

Avis technique

SGEF-31

Direction de la recherche forestière

| | |
|------------------|---|
| Titre : | Étude de cas : étiologie du dépérissement d'une érablière sucrière dans le Bas-Saint-Laurent |
| Auteurs : | Rock Ouimet, Guillaume Drolet et Jean-Daniel Sylvain |
| Date : | Avril 2024 |

Nous présentons l'étude de cas d'une érablière dans le Bas-Saint-Laurent, aménagée pour l'acériculture et ayant subi un dépérissement en cime. Historiquement, le dépérissement est rare dans les érablières de cette région aux sols généralement fertiles. Pour déterminer les causes et l'origine du problème, nous avons comparé l'historique de croissance d'arbres dans cette érablière avec d'autres dans un secteur adjacent n'ayant jamais été entaillé. Nos analyses démontrent qu'une réduction de la croissance survenue à partir de 2010 à 2012 coïncide avec une période de recrudescence d'événements climatiques extrêmes. L'entaillage sous haut vacuum semble avoir accentué la baisse de croissance par la suite.

1. Contexte

Dans le cadre du suivi des stations du Réseau d'étude et de surveillance des écosystèmes forestiers (RESEF), un dépérissement important de l'érable à sucre (*Acer saccharum* Marshall) a été observé dans une érablière sucrière située dans le Bas-Saint-Laurent. Selon le propriétaire de l'érablière, les premiers signes de dépérissement de la cime sont survenus en 2015-2016. Un premier diagnostic de l'état de santé de l'érablière a été fait en 2018 par le Club d'encadrement technique en acériculture de l'Est, et un second diagnostic a été fait en 2020 par une firme d'ingénieurs forestiers-conseils. Selon ces rapports, les sols ne souffraient d'aucune carence majeure et étaient généralement propices à la croissance de l'érable à sucre (tableau 1). Le peuplement présenterait une densité relativement élevée et une structure plutôt équienne. Ces rapports recommandaient d'appliquer une coupe de jardinage acérico-forestier afin d'augmenter la croissance des arbres résiduels et de diriger le peuplement vers une structure plus inéquienne. Cette recommandation n'avait pas été suivie jusqu'à aujourd'hui, en raison de l'ouverture du couvert causée par la mort en cime et de l'abondante régénération en feuillus durs qui s'était installée. Malgré les deux investigations indépendantes, on n'a pas pu cerner la ou les causes probables du dépérissement survenu dans ce secteur de la forêt.

Tableau 1. Analyse du sol des secteurs du Milieu et du Haut de l'érablière réalisée en 2020.

| Secteur | Horizon | Matière organique (%) | pH (eau) | P (kg·ha ⁻¹) | K (kg·ha ⁻¹) | Ca (kg·ha ⁻¹) | Mg (kg·ha ⁻¹) | Capacité d'échange cationique (cmol·kg ⁻¹) |
|---|-----------|-----------------------|----------|--------------------------|--------------------------|---------------------------|---------------------------|--|
| Milieu | Humus | 33 | 5,5 | 14 | 172 | 6 700 | 483 | 27 |
| | B minéral | 4,2 | 5,3 | 2 | 65 | 2100 | 212 | 13,1 |
| Diagnostic DELFES* : probabilités de carence = Ca : 60 %, K : 29 %, P : 42 % | | | | | | | | |
| Haut | Humus | 34,5 | 5,2 | 19 | 139 | 4 500 | 336 | 20,5 |
| | B minéral | 1,8 | 5,6 | 2 | 68 | 2 800 | 328 | 11,1 |
| Diagnostic DELFES* : probabilités de carence = Ca : 60 %, K : 29 %, P : 85 % | | | | | | | | |

* DELFES : Diagnostic des éléments limitatifs à partir du feuillage ou du sol (Ouimet *et al.* 2012).

À l'été 2022, une analyse du feuillage a montré que la composition foliaire de l'érable à sucre était tout à fait équilibrée en éléments majeurs, avec un indice de déséquilibre nutritif minimal (tableau 2). Ce résultat indique que le statut nutritionnel des érables était adéquat et que la fertilité du sol ne constituait pas un facteur prédisposant les arbres au dépérissement.

Tableau 2. Analyse foliaire de l'érable à sucre du secteur d'étude réalisée en 2022.

| Variable | N | P | K | Ca | Mg | IDN* |
|-------------------------------------|------|-----|-----|-----|-----|------|
| Concentration (g·kg ⁻¹) | 15,1 | 1,7 | 8,0 | 8,9 | 1,3 | |
| Indice DRIS [†] | 4 | 4 | -4 | -6 | 3 | 21 |

* IDN = indice de déséquilibre nutritif. Plus sa valeur est proche de zéro, plus la composition foliaire est équilibrée. Un indice IDN < 50 est considéré comme équilibré.

[†] DRIS = *Diagnosis and recommendation integrated system* (Walworth et Sumner 1987).

En 2023, nous avons enquêté pour déterminer la ou les causes probables du dépérissement observé ainsi que le moment où celui-ci avait débuté. Pour ce faire, nous avons examiné par dendrochronologie l'historique de croissance radiale annuelle des arbres, puis nous avons lié ces données de croissance à un ensemble d'indicateurs phénologiques et d'événements extrêmes climatiques, de même qu'à l'historique des pratiques acéricoles. À la lumière des résultats, nous proposons quelques recommandations pour aider le propriétaire à contrer ce dépérissement et à améliorer la résilience du peuplement aux stress climatiques.

2. Matériel et méthodes

2.1. Secteur d'étude

L'érablière à l'étude est située dans la région du Bas-Saint-Laurent, dans la municipalité de Lac-des-Aigles, à une altitude d'environ 270 m. Le peuplement, d'une superficie d'environ 7 ha, est principalement composé d'érables à sucre, avec environ 5 % d'essences compagnes telles que le bouleau jaune (*Betula alleghaniensis* Britton) et le frêne blanc (*Fraxinus americana* L.). Il est situé à mi-pente dans le paysage et

classé dans le type écologique FE32, soit l'érablière à bouleau jaune sur station au dépôt de mince à épais, de texture moyenne et de drainage mésique. La hauteur des tiges dominantes est d'environ 18 m, et la surface terrière du peuplement varie de 26 à 28 m² ha⁻¹.

2.2. Évaluation de l'état de l'érablière

L'érablière a été grossièrement divisée en 3 secteurs adjacents qui, selon le propriétaire, montraient divers degrés de dépérissement :

- **secteur du Milieu** : entaillé, situé à mi-pente, qui apparaissait avoir le plus dépéri;
- **secteur du Haut** : entaillé, situé plus haut sur la pente, qui apparaissait avoir un peu moins dépéri;
- **secteur Non entaillé** : voisin des deux autres, situé à mi-pente, apparaissant avoir un peu dépéri, mais n'ayant jamais été entaillé.

Le 30 août 2023, nous avons sélectionné 10 arbres représentatifs de l'état de santé de chacun des 3 secteurs. À l'aide d'une sonde de Pressler, nous avons prélevé 2 carottes de sondage sur chaque arbre à environ 40 cm du sol, pour un total de 60 carottes. La distribution des diamètres à hauteur de poitrine (DHP, mesuré à 1,3 m du sol) des arbres mesurés dans les différentes zones est présentée à la figure 1.

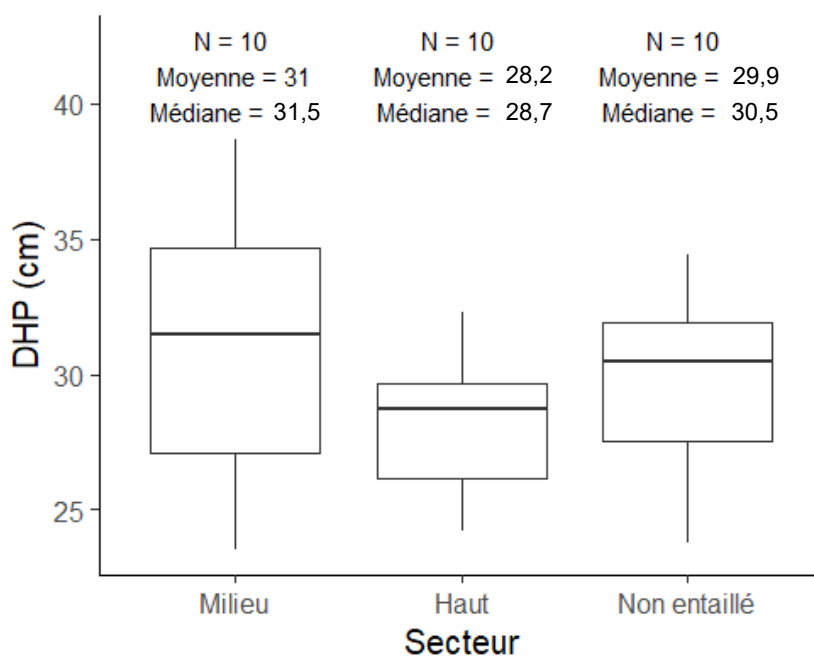


Figure 1. Distribution des diamètres à hauteur de poitrine (DHP) des érables à sucre échantillonnés dans les 3 secteurs de l'érablière à l'étude.

Au laboratoire, les 60 carottes de sondage ont été séchées à l'air, collées sur des gabarits et sablées. Les cernes annuels ont ensuite été délimités à l'aide d'un microscope stéréoscopique, puis numérisés et mesurés au 1 µm près à l'aide du logiciel WinDENDRO (Régent Instruments inc.). Comme nous n'avons pas prélevé les carottes jusqu'au centre des arbres, leur âge n'a pu être déterminé.

2.3. Calcul d'indices du climat

Nous avons calculé divers indices du climat pour déterminer si des changements dans la fréquence, la durée et l'intensité des précipitations ou de la température avaient eu lieu au cours des dernières années dans la région. Pour ce faire, nous avons récupéré les données archivées des températures journalières minimales et maximales ainsi que celles des précipitations journalières totales de 10 stations météo d'Environnement et Changement climatique Canada situées à l'intérieur d'un rayon de 88 km du secteur à l'étude (stations n^{os} 5803, 5814, 5821, 5836, 5838, 5848, 5855, 5874, 8539 et 43323), à l'aide du module *weathercan* (LaZerte et Albers 2018) dans l'environnement R, version 4.1.2 (R Core Team 2021). La station météo la plus proche (station n^o 5855, Saint-Guy, à 320 m d'altitude), située à 11 km de l'érablière, présentait de nombreuses données manquantes. Les données provenant des 9 autres stations météo ont servi à compléter les séries de données manquantes de la station météo de Saint-Guy. Le contrôle de qualité, l'homogénéisation et l'inférence des données manquantes ont été réalisés à l'aide du module *climatol* (Guijarro 2019) dans l'environnement R, version 4.1.2 (R Core Team 2021), pour la période allant de janvier 1960 à décembre 2022.

Avec les séries de données ainsi obtenues pour la station Saint-Guy, nous avons calculé des indices climatiques à l'aide du module *RClimdex* (Peterson *et al.* 2001), de même que l'indice de sévérité de sécheresse de Palmer (PDSI, de l'anglais *Palmer Drought Severity Index*) à l'aide du module *scPDSI* (Zhong *et al.* 2018). Dans le calcul du PDSI, nous avons évalué l'évapotranspiration selon l'équation de Hargreaves (Hargreaves 1994) modifiée par les précipitations à l'aide de la fonction *hargreaves* du module SPEI (Beguería et Vicente Serrano 2017), en présumant que la capacité de rétention d'eau du sol était de 150 mm. Lors d'une analyse préliminaire, nous avons testé plusieurs valeurs de capacité de rétention d'eau du sol (de 50 à 300 mm) et vérifié que celles-ci n'influençaient pas les tendances du PDSI. L'analyse des données météo a permis de générer un total de 44 indices climatiques.

Nous avons aussi déterminé, pour chaque année, la première date au printemps où la température maximale journalière a atteint au moins +4 °C, de même que celle où la température minimale journalière a atteint ou est descendue sous -4 °C. Le seuil de +4 °C caractérise la température minimale à partir de laquelle l'activité métabolique des microorganismes et de la végétation est favorisée, tandis que le seuil de -4 °C correspond à la température de l'air en dessous de laquelle la couche sol-racine en surface gèle en l'absence de couverture neigeuse (Braathe 1995; Allen 2003; Bourque *et al.* 2005), et à partir de laquelle le métabolisme des racines et des méristèmes est réduit.

2.4. Données de phénologie

Des données sur les stades phénologiques du couvert forestier dans la région du secteur d'étude, estimés à partir de l'indice différentiel normalisé de végétation (NDVI, de l'anglais *normalized difference vegetation index*), étaient disponibles dans nos archives pour la période de 2009 à 2014. Ces données de NDVI, utilisées pour estimer la phénologie, proviennent de séries temporelles d'indices de végétation (MOD13Q1, version 6) à une résolution spatiale de 250 m, dérivés d'images satellitaires de la réflectance de surface provenant du spectroradiomètre imageur à moyenne résolution (MODIS), téléchargées du site web des données terrestres de la NASA¹. Ces valeurs de NDVI ont été modélisées dans le temps à l'aide d'une équation logistique double (Beck *et al.* 2006) qui fournit, pour une année donnée, le jour associé au point d'inflexion de la courbe ascendante du NDVI au printemps (paramètre S), le jour associé au point d'inflexion de la courbe descendante du NDVI à l'automne (paramètre A), les valeurs minimales et maximales du NDVI au cours de l'année et les taux de changement (pentes) au printemps (paramètre mS) et à l'automne (paramètre mA) (tableau 3).

Tableau 3. Valeurs annuelles des paramètres utilisés pour caractériser l'évolution de la phénologie dans le secteur d'étude à partir de séries temporelles du NDVI MODIS. Ces valeurs résultent l'optimisation de la fonction logistique double pour chaque année.

| Année | S | A | mS | mA | minNDVI | maxNDVI |
|-------|-----------|-----------|------------|------------|------------|------------|
| 2009 | 154,23793 | 281,45657 | 0,32498237 | 0,3420208 | 0,43099853 | 0,904498 |
| 2010 | 137,80087 | 281,71268 | 0,27388498 | 0,27865747 | 0,4340839 | 0,91599005 |
| 2011 | 160,9572 | 281,7537 | 0,18967046 | 0,15972733 | 0,43155295 | 0,91676307 |
| 2012 | 133,19234 | 289,7968 | 0,09200535 | 0,05428588 | 0,26849878 | 0,9305938 |
| 2013 | 141,48851 | 301,29758 | 0,16578849 | 0,08038436 | 0,42434996 | 0,8780622 |
| 2014 | 149,98029 | 286,21307 | 0,2299388 | 0,08556256 | 0,2837156 | 0,9071547 |

Note : Ces paramètres servent à estimer le NDVI avec l'équation logistique double suivante :
$$\text{NDVI} = \text{minNDVI} + (\text{maxNDVI} - \text{minNDVI}) \times \left(\frac{1}{1 + \exp(-mS \times (\text{jour} - S))} + \frac{1}{1 + \exp(mA \times (\text{jour} - A))} - 1 \right),$$

où jour = jour de l'année (de 1 à 365).

Nous avons normalisé les données de NDVI à des valeurs allant de 0 à 1 pour ensuite déterminer les stades phénologiques du peuplement. Une valeur de 0,8 du NDVI normalisé au printemps indiquerait le début de la saison de végétation (Khare *et al.* 2019). Enfin, ayant en main les dates de fin de récolte de sève de l'érablière de 2009 à 2022, nous avons estimé les dates d'ouverture des bourgeons à partir du modèle de phénologie de l'érable à sucre de Raulier et Bernier (2000). Ces données de phénologie nous

¹ <https://earthdata.nasa.gov>.

ont permis de calculer, pour chacune de ces années, l'écart entre la date d'ouverture des bourgeons et la date de fin de la récolte de sève dans les secteurs du Haut et du Milieu de l'érablière.

2.5. Analyses statistiques

Nous avons calculé les événements climatiques extrêmes ($\leq 5^{\text{e}}$ et $\geq 95^{\text{e}}$ percentiles) à partir des indices climatiques de la station météo de Saint-Guy et avons déterminé le nombre annuel d'occurrences durant la période 1960-2020.

Pour chaque arbre, nous avons combiné les mesures de croissance radiale annuelle (en $\text{mm}\cdot\text{an}^{-1}$) aux mesures de DHP afin de calculer l'accroissement annuel en surface terrière (AST, en $\text{cm}^2\cdot\text{an}^{-1}$) à l'aide de la fonction *bai.out* du module *dplR* (Bunn *et al.* 2013) dans l'environnement R, version 4.1.2 (R Core Team 2021). Les calculs de ce module se basent sur l'hypothèse que les arbres ont une forme circulaire.

Nous avons analysé chaque série temporelle d'AST à l'aide de la fonction *trendsegment* du module *trendsegmentR* (Maeng et Fryzlewicz 2023) dans l'environnement R afin de détecter des changements dans la croissance de chaque individu. La fonction *trendsegment* utilise une méthode de décomposition en ondelettes pour détecter des points d'inflexion qui permettent de traduire des changements dans la tendance linéaire de la série de données. Elle évalue dans un premier temps les caractéristiques locales des données, puis dans un second temps, les caractéristiques globales. Cela permet de détecter à la fois les segments de tendance linéaire courts et ceux plus longs et ainsi, de repérer un point de changement dans la tendance de l'AST. Dans la présente analyse, nous avons nommé « début de baisse d'AST » le dernier point de changement observé dans la tendance d'AST. Nous avons aussi évalué visuellement et de façon subjective le point de changement de l'état de santé des arbres, nommé ici « début du dépérissement », en examinant les séries temporelles d'AST pour chacun des arbres échantillonnés. Nous basions généralement notre jugement sur le changement de tendance d'AST récent ou sur le moment où l'AST atteignait un seuil de $5 \text{ cm}^2\cdot\text{an}^{-1}$ durant les dernières années, signal de l'amorce d'un dépérissement de l'arbre.

Nous avons également vérifié si les tendances de l'AST des arbres différaient selon les secteurs de l'érablière. Pour ce faire, nous avons analysé l'évolution de l'AST pour la période 2000-2023 dans chaque secteur à l'aide d'un modèle additif généralisé selon une fonction spline, dans la fonction *gamm* du module *mgcv* dans l'environnement R (Wood 2017), avec les arbres comme variable aléatoire.

Afin d'évaluer si les événements climatiques coïncidaient avec le moment où les arbres connaissaient une baisse d'AST ou entraient en dépérissement, nous avons testé la corrélation (coefficient de rang de Kendall) entre le nombre d'arbres par année qui entraient en début de baisse d'AST ou en début de dépérissement et le nombre d'événements climatiques extrêmes. Pour ce faire, nous avons utilisé la fonction *Kendall* dans le module *Kendall* (McLeod 2022) dans l'environnement R.

3. Résultats

3.1. Croissance en surface terrière des arbres individuels

Les mesures d'AST de chaque arbre échantillonné, les tendances de leur évolution temporelle et l'année durant laquelle nous considérons que chaque arbre est entré en dépérissement sont présentées aux figures 2 à 4, respectivement, pour les secteurs du Milieu, du Haut et Non entaillé. En général, l'AST des arbres a diminué à partir des années 2000, mais cette diminution différait entre les secteurs entaillés et non entaillés de l'érablière ($p \leq 0,062$), particulièrement à partir des années 2010 (figure 5).

L'année durant laquelle les arbres échantillonnés ont atteint un DHP de 20 cm (donc présumément celle du début de l'entaillage dans les secteurs du Haut et du Milieu) se situait vers 1985 (intervalle de confiance à 95 % : 1981-1990) et ne différait pas entre les 3 secteurs, que ceux-ci soient entaillés ou non ($p = 0,361$).

En revanche, l'année où l'on a considéré que les arbres entraient en dépérissement semblait différer sensiblement selon le secteur ($p = 0,116$) : vers 2011-2012 dans les secteurs entaillés, et vers 2015 dans le secteur non entaillé.

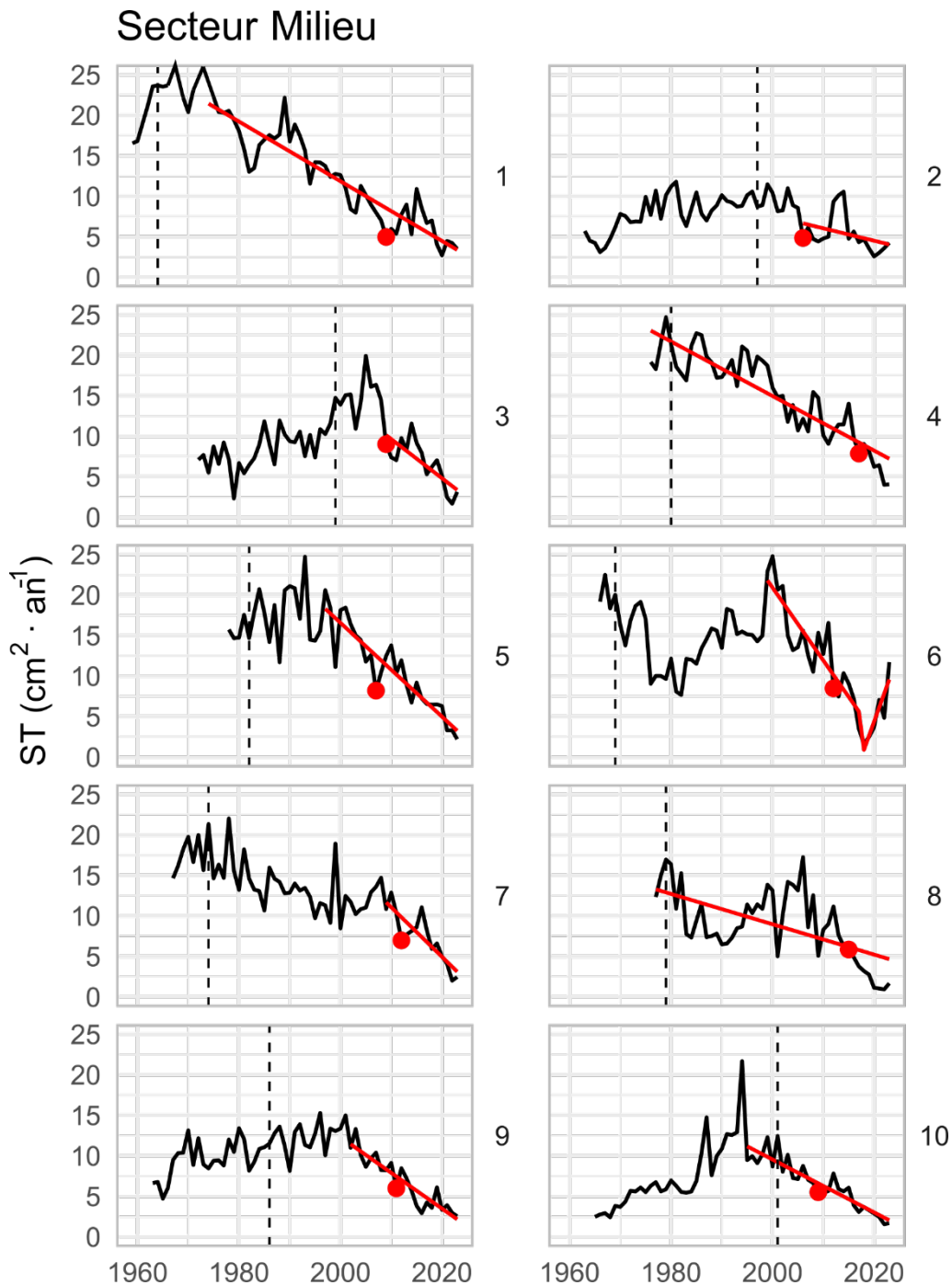


Figure 2. Évolution de l'accroissement en surface terrière (AST) de 10 érables à sucre (numérotés de 1 à 10) échantillonnés dans le secteur **entailé** de l'érablière **montrant un fort dépérissement (Milieu)**. La ligne rouge indique un point de changement dans les données d'AST et représente la tendance la plus récente détectée par l'algorithme de *trendsegmentR*. Le point rouge indique l'année à partir de laquelle les auteurs considèrent que l'arbre est entré en dépérissement. La ligne verticale pointillée indique l'année où l'arbre a atteint la classe de diamètre à hauteur de poitrine de 20 cm, taille à partir de laquelle les arbres sont présumément entaillés.

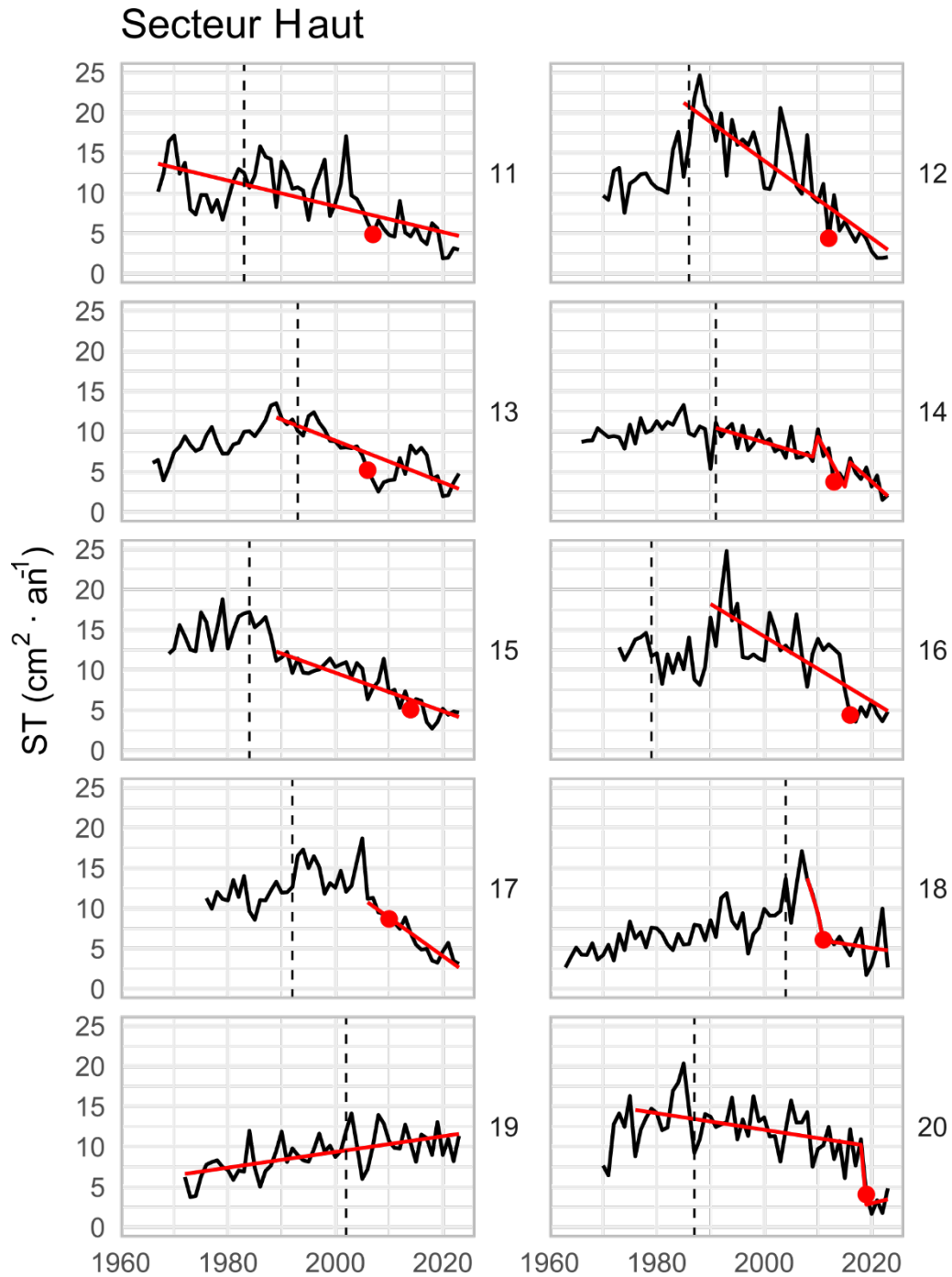


Figure 3. Évolution de l'accroissement en surface terrière (AST) de 10 érables à sucre (numérotés de 11 à 20) dans un secteur **entailé** de l'érablière **montrant un plus faible dépérissement (Haut)**. La ligne rouge indique un point de changement dans les données d'AST et représente la tendance la plus récente détectée par l'algorithme de *trendsegmentR*. Le point rouge indique l'année à partir de laquelle les auteurs considèrent que l'arbre est entré en dépérissement. La ligne verticale pointillée indique l'année où l'arbre a atteint la classe de diamètre à hauteur de poitrine de 20 cm, taille à partir de laquelle les arbres sont présumément entaillés.

Secteur Non entaillé

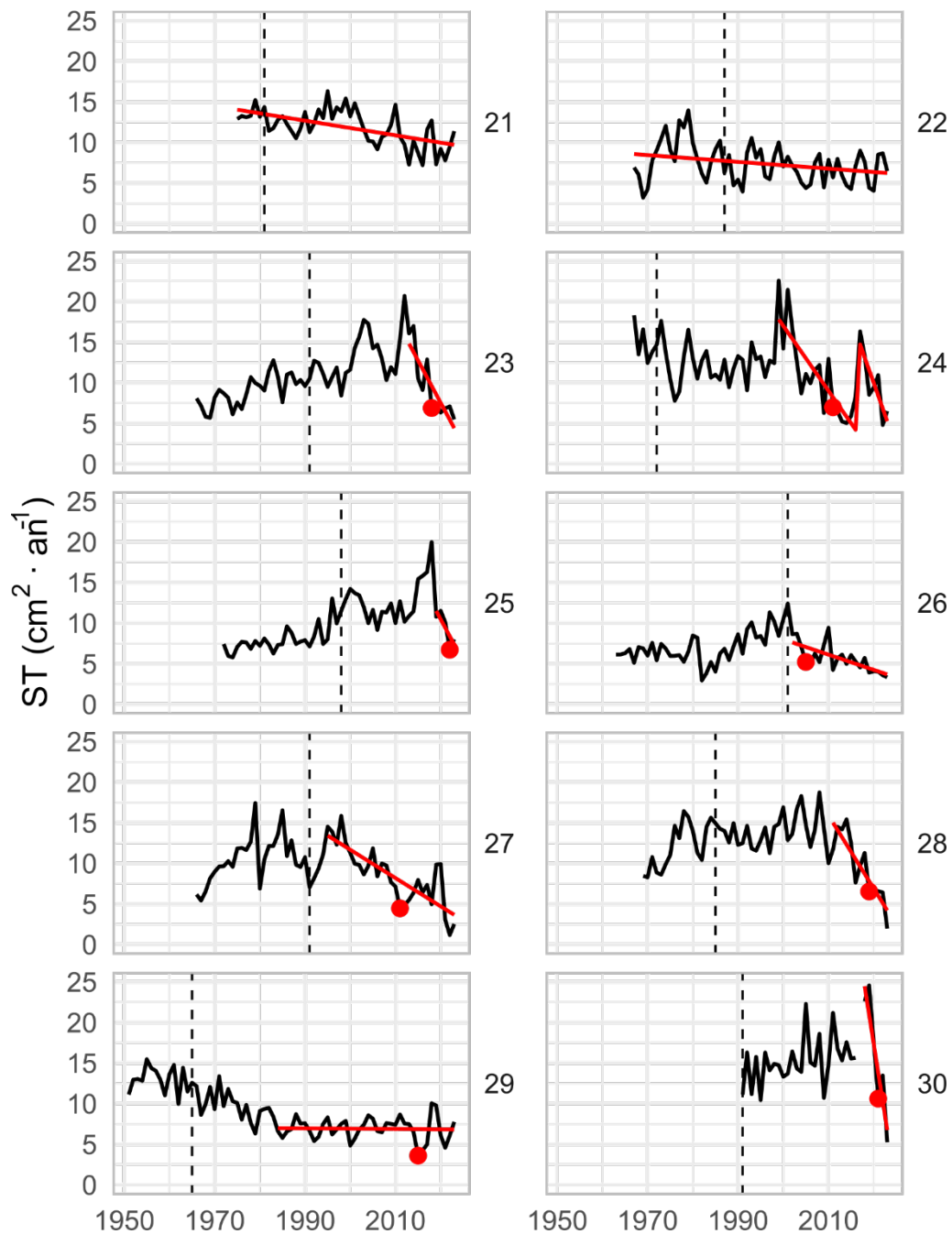


Figure 4. Évolution de l'accroissement en surface terrière (AST) de 10 érables à sucre (numérotés de 21 à 30) dans le **secteur non entaillé** de l'érablière. La ligne rouge indique un point de changement dans les données d'AST et représente la tendance la plus récente détectée par l'algorithme de *trendsegmentR*. Le point rouge indique l'année à partir de laquelle les auteurs considèrent que l'arbre est entré en dépérissement. La ligne verticale pointillée indique l'année où l'arbre a atteint la classe de diamètre à hauteur de poitrine de 20 cm, taille à partir de laquelle les arbres seraient présumés entaillés s'ils l'avaient été.

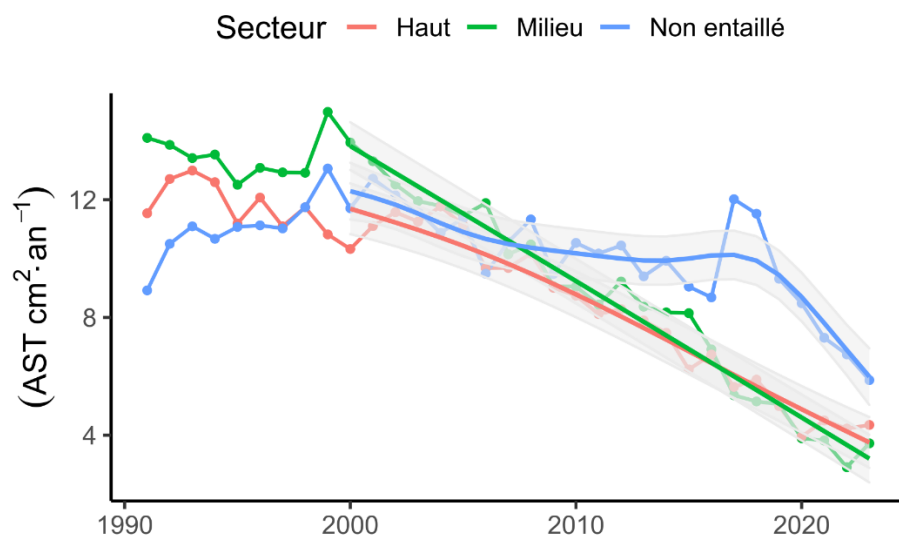


Figure 5. Évolution des moyennes de l'accroissement annuel en surface terrière (AST) des arbres dans les 3 secteurs, et tendances prédites par le modèle additif (valeurs prévues \pm intervalles de confiance à 95 %), pour la période de 2000 à 2023. Seuls les secteurs du Haut et du Milieu sont entaillés.

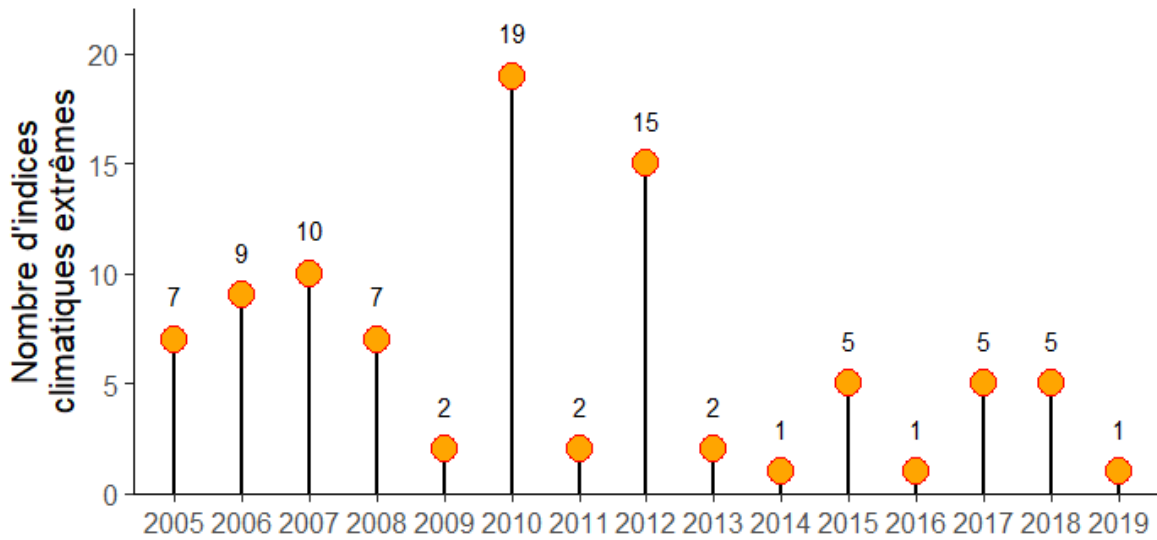
3.2. Indices climatiques

L'année 2010 et l'année 2012 sont celles lors desquelles le plus grand nombre de valeurs extrêmes des indices climatiques calculés ont été atteintes (figure 6a). La liste de ces occurrences est présentée en détail au tableau 4. L'année 2010 a été l'une des plus chaudes, avec une température annuelle moyenne élevée, des températures minimales et maximales élevées, un faible nombre de jours dans l'année où la température maximale journalière était sous 0 °C et où la température minimale journalière était basse. Ce fut aussi une année où les précipitations ont été particulièrement abondantes et plus fortes que la normale. L'année 2012 se démarque surtout par son régime de températures très au-dessus des normales, y compris la température maximale journalière durant la saison estivale la plus chaude pour la période allant de 1960 à 2020 (34,8 °C).

L'occurrence de ces extrêmes climatiques coïncide en bonne partie avec le début du dépérissement pour plusieurs des arbres parmi les 10 sélectionnés dans le secteur du Milieu de l'érablière ($p = 0,099$), mais un peu moins pour ceux dans le secteur du Haut de l'érablière ($p = 0,174$), et pas du tout pour ceux dans le secteur non entaillé ($p = 0,454$) (figure 6b).

Nous avons aussi noté, avec les données de la station météo de Saint-Guy, que le PDSI a connu une période exceptionnelle et est demeuré à des valeurs très positives de 2004 à 2013, sauf en 2010 (figure 7). Un indice positif indique une grande disponibilité de l'eau dans le sol et une absence de sécheresse malgré des températures élevées.

a)



b)

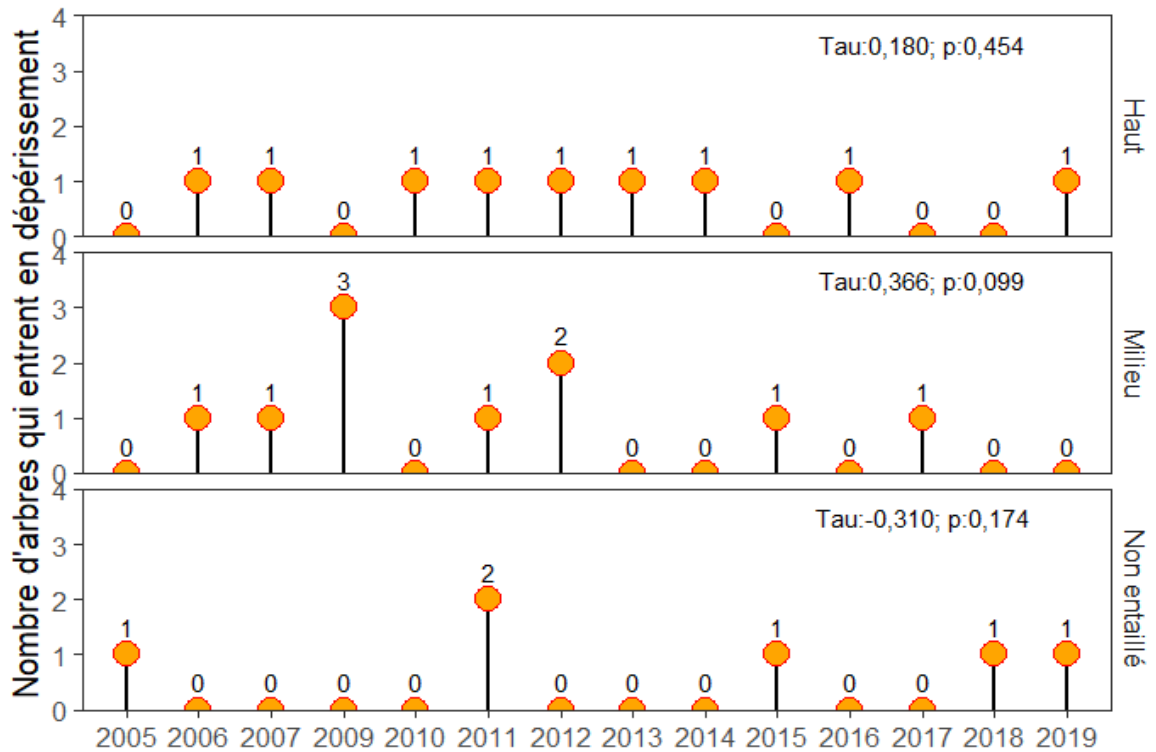


Figure 6. a) Nombre d'occurrences de valeurs extrêmes pour les indices climatiques calculés de 2005 à 2019 à la station météo de Saint-Guy; b) nombre d'arbres qui sont entrés en dépérissement au cours de cette période. Les valeurs et les seuils de probabilité (p) du Tau de Kendall testant la corrélation entre chaque série temporelle et les extrêmes d'indices climatiques sont indiquées.

Tableau 4. Extrêmes atteints en 2010 et en 2012 (valeurs $\leq 5^{\text{e}}$ percentile ou $\geq 95^{\text{e}}$ percentile) et valeurs minimales et maximales atteintes de 1960 à 2022 des indices climatiques calculés à la station météo de Saint-Guy.

| Année | Indice climatique | Définition de l'indice | Extrême | Valeur* | Minimum atteint (1960-2022) | Maximum atteint (1960-2022) |
|-------|-------------------|--|---------|---------|-----------------------------|-----------------------------|
| | TN | Température minimale journalière mesurée (°C) | | | -36,0 | 22,1 |
| | TX | Température maximale journalière mesurée (°C) | | | -28,5 | 34,8 |
| | TM | Température moyenne journalière mesurée (°C) | | | -30,8 | 27,2 |
| | TNgs | Température minimale journalière durant la période estivale [†] (°C) | Élevé | 2,8 | -4,0 | 3 |
| | TNgt0 | Nombre de jours dans l'année où TN > 0 °C | Élevé | 182 | 146 | 183 |
| | TMm | Température annuelle moyenne (°C) | Élevé | 4,9 | 0,5 | 4,9 |
| | TNm | Température minimale annuelle moyenne (°C) | Élevé | 0,2 | -4,6 | 0,2 |
| | TXgt50p | Pourcentage de jours dans l'année où TX > 50 ^e percentile (8,0 °C) (%) | Élevé | 67,6 | 30,5 | 67,6 |
| | TXm | Température maximale annuelle moyenne (°C) | Élevé | 9,7 | 5,5 | 10 |
| | csdi1 | Nombre de jours avec au moins deux jours consécutifs où TN < 10 ^e percentile (-19,2 °C) | Bas | 6 | 3 | 76 |
| | ld | Nombre de jours dans l'année où TX < 0 °C | Bas | 75 | 75 | 135 |
| | TN10p | Pourcentage de jours dans l'année où TN < 10 ^e percentile (-19,2 °C) (%) | Bas | 1,6 | 0,8 | 21,5 |
| 2010 | TNlt2 | Nombre de jours dans l'année où TN < 2 °C | Bas | 202 | 196 | 241 |
| | TNltm20 | Nombre de jours dans l'année où TN < -20 °C | Bas | 5 | 5 | 61 |
| | rx5day | Maximum de total de précipitations sur 5 jours (mm) | Élevé | 136,1 | 51,3 | 136,8 |
| | Cdd | Nombre maximal de jours consécutifs sans précipitations (< 1 mm) | Élevé | 18 | 8 | 20 |
| | Gsl | Durée de la saison de végétation (nombre de jours) | Élevé | 183 | 139 | 188 |
| | r30mm | Nombre de jours dans l'année où les précipitations ≥ 30 mm | Élevé | 9 | 0 | 14 |
| | r95p | Somme des fortes précipitations (> 95 ^e percentile) dans l'année (mm) | Élevé | 548,9 | 0 | 698,8 |
| | r95ptot | Pourcentage de r95p par rapport aux précipitations totales annuelles (%) | Élevé | 37,3 | 0 | 46,1 |
| | r99p | Somme des fortes précipitations (> 99 ^e percentile) dans l'année (mm) | Élevé | 255,1 | 0 | 347,4 |
| | r99ptot | Pourcentage de r99p par rapport aux précipitations totales annuelles (%) | Élevé | 17,4 | 0 | 23,2 |

| Année | Indice climatique | Définition de l'indice | Extrême | Valeur* | Minimum atteint (1960-2022) | Maximum atteint (1960-2022) |
|-------|-------------------|--|---------|---------|-----------------------------|-----------------------------|
| 2012 | TXgs | Température maximale journalière durant la période estivale (°C) | Élevé | 34,8 | 27,7 | 34,8 |
| | TNgt0 | Nombre de jours dans l'année où TN > 0 °C | Élevé | 183 | 146 | 183 |
| | TMge5 | Nombre de jours dans l'année où TM ≥ 5 °C | Élevé | 187 | 145 | 194 |
| | TMm | Température annuelle moyenne (°C) | Élevé | 4,4 | 0,5 | 4,9 |
| | TNm | Température minimale annuelle moyenne (°C) | Élevé | -0,8 | -4,6 | 0,2 |
| | TNn | Température minimale la plus froide dans l'année (°C) | Élevé | -23,8 | -36,0 | -23,4 |
| | TXgt50p | Pourcentage de jours dans l'année où TX > 50 ^e percentile (8,0 °C) (%) | Élevé | 63,1 | 30,5 | 67,6 |
| | TXm | Température maximale annuelle moyenne (°C) | Élevé | 9,6 | 5,5 | 10 |
| | TXn | Température maximale la plus froide dans l'année (°C) | Élevé | -15,6 | -28,5 | -13,5 |
| | TXx | Température maximale la plus chaude dans l'année (°C) | Élevé | 34,8 | 27,7 | 34,8 |
| | csdi1 | Nombre de jours avec au moins un jour consécutif où TN < 10 ^e percentile (-19,2 °C) | Bas | 3 | 3 | 76 |
| | HWMfce | Indice d'intensité de chaleur basé sur le facteur de chaleur excessive (FCE) | Bas | 2,5 | 2,3 | 61,5 |
| | TMI5 | Nombre de jours dans l'année où TM < 5 °C | Bas | 179 | 171 | 220 |
| | TN10p | Pourcentage de jours dans l'année où TN < 10 ^e percentile (-19,2 °C) (%) | Bas | 0,8 | 0,8 | 21,5 |
| | TX10p | Pourcentage de jours dans l'année où TX < 10 ^e percentile (-8,9 °C) (%) | Bas | 2,6 | 2,1 | 22,4 |

* Valeur du 5^e percentile pour les extrêmes « bas » et valeur du 95^e percentile pour les extrêmes « élevés ».

† Saison de végétation : calculée de la semaine 21 (3^e semaine de mai environ) à la semaine 33 (2^e semaine d'août environ) durant l'année.

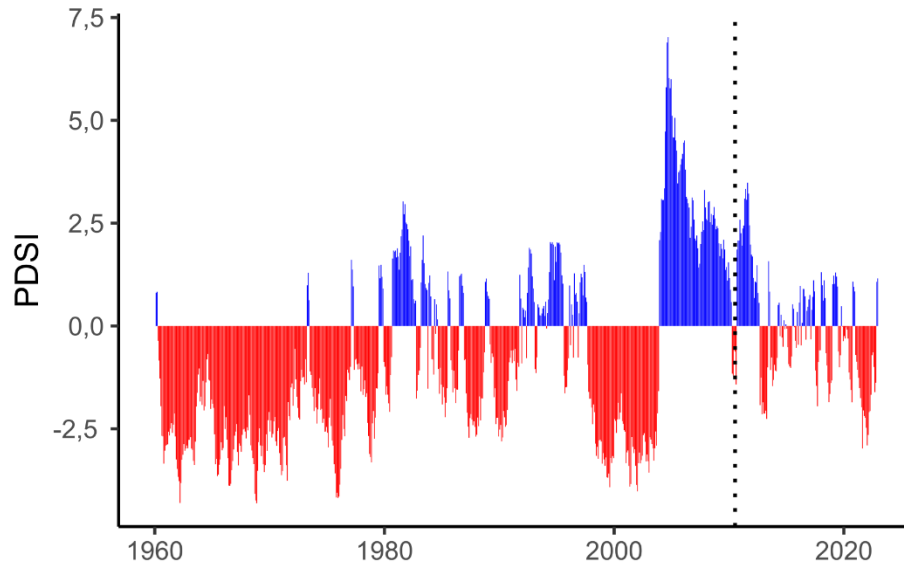


Figure 7. Indice de sévérité de sécheresse de Palmer (PDSI) calculé à la station météo de Saint-Guy de 1960 à 2022. Un PDSI positif (en bleu) indique un surplus relatif d'eau dans le sol par rapport à sa capacité au champ, tandis qu'un PDSI négatif (en rouge) indique un manque d'eau relatif. La ligne verticale pointillée indique l'été 2010.

3.3 Activité acéricole

Cette érablière est entaillée depuis plusieurs générations. Aucune activité sylvicole n'y a été réalisée depuis au moins une vingtaine d'années, hormis le dégagement des tubulures des branches ou des arbres tombés. De 2009 à 2023, le rendement en sirop s'est maintenu autour de $3,84 \pm 0,79$ lb·entaille⁻¹ (moyenne \pm écart-type). Cependant, ces chiffres s'appliquent à l'ensemble de l'entreprise, dont la superficie va au-delà de l'érablière en dépérissement. On ne connaît donc pas vraiment les rendements obtenus dans les secteurs de cette érablière étudiés ici.

En 2013, le propriétaire a équipé sa cabane à sucre de pompes à haut vacuum, qui sont en fonction depuis. Il a aussi mentionné qu'il étirait de plus en plus la saison de récolte de sève, car il avait trouvé un débouché pour le sirop dit « de bourgeon ». Comme le montre la figure 8, les dates de début de récolte de sève dans cette érablière se comparent à la moyenne dans le Bas-Saint-Laurent pour la période allant de 2011 à 2020. En revanche, la récolte dans cette érablière tend à finir de plus en plus tard, alors que la récolte dans l'ensemble de la région tend plutôt à finir de plus en plus tôt avec les années.

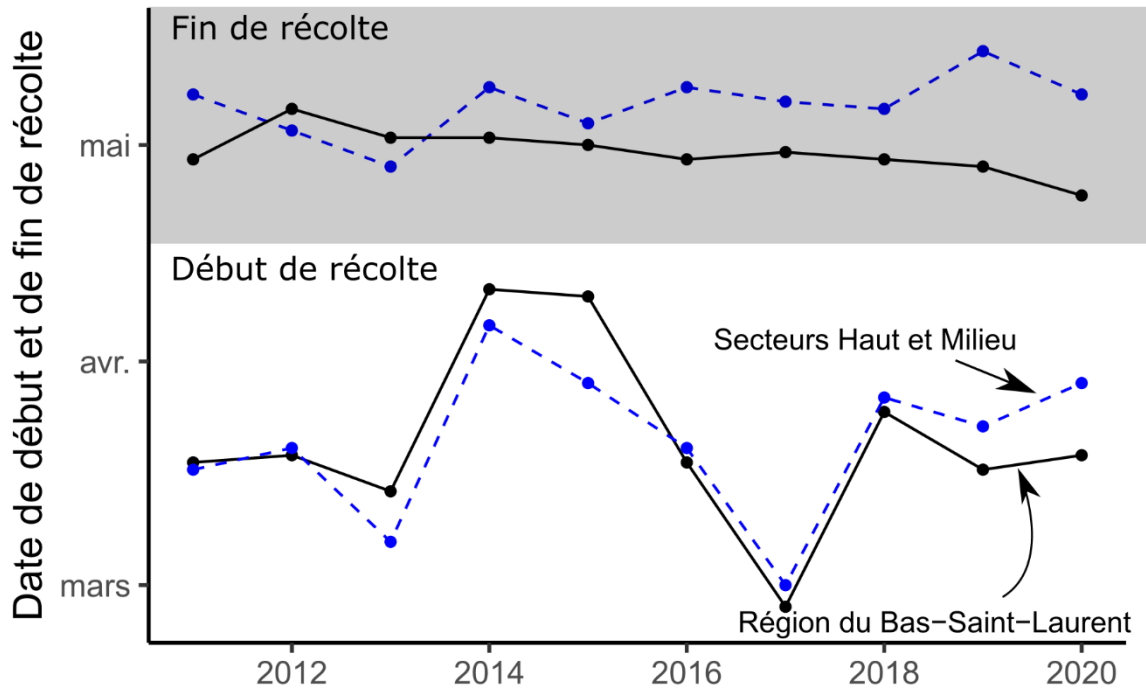


Figure 8. Dates de début et de fin de la récolte de sève dans l'érablière à l'étude (secteurs du Haut et du Milieu : lignes tiretées bleues) et dates moyennes correspondantes dans la région du Bas-Saint-Laurent de 2011 à 2020 (lignes continues noires). Source : données des Producteurs et productrices acéricoles du Québec.

Les données de températures journalières de 2009 à 2014 indiquent que le réveil de l'activité biologique ($TX \geq 4 \text{ }^\circ\text{C}$ et $TN \geq -4 \text{ }^\circ\text{C}$) survient en moyenne le 17 mars (minimum : 8 mars; maximum : 7 avril, soit 44 jours (minimum : 32 jours; maximum : 58 jours) avant la fin de la saison de récolte de sève (figure 9). Pour cette même période, les données de phénologie (NDVI) indiquent que la récolte se serait terminée de 22 à 39 jours avant le début de la saison de végétation (moyenne \pm écart-type : 31 ± 6 jours).

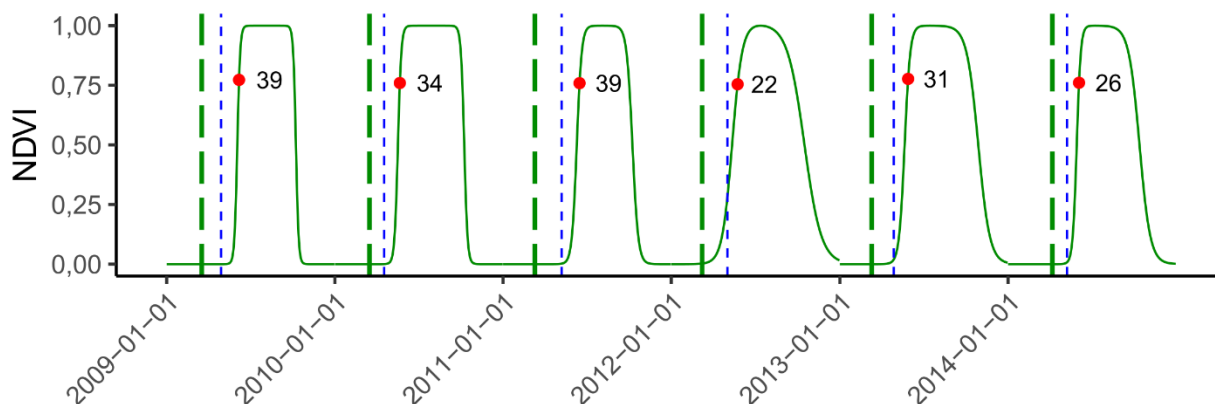


Figure 9. Fluctuations estimées de 2009 à 2014, dans le secteur d'érablière à l'étude, de l'indice de végétation par différence normalisée (NDVI normalisé : ligne continue verte), de l'indication du réveil de l'activité biologique selon la température (lignes verticales tiretées vertes), de l'indication de la fin de la saison de récolte de sève dans l'érablière à l'étude (lignes verticales pointillées bleues) et de l'indication du moment où le NDVI atteint 0,8 (point rouge), moment considéré comme le début de la saison de végétation. Le chiffre qui accompagne le point rouge correspond au nombre de jours entre la fin de la saison de récolte de sève et le début de la saison de végétation.

Quant à elles, les estimations faites à partir du modèle de Raulier et Bernier (2000) indiquent que de 2009 à 2022, l'ouverture des bourgeons survient de 0 (en 2022) à 35 jours (en 2010) après la fin de la récolte de sève, ce qui représente un délai moyen de 14 jours durant ces années (figure 10).

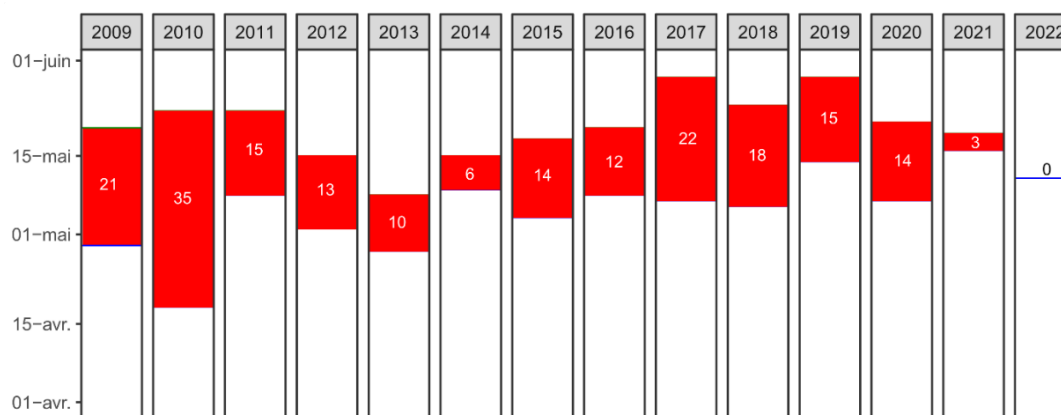


Figure 10. Estimation du délai entre la fin de la récolte de sève dans l'érablière (bas de la colonne rouge) et l'ouverture des bourgeons (haut de la colonne rouge) de 2009 à 2022, d'après le modèle de phénologie de l'érable à sucre de Raulier et Bernier (2000). Les chiffres indiquent le nombre de jours durant ce laps de temps.

4. Discussion

4,1, Extrêmes climatiques

Cette érablière possède un sol relativement fertile et une bonne régénération en érable à sucre. La baisse d'AST a commencé dans tous les secteurs de l'érablière après les années 2000. Les événements climatiques survenus au début des années 2010 coïncident approximativement avec le début du dépérissement des érables dans les secteurs du Haut et du Milieu. C'est aussi le moment où apparaît l'écart d'AST entre les secteurs entaillés et celui non entaillé. Il semble en effet que ces périodes de chaleur extrême, combinées au régime hydrique (PDSI) qui a changé radicalement de 2004 à 2010, ont eu des répercussions sur la croissance des arbres. En Estrie et en Beauce, ces périodes de chaleur ont également conduit à des cycles extrêmes de gel-dégel au printemps 2010 qui ont affecté la croissance des arbres (Moreau *et al.* 2020).

D'après les données météo de la station de Saint-Guy, il n'y a pas eu d'épisode majeur de sécheresse durant la période 2004-2013 (sauf en 2010, avec 18 jours consécutifs sans précipitations), mais plutôt une surabondance d'eau disponible dans le sol. Ce surplus d'eau a pu causer des épisodes d'anoxie dans le sol, en particulier dans le secteur du Milieu, qui est plus humide que le secteur du Haut. Comme l'érable à sucre est plutôt sensible au régime hydrique du sol et qu'il préfère des sols à drainage bon à modéré (Burns et Honkala 1990), cette essence a probablement connu un stress additionnel durant cet épisode de surplus d'eau. Habituellement, ce sont plutôt des érablières à érable rouge (*Acer rubrum* L.) qui s'installent sur les sols à drainage subhydrique.

Les plantes présentent une sensibilité différente aux températures élevées en fonction de la sévérité, de la durée et du moment où survient un stress par rapport aux stades phénologiques. C'est pourquoi il est difficile d'estimer les dommages causés aux plantes par le stress thermique. Bien qu'elle ne soit pas nécessairement mortelle, l'exposition à des températures en dehors de la plage habituelle peut être considérée comme stressante. La limite supérieure réelle de température pour la survie des espèces végétales tempérées se situe entre 40 °C et 55 °C, selon la durée d'exposition (Klueva *et al.* 2001). Cependant, en deçà de ces extrêmes, des dommages ou des arrêts de croissance peuvent survenir à l'échelle de la cellule végétale (Larkindale *et al.* 2005). Par exemple, dans l'État de New York, Lapenis *et al.* (2022) ont trouvé que l'épinette blanche (*Picea glauca* (Moench) Voss) avait subi une baisse de croissance durant les années où la température journalière dépassait 30 °C. En fonction de son bilan énergétique, la température interne d'une feuille pendant la journée peut être de 5 à 15 °C plus chaude que l'air ambiant. Par conséquent, même en l'absence d'un déficit prononcé d'humidité dans le sol, une température de l'air de 30 °C ou plus peut entraîner des températures internes des feuilles dépassant les 42-45 °C, avec des conséquences possibles sur leur activité photosynthétique.

4.2. Intensification de l'acériculture

La baisse de l'AST chez des arbres ayant des DHP similaires est survenue à partir des années 2012-2013, tant dans les secteurs entaillés que non entaillés. Ces années coïncident avec l'installation des pompes à haut vacuum. On constate de plus en plus que la récolte de sève peut causer une baisse de la croissance des érables (Copenheaver *et al.* 2014; van den Berg *et al.* 2016; Ouimet *et al.* 2017; Ouimet *et al.* 2021). Cependant, il n'est pas prouvé que le haut vacuum (degré de vide ≥ 85 kPa ou ≥ 25 po Hg) cause un stress plus grand ou réduise davantage la croissance que le vacuum plus faible (68-75 kPa ou 20-22 po Hg), du moins à court terme (Lagacé *et al.* 2019; Ouimet 2023). Les études sur l'effet du haut vacuum sur les érables sont cependant encore préliminaires, étant donné le manque de recul découlant de l'application récente de cette technique.

À notre connaissance, il n'existe pas d'étude sur l'effet d'un allongement de la saison de récolte de sève sur la santé des érables à sucre. La production de sirop « de bourgeon » marque généralement la fin de la saison de récolte, ce qui explique en partie ce manque de connaissances. L'activation du métabolisme du cambium et le déploiement du feuillage sont les principaux puits d'énergie de l'arbre au printemps. Les travaux sur la dynamique des glucides non structuraux (GNS) dans les arbres indiquent que les réductions des réserves lors du débourrement printanier sont abruptes, mais relativement transitoires (Schädel *et al.* 2009; Martínez *et al.* 2016). La production de sirop d'érable entraîne une réduction directe supplémentaire des réserves de GNS chez l'érable à sucre, juste avant cette période critique. Comme une partie de la sève de bourgeon renferme une concentration élevée d'acides aminés (de là le goût de bourgeon du sirop; N'guyen *et al.* 2018; Forest *et al.* 2023), une partie des matériaux nécessaires au débourrement des bourgeons et au déploiement des feuilles est détournée par la récolte de cette sève. De 2009 à 2014, il s'est passé en moyenne 31 jours entre la fin de la saison de récolte de sève et le début de la saison de végétation, d'après les données de NDVI. Il est certain que la levée de la dormance, laquelle s'effectue naturellement au printemps, survient plusieurs jours avant que le NDVI atteigne 80 % de sa valeur relative, ce qui a pour effet de raccourcir d'autant le délai entre la fin de la récolte de sève et la levée de la dormance. Bien que le modèle de Raulier et Bernier ne prenne pas en compte l'altitude ou la longueur de la photopériode, l'écart de temps estimé entre la fin de la récolte de sève et l'ouverture des bourgeons est relativement court, soit 14 jours en moyenne. Les conséquences physiologiques du détournement de sève enrichie d'acides aminés sur la vigueur des arbres ne sont pas connues et devraient faire l'objet de recherches plus approfondies.

Présentement, il n'est pas prouvé que le prélèvement de sève sous haut vacuum réduit à court terme la concentration des GNS dans les ramilles des érables (Isselhardt 2012) ni qu'il augmente le taux d'hormones de stress dans l'arbre (Lagacé *et al.* 2019). On sait que les acides aminés jouent un rôle important dans la formation des protéines, des enzymes et d'autres produits qui servent non seulement au métabolisme des plantes, mais aussi à accroître leur tolérance aux stress abiotiques et biotiques (Ali *et al.* 2019). De plus, vers la fin de période de récolte de sève, le vacuum est généralement appliqué 24 heures sur 24, car la température de l'air ne descend plus sous les -4 °C. Ce haut vacuum peut causer des

embolies dans les arbres, embolies pouvant entraîner le dépérissement en cime (Auclair 1989). La différence de croissance observée entre les secteurs entaillés et celui non entaillé nous laisse croire que l'allongement, durant plusieurs années consécutives, de la saison de récolte de sève sous haut vacuum pour faire du sirop « de bourgeon » a causé une réduction de la tolérance aux événements climatiques et a pu ainsi contribuer au dépérissement plus marqué des érables dans les secteurs entaillés.

5. Conclusion et recommandations

Le dépérissement et la mortalité accrus qui ont été observés dans les secteurs entaillés de cette érablière sont probablement attribuables à la combinaison d'événements climatiques extrêmes — grandes chaleurs et anoxie — et de l'intensification de l'acériculture. La fertilité des sols ne représente pas un facteur limitant dans cette érablière. La densité du peuplement, relativement forte sans être extrême, n'apparaît pas non plus comme une cause majeure du dépérissement. Celui-ci s'est amorcé en 2011-2012, d'après les données dendrochronologiques.

Il ressort des analyses que les causes les plus plausibles du dépérissement observé dans cette érablière sont les extrêmes de chaleur et de précipitations en 2010, les extrêmes de chaleur en 2012 et le changement de régime hydrique de 2004 à 2010, le tout combiné à l'allongement subséquent de la saison de récolte de sève sous haut vacuum pour produire du sirop « de bourgeon ».

Les modèles climatiques prévoient, pour le Bas-Saint-Laurent, des augmentations de l'ordre de 2 °C pour la température et de l'ordre de 6 % pour les précipitations d'ici 2050 (selon le scénario modéré SSP2-4.5²). Ainsi, les forêts subiront de plus en plus souvent des stress liés au climat changeant. Il apparaît donc important de prendre toutes les actions possibles pour maximiser la résilience des érablières aux stress abiotiques.

La prévention du dépérissement des érablières passe par une bonne gestion de la densité du peuplement et de la diversité des essences, de même que par de bonnes pratiques dans les activités acéricoles. Lors d'opérations sylvicoles ou acéricoles dans ces secteurs de l'érablière en dépérissement, nous recommandons de :

- S'abstenir d'entailler les arbres durant les 3 à 4 prochaines années dans les secteurs présentant des symptômes de dépérissement, afin de leur donner une chance de rétablir leur vigueur. Le fait de soumettre les arbres déjà stressés à l'effet supplémentaire de l'entaillage peut ralentir leur rétablissement;
- S'abstenir de procéder à des coupes d'éclaircie; l'ouverture du couvert par le dépérissement des cimes et la mortalité a engendré suffisamment d'ouverture pour que la régénération croisse bien.

² <https://portraits.ouranos.ca>

Dans l'avenir, nous conseillons de :

- Favoriser la diversité des essences dans l'érablière, en conservant au moins 10 % de la surface terrière en essences compagnes comme le bouleau jaune, le hêtre à grandes feuilles (*Fagus grandifolia* Ehrh.), le frêne blanc et l'érable rouge. Ces essences contribuent à la stabilité du peuplement, à la résistance aux perturbations, à la fertilité du sol et à la qualité du sirop (effet terroir);
- Protéger l'érablière contre les agents biotiques comme les insectes, les champignons, les blessures mécaniques, les dégâts causés par la faune, etc. Pour cela, il faut surveiller l'état de santé des érables, utiliser des méthodes de lutte intégrée, éviter les blessures lors de l'entaillage ou du débardage, procéder à des coupes sanitaires, installer des clôtures ou des répulsifs pour éloigner les animaux, etc.
- Se prémunir contre les effets négatifs des agents abiotiques comme la pollution, le verglas, les sécheresses, les insulations, les gélivures, etc. Pour cela, on peut favoriser l'établissement ou le maintien des essences adaptées aux conditions du milieu, maintenir une structure inéquienne du peuplement, éviter les coupes rases ou les éclaircies trop fortes, etc.
- Éviter d'étirer la saison de récolte de sève pour faire du sirop « de bourgeon » afin de réduire le risque de formation d'embolie, d'une part, et de laisser aux arbres leurs acides aminés essentiels au débourrement printanier, d'autre part.

Les connaissances sur la physiologie des arbres dans un contexte acéricole sont encore très sommaires. L'emploi d'équipement sophistiqué en acériculture — pompes à haut vacuum, cycles de pompage, etc. — permet aujourd'hui de récolter de la sève à des quantités jamais vues dans le passé. Il faut toutefois demeurer prudent dans l'utilisation de cet équipement pour éviter de causer un trop grand stress aux arbres.

Remerciements

Nous tenons à remercier le propriétaire de l'érablière, le Club d'encadrement technique en acériculture de l'Est et SNG Foresterie Conseil de leur appui à cette investigation, de même que Denise Tousignant et Maude-Emmanuelle Hajjaj pour l'édition finale de l'avis.

Références bibliographiques

Ali, Q., H.u.R. Athar, M.Z. Haider, S. Shahid, N. Aslam, F. Shehzad, J. Naseem, R. Ashraf, A. Ali et S.M. Hussain, 2019. « Chapter 12: Role of amino acids in improving abiotic stress tolerance to plants. » Dans : Hasanuzzaman, M., M. Fujita, H. Oku et M.T. Islam (édit.). *Plant tolerance to environmental stress: Role of phytoprotectants*. CRC Press. p. 175-203. <https://doi.org/10.1201/9780203705315-12>

- Allen, D.J., 2003. *Spring dieback of yellow birch in North America: Historical examination of weather and frost hardiness*. Mémoire de maîtrise, Faculty of Forestry, University of New Brunswick, Fredericton, N.B. 155 p. <https://bibliotheque-archives.canada.ca/fra/services/services-bibliotheques/theses/Pages/item.aspx?idNumber=57391553>
- Auclair, A.N.D., 1989. « Cavitation as a mechanism of dieback in northern hardwoods ». Dans : Boudreault, G. et G.B. Allard (édit.), *Atelier sur le dépérissement dans les érablières — cahier des conférences*. 23-24 février 1989. Centre de recherche acéricole, ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation, Saint-Hyacinthe, Québec. p. 34-39.
- Beck, P.S.A., C. Atzberger, K.A. Høgda, B. Johansen et A.K. Skidmore, 2006. *Improved monitoring of vegetation dynamics at very high latitudes: A new method using MODIS NDVI*. Remote Sens. Environ. 100(3) : 321-334. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2005.10.021>
- Beguería, S. et S.M. Vicente Serrano, 2017. *SPEI: Calculation of the Standardised Precipitation-Evapotranspiration Index*. R package version 1.7. <https://rdr.io/cran/SPEI/>
- Bourque, C.P.-A., R.M. Cox, D.J. Allen, P.A. Arp, F.-R. Meng, 2005. *Spatial extent of winter thaw events in eastern North America: Historical weather records in relation to yellow birch decline*. Glob. Change Biol 11(9): 1477-1492. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2005.00956.x>
- Braathe, P., 1995. *Birch dieback-caused by prolonged early spring thaws and subsequent frost*. North. J. For. Agric. Sci. 20 : 1-59. <https://nmbu.brage.unit.no/nmbu-xmlui/handle/11250/3006310>
- Bunn, A., M. Korpela, F. Biondi, F. Campelo, P. Mérian, M. Mudelsee, F. Qeadan, M. Schulz et C. Zang, 2013. *dplR : Dendrochronology Program Library in R*. R package version 1.5.7. <https://CRAN.R-project.org/package=dplR>
- Burns, R.M. et B.H. Honkala (édit.), 1990. *Silvics of North America: Volume 2. Hardwoods*. United States Department of Agriculture, Forest Service, Washington, DC (États-Unis). Agriculture Handbook 654. 876 p. https://www.srs.fs.usda.gov/pubs/misc/ag_654/volume_2/silvics_v2.pdf
- Copenheaver, C.A., R.C. McCune, E.A. Sorensen, M.F.J. Pisaric et B.J. Beale, 2014. *Decreased radial growth in sugar maple trees tapped for maple syrup*. For. Chron. 90(06) : 771-777. <https://doi.org/10.5558/tfc2014-149>
- Forest, S., J. Coutu, Montiel, J.M. Léon, I. Beniani, Z.S. Yu, M. Craig et J.F. Masson, 2023. *Prediction of maple syrup quality from maple sap with a plasmonic tongue and ordinal mixed-effects modeling*. ACS Food Sci. Technol. 3(4): 635-647. <https://doi.org/10.1021/acsfoodscitech.2c00397>
- Guijarro, J.A., 2019. *climatol: Climate tools (series homogenization and derived products)*. R package version 3.1.2. <https://climatol.eu/h>

- Hargreaves, G.H., 1994. *Defining and using reference evapotranspiration*. J. Irrig. Drain. Eng. 120(6): 1132–1139. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9437\(1994\)120:6\(1132\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9437(1994)120:6(1132))
- Isselhardt, M., 2012. *Carbohydrate reserves and growth response in sugar maple (Acer saccharum Marsh.) under two levels of spring xylem sap extraction*. Mémoire de maîtrise. Faculty of the Graduate College, University of Vermont. 73 p.
https://library.uvm.edu/collections/theses?search_type=item&bid=2688019
- Khare, S., G. Drolet, J. Sylvain, Daniel, M.C. Paré et S. Rossi, 2019. *Assessment of spatio-temporal patterns of black spruce bud phenology across Quebec based on MODIS-NDVI time series and field observations*. Remote Sens. 11(23) : 2745. <https://doi.org/10.3390/rs11232745>
- Klueva, N.Y., E. Maestri, N. Marmioli et H.T. Nguyen, 2001. « Mechanisms of thermotolerance in crops. » Dans : Basra, A.S. (édit.) *Crop responses and adaptations to temperature stress*. Food Products Press. Binghamton, New York. p. 177–217.
- Lagacé, L., M. Camara, N. Martin, F. Ali, J. Houde, S. Corriveau et M. Sadiki, 2019. *Effect of the new high vacuum technology on the chemical composition of maple sap and syrup*. Heliyon 5(6): e01786. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2019.e01786>
- Lapenis, A., G. Robinson et G. Lawrence, 2022. *Radial growth decline of white spruce (Picea glauca) during hot summers without drought: Preliminary results from a study site south of a boreal forest border*. Can. J. For. Res. 52(4): 582-590. <https://doi.org/10.1139/cjfr-2021-0268>
- Larkindale, J., M. Mishkind et E. Vierling, 2005. « Chapter 5: Plant responses to high temperature ». Dans : Jenks, M.A. et P.M. Hasegawa (édit.). *Plant abiotic stress*. p. 100-144. <https://doi.org/10.1002/9780470988503.ch5>
- LaZerte, S.E. et S. Albers, 2018. *weathercan: Download and format weather data from Environment and Climate Change Canada*. J. Open Source Softw. 3(22) : 571. <https://doi.org/10.21105/joss.00571>
- Maeng, H. et P. Fryzlewicz, 2023. *Detecting linear trend changes in data sequences*. arXiv:1906.01939. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1906.01939>
- Martínez, J. Vilalta, A. Sala, D. Asensio, L. Galiano, G. Hoch, S. Palacio, F.I. Piper et F. Lloret, 2016. *Dynamics of non-structural carbohydrates in terrestrial plants: a global synthesis*. Ecol. Monogr. 86(4): 495-516. <https://doi.org/10.1002/ecm.1231>
- McLeod, A.I., 2022. *Kendall: Kendall rank correlation and Mann-Kendall trend test*. R package version 2.2.1. URL: <http://CRAN.R-project.org/package=Kendall>

- Moreau, G., A. Achim et D. Pothier, 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. <https://doi.org/10.1002/ecs2.3183>
- N'guyen, G. Q., N. Martin, M. Jain, L. Lagacé, C.R. Landry et M. Filteau, 2018. *A systems biology approach to explore the impact of maple tree dormancy release on sap variation and maple syrup quality*. *Sci. Rep.* 8 : 14658. <https://doi.org/10.1038/s41598-018-32940-y>
- Ouimet, R., 2023. *Effet du haut vacuum sur la croissance des érables à sucre en Estrie : résultats préliminaires*. Gouvernement du Québec, ministère des Ressources naturelles et des Forêts, Direction de la recherche forestière. Note de recherche forestière n° 159. 10 p. <https://mffp.gouv.qc.ca/documents/forets/recherche/NRF159.pdf>
- Ouimet, R., L. Duchesne et J.-D. Moore, 2017. *Effet de l'entaillage sur la croissance de l'érable à sucre (Acer saccharum Marsh.) dans trois stations du RÉSEF dans les Appalaches*. Gouvernement du Québec, ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs du Québec, Direction de la recherche forestière. Note de recherche forestière n° 148. 13 p. <https://mffp.gouv.qc.ca/documents/forets/connaissances/recherche/Note148.pdf>
- Ouimet, R., F. Guillemette, L. Duchesne et J.-D. Moore, 2021. *Effect of tapping for syrup production on sugar maple tree growth in the Quebec Appalachians*. *Trees*: 1-13. <https://doi.org/10.1007/s00468-020-02001-x>
- Ouimet, R., J.-D. Moore et L. Duchesne, 2012. *DELFEES : Diagnostic des éléments limitatifs à partir du feuillage et du sol (DELFEES). Version 1.3*. Gouvernement du Québec, ministère des Ressources naturelles, Direction de la recherche forestière. <https://mffp.gouv.qc.ca/nos-publications/delfes-diagnostic-elements-limitatifs-feuillage-erable-sucre-sol-v1-3/h>
- Peterson, T.C., C. Folland, G. Gruza, W. Hogg, A. Mokssit et N. Plummer, 2001. *Report on the activities of the working group on climate change detection and related rapporteurs 1998-2001*. World Meteorological Organization. Genève (Suisse). Rapport n° WCDMP-47, WMO-TD 1071. 143 p. <http://etccdi.pacificclimate.org/docs/wgccd.2001.pdf>
- R Core Team, 2021. *R: A language and environment for statistical computing*. R Foundation for Statistical Computing, Vienne (Autriche). version 4.1.2. <https://www.R-project.org>
- Raulier, F. et P.Y. Bernier, 2000. *Predicting the date of leaf emergence for sugar maple across its native range*. *Can. J. For. Res.* 30(9): 1429-1435. <https://doi.org/10.1139/x00-064>
- Schädel, C., A. Blöchl, A. Richter et G. Hoch, 2009. *Short-term dynamics of nonstructural carbohydrates and hemicelluloses in young branches of temperate forest trees during bud break*. *Tree Physiol.* 29(7): 901-911. <https://doi.org/10.1093/treephys/tpp034>

van den Berg, A.K., T.D. Perkins, M.L. Isselhardt et T.R. Wilmot, 2016. *Growth rates of sugar maple trees tapped for maple syrup production using high-yield sap collection practices*. Forest Sci. 62(1): 107-114. <https://doi.org/10.5849/forsci.15-019>

Walworth, J.L. et M.E. Sumner, 1987. «The Diagnosis and Recommendation Integrated System (DRIS) ». Dans : Stewart, B.A. (edit.), *Advances in soil science, volume 6*. Springer, New York, NY (États-Unis). p. 149-188. https://doi.org/10.1007/978-1-4612-4682-4_4

Wood, S.N., 2017. *Generalized additive models: An introduction with R (2nd edition)*. Chapman and Hall/CRC Press. 496 p. <https://doi.org/10.1201/9781315370279>

Zhong, R., X. Chen, Z. Wang et C. Lai, 2018. *scPDSI : Calculation of the conventional and self-calibrating Palmer Drought Severity Index*. R package version 0.1.3. <https://rdrr.io/cran/scPDSI/>

Rock Ouimet, ing.f., Ph. D.
Service de la génétique et de l'écologie forestière

Guillaume Drolet, ing.f., M. Sc.
Service de la sylviculture et du rendement des forêts

Jean-Daniel Sylvain, Ph. D.
Service de la sylviculture et du rendement des forêts

Correspondance :
Ministère des Ressources naturelles et des Forêts
Direction de la recherche forestière
2700, rue Einstein, bureau C.1.305
Québec (Québec) G1P 3W8
Tél. : 418 643-7994
Courriel : guillaume.drolet@mrf.gouv.qc.ca

On peut citer ce texte en indiquant la référence. Citation recommandée :

Ouimet, R., G. Drolet et J.-D. Sylvain, 2024. *Étude de cas : étiologie du dépérissement d'une érablière dans le Bas-Saint-Laurent*. Gouvernement du Québec, ministère des Ressources naturelles et des Forêts, Direction de la recherche forestière. Avis technique SGEF-31. 25 p.