

Analyse des impacts des changements climatiques sur la production de sirop d'érable au Québec et solutions d'adaptation

Projet piloté par Daniel Houle, MFFP-Ouranos

En collaboration avec :

Benoît Côté, McGill

Hughes Power, MFFP

Travis Logan, Ouranos

Louis Duchesne, MFFP

Isabelle Charron, Ouranos

Les résultats et opinions présentés dans cette publication sont entièrement la responsabilité des auteurs et n'engagent pas Ouranos ni ses membres.



Ressources naturelles
Canada

Natural Resources
Canada

Canada



Québec



Table des matières

Liste des tableaux	iv
Liste des figures	v
Avant propos	vi
Remerciements	vii
Chapitre 1. Contexte général	1
1.1 Introduction	1
1.2 Cadre théorique / revue de littérature	2
1.2.1 L'érable à sucre	2
1.2.2 Phénomène de la coulée de la sève d'érable	2
1.2.3 Phénomènes influençant la production de sirop d'érable	3
1.2.4 Changements climatiques et production de sirop d'érable.....	4
Chapitre 2. Modélisation de la période de production et de de production totale annuelle par régions à partir de données climatiques hebdomadaires	5
2.1 Objectif	6
2.2 Méthodologie	6
2.2.1 Production de sirop d'érable	6
2.2.2 Données météo.....	8
2.2.3 Modèle de période de production.....	11
2.2.5 Modèles de production de sirop d'érable.....	12
2.3 Résultats et discussion	14
2.3.1 Production et période de production	14
2.3.2 Modèle de prédiction de la période de production.....	16

2.3.3 Modèle de production de sirop d'érable	17
--	----

Chapitre 3. Projection des déplacements de la période de coulée et de la production future de sirop d'érable	21
3.1 Objectif	22
3.2 Méthodologie	22
3.2.1 Scénarios Climatiques	22
3.2.2 Projections futures de production de sirop	24
3.3 Résultats et discussion	24
3.3.1 Début, fin et durée de la saison de coulée	24
3.3.2 Production totale annuelle	29
3.3.3 Limites de l'approche de modélisation	32
3.3.4 Conclusions et recommandations.....	32
Références	35

Liste des tableaux

Tableau 2.1. Statistiques sur la production annuelle de sirop d'érable.	7
Tableau 2.2. Description des variables climatiques utilisées pour la modélisation.....	9
Tableau 2.3. Coefficients du modèle de production totale de sirop d'érable avec moyennes régionales climatiques.	18
Tableau 3.1. Projection du début et de la fin de la saison de coulée (jours juliens, jj). La durée de la saison de coulée (jours, j) ainsi que les différences entre le début et la fin de la période de coulée entre les périodes futures et la période de référence (1981-2000) sont aussi indiquées (jours, j).	25
Tableau 3.2. Variabilité (Écart-type moyen $\pm$ écart-type) des dates de début, de fin et de durée de la saison de coulée pour les trois périodes d'études.	28
Tableau 3.3. Production totale annuelle moyenne ($\pm$ écart type) de sirop d'érable (lb/entaille) pour la période de référence et les périodes futures pour chacune des régions étudiées.....	30

Liste des figures

Figure 2.1. Localisation des érablières participant au sondage et des stations météorologique.	8
Figure 2.2. Variations du rendement à l'entailler entre les régions.	15
Figure 3.1. a) Émissions mondiales des GES (soit le CO ₂ , le CH ₄ , le N ₂ O et les gaz fluorés) illustrant six scénarios de SRES (lignes colorées) et b) Évolution de la température moyenne globale selon plusieurs simulations MCG regroupées par divers scénarios d'émissions de gaz à effet de serre de la famille SRES (source GIEC 2007, WG1-AR4).....	23
Figure 3.2. Densité de probabilité du début (a) de la fin (b) et de la durée (c) de la saison de coulée pour la région Saint-Jean Valleyfield pour la période de référence (1981-2000) et pour les périodes 2046-2065 et 2081-2100 respectivement. Les valeurs sont calculées à partir d'un ensemble de scénarios climatiques (n=77).	27
Figure 3.3. Évolution temporelle de la production totale annuelle de sirop d'érable pour les régions du Bas-Saint-Laurent (a) et de Saint-Jean-Valleyfield (a) projetée à partir d'un ensemble de scénarios climatiques (enveloppes grises et lignes bleues; n=77) et des observations de Hutchinson et al. 2009 (ligne noire). Les valeurs observées de production sont indiquées par la ligne rouge.	31

Avant propos

Ce rapport présente les résultats d'un travail auquel plusieurs personnes ont participé au sein de différentes équipes de recherches (Ouranos, MFFP, McGill,) ainsi que la Fédération des producteurs acéricoles du Québec (FPAQ). Une telle complémentarité était nécessaire pour la réalisation de ce projet, entre autre pour assembler un jeu de données regroupant des résultats de production de sirop hebdomadaire et des indices climatiques novateurs et aussi pour avoir la capacité d'aborder les aspects physiques et éco-physiologiques inhérents à l'étude des effets des changements climatiques sur la production de sirop d'érable.

Les travaux faits dans le cadre de ce travail ont menés à l'écriture de deux articles scientifiques où les résultats sont présentés dans un langage plus spécialisé. Un troisième sur l'effet des changements climatiques sur la production de sirop est en préparation.

Duchesne, L., and Houle, D. 2014. Interannual and spatial variability of maple syrup yield as related to climatic factors. *PeerJ* 2:e428; DOI 10.7717/peerj.428

Daniel Houle, D., Paquette, A., Côté, B., Logan, T., Power, H., Charron, I., et Duchesne, L. 2015. Impacts of climate change on the seasonal variation of maple syrup production timing. En révision à *Plos One*

Remerciements

Les travaux présentés dans ce rapport ont été réalisés avec le support du ministère des Ressources naturelles du Québec (MRN), grâce au Fonds vert dans le cadre de la mise en œuvre du Plan d'action 2006-2012 sur les changements climatiques du gouvernement du Québec et en collaboration avec Ressources naturelles Canada.

Nous tenons à remercier Anne Blondlot pour son aide précieuse dans l'amorce du projet et dans la rédaction de la première version du document de présentation du projet. Nous remercions aussi Jean-Pierre Bellegarde de la Fédération des producteurs acéricoles du Québec (FPAQ) pour nous avoir donné accès aux données de production hebdomadaire et nous avoir prodigué de nombreux conseils lors de réunions préparatoires au projet ainsi que Simon Trépanier, aussi de la FPAQ, pour son support.

Finalement, nous tenons aussi à remercier les réviseurs pour leurs nombreux et précieux commentaires ainsi que Mathieu Bélanger Morin et Charles Marty pour leur aide dans l'édition du document.

Chapitre 1. Contexte général

1.1 Introduction

La production de sirop à partir de la sève d'érable est une activité sociale et économique dont les origines remontent aux peuples amérindiens qui occupaient le territoire du Québec avant l'arrivée des européens (Tyminski 2011). Au fil des ans, les méthodes de production se sont modernisées et la production de sirop d'érable est aujourd'hui une activité économique importante au Québec. Elle est pratiquée par environ 13500 producteurs acéricoles qui produisent 71% de la production mondiale et génère des revenus annuels de 283 millions de dollars (anonyme 2011). La production totale de sirop d'érable au Québec, ainsi que le nombre d'entailles, ont augmenté entre les années 2005 et 2011 alors que le nombre de producteurs est demeuré stable depuis 1990 (anonyme 2011; Rondeaux 2007).

La coulée de la sève d'érable se produit généralement au Québec entre la fin du mois de février et la fin du mois d'avril (Duchesne et al. 2009). La production de sirop d'érable étant très intimement liée aux conditions climatiques, la période à laquelle elle s'effectue peut donc varier d'une région à l'autre (Rondeaux 2007).

La productivité des érablières est généralement rapportée en livres de sirop par entaille. La normalisation de la production par le nombre d'entailles permet d'éliminer les variations annuelles associées au nombre d'érables entaillés. La productivité dépend conjointement de deux facteurs soit : la quantité de sève produite et sa teneur en sucre (Tyminski 2011). La production de sève de même que sa teneur en sucre ont été associées par plusieurs auteurs aux conditions climatiques qui prévalent au moment, ou dans les mois précédents la période de production (Kim and Leech 1985; Marvin and Erickson 1956; Plamondon and Bernier 1980; Pothier 1995).

Récemment, des inquiétudes quant à l'avenir de la production de sirop d'érable ont été soulevées par les producteurs. Ceux-ci mentionnent être préoccupés et ressentir les effets du réchauffement climatique sur leurs activités (Rondeaux 2007). Du côté américain, on remarque un déclin de la production depuis la deuxième moitié du 20^{ième} siècle. Parmi les raisons mentionnées pour expliquer ce déclin, notons les épidémies d'insectes, l'appauvrissement des sols, l'augmentation de la concentration en dioxyde de carbone, les épisodes de verglas, les sécheresses estivales et automnales, la perte du couvert neigeux et l'augmentation des températures printanières (Tyminski 2011). Ces phénomènes peuvent tous être, de près ou de loin, associés aux changements climatiques.

1.2 Cadre théorique / revue de littérature

1.2.1 L'érable à sucre

L'érable à sucre (*Acer saccharum* Marshall) est l'espèce la plus utilisée pour la production de sirop d'érable. C'est l'espèce dont la concentration en sucre de la sève est la plus élevée (2 à 10%) et qui produit également la plus grande quantité de sève (Gabriel 1972). L'érable à sucre se retrouve naturellement dans le Nord-est de l'Amérique du Nord. C'est au Québec, à environ 47° de latitude nord qu'il atteint la limite nordique de sa distribution. Sous cette latitude, sa distribution est générale et il y forme des peuplements purs ou mélangés. Il s'associe entre autres au bouleau jaune (*Betula alleghaniensis* Britton), au caryer cordiforme (*Carya cordiformis* (Wangenheim) K. Koch), au frêne d'Amérique (*Fraxinus americana* Linnaeus), au tilleul d'Amérique (*Tilia americana* Linnaeus), au chêne rouge (*Quercus rubra* Linnaeus), à l'orme d'Amérique (*Ulmus americana* Linnaeus), au noyer cendré (*Juglans cinerea* Linnaeus), à l'érable argenté (*Acer saccharinum* Linnaeus), à l'érable rouge (*Acer rubrum* Linnaeus), au hêtre à grande feuilles (*Fagus grandifolia* Ehrhart), à la pruche de l'est (*Tsuga canadensis* (Linnaeus) Carrière) et au pin blanc (*Pinus strobus* Linnaeus) (Burns and Honkala 1990). L'érable à sucre pousse de façon optimale sur des sols riches et profonds (Houston et al. 1990). En plus de l'érable à sucre, l'érable rouge, l'érable argenté et l'érable noir (*Acer nigrum* F. Michaux) sont aussi utilisés pour la production de sirop d'érable (Tyminski 2011).

1.2.2 Phénomène de la coulée de la sève d'érable

Plusieurs phénomènes sont impliqués dans la coulée printanière de la sève chez les érables. Le principe de base derrière la coulée implique une alternance de pression négative et positive dans le tronc et dans les branches de l'arbre. Ce phénomène est favorisée par un gel durant la nuit et un dégel le jour (Marvin, 1958, Plamondon, 1977, Rondeaux 2007). Les membres de la famille des Acéracée, dont font partie les érables, comportent des fibres dont l'intérieur est rempli de gaz. Ces gaz se contractent sous l'action du refroidissement de température et induisent une pression négative attirant des molécules d'eau de la paroi cellulaire à l'intérieur de la fibre où elles formeront des cristaux de glace. Cet appel d'eau se transmet de la paroi cellulaire des fibres aux vaisseaux à l'intérieur desquels la sève est toujours présente sous forme liquide. Ainsi, grâce au potentiel hydrique négatif créé par ce phénomène, l'aubier de l'érable, sous l'action du gel, pourra absorber par ses racine l'eau présente dans le sol (Milburn and O'Malley 1984). Le gel se produit principalement dans les branches de l'érable puisque celles-ci subissent plus facilement l'action du gel/dégel à cause de leur ratio surface volume plus élevé et de la plus faible épaisseur de leur écorce (Roy 1997). Lors du dégel, le phénomène contraire se produit; les gaz des vaisseaux gagnent en volume inversant le gradient de pression et, couplé à la force de la gravité, entraînent l'expulsion de sève par l'entaille à la base du tronc (Roy 1997). Il semble cependant que le sucrose dissout dans la sève joue un rôle fondamental dans la phase d'exsudation et que sans cette substance en solution, l'exsudation n'a pas lieu (Johnson et al. 1987). Le cycle d'absorption/exsudation se déroule habituellement en 24 heures mais peut également se produire sur une période de temps plus longue (Plamondon and Bernier 1980). La quantité de sève exsudée est généralement inférieure à la quantité de liquide absorbé (Johnson et al. 1987). Le phénomène peut alors être utile à l'arbre en rechargeant l'aubier de sève et en permettant

de faire circuler les réserves de sucre afin de permettre aux cellules d'amorcer leur croissance printanière (Tyree 1983). Un autre phénomène contribuant à la translocation d'eau du sol vers l'arbre est la différence de potentiel osmotique entre le sol et les racines de l'arbre. Au début de l'hiver, les réserves d'amidon sont hydrolysées en sucrose grâce à l'activité de l'enzyme amylase (anonyme 1995). Le sucre retrouvé dans la sève de l'érable pourrait contribuer à diminuer son potentiel hydrique et à favoriser, par osmose, l'absorption de l'eau du sol (Becker et al. 2000; Roy 1997).

Les minéraux accumulés dans les racines pourraient eux aussi contribuer, par différence de potentiel, à faire entrer l'eau du sol dans celles-ci et à la faire circuler dans le tronc (Johnson et al. 1987).

1.2.3 Phénomènes influençant la production de sirop d'érable

Plusieurs auteurs ont noté que les conditions climatiques idéales pour la production de sirop d'érable sont une température près de 0°C la nuit et une température de plus de 4°C le jour (Marvin 1957,1958; Pothier 1995). En plus de permettre la coulée de la sève, ces conditions favoriseraient la production d'une sève plus sucrée. D'autres auteurs ont identifié la température maximale de la journée (Kim and Leech 1985) ou la différence entre le minimum et le maximum de température comme facteur influençant la production de sève (Plamondon 1977). Par contre, les conditions optimales pour la production de sirop d'érable pourraient varier d'un arbre à l'autre (Tyminski 2011). D'ailleurs des différences génétiques quant à la quantité de sève récoltée et quand à son taux de sucre ont été observées (Houston et al. 1990).

Parmi les autres conditions climatiques affectant la production de sève notons la radiation solaire qui en réchauffant l'écorce favorise la coulée de la sève (Plamondon and Bernier 1980; Pothier 1995). En fait, la quantité de sève récoltée serait plus intimement liée à la température de la surface des branches de l'arbre qu'à la température de l'air ambiant (Tyree 1983). En contrepartie, la présence de vent diminuant la température de la surface des branches et du tronc de l'arbre aurait tendance à faire diminuer la quantité de sève récoltée (Plamondon and Bernier 1980). Les conditions climatiques des mois précédant la coulée de la sève peuvent également influencer la production de sirop d'érable (Duchesne et al. 2009). Entre autres, les précipitations, sous forme de neige et de pluie tombées entre le 1^{er} octobre et le 30 avril sont positivement corrélées à la production printanière de sirop d'érable (Pothier 1995). Des températures hivernales froides stimulent la formation de sucre dans l'arbre et la présence d'eau dans l'aubier (Duchesne et al. 2009). Par contre, un gel profond du sol peut endommager les racines de l'arbre et diminuer sa production de sirop pendant plusieurs années (Robitaille et al. 1994). Quant à elle, une température élevée au mois d'avril arrêtera la coulée de la sève d'érable en favorisant le débourrement et la prolifération des microorganismes dans l'entaille (Duchesne et al. 2009).

En ce qui concerne le peuplement forestier, les érablières en santé sont reconnues pour être plus productives que celles qui sont affaiblies (Robitaille et al. 1994; Roy 1997). À ce sujet, les traitements sylvicoles dans les érablières peuvent avoir un impact positif ou négatif (Houston et al. 1990). Afin de ne pas détériorer l'état de santé de l'érablière et ainsi diminuer sa productivité, il est essentiel de

conserver des essences compagnes et ne pas viser l'établissement d'un peuplement d'érable à sucre pur (Bernier et al. 2001). D'autres phénomènes peuvent également affecter l'état de santé de l'érablière et par conséquent sa production de sirop. Parmi ces facteurs notons l'exposition sur la pente (Bernier et al. 2001), le type de sol (Houston et al. 1990), l'acidité du sol (Bernier et al. 2001), les polluants atmosphériques (Forget et al. 2003), les épidémies d'insectes (anonyme 1995), et les événements de gel-dégels qui affectent la survie des racines et l'absorption des nutriments (Robitaille et al. 1995, Tierney et al. 2001; Auclair et al. 2010).

1.2.4 Changements climatiques et production de sirop d'érable

Depuis quelques années les effets des changements climatiques se font sentir sur le sud du Québec. Il y a fort à parier que le changement de climat affectera la production de sirop d'érable (Rondeaux 2007). Les changements climatiques anticipés comprennent entre autres une augmentation marquée des températures hivernales, des précipitations sous forme de pluie en hiver, un déplacement dans le temps de la période de gel/dégel, une diminution du couvert nival et une augmentation des températures estivales (Logan et al. 2011).

Parmi les impacts possibles de ces changements sur la production de sirop d'érable, notons d'abord le devancement de la saison de production (Lemieux 2006), compte tenu de la dépendance de la production de sirop d'érable aux cycles de gel/dégel et que ces cycles arriveront plus tôt en saison. Les changements climatiques pourraient également avoir un impact favorable sur la croissance de l'érable à sucre. On prévoit un allongement de la saison de croissance des arbres ce qui pourrait augmenter leur productivité (Norby et al. 2003). Par ailleurs, la présence d'une période assez longue de gel est nécessaire afin que l'arbre enclenche son processus de désendurcissement associé à la production de sirop d'érable (Norby et al. 2003). Si cette période devenait trop courte, la physiologie et la vigueur de l'arbre pourraient être affectées et ainsi limiter la production de sirop d'érable. La présence de dégels hivernaux répétés pourrait affecter la survie et la vigueur des érables influençant négativement la production de sirop d'érable. Notons également qu'un débourrement des bourgeons hâtif mettant ainsi fin prématurément à la saison de production pourrait être associé à la hausse des températures hivernales (Lemieux 2006; Saxe et al. 2001). La perte du couvert neigeux pourrait quant à elle rendre les érablières plus vulnérables à un gel profond du sol et ainsi entraîner des dommages aux racines (Roy 1998). Ces constatations nous laissent donc entrevoir un effet complexe des changements climatiques sur la production du sirop d'érable.

Chapitre 2. Modélisation de la période de production et de de production totale annuelle par régions à partir de données climatiques hebdomadaires

Par Benoît Côté (Université McGill) et Hughes Power (MFFP)

En collaboration avec Daniel Houle et Louis Duchesne

du Ministère des Forêts, Faune et Parcs du Québec

et Travis Logan et Isabelle Charron d'Ouranos

2.1 Objectif

Le but de ce volet du projet est de quantifier les impacts des changements climatiques sur la production de sirop. En premier lieu, les variations passées de production hebdomadaire et annuelle et la durée de la période de production dans différentes régions du Québec seront modélisées en utilisant des données observées de température, de précipitation et de production de sirop. Des estimations de production et de période de production futures seront par la suite obtenues à l'aide de ces modèles et de scénarios climatiques futurs.

2.2 Méthodologie

2.2.1 Production de sirop d'érable

La production régionale hebdomadaire de sirop d'érable a été estimée par le groupe AGÉCO pour le compte de la Fédération des producteurs acéricoles du Québec. L'estimation de la production hebdomadaire moyenne en livre de sirop par entaille est faite à l'aide d'une enquête sur la production menée auprès d'une centaine de producteurs répartis dans chacune des régions où il y a production de sirop d'érable (Figure 2.1, Tableau 2.1). Les estimations de la production hebdomadaire utilisées dans cette étude couvrent les années 1999 à 2011.

Tableau 2.1. Statistiques sur la production annuelle de sirop d'érable.

Région	Nombre producteurs*	Nombre producteurs sondés†	Production annuelle moyenne (lb/entaille) [†] - Écart type	Nombre entailles (k entailles)*	Début (Jours juliens) [†] - Écart type	Fin (Jours juliens) [†] -Écart type	Durée saison (jours) [†] Écart type
Beauce	3426	15	2,11-0.38	15887	73-11	107-6	33-10
Côte-du-Sud		12	1,98-0.38		77-7	115-3	38-6
Bas-Saint-Laurent	586	15	2,28-0.56	7520	83-8	116-4	33-7
Capitale Nationale, Saguenay / Lac-St-Jean	223	15	2,03-0.36	1232	71-9	110-5	38-8
Centre-du-Québec	890	10	1,96-0.41	4510	71-11	105-8	34-12
Mauricie		8	1,84-0.51		77-12	108-8	31-12
Estrie	755	12	2,19-0.43	5616	73-11	108-6	35-10
Laurentides, Outaouais, Abitibi-Témis.	167	10	2,09-0.40	1262	73-13	110-10	37-9
Lanaudière, Laval, Montréal	155	8	1,99-0.42	580	73-10	106-7	33-8
St-Hyacinthe	516	8	2,48-0.56	2382	66-9	102-5	34-10
Valleyfield		8	2,69-0.47		65-7	101-6	34-7
Province	6717	121	2,13-0.49	38990			

* Dossier économique, Fédération des producteurs acéricoles du Québec années, 2005 à 2011.

† Enquête sur la récolte hebdomadaire, Fédération des producteurs acéricoles du Québec, années 1999 à 2011.

2.2.2 Données météo

Les estimations de production de sirop d'érable ont été jumelées à une banque de données météo provenant de plusieurs stations localisées dans chacune des régions productrices de sirop d'érable (Figure 2.1). Les stations météo ont fourni une gamme complète de mesures de températures et de précipitations quotidiennes. Des moyennes de mesure des données des stations météo ont été compilées afin d'obtenir des valeurs régionales pour chacune des variables fournies par les stations météo.

Le choix de l'échelle spatiale et temporelle des données de production et des données météo a été fait afin de caractériser le plus adéquatement possible la production de sirop d'érable ainsi que de rendre les modèles applicables à des simulations de changement du climat. L'utilisation de cumulatif de valeurs hebdomadaires permet de saisir les variations de température qui affectent la production de sirop d'érable de manière plus détaillée que l'utilisation de moyennes mensuelles/annuelles. L'utilisation de ce type de données permet également d'utiliser les modèles dans un scénario de changement climatique où la période de production de sirop d'érable serait déplacée dans le temps.

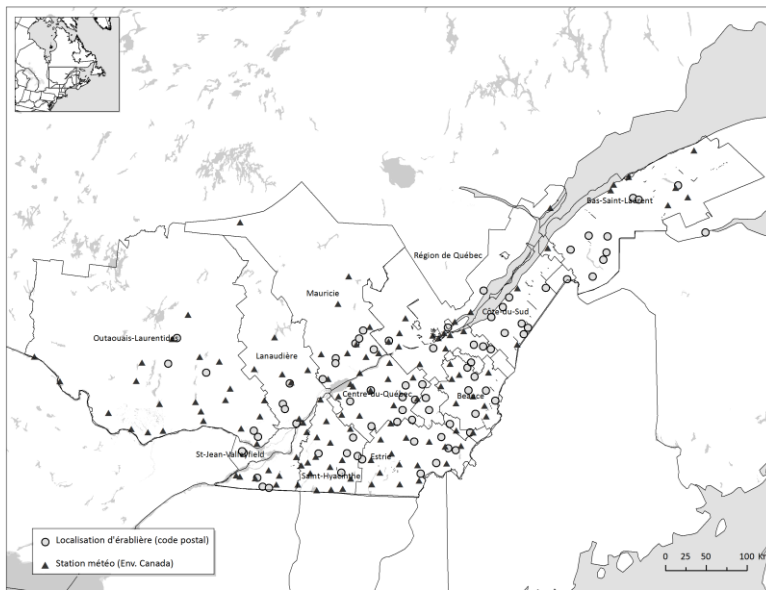


Figure 2.1. Localisation des érablières (cercle vide) participant au sondage et des stations météorologique (triangle noir). Notez que les endroits indiqués pour les érablières représentent les trois premiers chiffres d'un code postal seulement, les producteurs participant étant anonymes. Ainsi, un cercle peut indiquer la présence de plusieurs érablières réparties dans une zone autour du symbole.

La modélisation visait à sélectionner un nombre restreint de variables susceptibles d'avoir la plus grande influence sur la production de sirop d'érable. Les variables utilisées se devaient d'être associées à un ou plusieurs mécanismes connus pour influencer la coulée de la sève et la production de sucre de l'arbre. Compte tenu que la quantité de sève récoltée varie en fonction des fluctuations de la température autour du point de congélation, des variables tentant de

caractériser ce phénomène ont été créées. Plusieurs seuils de fluctuation de température allant de -3 à 5 °C ainsi que différents intervalles de température moyenne journalière ont été testés afin d’obtenir les meilleurs prédictors de la production de sirop d’érable. Différents seuils ont été utilisés puisque les fluctuations de température sont reconnues pour influencer la quantité de sève récoltée ainsi que la quantité de sucrose présent dans la sève (anonyme 1995). La température atmosphérique est corrélée à la température du bois de l’érable qui elle, en augmentant, favorise l’exsudation de la sève par le gain en volume des gaz présents dans les fibre du xylème (Tyree 1983). Une autre raison justifiant l’exploration de différents seuils de température est la température optimale de fonctionnement de l’enzyme amylase qui se situerait entre 0 et 4°C (Cortes and Sinclair 1985). Plus le taux de sucre de la sève est élevé, plus la quantité de sirop d’érable produite par unité de volume de sève récoltée sera importante.

Parmi les facteurs autres que ceux mesurés durant la période de coulée et qui ont été retenus pour la modélisation, mentionnons la température et les précipitations du mois de janvier, de l’été et l’automne précédant la période de production. L’ensemble des variables utilisées pour la modélisation sont présentées au Tableau 2.2.

Tableau 2.2. Description des variables climatiques utilisées pour la modélisation.

Variables climatiques	Description
AvgWBal	Moyenne des différences entre précipitation et évapotranspiration pour les mois de mai à octobre inclusivement
FrzThwX :Nb	Nombre d’événements de gel/dégel avec un seuil de dégel égal à la valeur prise par X (de -3 à 5°C).
FrzThwX :CumFrz	Somme des degrés sous 0°C pour les jours et les stations expérimentant un gel/dégel avec un seuil de dégel égal à la valeur prise par X (de -3 à 5 °C). La valeur de la variable est normalisée par le nombre total de stations météo présentes dans la région de production
FrzThwX :CumThw	Somme des degrés au dessus du seuil égal à la valeur prise par X (de -3 à 5 °C) pour les jours et les stations expérimentant un gel/dégel avec un seuil de dégel égal à la valeur prise par X. La valeur de la variable est normalisée par le nombre total de stations météo présentes dans la région de production
FrzThwX :IntensFrz	FrzThwX :CumFrz/ FrzThwX :Nb (voir description ci-dessus)
FrzThwX :IntensThw	FrzThwX :CumThw/ FrzThwX :Nb (voir description ci-dessus)
FrzThwX :Trng	Somme des différences entre les maxima et minima journaliers pour les jours et les stations expérimentant un gel/dégel avec un seuil égal à la valeur prise par X. La valeur de la variable est normalisée par le nombre total de stations météo présentes dans la région de production
GDD	Somme hebdomadaire des degrés-jours au dessus de 5°C

JJAWBal	Moyenne des différences entre précipitation et évapotranspiration pour les mois de juin à août inclusivement
MaxDry2mm	Valeur maximale de la somme des jours consécutifs sans précipitation dépassant le seuil de 2 mm pour les mois de juin à octobre inclusivement
MaxDry4mm	Valeur maximale de la somme des jours consécutifs sans précipitation dépassant le seuil de 4 mm pour les mois de juin à octobre inclusivement
MTavg	Moyenne mensuelle des températures journalières
Pr	Précipitations hebdomadaires
PrJA	Somme des précipitations pour les mois de juillet et août
Pr_Janv	Somme des précipitations hebdomadaires pour le mois de janvier
PrJO	Somme des précipitations pour la période s'étendant entre les mois de juin et octobre inclusivement
PrSN	Somme des précipitations pour la période s'étendant entre les mois de septembre et novembre inclusivement
PrSummer	Somme des précipitations pour la période estivale
TavgDProd	Moyenne des températures journalières pour la période incluant les deux semaines précédant la première semaine de production et les deux premières semaines de production
TavgJA	Température hebdomadaire moyenne pour les mois de juillet et août
TavgJanv	Température journalière moyenne pour les semaines du mois de janvier
TavgJO	Température hebdomadaire moyenne pour la période s'étendant des mois de juin à octobre inclusivement
TavgSN	Température hebdomadaire moyenne pour la période s'étendant des mois de septembre à novembre inclusivement
TavgSummer	Température hebdomadaire moyenne pour la période estivale
TavgX_YC :Nb	Nombre de jours avec température journalière moyenne entre les valeurs prises par X et Y (0 à 8 °C)
TmaxJanv	Température moyenne hebdomadaire maximale la plus élevée pour le mois de janvier
TmaxAvgJanv	Moyenne des températures hebdomadaires maximales pour le mois de janvier
TminJanv	Température moyenne hebdomadaire minimale la moins élevée pour le mois de janvier
TminAvgJanv	Moyenne des températures hebdomadaires minimales pour le mois de janvier

WTavg	Moyenne hebdomadaire des températures journalières
WTavgMin	Moyenne hebdomadaire de la température journalière minimum
WTavgMax	Moyenne hebdomadaire de la température journalière maximum
YTavg	Moyenne annuelle des températures journalières

2.2.3 Modèle de période de production

L'étude s'est d'abord intéressée à la période de production de sirop d'érable. La période de production a été définie comme étant, pour une région et pour une année donnée, l'intervalle entre la première et la dernière semaine de production. Afin de prédire la durée, le début et la fin de la période de production, une régression logistique a été paramétrée avec la moyenne de l'ensemble des stations d'une région. La régression logistique est une application des modèles linéaires généralisés qui prédit à l'aide d'une équation linéaire et d'un lien « logit » la probabilité d'occurrence d'un événement (Eq.1). L'événement modélisé dans ce cas-ci était l'appartenance ou non d'une semaine à la période de production. Pour chacune des régions productrices, une variable catégorique a été créée et attribuée à chacune des semaines des mois de janvier à mai inclusivement pour les années 1999 à 2011. La variable catégorique prend la valeur de 1 pour les semaines incluses dans la période de production et la valeur de 0 pour les semaines non incluses dans cette période.

$$\text{Eq.1} \quad \hat{y} = \frac{e^{\beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \dots + \beta_n x_n}}{1 + e^{\beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \dots + \beta_n x_n}} + \epsilon$$

Où : $\hat{y}$ est la probabilité qu'une semaine fasse partie de la période de production β_1 à β_n sont des coefficients à estimer, x_1 à x_n sont des variables explicatives indépendantes et ϵ est l'erreur résiduelle du modèle.

Une matrice de corrélation incluant les variables climatiques du Tableau 2.2, les sommes cumulatives de températures et d'événements de gel/dégel hebdomadaires ainsi que la variable catégorique de période de production a été produite. L'analyse de la matrice a permis de cibler des variables pouvant être utilisées pour prédire la probabilité qu'une semaine fasse partie de la période de production. Pour chacune des variables ciblées, une régression logistique a été paramétrée. Les suppositions de la régression logistique ont été vérifiées graphiquement.

Les différentes régressions ont été comparées entre elles à l'aide du critère de Akaike (Akaike 1973). La régression présentant le critère de Akaike (AIC) le plus faible a été sélectionnée en tant que modèle de base. Une seconde matrice de corrélation, dans laquelle la variable catégorique

de période de production a été remplacée par les résidus du modèle de base, a été créée. Les résidus du modèle de base ont également été rapportés sur un graphique avec les autres variables de la matrice de corrélation. La nouvelle matrice de corrélation de même que les graphiques ont été utilisés afin de sélectionner des co-variables permettant d'améliorer le modèle de base. Les variables démontrant une corrélation avec les résidus ont été ajoutées individuellement au modèle de base. Un test de ratio du maximum de vraisemblance (maximum likelihood ratio test) a été effectué entre le modèle original et les modèles avec ajout de variable. Ce test a permis de s'assurer que l'ajout de variables améliorerait significativement le modèle de base. Par la suite, le modèle modifié présentant la plus faible valeur de AIC et qui améliorerait significativement le modèle de base était conservé et identifié comme étant le modèle amélioré. Les étapes précédentes visant à améliorer le modèle de base ont été reprises avec le modèle amélioré jusqu'à l'obtention d'un modèle final qui n'était plus amélioré par l'ajout de variables.

Étant donné que la régression logistique prédit la probabilité d'occurrence d'un événement, un seuil de probabilité doit être fixé afin de décider à partir de quelle probabilité l'équation prédit l'occurrence de l'événement. Le seuil de probabilité a d'abord été établi à 0.5 pour être ensuite ajusté de manière itérative à l'aide d'un tableau de contingence. Le tableau de contingence classe les semaines selon leur appartenance à la période de production et selon la capacité du modèle à bien prédire leur appartenance. Le seuil de classification permettant la meilleure classification de l'ensemble des semaines a été adopté. Un modèle global de période de production a été paramétré pour l'ensemble des régions et des années de production.

Afin de vérifier la stabilité du modèle lorsqu'appliqué à des données qui n'ont pas servies à le paramétrer, une validation croisée (cross validation) a été effectuée sur les modèles (Bradley et Gong 1983). La validation croisée consiste à séparer aléatoirement le jeu de données en 10 portions de même dimension pour ensuite paramétrer le modèle avec 9 des 10 portions et vérifier l'ajustement du modèle sur la dixième portion. Cette étape est répétée pour chacune des portions du jeu de données et la moyenne des statistiques d'ajustement sont compilées afin de porter un jugement sur le comportement du modèle.

2.2.5 Modèles de production de sirop d'érable

L'approche de la régression multiple a été choisie afin de tenir compte de plusieurs variables influençant la production. Une matrice de corrélation incluant les variables du Tableau 2.2 et les valeurs de production annuelle totale de sirop d'érable a été construite. Des graphiques mettant en relation ces mêmes variables avec la production totale ont été produits afin de détecter la présence de relations non linéaires que la matrice de corrélation n'aurait pu détecter. Les variables fortement corrélées et les variables dont l'analyse graphique suggérait une relation avec la production de sirop ont été utilisées individuellement en tant que variables prédictives dans un modèle linéaire mixte (Eq.2).

$$\text{Eq.2} \quad \hat{y} = b_0 + \beta_0 + (\beta_1 + b_1)x_1 + \cdots (\beta_n + b_n)x_n + \epsilon$$

Où : y est la production annuelle de sirop d'érable pour une région donnée, b_0 à b_n sont les effets aléatoires du modèle spécifique à chacune des régions, β_0 à β_n sont les effets fixes du modèle, x_1 à x_n sont des variables explicatives indépendantes et ϵ est l'erreur résiduelle du modèle.

Pour les modèles à l'échelle provinciale, un effet aléatoire tenant compte de la région a été ajouté sur tous les coefficients du modèle. La même méthode mais avec un effet aléatoire sur l'année a été employée pour les modèles régionaux. Lorsque la variance des effets aléatoires s'est avérée être négligeable l'effet aléatoire a été retiré du modèle (Pinheiro et Bates, 2000). L'insertion d'effets aléatoires permet une estimation juste du terme d'erreur du modèle compte tenu de la structure hiérarchique des données (production subdivisée par région). De plus, le modèle mixte avec effets aléatoires sur les régions permet d'obtenir des prédictions de production spécifiques à chacune des régions. Le modèle mixte a été paramétré à l'aide de la fonction « lmer » (Bates et al. 2012), fonction du logiciel de statistiques R. Les conditions de validité de la régression, soit l'homogénéité de la variance, la normalité des résidus et la normalité des effets aléatoires ont été vérifiés graphiquement.

Les différents modèles obtenus ont été comparés sur la base de la valeur de leur AIC. Le modèle avec la plus faible valeur de AIC a été retenu comme modèle de base. Une matrice de corrélation dans laquelle la production de sirop a été remplacée par les résidus du modèle de base a été produite. Les résidus du modèle de base ont également été analysés graphiquement en fonction des variables précédemment mentionnées afin de détecter des effets non linéaires. Les variables présentant les plus fortes corrélations et celles dont le patron de résidus présentait une distribution non aléatoire ont été ajoutées une à une au modèle de base. Advenant le cas où un effet non linéaire était soupçonné, la variable portée au carré pouvait également être ajoutée simultanément afin de capturer un éventuel effet quadratique. Les modèles modifiés ont alors été comparés sur la base de la valeur de leur AIC. Le modèle modifié avec la plus faible valeur de AIC a été retenu. Le modèle modifié a alors été comparé au modèle de base à l'aide d'un test du ratio de vraisemblance. Si le modèle modifié était jugé par le test meilleur que le modèle de base, le modèle modifié était conservé. La procédure a été répétée jusqu'à ce qu'aucune nouvelle variable ne permette d'améliorer le modèle. Les interactions simples entre les variables du modèle final ont ensuite été ajoutées au modèle final. Un test du ratio de vraisemblance a été effectué afin de vérifier si l'ajout des interactions améliorait le modèle. Si l'ajout d'interactions n'améliorait pas le modèle, le modèle final était conservé tel quel. Dans le cas contraire, les interactions dont le coefficient n'était pas significativement différent de zéro étaient enlevées du modèle une par une en débutant par l'interaction la moins significative. Après chaque retrait d'interaction, le modèle était re-paramétré et comparé à l'aide du test de ratio de vraisemblance au modèle incluant l'ensemble des interactions. Si le maximum de vraisemblance du modèle diminué n'était pas significativement différent du modèle incluant toutes les interactions, le modèle diminué était conservé et la procédure était répétée jusqu'à ce que le modèle diminué

soit significativement moins bon que le modèle avec toutes les interactions, le dernier modèle diminué non significativement différent du modèle avec toutes les interactions a été conservé comme modèle final.

Une procédure de régression pas à pas (Stepwise) a également été utilisée afin de paramétrer des modèles de production. La fonction « step » du logiciel de statistique R a été utilisée afin de sélectionner les variables incluses dans les régressions pas à pas. La sélection des variables à inclure dans le modèle s'est faite à l'aide de l'AIC et des seuils de 2 à 5 ont été alternativement considérés afin d'inclure ou d'exclure une variable du modèle. L'équation sélectionnée par la régression pas à pas a ensuite été re-paramétrée dans un modèle mixte avec la fonction « lmer » du logiciel R. Cette étape a été effectuée afin de tenir compte de la structure hiérarchique des données dans l'estimation du terme d'erreur.

Des statistiques d'ajustement tel que l'erreur moyenne (RMSE, Eq.3) et le coefficient de détermination ajusté (R^2_{adj} , Eq.4) ont été calculées pour les modèles sélectionnés sur la base de l'AIC. Une attention a également été portée sur le nombre de variables utilisées par le modèle et sur le patron des résidus afin de porter jugement sur sa performance. Une validation croisée a été effectuée sur les modèles retenus.

$$\text{Eq. 3} \quad \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - y_i)^2}{n-p}}$$

$$\text{Eq. 4} \quad 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - y_i)^2 / (n-p-1)}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2 / (n-1)}$$

Où : $\hat{y}_i$ est la prédiction du modèle pour l'observation i de la variable dépendante, y_i est la $i^{\text{ème}}$ observation de la variable dépendante, $\bar{y}$ est la moyenne des observations de la variable dépendante, n est le nombre d'observations de la variable dépendante et p est le nombre de paramètres du modèle.

2.3 Résultats et discussion

2.3.1 Production et période de production

Le Tableau 2.1 cité précédemment nous renseigne sur les variations régionales de la production de sirop d'érable. On remarque que la production annuelle moyenne par entaille varie de 1,84 lb en Mauricie à 2,69 lb dans la région de Valleyfield. Par contre, la variation de la production annuelle totale est relativement semblable entre les régions (Tableau 2.1, Figure 2.2).

Nous remarquons également que la durée de la période de production varie très peu, passant de 31 jours pour la Mauricie à 38 jours pour le Centre du Québec. Le début de la période de production arrive en moyenne le 65^{ième} jour julien, soit autour du 6 mars, dans les régions de Saint-Hyacinthe et de Valleyfield alors que la période de production commence autour du 24 mars (83^{ième} jour julien) dans le Bas-Saint-Laurent. Le début de la production est donc décalé de 18 jours, soit 2-3 semaines dans la zone d'étude. Cette différence s'explique par le gradient de température dans la zone d'étude qui est d'environ 4 °C. On peut estimer que le changement dans le début de la période de production est donc d'environ 4 jours par degré °C.

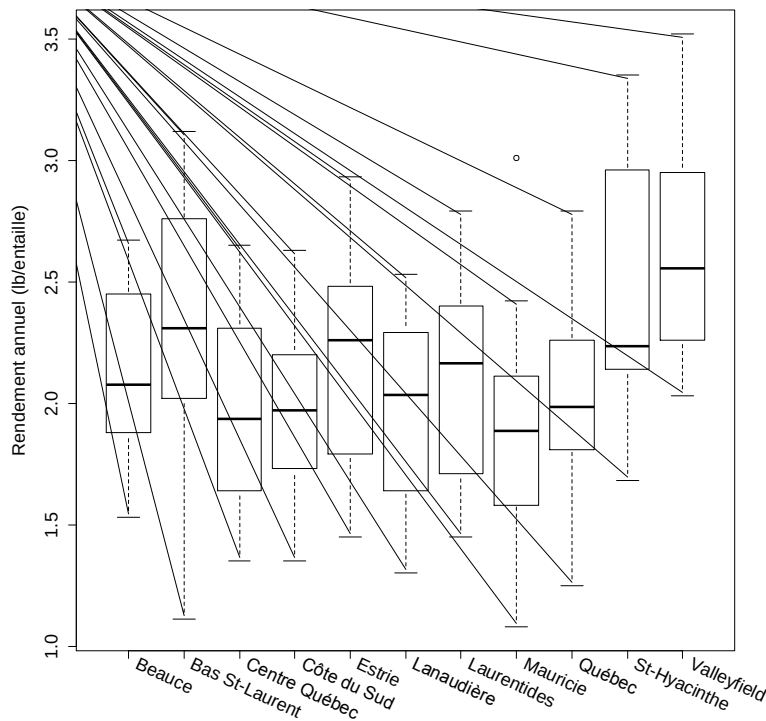


Figure 2.2. Variations du rendement moyen à l'entaille entre les régions.

Les différences de production annuelle moyenne par entaille entre régions pourraient être expliquées partiellement par la condition des érablières. Des arbres plus gros avec des cimes plus grandes sont généralement associés à des productions de sève plus élevées. Les deux régions présentant la plus grande productivité sont celles de Saint-Hyacinthe et de Valleyfield, deux régions situées en partie dans le domaine bioclimatique de l'érablière à caryer où la saison de croissance est la plus longue. Ces deux régions ont également subi la « tempête de verglas » de 1998. De nombreux arbres ont donc été endommagés dans ces régions et pourraient être plus sensibles aux insectes et maladies. Il est connu que les arbres en période de stress augmentent leur réserves de sucres (Sauvesty et al. 1993), sur une courte période de temps, leur rendement en sirop d'érable pourrait alors être supérieur. D'autres facteurs comme des différences dans les méthodes d'exploitation (équipement utilisé, fin de la saison etc.) et de la durée de la période de

production pourraient également expliquer ces différences régionales de productivité. On remarque que la période de coulée moyenne la plus courte se retrouve en Mauricie (31 jours), la région qui a également la production annuelle de sirop par entaille la plus faible. Il est cependant difficile de savoir si la durée plus courte de la saison de production est due à des facteurs climatiques ou humains. Par opposition, la période de production la plus longue se retrouve sur la Côte du Sud (38 jours). La longue période de production dans la région de la Côte du Sud n'est cependant pas associée à une forte productivité puisque la production annuelle moyenne de cette région (1,98 lb/entaille) se situe légèrement sous la moyenne provinciale (2,13 lb/entaille).

2.3.2 Modèle de prédiction de la période de production

Le modèle logistique de prédiction de la période de production paramétré avec les moyennes climatiques régionales produit de bons résultats tant globalement que pour chacune des régions. Le modèle utilise le cumulatif des événements de gel/dégel avec un seuil de dégel établis à trois degrés Celsius (FrThw3:NbCum), ainsi qu'une forme quadratique de cette même variable et le cumulatif des degrés/jours de croissance (GDDCum).

$$\text{Présence de coulée} = - 5.09 + 0.722 \text{ FrThw3:NbCum} - 0.014 (\text{FrThw3:NbCum})^2 - 0.07 \text{ GDDCum}$$

L'effet positif du gel/dégel et de l'augmentation de la température au printemps sur la coulée de la sève d'érable est un phénomène bien connu (Bernier et Plamondon 1980) et est reflété par l'utilisation de ces variables dans les modèles.

Le modèle global réussit à bien classer les semaines selon leur appartenance ou non à la période de production. Selon les résultats de la validation croisée, les semaines incluses dans la période de production sont bien identifiées dans 83% des cas. En ce qui concerne la classification des semaines ne faisant pas partie de la période de production, un taux de succès de 95% est atteint.

2.3.3 Modèle de production de sirop d'érable

Le modèle de production totale de sirop d'érable paramétré avec les données régionales climatiques (Tableau 2.5) prédit une production proportionnelle au nombre total de jours avec une température moyenne entre 0 et 8 degrés Celsius (Tavg0_8C:NbCum). Le modèle prédit également une augmentation de la production avec l'intensité du gel lors des événements de gel/dégel avec un seuil de dégel de 3°C (FrzThw3:IntensFrzCum) et avec la température moyenne hebdomadaire des mois de juin à octobre de l'année précédente inclusivement (TavgJO). La production totale est par ailleurs diminuée lorsque la température hebdomadaire moyenne maximale du mois de janvier (TmaxJanv) est élevée et par l'interaction entre cette dernière variable et la variable FrzThw3:IntensFrzCum.

$$\text{Rendement annuel (lb/entaille)} = 0.578 + 0.006 \text{ FrzThw3:IntensFrzCum} - 0.124 \text{ TmaxJanv} + 0.071 \text{ TavgJO} + 0.017 \text{ Tavg0_8C:NbCum} - 0.01 \text{ FrzThw3:IntensFrzCum} * \text{TmaxJanv}$$

Le modèle de production totale comprends des variables de température et de gel-dégel ce qui n'est pas surprenant puisque la coulée de sève d'érable se produit lorsque des événements de gel/dégel ont cours (Bernier et Plamondon 1980). Le processus fait varier la pression à l'intérieur du tronc de l'arbre qui, à cause d'une baisse de pression, absorbe l'eau du sol lorsque la température baisse et expulse de la sève par l'entaille lorsque la pression à l'intérieur du tronc augmente avec la température. Une température de 2-4°C permet quant à elle une optimisation de l'activité enzymatique de l'amylase ce qui résulte en une sève plus sucrée et donc d'une production accrue de sirop. La corrélation positive entre la température moyenne des mois de juin à octobre et la production totale de sirop d'érable pourrait être associée à un stress hydrique des arbres accru lorsque la température de cette période est élevée, les arbres stressés produisant une plus grande quantité de sucres (Sauvesty et al. 1993). Nous n'avons toutefois pas détecté de relations significatives entre l'intensité des stress hydriques de l'été précédent. Une croissance accrue associée à une photosynthèse plus élevée durant les saisons de croissance chaudes pourrait donc contribuer à produire une sève plus sucrée et favoriser un rendement en sirop plus élevé lors de la récolte au printemps suivant. Pour ce qui est de l'effet de la température de janvier son interprétation est plus délicate car nous avons un effet d'interaction avec les cycles

gel/dégel autour de 3°C. L'observation de la variation expliquée par ces deux facteurs et de leur interaction pour la période de 1999-2010 suggère qu'un mois de janvier chaud devra être compensé par des cycles autour de 3°C plus intensifs pour avoir une bonne production et vice versa pour un mois de janvier froid. Un dégel au mois de janvier pourrait, tel que mentionné par Duchesne et al. (2009), diminuer la couche de neige au sol et par la suite affecter les racines des arbres si un gel profond se produit par la suite. Le gel des racines diminue l'écoulement et le taux de sucre de la sève d'érable pour plusieurs années (Robitaille et al. 1994).

L'utilisation d'une équation linéaire mixte pour prédire la production de sirop d'érable permet d'obtenir de coefficients de régression spécifiques à chaque niveau hiérarchique. Dans le cas de cette étude, le seul niveau hiérarchique qui a été inclus dans l'analyse des données est celui de la région. Les modèle de production totale fait varier l'ordonnée à l'origine (intercepte) pour chacune des régions (Tableau 2.3). L'ajout d'effets aléatoires sur les coefficients des autres variables du modèle a eu un effet minime sur les prédictions et les effets aléatoires ont été enlevés du modèle. On peut donc conclure que l'effet des variables du modèle sur la production totale de sirop d'érable est similaire pour l'ensemble des régions.

Tableau 2.3. Coefficients du modèle de production totale de sirop d'érable avec moyennes régionales climatiques.

Région	Variables						RMSE	R ²
	Intercept	FrTh3Intens FrzCum	TmaxJ	TavgJO	Tavg0_8: NbCum	FrThw3Intens FrzCum*TmaxJan		
Beauce	0.670	0.0059	-0.124	0.0713	0.0165	-0.0011	NA	NA
Bas-St-Laurent	0.676	0.0059	-0.124	0.0713	0.0165	-0.0011	NA	NA
Centre du Québec	0.377	0.0059	-0.124	0.0713	0.0165	-0.0011	NA	NA
Côte du sud	0.471	0.0059	-0.124	0.0713	0.0165	-0.0011	NA	NA
Estrie	0.695	0.0059	-0.124	0.0713	0.0165	-0.0011	NA	NA
Lanaudière	0.462	0.0059	-0.124	0.0713	0.0165	-0.0011	NA	NA
Laurentides-Outaouais	0.554	0.0059	-0.124	0.0713	0.0165	-0.0011	NA	NA
Mauricie	0.257	0.0059	-0.124	0.0713	0.0165	-0.0011	NA	NA
Lévis	0.429	0.0059	-0.124	0.0713	0.0165	-0.0011	NA	NA
St-Hyacinthe	0.824	0.0059	-0.124	0.0713	0.0165	-0.0011	NA	NA
Valleyfield	0.942	0.0059	-0.124	0.0713	0.0165	-0.0011	NA	NA
Tout	0.578	0.0059	-0.124	0.0713	0.0165	-0.0011	0.318	0.604

Les statistiques d'ajustement du modèle de production totale avec moyenne régionale climatique montrent que le modèle prédit environ 60% de la variation de la production totale de sirop d'érable ($R^2=0.60$) avec une erreur moyenne de 0.32 lb/entaille.

Même si le modèle semble peu enclin à prédire avec précision les variations inter annuelles de production, son intervalle de confiance sur la moyenne des prédictions est relativement petit. Cela devrait donc permettre des estimations fiables des effets des variables utilisées par le modèle sur la production annuelle de sirop d'érable.

Lorsque soumis à la validation croisée, l'erreur sur le modèle augmente. La portion de variation expliquée par le modèle baisse à 50% ($R^2=0.50$) et l'erreur moyenne augmente à 0,36 lb/entaille. Ce comportement du modèle est normal puisque la validation croisée permet de vérifier le comportement du modèle lorsqu'appliqué à des données qui n'ont pas servi à sa paramétrisation. Le fait que le modèle ne perde que 10% de la variation expliquée lors de la validation croisée nous permet d'avoir confiance quant à la robustesse du modèle et à son applicabilité dans de nombreuses situations.

La performance de notre modèle de production totale se compare à celles obtenues par d'autres modèles. Ainsi Pothier (1995) obtient pour une érablière dont une station météorologique est située à proximité, un R^2 de 0.70 pour la prédiction de la quantité de sève récoltée. Duchesne et al. (2009) expliquent 84% de la variation de la production de sirop d'érable mais cette prédiction est faite au niveau de la province de Québec et ne tient pas compte des variations entre régions. Lorsque l'on juge de la performance des modèles de production de sirop d'érable, il faut également se rappeler que ces modèles seront utilisés principalement pour cerner les effets des changements climatiques sur la moyenne de la production de sirop d'érable et non de prédire avec précision la production d'une année précise. Plus récemment, Duchesne et Houle (2014), ont construit un modèle avec les données de production du Québec et des États du Nord-Est des États-Unis. Ce modèle qui prend en charge autant les variations annuelles de production que le large gradient climatique de la zone d'étude, explique 42% de la variation dans la production totale annuelle. Les variables incluses dans le modèle sont relativement semblables à celles obtenus dans le cadre du présent travail pour le modèle de production totale annuelle.

Plusieurs hypothèses peuvent être avancées pour expliquer les limites des modèles de production totale. L'adéquation entre les conditions climatiques observées dans l'érablière et à la station météorologique pourrait être une cause. En effet, il aurait idéalement fallu pouvoir compter sur des observations météo faites directement sur les sites de production de sirop d'érable. Certaines érablières étant situées à plusieurs kilomètres d'une station météorologique, il est possible que pour les régions montagneuses où l'altitude et l'exposition de la pente changent les conditions climatiques, que les conditions observées aux stations météorologiques soient plus où

moins représentatives de celles présentes sur les lieux de production. L'échelle à laquelle est faite la prédiction peut également en influencer la précision. Étant donné que nous travaillions au niveau régional, il est normal d'avoir plus de variation dans les productions annuelles puisqu' à l'échelle de la province, les variations entre productions annuelles régionales peuvent s'annuler les unes et les autres et diminuer la variation au niveau provincial. Une autre source d'imprécision des modèles est la non-prise en compte de certaines variables climatiques possiblement d'importance comme par exemple, la quantité de neige au sol, la pression barométrique et la présence de couvert nuageux limitant l'exposition au soleil (Pothier 1995). L'ensoleillement est une variable dont nous ne disposons pas notre étude et dont il a été mentionné quelle influençait la quantité de sève récoltée (Pothier 1995). La présence du soleil modifie l'effet de la température sur la coulée de la sève, la partie du tronc exposée au soleil pouvant être plus chaude de plusieurs degrés et favorisant ainsi l'expansion des gaz dissous dans les fibres et la coulée.

D'autres facteurs non liés au climat peuvent également être avancés pour expliquer l'erreur résiduelle des modèles. Notons d'abord la possibilité que les méthodes de production de sirop aient changée chez les producteurs sondés au cours des 13 années durant lesquelles les données ont été recueillies. Le changement de méthode de production ayant été reconnu pour avoir amélioré la productivité des érablières (Rondeaux 2007). Il est également reconnu que des caractéristiques situationnelles comme le type de sol, l'âge des érablières, le diamètre des arbres entaillés puissent influencer la production de sirop d'érable.

Le fait que nous ayons considéré plusieurs variables climatiques ayant des liens physiologiques ou physiques avec la quantité de sève récoltée et avec son taux de sucre nous porte à croire que les effets du climat sont bien saisis par les modèles et que la variance résiduelle pourrait être majoritairement attribuée à des variables autres que climatiques. Ceci nous porte à avoir confiance quant à la capacité du modèle à prédire les changements de la moyenne de la production de sirop d'érable associée aux changements climatiques futurs.

Chapitre 3. Projection des déplacements de la période de coulée et de la production future de sirop d'érable

Daniel Houle (MFFP-Ouranos) et Travis Logan (Ouranos)

3.1 Objectif

Dans la section précédente, deux modèles ont été construits qui ont permis de prédire le début et la fin de la période de coulée (et donc la durée de période de coulée) ainsi que la production totale annuelle de sirop. Ces modèles peuvent être utilisés, couplés à des scénarios climatiques, pour projeter les déplacements dans la période de coulée ainsi que la production future de sirop, et ce par région. Dans cette section, nous présentons les projections pour les périodes 2046-2065 et 2081-2100.

3.2 Méthodologie

3.2.1 Scénarios Climatiques

Un ensemble de 77 simulations provenant de modèles climatiques globaux (MCG) a été utilisé pour les projections futures (Annexe 3.1). Les données de cet ensemble proviennent des archives de la troisième phase du «Coupled Model Intercomparison Project » (CMIP3, Meehl et al. 2007), qui met à la disposition des chercheurs un grand nombre de simulations de MCG produites par plusieurs centres de modélisation à travers le monde. Les données simulées sont disponibles pour trois scénarios d'émission de gaz à effet de serre (GES) issus du rapport spécial sur les scénarios d'émissions (SRES, Special report on emissions scenarios: A1b, A2 et B1; Nakicenovic et al. 2000). Cet ensemble de simulations climatiques a été endossé par le Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC) et forme la base du 4^{ième} rapport d'évaluation du GIEC publié en 2007. Les simulations climatiques proviennent d'un total de 14 modèles climatiques différents avec une moyenne d'environ cinq simulations par modèle de climat. Les simulations sont séparées assez également entre les scénarios d'émissions GES, avec 28 simulations SRES A1b, 22 simulations SRES A2, et 27 simulations SRES B1. Les Figures 3.1a et 3.1b montrent l'évolution des émissions de GES et de la température moyenne globale suivant plusieurs scénarios d'émissions de GES, endossés par le GIEC. Les données quotidiennes simulées, nécessaires pour calculer les changements de dates de coulée et de production totale, sont disponibles pour trois horizons temporels soit 1971 à 2000 (période de référence), 2046 à 2065 (horizon 2050) et 2081 à 2100 (horizon 2090).

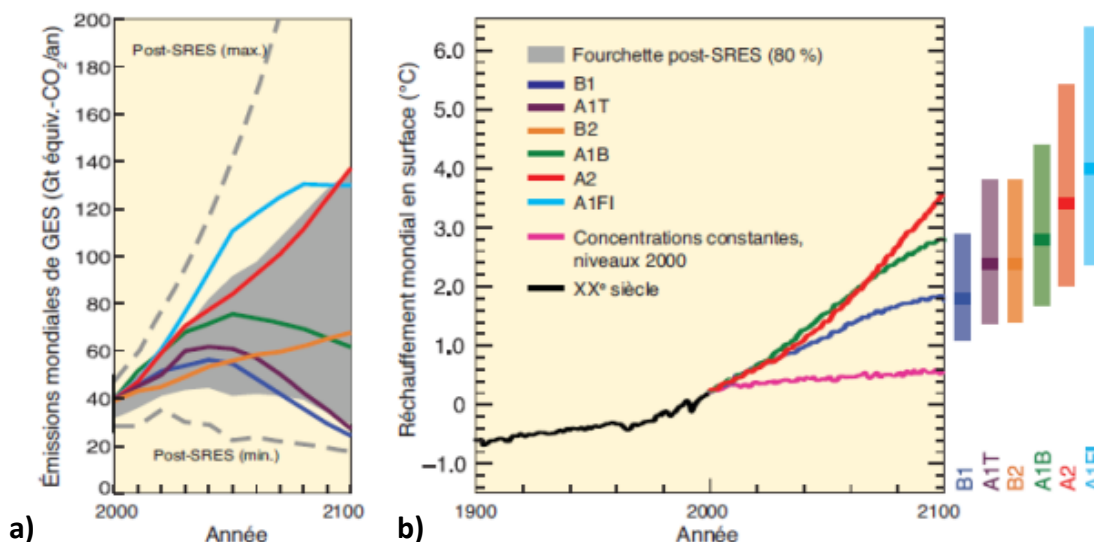


Figure 3.1. a) Émissions mondiales des GES (soit le CO₂, le CH₄, le N₂O et les gaz fluorés) illustrant six scénarios de SRES (lignes colorées) et b) Évolution de la température moyenne globale selon plusieurs simulations MCG regroupées par divers scénarios d'émissions de gaz à effet de serre de la famille SRES (source GIEC 2007, WG1-AR4).

Le développement de scénarios du climat futur implique dans la plupart des cas une étape de post-traitement des sorties des modèles climatiques afin de pallier à leurs imperfections et à leur résolution parfois trop grossière. Afin de construire des scénarios climatiques locaux et adaptés aux projections futures de la production de sirop, une méthode de post-traitement a été appliquée sur les variables climatiques de base (soit les températures quotidiennes maximales et minimales et les précipitations quotidiennes totales). Cette méthode, décrite dans Mpelasoka et Chiew (2009) (et nommée « daily translation »), consiste à ajuster les biais présents dans les simulations MCG par rapport aux observations locales. Un classement par quantiles est d'abord effectué sur les valeurs quotidiennes simulées par les MCG en climat de référence ainsi que pour les observations. Ensuite, les biais pour les différentes classes sont calculés pour chacune des simulations climatiques. Finalement, une correction de biais par classe quantile est effectuée sur les simulations climatiques pour la période de référence et les deux horizons futurs. Cette méthode de post-traitement se compare avantageusement à d'autres méthodes de mise à l'échelle statistique (Themeßl et al., 2010; Maraun et al., 2010). Les observations de référence proviennent de la banque de données quotidiennes sur grille (~10km x 10km) décrite dans Hopkinson et al. (2011) et Hutchinson et al. (2009). La méthodologie est appliquée sur chaque point de grille de 10x10km des données observées qui correspondent à la localisation des codes postaux des érablières de la Figure 2.1. Pour chaque point de grille, les biais sont calculés par rapport à la tuile de MCG la plus proche.

3.2.2 Projections futures de production de sirop

Les projections futures sont produites à partir du modèle de période de production et du modèle de production totale de sirop calibrés avec les moyennes régionales. Pour chaque région, les variables climatiques requises sont calculées en utilisant les sorties de la méthode « daily translation » pour les 77 simulations pour les 3 horizons d'intérêt. Ces variables sont utilisées en premier lieu dans le modèle de période de coulée pour déterminer le début, la fin et la longueur de la période de coulée et en deuxième lieu, dans le modèle de production de sirop afin d'obtenir des projections de la production totale annuelle. Dans les cas rares où un modèle projette une absence de saison de coulée pour une année donnée, la production totale de l'année en question est considérée comme nulle (valeur de zéro).

3.3 Résultats et discussion

3.3.1 Début, fin et durée de la saison de coulée

Le Tableau 3.1 montre les résultats des déplacements projetés, en nombre de jours, des dates de début et de fin de la coulée, pour chacune des régions. Il est important de préciser ici que le terme « période de coulée » signifie la période pendant laquelle l'eau d'érable est transformée en sirop. Il est toutefois possible que la période de coulée réelle puisse être supérieure dans les cas où les producteurs auraient cessé de produire du sirop à cause de la mauvaise qualité de l'eau d'érable, particulièrement en fin de saison.

De façon générale, pour l'ensemble des régions, les débuts et les fins de saison se produiront environ 7-11 jours plus tôt pour la période 2046-2065 et 12-16 jours plus tôt pour la période 2081-2100. Nous avons aussi choisi d'illustrer ce phénomène à l'aide d'une figure en prenant comme exemple la région de Saint-Jean Valleyfield (Figure 3.2). Les projections montrent une diminution de la durée de la saison de croissance de 1-2 jours mais ces changements ne sont pas significatifs étant donné que les dates de début et de fin se déplacent sensiblement de façon égale.

Les projections de début et de fin de saison ainsi que de la durée de la saison suggèrent que la variabilité sera plus élevée dans le futur tel qu'illustré par les coefficients de variations associés aux dates moyennes de début et de fin de saison, et de la durée de la saison, qui augmentent systématiquement pour les périodes 2046-2065 et 2081-2100 (Tableau 3.1). Ce phénomène est aussi illustré par l'aplatissement de la courbe de densité de probabilité pour les débuts (Figure 3.2a), fins (Figure 3.2b) et durées (Figure 3.2c) de saison dans le futur. Ce phénomène est en fait causé par la variabilité induite par les modèles climatiques, qui augmente dans le futur étant donné les différents scénarios de gaz à effet de serre considérés, et n'est pas représentative d'une plus grande variabilité climatique dans le futur. La question de la variabilité est importante.

Tableau 3.1. Projection du début et de la fin de la saison de coulée (jours juliens, jj). La durée de la saison de coulée (jours, j) ainsi que les différences entre le début et la fin de la période de coulée entre les périodes futures et la période de référence (1981-2000) sont aussi indiquées (jours, j).

Région	Variable	Date moyenne pour chaque période (n = 77 scénarios)			Delta Date moyenne pour chaque période (n = 77 scénarios)	
		(1971-2000)	(2046-2065)	(2081-2100)	(2046-2065)	(2081-2100)
Bas-Saint-Laurent	Début (jj)	86.2 ± 1.4	76.5 ± 5.3	69.3 ± 7.9	-9.7 ± 5.0	-16.9 ± 7.7
	Fin (jj)	123.1 ± 0.8	114.0 ± 5.4	108.2 ± 7.7	-9.1 ± 5.2	-14.8 ± 7.5
	Longueur (j)	43.9 ± 1.9	44.5 ± 6.3	45.6 ± 8.1	0.6 ± 5.8	1.7 ± 7.5
Beauce	Début (jj)	74.5 ± 1.9	62.7 ± 5.3	55.5 ± 7.1	-11.8 ± 5.5	-19.0 ± 7.2
	Fin (jj)	114.1 ± 1.1	103.2 ± 5.1	97.2 ± 7.1	-10.9 ± 4.8	-17.0 ± 6.9
	Longueur (j)	46.6 ± 2.5	47.1 ± 7.6	47.8 ± 9.2	0.5 ± 7.0	1.2 ± 8.2
Centre du Québec	Début (jj)	69.4 ± 1.7	56.3 ± 5.3	50.1 ± 7.2	-13.1 ± 5.6	-19.3 ± 7.1
	Fin (jj)	108.7 ± 1.1	98.4 ± 4.6	92.3 ± 6.9	-10.3 ± 4.4	-16.4 ± 6.7
	Longueur (j)	46.2 ± 2.2	48.7 ± 7.2	48.6 ± 9.1	2.4 ± 6.9	2.4 ± 8.5
Côte-du-Sud	Début (jj)	81.3 ± 1.5	71.1 ± 5.1	64.3 ± 7.0	-10.3 ± 4.8	-17.0 ± 6.7
	Fin (jj)	118.3 ± 0.9	108.6 ± 4.7	102.8 ± 7.1	-9.7 ± 4.5	-15.5 ± 6.9
	Longueur (j)	44.0 ± 2.0	44.2 ± 6.3	44.9 ± 8.7	0.2 ± 5.3	0.9 ± 7.5
Estrie	Début (jj)	67.5 ± 1.9	55.0 ± 5.7	49.0 ± 7.7	-12.4 ± 6.1	-18.4 ± 7.6
	Fin (jj)	109.4 ± 1.1	98.2 ± 5.7	91.7 ± 7.6	-11.2 ± 5.3	-17.6 ± 7.2
	Longueur (j)	48.9 ± 2.3	49.6 ± 8.5	48.8 ± 10.4	0.7 ± 8.2	-0.1 ± 9.6
Lanaudière	Début (jj)	77.3 ± 1.5	67.0 ± 4.8	60.4 ± 6.6	-10.4 ± 4.6	-16.9 ± 6.2
	Fin (jj)	113.5 ± 0.8	103.2 ± 4.9	98.0 ± 6.3	-10.3 ± 4.7	-15.5 ± 6.1
	Longueur (j)	43.1 ± 1.9	43.0 ± 6.6	44.1 ± 7.9	-0.2 ± 5.9	1.0 ± 6.9
Lévis-RiveNord-Lotbinière	Début (jj)	82.5 ± 1.8	72.4 ± 4.9	65.9 ± 6.6	-10.0 ± 4.5	-16.6 ± 6.4
	Fin (jj)	118.2 ± 0.8	108.7 ± 4.6	103.3 ± 6.6	-9.5 ± 4.5	-14.9 ± 6.4
	Longueur (j)	42.7 ± 2.0	42.9 ± 6.2	43.8 ± 8.1	0.3 ± 5.2	1.1 ± 7.0

Mauricie	Début (jj)	82.5 ± 1.6	73.5 ± 4.7	67.3 ± 6.3	-9.0 ± 4.2	-15.1 ± 5.9
	Fin (jj)	116.7 ± 0.9	107.8 ± 4.7	102.7 ± 6.1	-8.9 ± 4.6	-14.0 ± 5.9
	Longueur (j)	41.2 ± 1.9	41.0 ± 6.2	41.8 ± 7.4	-0.3 ± 5.3	0.6 ± 6.3
Outaouais-Laurentides	Début (jj)	76.3 ± 1.5	64.7 ± 5.5	57.9 ± 6.8	-11.6 ± 5.5	-18.4 ± 6.6
	Fin (jj)	111.6 ± 0.9	101.3 ± 4.9	95.8 ± 6.7	-10.3 ± 4.7	-15.8 ± 6.6
	Longueur (j)	42.3 ± 1.7	43.3 ± 7.0	44.6 ± 7.7	1.0 ± 6.6	2.3 ± 7.1
Saint-Hyacinthe	Début (jj)	61.7 ± 1.6	48.3 ± 6.3	42.9 ± 7.6	-13.4 ± 6.4	-18.8 ± 7.5
	Fin (jj)	103.5 ± 1.4	92.7 ± 5.0	86.2 ± 7.0	-10.8 ± 4.7	-17.3 ± 6.8
	Longueur (j)	48.8 ± 1.9	50.8 ± 8.5	49.7 ± 10.0	2.1 ± 7.9	0.9 ± 9.3
St-Jean-Valleyfield	Début (jj)	60.6 ± 1.6	47.2 ± 6.3	42.1 ± 7.5	-13.3 ± 5.9	-18.5 ± 7.0
	Fin (jj)	102.7 ± 1.3	91.7 ± 4.9	85.9 ± 6.9	-11.0 ± 4.6	-16.8 ± 6.8
	Longueur (j)	49.1 ± 2.3	51.0 ± 8.5	50.0 ± 10.1	1.9 ± 7.5	0.9 ± 8.9

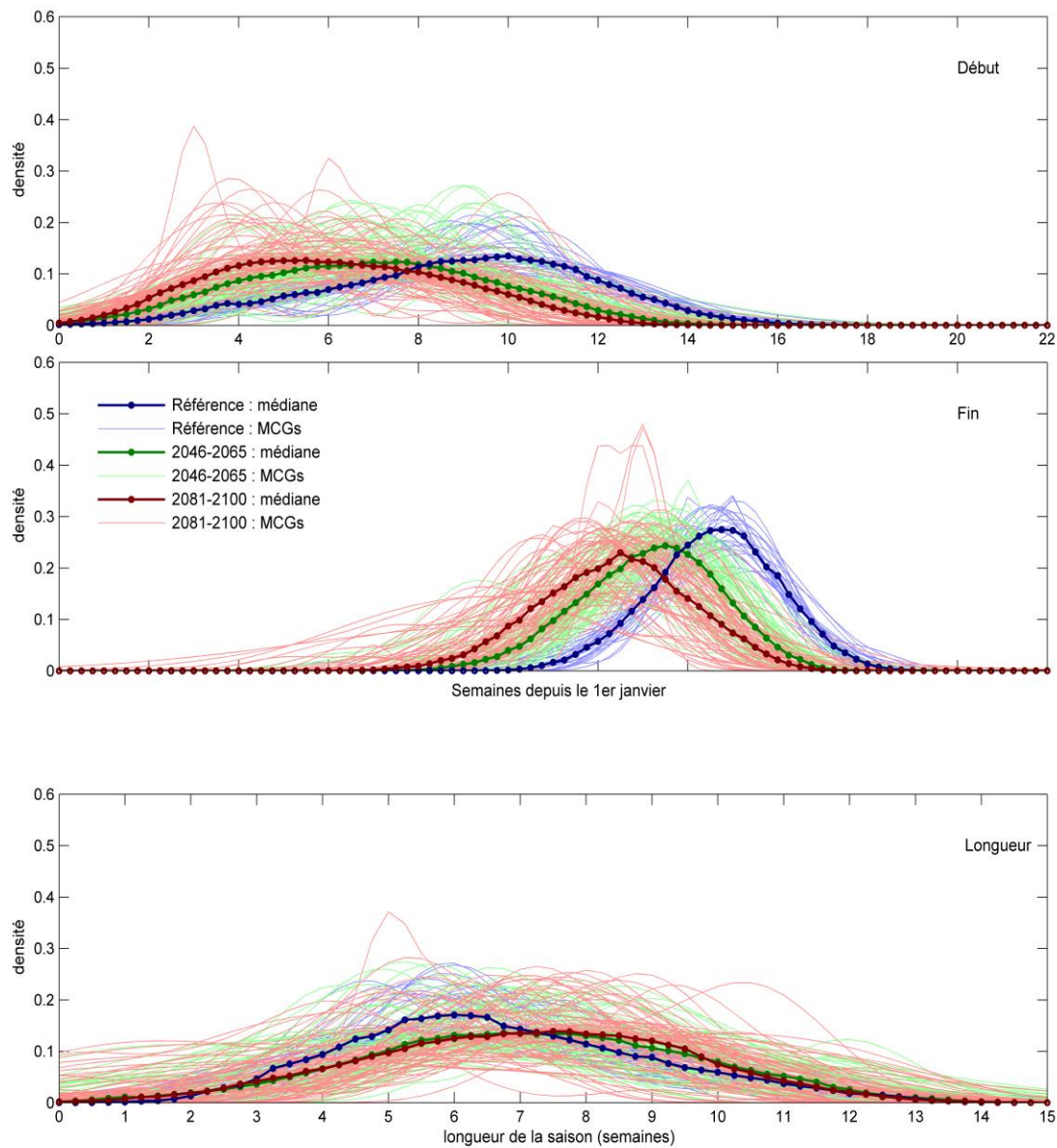


Figure 3.2. Densité de probabilité du début (a) de la fin (b) et de la durée (c) de la saison de coulée pour la région Saint-Jean Valleyfield pour la période de référence (1981-2000) et pour les périodes

2046-2065 et 2081-2100 respectivement. Les valeurs sont calculées à partir d'un ensemble de scénarios climatiques (n=77).

Pour analyser la variabilité de la production de sirop inter-annuelle pour la période actuelle et le futur nous avons calculée l'écart-type de la production annuelle pour chacune des périodes de chacune des simulations. Autrement dit, on compare la variabilité des périodes de chaque simulation entre elles et non les simulations entre-elles. Les résultats sont présentés au Tableau 3.2. En général, on ne décèle pas une augmentation significative des écart-types dans le futur. Cette analyse indique clairement que le déplacement de la saison de coulée ne s'accompagnera pas d'une plus grande variabilité. La conséquence pour l'industrie acéricole et en particulier pour les producteurs est que ces derniers ne seront pas confrontés à une plus grande variabilité dans le processus de coulée et de production de sirop, d'une année à l'autre.

Tableau 3.2. Variabilité (Écart-type moyen $\pm$ écart-type) des dates de début, de fin et de durée de la saison de coulée pour les trois périodes d'études.

Région	Variable	Écart-type pour chaque période (n = 77 scénarios)		
		(1971-2000)	(2046-2065)	(2081-2100)
Bas-Saint-Laurent	Début (jj)	12.3 $\pm$ 2.4	13.2 $\pm$ 2.9	14.4 $\pm$ 3.5
	Fin (jj)	7.4 $\pm$ 1.6	7.7 $\pm$ 1.9	8.8 $\pm$ 2.6
	Longueur (j)	9.6 $\pm$ 1.9	11.2 $\pm$ 2.9	12.4 $\pm$ 3.3
Beauce	Début (jj)	16.4 $\pm$ 2.0	16.4 $\pm$ 3.1	16.8 $\pm$ 3.0
	Fin (jj)	8.5 $\pm$ 1.6	9.4 $\pm$ 2.4	10.7 $\pm$ 2.9
	Longueur (j)	13.4 $\pm$ 2.2	15.2 $\pm$ 2.9	15.6 $\pm$ 3.7
Centre du Québec	Début (jj)	16.8 $\pm$ 2.0	16.8 $\pm$ 3.0	16.6 $\pm$ 2.7
	Fin (jj)	8.2 $\pm$ 1.5	8.9 $\pm$ 1.9	10.3 $\pm$ 3.0
	Longueur (j)	13.8 $\pm$ 2.0	15.5 $\pm$ 3.1	15.2 $\pm$ 3.5
Côte-du-Sud	Début (jj)	14.3 $\pm$ 2.6	14.9 $\pm$ 3.1	15.5 $\pm$ 3.4
	Fin (jj)	7.8 $\pm$ 1.8	8.4 $\pm$ 2.0	9.5 $\pm$ 2.6
	Longueur (j)	11.3 $\pm$ 2.0	13.4 $\pm$ 3.2	13.8 $\pm$ 3.7
Estrie	Début (jj)	17.7 $\pm$ 2.4	17.0 $\pm$ 2.9	16.2 $\pm$ 2.6
	Fin (jj)	9.3 $\pm$ 2.1	9.9 $\pm$ 2.4	11.1 $\pm$ 2.3
	Longueur (j)	14.9 $\pm$ 2.3	15.7 $\pm$ 2.8	15.3 $\pm$ 3.2
Lanaudière	Début (jj)	13.9 $\pm$ 2.0	14.7 $\pm$ 3.0	15.3 $\pm$ 3.5
	Fin (jj)	8.1 $\pm$ 1.4	8.9 $\pm$ 2.1	9.5 $\pm$ 2.4
	Longueur (j)	11.1 $\pm$ 2.2	13.2 $\pm$ 2.8	13.3 $\pm$ 3.3
Lévis-RiveNord-Lotbinière	Début (jj)	12.6 $\pm$ 2.5	13.2 $\pm$ 2.9	14.4 $\pm$ 3.3
	Fin (jj)	7.4 $\pm$ 1.6	8.1 $\pm$ 2.0	9.0 $\pm$ 2.5
	Longueur (j)	9.9 $\pm$ 2.2	12.0 $\pm$ 3.1	12.9 $\pm$ 3.3

Mauricie	Début (jj)	12.0 ± 1.9	12.8 ± 2.9	14.0 ± 3.5
	Fin (jj)	7.6 ± 1.5	8.4 ± 1.9	8.9 ± 2.1
	Longueur (j)	9.6 ± 1.7	11.6 ± 2.8	12.4 ± 3.3
Outaouais-Laurentides	Début (jj)	14.0 ± 1.9	15.4 ± 3.0	16.1 ± 2.9
	Fin (jj)	8.2 ± 1.6	9.0 ± 2.1	9.7 ± 2.3
	Longueur (j)	11.6 ± 2.0	14.0 ± 2.9	13.8 ± 3.1
Saint-Hyacinthe	Début (jj)	17.8 ± 1.7	16.5 ± 3.0	15.5 ± 3.0
	Fin (jj)	8.9 ± 1.9	9.6 ± 2.2	10.8 ± 2.5
	Longueur (j)	15.0 ± 2.0	15.7 ± 2.8	14.9 ± 3.3
St-Jean-Valleyfield	Début (jj)	18.6 ± 1.9	16.7 ± 2.9	15.6 ± 2.9
	Fin (jj)	8.9 ± 1.7	9.8 ± 2.3	10.6 ± 2.5
	Longueur (j)	15.7 ± 1.8	15.8 ± 2.7	15.1 ± 3.4

Cette situation n'enlève pas le fait que les années « extrêmes » continueront de se produire dans le futur. On peut aussi observer sur la Figure 3.2c, que dans la période 2081-2100, la probabilité d'avoir des saisons très courtes et dans certaines années extrêmes, une quasi absence de saison (traits rouges qui croisent l'axe des y indiquant une durée de saison nulle) va augmenter. Il faut noter cependant que ce phénomène va se produire essentiellement dans les régions du sud du Québec où le climat est déjà plus chaud que pour les régions situées plus au nord. Ces dernières seront vraisemblablement épargnées. Il est intéressant de noter qu'une quasi absence de saison ou encore une saison très courte et peu productive a été observée pour certains états du nord-est des États-Unis lors du printemps 2012 qui a été représentatif de ce que le climat futur nous réserve avec des températures printanières, particulièrement en mars, beaucoup plus élevées que les normales de saisons. Ces années de faible production vont vraisemblablement affecter la production totale annuelle.

3.3.2 Production totale annuelle

Les projections de production totale annuelle en lb/entaille sont présentées au Tableau 3.3. Globalement, les résultats indiquent que la production par entaille ne changera pas de façon importante pour l'ensemble des régions. Dans certains cas, comme par exemple pour la région du Bas Saint-Laurent, une faible augmentation de la production est à prévoir. Il est important de bien préciser que ces projections supposent que l'érable à sucre sera en mesure de composer avec des conditions climatiques propices à la coulée qui se produiront de plus en plus tôt. Les données de production observées pour les années de printemps hâtif laissent suggérer que cette possibilité est bien réelle. Cependant, quand cette situation deviendra la norme, il n'est pas impossible que ça puisse devenir problématique pour l'érable à sucre d'un point de vue physiologique. La faible augmentation de production projetée pour certaine région, dont celle du Bas-Saint-Laurent et plus particulièrement pour la période 2081-2100 (Figure 3.3a) est probablement due à l'inclusion dans le modèle de production totale, de la variable « température estivale de l'année qui précède le

printemps d’une année donnée ». Cette variable laisse supposer qu’un climat généralement plus favorable, et donc des étés plus chauds, aura un impact positif sur la vigueur de l’arbre et des peuplements en général, ce qui pourrait augmenter la production de sirop d’un peuplement donné. Ce phénomène où la croissance d’une essence est affectée par les conditions climatiques de l’année qui précède est bien documenté dans les études de dendrochronologie. En fait, l’impact des étés plus chauds affecte toutes les régions et pourrait pallier des conditions climatiques moins favorables à la coulée pour certaines régions. Le cas de Saint-Jean-Valleyfield est un bel exemple (Figure 3.3b). Pour cette région, comme nous l’avons mentionné plus tôt, on observe une proportion plus importante de mauvaises années de production, particulièrement pour la période 2081-2100 (voir intervalle de confiance, zone grise sur la figure), ce qui tend à diminuer la production totale annuelle. Cependant, les étés plus chauds en moyenne tendent à augmenter la production, si bien que la production totale annuelle est comparable à celle de la période de référence (période actuelle).

Tableau 3.3. Production totale annuelle moyenne ($\pm$ écart type) de sirop d’érable (lb/entaille) pour la période de référence et les périodes futures pour chacune des régions étudiées.

Région	Production (lb/entaille) (n = 77 scénarios)		
	(1971-2000)	(2046-2065)	(2081-2100)
Bas-Saint-Laurent	2.03 $\pm$ 0.10	2.11 $\pm$ 0.13	2.14 $\pm$ 0.15
Beauce	2.16 $\pm$ 0.08	2.21 $\pm$ 0.10	2.24 $\pm$ 0.15
Centre du Québec	2.00 $\pm$ 0.07	2.03 $\pm$ 0.10	2.05 $\pm$ 0.13
Côte-du-Sud	2.05 $\pm$ 0.08	2.09 $\pm$ 0.11	2.10 $\pm$ 0.16
Estrie	2.11 $\pm$ 0.08	2.16 $\pm$ 0.10	2.20 $\pm$ 0.13
Lanaudière	1.73 $\pm$ 0.10	1.77 $\pm$ 0.13	1.81 $\pm$ 0.16
Lévis-RiveNord-Lotbinière	2.01 $\pm$ 0.10	2.05 $\pm$ 0.11	2.08 $\pm$ 0.16
Mauricie	1.65 $\pm$ 0.11	1.67 $\pm$ 0.13	1.70 $\pm$ 0.18
Outaouais-Laurentides	1.81 $\pm$ 0.11	1.85 $\pm$ 0.13	1.91 $\pm$ 0.16
Saint-Hyacinthe	2.29 $\pm$ 0.06	2.32 $\pm$ 0.11	2.35 $\pm$ 0.13
St-Jean-Valleyfield	2.47 $\pm$ 0.08	2.48 $\pm$ 0.16	2.49 $\pm$ 0.15

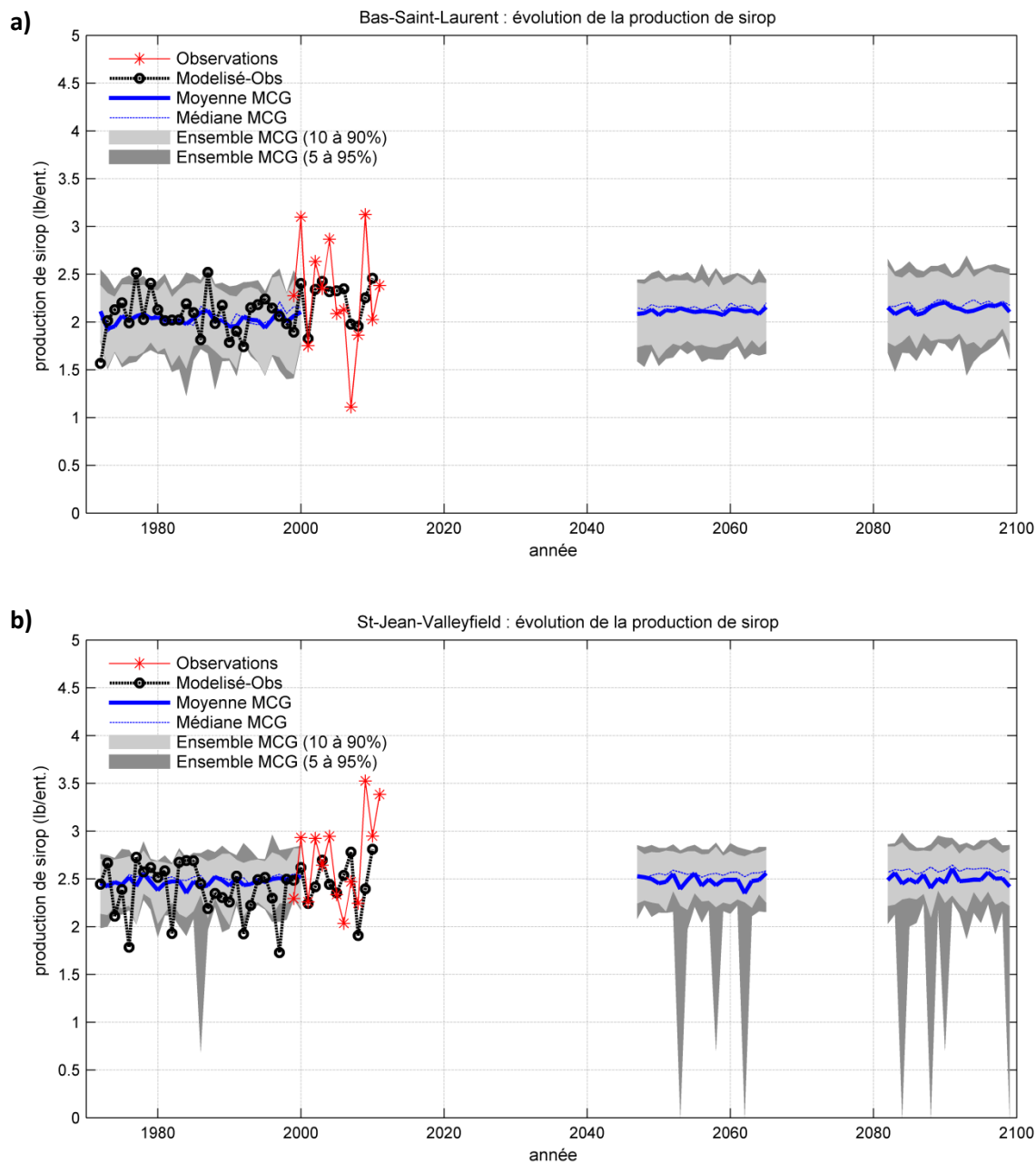


Figure 3.3. Évolution temporelle de la production totale annuelle de sirop d'érable pour les régions du Bas-Saint-Laurent (a) et de Saint-Jean-Valleyfield (a) projetée à partir d'un ensemble de scénarios climatiques (enveloppes grises et lignes bleues; $n=77$) et des observations de Hutchinson et al. 2009 (ligne noire). Les valeurs observées de production sont indiquées par la ligne rouge.

3.3.3 Limites de l'approche de modélisation

L'approche que nous avons utilisée est basée sur certaines suppositions qu'il est important de considérer pour bien mettre les résultats en contexte. Comme nous l'avons mentionné précédemment, les résultats sont valables dans la mesure où l'érable, ainsi que les producteurs, pourront s'adapter à une saison de coulée de plus en plus hâtive. D'autres facteurs sont aussi importants. Parmi ceux-ci, il y a la possibilité que la disparition de plus en plus hâtive du couvert nival augmente la probabilité que le sol puisse geler, étant donné la perte d'isolation thermique de la neige au sol. Ainsi, l'occurrence de périodes de gel tardif alors que le sol est dénudé pourrait causer un gel des racines ce qui aurait inévitablement un impact négatif sur la production de sirop. Le même phénomène de gels tardifs après l'éclosion hâtive des bourgeons pourrait aussi avoir un impact négatif sur la vigueur des peuplements ce qui aurait aussi tendance à diminuer la productivité. Une étude récente suggère que les sols seront en moyenne plus secs dans le futur et que la fréquence de sécheresses importantes va augmenter (Houle et al. 2012). De telles conditions auront aussi vraisemblablement un impact négatif sur les peuplements d'érables à sucre. Bien que la variable « sécheresse » ait été incluse au départ dans la construction du modèle, elle n'a pas été retenue comme ayant un impact significatif sur la production. Cependant, la période pour laquelle on possède des données observées est relativement courte. Dans un climat futur, il se peut aussi qu'un effet « seuil » au niveau du contenu en eau du sol soit plus fréquemment atteint et que cette variable devienne plus importante en tant que déterminant de la vigueur de l'érable. Une plus grande probabilité d'infestation d'insectes et de pathogènes pourrait aussi devenir un facteur important. Finalement, on projette une augmentation de l'aire de distribution de l'érable à sucre plus au nord. Bien que ce type de changement se produise lentement, la zone potentiellement « productive » de sirop d'érable pourrait augmenter ce qui aurait un impact positif sur la production totale annuelle du Québec en autant que cette nouvelle zone soit exploitée activement.

Toutes ces considérations montrent que les projections faites à partir des conditions climatiques qui prévalent pendant la période de coulée (à l'exception de la température de l'été précédent tel que mentionné ci-haut) doivent être interprétées avec prudence.

3.3.4 Conclusions et recommandations

Dans cette étude nous avons pu construire des modèles de prédictions de la période de production ainsi que de la production totale annuelle. Globalement, nos résultats suggèrent une production future peu affectée mais un déplacement de l'ordre de 2-3 semaines dans le début et

la fin de la saison de coulée. Il en découle que les producteurs devront être prêts à entailler tôt et peut-être même à l'avance (rapport du centre ACER). Contrairement à ce que d'autres études ont pu laisser prévoir, il semble que la variabilité interannuelle dans le début et la fin de la saison ainsi que la variabilité de la production totale annuelle, ne sera pas plus importante dans le futur. C'est donc dire que la saison va se déplacer significativement dans le temps mais sans une augmentation de la variabilité. Il semble par contre que les régions plus au sud du Québec connaîtront une plus grande proportion d'années de faible production, dû principalement à des saisons écourtées. Le printemps très hâtif de 2012 a d'ailleurs mené à une mauvaise année, notamment dans le sud-ouest du Québec, ce qui est un avant-goût de ce qui pourrait se produire plus fréquemment dans le futur. Il est intéressant de noter que la grande surface de production est un avantage pour atténuer les impacts d'une mauvaise année. En 2012 par exemple, le bas Saint-Laurent et la Beauce ont eu des bonnes productions ce qui a compensé pour le moins bon rendement du sud-ouest de la province. En revanche aux États-Unis, la récolte a été très moyenne. Il semble d'ailleurs que la production des EU pourrait diminuer particulièrement pour les états les plus au sud et que la position concurrentielle du Québec ne sera pas menacée dans le futur (Debailleul et al. *en préparation*).

Bien que nous soyons en mesure de faire des prédictions quant à la durée de la saison et quant à la production totale annuelle, on ne sait rien des effets potentiels des CCs sur le goût du sirop ainsi que sur ses propriétés. D'autres recherches sont nécessaires pour approfondir cet aspect. D'ailleurs, lors d'un « focus group » (Debailleul et al. *en préparation*), la possibilité de développer des débouchés pour le sirop de fin de saison a été mentionnée par les producteurs comme étant essentielle (propriétés sucrantes ou pharmacologiques). Cela permettrait d'allonger encore plus la période de récolte et ainsi, offrir la possibilité de pallier à une éventuelle diminution des rendements du sirop d'érable « traditionnel », certaines années. L'ensemble des participants ce de

« focus group » (Debailleul et al. *en préparation*) étaient d'avis que les avancées technologiques joueront un rôle majeur dans la capacité d'adaptation de la production acéricole aux CCs.

La présente étude ne prend pas en considération la migration potentielle des érablières. Il est clair que même si le déplacement potentiel des érablières vers le nord sera considérable, la vitesse de migration de cet écosystème sera beaucoup plus lente que les changements du climat. Dans ce contexte, la migration assistée pourrait être vue comme une adaptation à moyen terme pour éventuellement favoriser l'exploitation d'une nouvelle « zone climatique de production » où il sera possible de produire du sirop l'érable à sucre était présent. Finalement, certains producteurs tirent une bonne portion de leurs revenus des activités reliées à la « visite » de la cabane à sucre et aux traditions alimentaires qui s'y rattachent comme, notamment, la traditionnelle « tire sur la neige ». Il est possible que l'activité d'aller à la cabane à sucre puisse être plus affectée que la production elle-même dans le sens où le public serait moins tenter d'aller à la cabane au début février! Il serait aussi intéressant d'estimer l'impact économique que pourrait avoir le déplacement de la saison dans ce contexte.

Références

- Akaike, H. 1973. Information theory as an extension of the maximum likelihood principle. *In* Second on information theory. B.N.P.a.F. ed. Akademiai Kiado, Budapest. pp. 267-281.
- anonyme. 1995. L'érable à sucre: caractéristiques, écologie et aménagement. Centre d'enseignement et de recherche en foresterie du Cégep de Ste-Foy; Ministère des ressources naturelles; Ministère de l'agriculture des pêcheries et de l'alimentation.
- anonyme. 2011. Dossier économique 2011. Fédération des producteurs acéricoles du Québec.
- Bates DM, Maechler M, Bolker B, Walker S, Haubo Bojesen Christensen R, Singmann H (2012) lme4: Linear mixed-effects models using Eigen and S4. R package version 0.999999-0. Available online at www.rproject.org
- Becker, P., Meinzer, F.C., and Wullschleger, S.D. 2000. Hydraulic limitation of tree height: A critique. *Functional Ecology* **14**(1): 4-11.
- Bernier, R., Bellegarde, J.P., and Gauthier, R. 2001. L'efficacité et les facteurs de productivité en production acéricole. *In* Journée acéricole 2001.
- Bradley, E., and Gong, G. 1983. A leisurley look at the bootstrap, the jackknife and cross validation. *American Statistician* **37**: 36-48.
- Burns, R.M., and Honkala, B.H. 1990. Silvics of North America: 1. Conifers; 2. Hardwoods. U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Washington D.C.
- Cortes, P.M., and Sinclair, T.R. 1985. The role of osmotic potential in spring sap flow of mature sugar maple trees (*Acer saccharum* Marsh). *Journal of Experimental Botany* **36**(1): 12-24.
- Duchesne, L., Houle, D., Côté, M.A., and Logan, T. 2009. Modelling the effect of climate on maple syrup production in Québec, Canada. *Forest Ecology and Management* **258**: 2683-2689.
- Duchesne, L., and Houle, D. 2014. Interannual and spatial variability of maple syrup yield as related to climatic factors. *PeerJ* 2:e428; DOI 10.7717/peerj.428
- Forget, E., Drever, R., and Lorenzetti, F. 2003. Changements climatiques: impacts sur la forêt québécoise-revue de littérature. Institut Québécois d'aménagement de la forêt feuillue.
- Gabriel, W.J. 1972. Phenotypic selection in sugar maple for superior sap sugar production. Department of agriculture, Forest service, Notheastern forest experiment station.
- Hopkinson, R. F.; McKenney, D. W.; Milewska, E. J.; Hutchinson, M. F.; Papadopol, P.; Vincent, L. A. 2011. Impact of aligning climatological day on gridding daily maximum-minimum temperature and precipitation over Canada. *Journal of Applied Meteorology and Climatology* 50:1654-1665.
- Houle D., Bouffard A., Duchesne L., Logan T., et Harvey R. 2012. Projections of future soil temperature and water content for three southern Quebec forested watersheds. *Journal of Climate*. 25: 7690-7701.
- Houston, D.R., Allen, D.C., and Lachance, D. 1990. Aménagement de l'érablière: guide de protection de la santé des arbres. Forêt Canada.
- Hutchinson, M. F., D.W. McKenney, K. Lawrence, J.H. Pedlar, R.F. Hopkinson, E. Milewska, and P. Papadopol, 2009: Development and testing of Canada-wide interpolated spatial models of

- daily minimum/maximum temperature and precipitation 1961–2003. J. Appl. Meteor. Climatol., 48, 725–741.
- Johnson, R.W., Tyree, M.T., and Dixon, M.A. 1987. A requirement for sucrose in xylem sapflow from dormant maple trees. Plant Physiology **84**: 495-500.
- Kim, Y.T., and Leech, R.H. 1985. Effects of climatic conditions on sap flow in sugar maple. For. Chron. **61**(4): 303-307.
- Lemieux, N. 2006. L'érablière et les changements climatiques. Gouvernement du Québec, Ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation.
- Logan, T., Charron, I., Chaumont, D., and Houle, D. 2011. Atlas de scénarios climatiques pour la forêt québécoise. Ouranos et MRNF.
- Maraun, D., F. Wetterhall, A.M. Ireson, R.E. Chandler, E.J. Kendon, M. Widmann, S. Brieren, H.W. Rust, T. Sauter, M. Themessl, V.K.C. Venema, K.P. Chun, C.M. Goodess, R.G. Jones, C. Onof, M. Vrac and I. Thiele-Eich. 2010. Precipitation Downscaling under climate change. Recent developments to bridge the gap between dynamical models and the end user, Rev. Geophys., 48: RG3003, DOI: 10.1029/2009RG000314.
- Marvin, J.W. 1957. Investigation of the sugar content and flow mechanism of maple sap. University of Vermont. MR 62.
- Marvin, J.W. 1958. Physiology of maple sapflow. University of Vermont.
- Marvin, J.W., and Erickson, R.O. 1956. A statistical evaluation of some of the factors responsible for the flow of sap from sugar maple. plant Physiology **31**: 57-61.
- Meehl, G.A., Covey, C., Delworth, T., Latif, M., McAyaney, B., Mitchell, J.F.B., Stouffer, R.J., Taylor, K.E., 2007. The WCRP CMIP3 multimodel dataset - A new era in climate change research. Bull. Am. Meteor. Soc., September 2007, 1383-1394.
- Milburn, J.A., and O'Malley, P. 1984. Freeze-induced sap absorption in *Acer pseudoplatanus*: a possible explanation. Can J Bot **62**: 2101-2106.
- Mpelasoka, F.S., F.H.S. Chiew. 2009. Influence of Rainfall Scenario Construction Methods on Runoff Projections. J. Hydrometeorol., 10 :1168-1183.
- Nakicenovic N, Alcamo J, Davis G, deVries B, Fenhann J, Gaffin S, Gregory K, Grübler A, Jung TY, Kram T, La Rovere EL, Michaelis L, Mori S, Morita T, Pepper W, Pitcher H, Price L, Raihi K, Roehrl A, Rogner H-H, Sankovski A, Schlesinger M, Shukla P, Smith S, Swart R, van Rooijen S, Victor N, Dadi Z. 2000. Emissions scenarios. Special report by Working group III of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, 599pp.
- Norby, R.J., Heartz-Rubin, J.S., and Verbrugge, M.J. 2003. Phenological responses in maple to experimental atmospheric warming and CO₂ enrichment. Global Change Biology **9**(12): 1792-1802.
- Pinheiro JC, Bates DM (2000) Mixed effects models in S and S-Plus. Springer-Verlag, New-York, U.S. p.p.206-226
- Plamondon, A.P. 1977. Analyse préliminaire de quelques facteurs écologiques influençant la production de la sève de l'*Acer saccharum*. Le Naturaliste Canadien **104**: 127-134.

- Plamondon, A.P., and Bernier, P. 1980. Modélisation de la coulée de l'érable à sucre (*Acer saccharum* Marsh.) à partir d'éléments météorologiques. *Canadian Journal of Forest Research* **10**: 152-157.
- Pothier, D. 1995. Effets des coupes d'éclaircie et des variations climatiques interannuelles sur la production et la teneur en sucre de la sève d'une érablière. *Canadian Journal of Forest Research* **25**: 1815-1820.
- Robitaille, G., Boutin, R., and Lachance, D. 1994. Effects of soil freezing stress on sap flow and sugar content of mature sugar maples (*Acer saccharum*). *Canadian Journal of Forest Research* **25**: 577-587.
- Rondeaux, A. 2007. L'acériculture face aux changements climatiques: inventaire des impacts potentiels et mesures d'adaptation. *In* Centre universitaire de formation en environnement. Université de Sherbrooke, Sherbrooke. p. 104.
- Roy, G. 1997. Aménagement forestier et la coulée de la sève. *In* Colloque régional sur l'érable à Granby, Granby, Qc. p. 3.
- Roy, G. 1998. Rôles des facteurs climatiques dans le mécanisme du dépérissement des érablières appalachiennes. *In* Faculté des sciences. Université de Sherbrooke, Sherbrooke. p. 426.
- Sauvesty, A., Pagé, F., and Giroux, M. 1993. Impact des milieux pédologiques en bosses et creux sur les teneurs en composés phénoliques et en éléments minéraux dans les feuilles d'érables à sucre (*Acer saccharum*) en dépérissement du Québec. *Canadian journal of forest research* **23**: 190-198.
- Saxe, H., Cannell, M.G.R., Johnsen, O., Ryan, M.G., and Vourlitis, G. 2001. Tree and forest functioning in response to global warming. *New Phytologist* **149**(3): 369-400.
- Themeßl, M. J., A. Gobiet, A. Leuprecht. 2010. Empirical-statistical downscaling and error correction of daily precipitation from regional climate models. *Int. J. Climatol.* **30**:10: 1530-1544.
- Tyminski, W.P.J. 2011. The utility of using sugar maple tree-ring data to reconstruct maple syrup production in New York. *In* Faculty of the Graduate School. University of North Carolina, Greensboro. p. 154.
- Tyree, M.T. 1983. Maple sap uptake, exudation and pressure changes correlated with freezing exotherms and endotherms. *Plant Physiology* **73**: 277-285.