FERTILISATION ORGANIQUE, SANTÉ GÉNÉRALE ET RENDEMENTS EN SUCRE DANS UNE ÉRABLIÈRE DU NORD-OUEST DU NOUVEAU-BRUNSWICK

Rapport technique

Mise en valeur et développement du territoire acéricole du Nouveau-Brunswick

Volet C - Projet 5

Fertilisation organique: application de fumiers compostés et production en sucre

Richard Barry, Fougère Augustin et Hector-Guy Adegbidi

FACULTÉ DE FORESTERIE UNIVERSITÉ DE MONCTON JUILLET 2009

AVANT-PROPOS

Ce rapport est essentiellement constitué du contenu de la thèse de Maîtrise ès sciences forestières de M. Fougère Augustin déposée en juin 2009 et est présenté en deux sections qui pourront permettre la soumission deux articles pour une éventuelle publication dans des revues spécialisées. Les première et deuxième parties présentées ont respectivement pour titres :

Augustin, F., Barry, R., Adégbidi, H.G. (en préparation). Effets de la fertilisation organique sur la santé générale des érablières.

Augustin, F., Barry, R., Adégbidi, H.G. (en préparation). Effets de la fertilisation organique sur les rendements en sucre de l'érable à sucre (*Acer saccharum* Marsh.).

Les auteurs désirent remercier tous les promoteurs du projet *Mise en valeur et développement des ressources du territoire acéricole du Nouveau-Brunswick* (MVDRTANB), les propriétaires de l'Érablière de la Montagne Verte - Patrick et Chantal Lévesque, les organismes subventionnaires notamment le Conseil National de Recherche du Canada (CNRC-PARI), la Fondation pour l'Innovation du Nouveau-Brunswick (FINB), l'Agence de promotion économique du Canada Atlantique (APECA), les ministères de l'Agriculture, des pêcheries et de l'alimentation et Entreprises-Nouveau-Brunswick, et le Silverhill Institute of Environmental Research and Conservation. Les contributions substantielles de Robert Ritchie, Jeff Lévesques, Luc Albert, Irka Laplante, Dominique Frenette, Ted Voisine ainsi que des techniciens et étudiants qui ont oeuvré au projet sont également appréciées..

SOMMAIRE

Les travaux sur le dépérissement ainsi que d'autres études récentes suggèrent une tendance vers l'acidification à long terme des sols d'érablières sucrières. L'acidification du milieu favorise une diminution des réserves de cations basiques du sol (notamment le calcium) par lessivage. Il en résulte des problèmes de déséquilibre nutritionnel entraînant une réduction de vigueur et de croissance des peuplements, les rendant moins productifs et plus vulnérables aux perturbations. C'est dans le but de rétablir l'équilibre nutritionnel et favoriser la vigueur des arbres que des essais de fertilisation ont été entrepris dans une érablière du Nord-Ouest du Nouveau-Brunswick. Les essais visent à élaborer un mode d'opération permettant l'utilisation d'un fertilisant admissible par les organismes de certification biologique (*NutriWave 4-1-2*, chaux dolomitique) afin d'améliorer la vigueur générale et d'augmenter les rendements en sucre de érable à sucre (*Acer saccharum* Marsh).

En 2005, un dispositif a été mis en place, incluant 102 arbres en apparence sains, sélectionnés dans deux zones du peuplement selon un certain nombre de critères établis pour les besoins de l'étude. L'état de vigueur et de santé générale des arbres du dispositif a été évalué en 2005 (avant traitement). Au printemps 2006, quatre traitements de fertilisation organique (a: équivalent à 125 kg N/ha; b: équivalent à 250 kg N/ha; c: b + 2 T/ha chaux dolomitique; d: témoin) ont été appliqués aux arbres-échantillons. Les paramètres de santé (nutriments foliaires et vigueur) et de production de sucre (volume de coulée, teneur en sucre et production de sucre journaliers collectés sous vide et sous gravité) ont été suivis en 2006, 2007 et 2008.

Durant les années subséquentes, les traitements ont occasionné des modifications de l'équilibre nutritionnel des arbres, observées notamment par des augmentations de la concentration de certains macronutriments foliaires (N, P, Ca, Mg). Les paramètres de vigueur des arbres fertilisés avaient également tendance à s'améliorer et leur capacité à refermer les blessures d'entaillage était meilleure comparativement aux arbres témoins. Parallèlement à l'amélioration de leur état de santé générale, les arbres traités collectés sous vide produisaient jusqu'à 29,9% plus de sucre que les témoins, alors que les fertilisants avaient l'effet inverse sur les arbres collectés sous gravité pour lesquelles des réductions de production allant jusqu'à 16,9% ont été observées comparativement aux arbres témoins.

Cette étude montre que l'on peut favorablement modifier l'équilibre nutritionnel des érables par des engrais organiques acceptés par les organismes de certification biologique, et ainsi améliorer la vigueur et la productivité des érablières à court terme.

TABLE DES MATIÈRES

AVANT-PROPOS		11
TABLE DES MATII	ÈRES	iv
LISTE DES TABLE	AUX	vi
LISTE DES FIGURI	ES	vii
INTRODUCTION		1
PARTIE I		7
Effets de la f	ertilisation organique sur la santé générale des érablièr	es
1.1 Résumé		7
1.2 Introducti	on	8
1.3 Matériel e	et méthodes	10
1.3.1	Aire d'étude	10
1.3.2	Structure et composition du peuplement	10
1.3.3	Dispositif expérimental et traitements appliqués	12
1.3.4	Échantillonnage de sol et méthodes d'analyse	
1.3.5	Échantillonnage de feuillage et méthodes d'analyse	17
1.3.6	Observation de l'état des cimes	
1.3.7	Évaluation de la fermeture des entailles	
1.3.8	Analyse des données	18
1.4 Résultats		
1.4.1	Caractéristiques chimiques du sol	
1.4.2	Concentration foliaire en nutriments	
1.4.3	États des cimes	
	Fermeture des entailles	
	n	
1.6 Conclusio	on	34
PARTIE II		37
Effets de la f	ertilisation organique sur les rendements en sucre de	
l'érable à su	cre (Acer saccharum Marsh.)	
2.1 Résumé		37
2.2 Introducti	on	38
2.3 Matériel e	et méthodes	
2.3.1	Aire d'étude	40
2.3.2	_ 1 1	
2.3.3	Échantillonnage, traitements et paramètres mesurés	
2.3.4	L'approche des arbres jumelés	46

2.3.5	Analyse des données	49
2.4 Résultats	et discussion	50
2.4.1	Description des saisons de coulée (arbres témoins)	50
2.4.2	Relation entre les paramètres de production des	
	groupes d'arbres	54
	2.4.2.1 Relation entre les sous-groupes d'arbres témoins	
	2.4.2.2 Relation entre les groupes d'arbres témoin et traités	
2.4.3	Analyse des effets des traitements sur la production de sucre.	58
	2.4.3.1 Cas des arbres collectés sous vide	
	2.4.3.2 Cas des arbres collectés sous gravité	66
2.5 Conclusio	on	
CONCLUSION		74
REFERENCES		77

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1.1.	Critères de sélection des arbres-échantillons	13
Tableau 1.2.	Composition chimique du Nutriwave 4-1-2	15
Tableau 1.3.	Traitements de fertilisation	16
	Caractéristiques chimiques du sol en 2008 (moyenne ± erreur-type)	
	Concentrations foliaires en nutriment (mg g ⁻¹) et valeurs	
	de référence	23
Tableau 1.6.	Ratios de concentrations foliaires et valeurs de référence	25
Tableau 1.7.	Analyse des indicateurs de la vitalité des cimes (moyenne	
	± erreur-type) pour tous les traitements en 2006, 2007 et 2008	29
Tableau 1.8.	Efficacité des traitements à favoriser la fermeture des entailles	
	de l'érable à sucre	30
Tableau 2.1.	Critères de sélection des arbres-échantillons	43
Tableau 2.2.	Composition chimique du Nutriwave 4-1-2	44
Tableau 2.3.	Traitements de fertilisation	45
Tableau 2.4.	Valeurs moyenne, minimale et maximale du volume d'eau, de la	
	teneur en sucre et de la production des érables à sucre témoins	
	en 2006, 2007 et 2008	55
Tableau 2.5.	Analyse de régression linéaire entre les paramètres de production	
	journalière des sous-groupes d'arbres témoins collectés sous vide	
	et sous gravité en 2006, 2007 et 2008	57
Tableau 2.6.	Analyse de régression linéaire entre les paramètres de production	
	journalière du groupe d'arbres témoins et ceux des groupes d'arbres	
	traités collectés sous vide en 2006, 2007 et 2008	59
Tableau 2.7.	Analyse de régression linéaire entre les paramètres de production	
	journalière du groupe d'arbres témoin et ceux des groupes d'arbres	
	traités collectés sous gravité en 2006, 2007 et 2008	60
Tableau 2.8.	Productions de sucre, teneurs en sucre, et volume d'eau prédits	
	et observés (moyenne ± erreur-type) sous vide en 2007 et 2008	
	pour les traitements appliqués	63
Tableau 2.9.	Productions de sucre, teneurs en sucre, et volume d'eau prédits	
	et observés (moyenne ± erreur-type) sous gravité en 2007 et 2008	
	pour les traitements appliqués	63
Tableau 2.12	2. Volumes d'eau d'érable prédit et observé (moyenne ± erreur-type)	
	sous vide en 2007 et 2008 pour les traitements appliqués	67
Tableau 2.13	. Teneurs en sucre prédit et observé (moyenne ± erreur-type)	
	sous vide en 2007 et 2008 pour les traitements appliqués	68

LISTE DES FIGURES

Figure 1.1a. Localisation du site de l'étude	11
Figure 1.1b. Localisation des zones 1 et 2	
Figure 1.1c. Localisation des arbres du disposit	
Figure 1.2. Fluctuations des concentrations foli	
	27
Figure 1.3. Fermeture des entailles de 2006 et 2	
	30
-	
Figure 2.1a. Localisation du site de l'étude	41
Figure 2.1b. Localisation des arbres du disposit	
Figure 2.2. Températures journalières maximal	e et minimale, moyennes de
coulée journalière, teneurs en sucre	moyennes et production
journalière moyennes du groupe d'	arbres témoin collecté sous
	l en 2006, 2007 et 200852
Figure 2.3. Températures journalières maximal	e et minimale, moyennes de
coulée journalière, teneurs en sucre	· · · · · · · · · · · · · · · · · · ·
journalière moyennes du groupe d'	
	n 2006, 2007 et 200853
Figure 2.4. Comparaison de régressions entre le	· · · · · · · · · · · · · · · · · · ·
journalière de sucre des groupes d'	
	c ans après traitement (2008)61
Figure 2.5. Changement dans les valeurs saison	<u> </u>
production de sucre des arbres colle	
représentent des augmentations (ou	· •
de production en pourcentage de la	1
calculée au moyen des équations de	
traitement. Changement = (valeur o	
	valeur prédite pour le paramètre 65
Figure 2.6. Comparaison de régressions entre le	
de coulées journalières des groupes	
	n après traitement (2007)67
Figure 2.7. Comparaison de régressions entre le	
journalière de sucre des groupes d'a	
	n (2007) après traitement
Figure 2.8. Comparaison de régressions entre le	· · · · · · · · · · · · · · · · · · ·
journalière de sucre des groupes d'a	
· · · · · · · · · · · · · · · · · · ·	ès traitement (2007)
Figure 2.9. Changement dans les valeurs saison	<u> </u>
production de sucre des arbres colle	
Ces valeurs représentent des augme	
paramètre de production en pourcer	-
Celle-ci a été calculée au moyen de	<u>.</u>
avant traitement. Changement = (va	
vaieur predite pour le parametre) / v	valeur prédite pour le paramètre 70

INTRODUCTION

Le sucre et le sirop d'érable comptent parmi les plus importants produits forestiers nonligneux au Nord-Est des États-Unis et au Canada. Pour plusieurs familles, l'exploitation de peuplements d'érables en vue de la production acéricole demeure une activité culturelle et ancestrale qui permet dans certains cas de générer un revenu d'appoint. Toutefois, au cours des dernières décennies, le développement de nouveaux procédés et d'équipements modernes pour la collecte et la transformation de l'eau d'érable a permis la mutation de cette activité en un véritable secteur de production spécialisé d'une importance économique accrue. Environ 80% de la production mondiale de sirop d'érable provient du Canada. Avec 4,5 % de la production canadienne, le Nouveau-Brunswick se place au deuxième rang des producteurs de sirop d'érable au Canada derrière le Québec (91,1%). En 2006, il se classait également au deuxième rang canadien quant au nombre d'entailles, qui est passé de 1,3 million en 2001 à 1,7 million en 2006, soit une augmentation de 29,1 % (Statistique Canada, 2006). Au Nouveau-Brunswick, la valeur des produits de l'érable, tels que le sirop, le sucre, la tire et le beurre se situait aux alentours de 12 millions de dollars en 2008. Actuellement, l'industrie acéricole néobrunswickoise est en pleine mutation. Elle cherche notamment à accroître la production à valeur ajoutée dans le contexte des nouveaux paradigmes de l'industrie agroalimentaire, notamment la production certifiée biologique. Dès lors, il est devenu crucial de rechercher des méthodes sylvicoles efficaces pour aménager les peuplements d'érables à sucre (Acer saccharum Marsh) de manière à favoriser leur vigueur et une capacité de production optimale à long terme.

De plus en plus, les principes d'aménagement des érablières sucrières prennent en compte les facteurs écologiques qui régissent l'évolution des écosystèmes. L'érable à sucre est une espèce tolérante, et les érablières évoluant naturellement s'organisent selon une structure inéquienne, avec des arbres de différentes classes d'âge, de diamètre et de hauteur. C'est cette structure qui est recherchée dans l'optique de l'aménagement durable des érablières exploitées pour la sève.

Des quatre espèces d'érable exploitées à des fins acéricoles, l'érable à sucre est celui qui peut atteindre la plus grande taille et qui possède la sève la plus sucrée. Seuls l'érable à

sucre et l'érable noir (*Acer nigrum* Michx. f.) possèdent la longévité nécessaire à une production acéricole soutenue (Huot, 1995). Mais l'érable rouge (*Acer rubrum* L.) et l'érable argenté (*Acer saccharinum* L.) produisent un sirop de très bon goût, même si moins sucré comparativement à celui de l'érable à sucre.

Lors de l'entretien des jeunes érablières, il est conseillé de favoriser le plus possible l'érable à sucre, tout en évitant sa sélection exclusive pour ne pas entrainer une dégradation de la qualité du sol par son acidification (Côté, 1997). Les érablières qui évoluent naturellement contiennent généralement 5% à 30% de leur volume en essences compagnes (Guay et Rodrigue, 2001). Le bouleau jaune (Betula alleghaniensis Britt.), le hêtre à grandes feuilles (Fagus grandifolia Ehrh.), le caryer cordiforme (Carya cordiformis (Wangenh.) K. Koch), le chêne rouge (Quercus rubra L.) et le frêne (Fraxinus americana L.) sont les espèces compagnes que l'on retrouve le plus souvent dans les érablières sucrières. Les essences compagnes contribuent à préserver l'intégrité du peuplement et à maintenir la fertilité des sols à long terme. La diversité des essences est essentielle à la stabilité des écosystèmes forestiers. Elles contribuent à la fertilité du sol en y favorisant le développement et l'entretien d'un grand nombre de microorganismes décomposeurs pour la minéralisation de la matière organique (Bélanger, 1998). En étalant leurs systèmes racinaires à différentes profondeurs dans le sol, certaines essences compagnes contribuent à réguler le flux des éléments minéraux par lessivage et en facilitent l'absorption par l'érable à sucre. Par exemple, le hêtre à grandes feuilles a un système racinaire qui lui permet d'aller puiser l'eau dans les profondeurs du sol en période de sécheresse, alors que le frêne noir (Fraxinus nigra Marsh.) peut absorber d'énorme quantité d'eau dans les sols trop humides ou mal drainés (Bélanger, 1998). Tout cela est de nature à créer un micro-habitat favorable au maintien de la vigueur de l'érable à sucre. D'autant plus que la diversité des espèces d'arbres dans un peuplement forestier réduit considérablement les risques d'infestation par des insectes en favorisant une compétition interspécifique et une présence beaucoup plus marquée des prédateurs d'insectes nuisibles (Guay et Rodrigue, 2001).

Même s'il croît sous des climats relativement variés, l'érable à sucre préfère les sites élevés, les régions à climat tempéré, où alternent au printemps une série de nuits froides

et de jours chauds et ensoleillés, qui favorisent l'écoulement de la sève (Valin, 1950). Dans son aire de distribution, les températures varient habituellement de -40°C à 38°C avec des valeurs moyennes de précipitation relativement abondantes allant de 510 mm à 2030 mm (Burns et Honkala, 1990). Étant donné qu'il est capable de supporter beaucoup d'ombrage, l'érable à sucre peut croître dans des peuplements très denses. Dans le contexte d'une érablière exploitée pour la sève, on cherche à développer des fûts courts surmontés de cimes de forts diamètres. Ainsi, on le traite de manière à obtenir des arbres chargés de houppiers, aux branches multiples (Valin, 1950). Les traitements à appliquer doivent viser à stimuler l'accroissement des tiges d'avenir et permettre à leur cime de se développer davantage. Ainsi, des traitements de jardinage sont appliqués pour l'entretien des érablières en production afin de maintenir la structure en J inversé (Majcen et al., 2006), alors que l'éclaircie peut permettre de maximiser la croissance radiale des jeunes arbres, d'augmenter la taille des cimes d'érable et ainsi d'accroître la production à long terme des érablières acéricoles par l'augmentation du nombre potentiel d'entailles à l'hectare (Pothier, 1995). La fertilité du sol est d'une importance capitale pour l'équilibre nutritif et la productivité des érablières. Sur le plan pédogénétique, l'érable à sucre se retrouve sur des brunisols, des podzols, des luvisols et des régosols (Camiré, 1995). Toutefois, un sol profond de l'ordre podzolique, frais, bien drainé, ayant une texture de type sable loameux à loam limono-sableux, une structure moyenne, une bonne capacité de rétention en eau et un humus de type mull, favoriserait un développement optimal de cette espèce. L'érable à sucre préfère également un sol avec un pH compris entre 5,5 et 7,3 (Burns et Honkala, 1990). Quand il croît dans des sols secs, mal drainés et/ ou présentant des carences au niveau des macro-nutriments (N, P, K, Ca, Mg), l'érable est plus susceptible au dépérissement (Moore, 1999). Par ailleurs, une surabondance de certains éléments (Mg, Mn) peut nuire à son développement en raison de la faible sélectivité de ses racines à certains cations basiques (Guay et Rodrigue, 2001). Dans ces conditions, l'élément le plus abondant est préférentiellement absorbé au détriment des autres.

Les travaux sur le dépérissement de l'érable à sucre ont eu entre autres effets de favoriser une prise de conscience de l'extrême fragilité des écosystèmes d'érablières et de l'importance d'avoir des peuplements en santé. Ces recherches ont également permis

de mettre en évidence le caractère multi-causal du phénomène de dépérissement (Camiré et Ouimet, 1992 ; Côté 1997). Les épidémies d'insectes, les extrêmes climatiques, les déséquilibres entre cations échangeables ainsi que les facteurs associés à l'acidification du sol, notamment les apports atmosphériques, sont très souvent associés à ce phénomène (Mader et Thompson, 1969; St.Clair et al., 2008). À la fin des années 1980, des programmes conjoints ont été mis en place par les gouvernements des États-Unis et du Canada pour réduire les émissions acides. Ces programmes ont donné des résultats intéressants et une baisse sensible des émissions a été observée dès les années 1980, mais des études récentes confirment le maintien d'une tendance vers l'acidification à long terme des sols d'érablières au Nord-Est américain et dans sa partie adjacente du Canada (Camiré et Ouimet, 1992; Likens et al., 1998; Moore, 1999). L'acidification de l'environnement entraine des problèmes de déséquilibres nutritionnels dans les érablières et les prédispose au dépérissement. Une des méthodes sylvicoles préconisées par plusieurs experts pour améliorer les conditions édaphiques des érablières, en vue de favoriser une nutrition équilibrée et la vigueur des peuplements, est la fertilisation au moyen d'engrais (Bernier et al., 1989; Feldkirchner et al., 2003; Schaberg et al., 2005). L'application de fertilisants a permis dans certains cas d'accroître le rendement en sucre des érablières acéricoles montrant des signes dépérissement légers à modérés (Barry et Desharnais, 2000 ; Barry et Robichaud, 1994 ; Barry et Roy, 1998). Dans ce contexte, la fertilisation au moyen d'engrais pourrait s'avérer souhaitable pour rétablir ou maintenir les conditions édaphiques favorables à la productivité à long terme des érablières. Cependant l'utilisation d'engrais chimique est considérée comme potentiellement néfaste et contraire à l'esprit de l'aménagement durable en l'acériculture. Cette pratique est donc prohibée par les organismes de certifications biologiques dont *Ecocert*. En cas de diagnostic de carences, les seuls traitements autorisés par ces organismes sont la cendre de bois, la chaux agricole et les engrais organiques naturels, sans additifs de synthèse.

La présente étude entre dans le cadre d'un projet dont l'objectif général est d'élaborer un mode d'opération permettant l'utilisation de *NutriWave 4-1-2*, fertilisant organique commercial à base de fumier de volaille, dans des érablières acéricoles afin de soustraire ces fragiles écosystèmes aux stress indus des déséquilibres nutritionnels et d'augmenter

les rendements en sucre des arbres. Pour faciliter l'examen de l'objectif général, celui-ci a été décomposé en trois objectifs spécifiques, à savoir :

- 1) Évaluer les effets de l'application du fumier de volaille sur la nutrition et l'état de santé général de l'érable à sucre;
- 2) Évaluer l'effet du fumier de volaille sur le rendement en sucre de l'érable dans des conditions opérationnelles d'une entreprise acéricole moderne;
- 3) Identifier des méthodes d'application des fertilisants organiques compatibles avec les installations encombrantes d'une exploitation acéricole moderne

L'intérêt de cette étude repose notamment sur le fait qu'à court terme, il est difficile d'agir directement sur les différentes causes de déséquilibres nutritionnels dans les sols forestiers. Or les arbres peuvent commencer à subir les conséquences de ces déséquilibres pendant plusieurs années avant l'apparition de symptômes visibles. Comme expliqué précédemment, l'utilisation de solutions fertilisantes chimiques a démontré son potentiel, mais très peu d'alternatives existent pour les acériculteurs qui s'adonnent à une production biologique. Au Nouveau-Brunswick, approximativement 78 à 80% des poulets à griller et 60% des dindes sont produits dans le comté de Madawaska, au Nord-Ouest de la province (Lavoie, 1999). L'aviculture génère annuellement une quantité considérable de fumier dont les propriétés sont susceptibles d'améliorer la fertilité des sols. Dans l'optique d'une production acéricole biologique, l'application de *NutriWave 4-1-2*, engrais biologique commercial fabriqué dans la région à partir du fumier de volaille, représente une opportunité de coupler les effets positifs de l'ajout de matière organique riche en éléments nutritifs avec la valorisation d'un produit, les déjections de productions animales, considéré comme une source de pollution.

Ce rapport est organisé en deux parties à travers lesquelles sont éprouvées un certain nombre d'hypothèses. Ainsi la première partie est consacrée à la détermination des effets de 4 traitements, acceptables dans un contexte de production biologique, sur la nutrition, la vigueur et l'état de santé général de l'érable à sucre. Dans cette partie, deux hypothèses de recherche sont testées :

- (1) l'application de *NutriWave 4-1-2* peut améliorer la nutrition de l'érable à sucre et ainsi favoriser une meilleure vigueur des arbres à court terme;
- (2) dans les sols acides, un traitement complet (*NutriWave 4-1-2* + chaux dolomitique) peut être plus efficace pour faire augmenter durablement les concentrations en bases échangeables afin d'améliorer la nutrition et la vigueur de l'érable à sucre, comparativement au *NutriWave 4-1-2* appliqué seul.

Les producteurs acéricoles étant constamment en quête de techniques et de méthodes sylvicoles capables d'accroître la production des exploitations, la deuxième partie se propose d'évaluer les effets des traitements sur les rendements en sucre des érables. Dans cette optique, trois hypothèses de recherche y ont été testées :

- (1) l'application de *NutriWave 4-1-2* peut augmenter les rendements en sucre des arbres
- (i) par un accroissement de la production d'eau d'érable, et (ii) par une augmentation de sa teneur en sucre ;
- (2) un traitement complet peut avoir un effet plus durable sur la production que le *NutriWave 4-1-2* appliqué seul;
- (3) l'effet de la fertilisation sur la production de l'érable à sucre ne dépend pas du mode de collecte de l'eau.

Le troisième objectif de l'étude, à savoir l'identification des méthodes d'application des fertilisants organiques compatibles avec les installations encombrantes d'une entreprise acéricole moderne, énoncé précédemment, n'est pas examiné dans le cadre de ce rapport, et sera traité lors de recherches ultérieures.

PARTIE I

Effets de la fertilisation organique sur la santé générale des érablières

1.1 Résumé

Des problèmes de déséquilibre nutritionnel sont devenus communs dans des érablières du Nord-Est des États-Unis et de l'Est canadien. Dans une érablière située au Nord-Ouest du Nouveau-Brunswick, une étude a été entreprise dans le but d'évaluer l'effet du NutriWave 4-1-2 et d'un traitement dit complet constitué de NutriWave 4-1-2 et de chaux dolomitique sur la nutrition, la vigueur et l'état de santé général de l'érable à sucre (Acer saccharum Marsh.). Au printemps 2006, quatre traitements de fertilisation (a: équivalent à 125 kg N/ha; b: équivalent à 250 kg N/ha; c: b + 2 T/ha chaux dolomitique; d: témoin) ont été appliqués dans un dispositif de 102 arbres en apparence sains, présentant des déficiences en calcium foliaire. Durant les trois années subséquentes, une augmentation des bases échangeables (K, Mg, Ca) a été observée dans le sol ayant reçu les traitements b et c (p<0,05) comparativement au témoin. Ces traitements ont également modifié positivement les concentrations foliaires en magnésium (2007 et 2008) et calcium (2006 et 2007) des arbres traités (p<0,05), comparativement aux arbres témoins. Dans les deux premières années suivant l'application des traitements, le *NutriWave 4-1-2* appliqué seul a favorisé une fermeture plus rapide des blessures d'entaillage (p < 0.05), comparativement au traitement complet et au témoin. Toutefois, aucune différence significative n'a été mise en évidence au niveau de l'état des cimes (mort en cime et transparence) des arbres fertilisés par rapport aux témoins. Le traitement complet semble avoir donné des effets plus marqués sur la chimie du sol et la nutrition foliaire en bases que le *NutriWave 4-1-2* appliqué seul. Cette étude confirme que la fertilisation forestière au moyen de produits naturels, acceptables dans un contexte de production biologique, peut être utilisée pour corriger des problèmes de déséquilibre nutritionnel et améliorer la santé des érablières.

Mots clés : Érable à sucre, fertilisation, nutrition, *NutriWave 4-1-2*, chaux dolomitique, propriétés du sol

1.2 Introduction

L'épisode de dépérissement de l'érable à sucre (Acer saccharum Marsh) observé dans plusieurs régions du Nord-Est américain et du Canada au cours de la seconde moitié du 20^{ème} siècle a été à la base de plusieurs programmes de recherche axés sur l'aménagement durable des érablières. Les résultats de ces travaux ont révélé, entre autres, des problèmes de déséquilibre nutritionnel des sols d'érablières touchées par le dépérissement (Bernier et Brazeau, 1988; Mader et Thompson, 1969; Ouimet et Camiré, 1995; Wilmot et al., 1995). Ces travaux ont également permis d'identifier des facteurs liés à ce phénomène dont la défoliation par des insectes, les extrêmes climatiques et l'acidité des sols (Camiré et Ouimet, 1992; Moore, 1999). La baisse du pH des sols facilite le lessivage accru de certains éléments et se traduit notamment par une diminution des réserves de cations basiques (Ca, K, Mg) utiles à l'arbre et la libération de cations parfois toxiques tels que l'aluminium (Dizengremel, 1997; Likens et al., 1998). Les déséquilibres nutritionnels qui en résultent entrainent une réduction de croissance et de vigueur des arbres (Duchesne et al., 2002, 2003; Huggett et al., 2007). Pour expliquer le mécanisme d'acidification des sols d'érablières, des auteurs ont avancé diverses causes possibles dont l'immobilisation des nutriments dans la biomasse végétale, des coupes forestières inadéquates, le changement de la composition floristique vers des espèces contribuant à l'acidification, le phénomène beaucoup plus global de la pollution atmosphérique qui entraine des dépositions acides (H₂SO₄ et HNO_x), ou une combinaison de ces facteurs (Côté, 1997; Duchesne et al., 2002; Houle, Ouimet et Duchesne, 2001; Mader et Thompson, 1969). Plusieurs programmes mis en place conjointement par les gouvernements canadien et américain dès les années 1980' ont permis de réduire les émissions acides (Houle et al., 1997), mais à court terme, il est difficile d'agir directement sur les différentes causes de l'acidification des sols. D'ailleurs, de plus en plus d'études rapportent des problèmes de fertilité des sols forestiers dans l'Est canadien et le Nord-Est des États-Unis, et des travaux récents ont confirmé la tendance vers une acidification à long terme des sols d'érablières dans ces régions, où des problèmes de déficience en cations basiques, notamment le calcium, ont été remarqués (e.g. Likens, et al., 1998). D'autres travaux ont montré que des arbres peuvent commencer à subir les conséquences des déséquilibres nutritionnels au moins

une dizaine d'années avant que des symptômes observables de carence foliaire n'apparaissent (Duchesne *et al.*, 2003). Ces travaux montrent également que la capacité de l'érable à sucre à résister aux stress environnementaux est très étroitement liée à l'équilibre nutritif des arbres (Bailey *et al.*, 2004; Moore *et al.*, 2000).

L'application de fertilisants compte parmi les méthodes sylvicoles préconisées pour corriger les problèmes de déséquilibre nutritionnel dans les érablières (Elvir *et al.*, 2003; Moore et Ouimet, 2006). Des études réalisées aussi bien au Canada qu'aux États-Unis ont permis d'évaluer les effets de la fertilisation sur la santé générale et la vigueur de peuplements d'érable (Barry et Desharnais, 2000; Côté, Hendershot et O'Halloran, 1993; Wilmot *et al.*, 1996; Wargo *et al.*, 2002). Toutefois, la quasi-totalité des essais concluants documentés ont été effectués au moyen de fertilisants chimiques. Des preuves existent concernant les effets bénéfiques de la fertilisation organique pour le statut nutritif des sols, la croissance et la vigueur de certaines espèces (Assamoi, 2008; Côté *et al.*, 1993; Hutchinson *et al.*, 1999; Scott et Chamberland, 1962), mais la littérature scientifique reste très pauvre en résultats concernant des expériences de fertilisation organique de l'érable à sucre. L'objectif de cette étude est d'évaluer les effets de l'application du *NutriWave 4-1-2*, fertilisant organique naturel à base de fumier de volaille, acceptable dans un contexte de production biologique, sur la vigueur et l'état de santé général de l'érable à sucre. Deux hypothèses de recherche ont été testées :

- (1) l'application de *NutriWave 4-1-2* peut améliorer la nutrition de l'érable à sucre et ainsi favoriser une meilleure vigueur des arbres à court terme;
- (2) dans les sols acides, un traitement complet (*NutriWave 4-1-2* + chaux dolomitique) peut être plus efficace pour faire augmenter durablement les concentrations en bases échangeables dans le sol afin d'améliorer la nutrition et la vigueur de l'érable à sucre, comparativement au *NutriWave 4-1-2* appliqué seul.

L'amélioration de la nutrition a été évaluée à partir de la concentration foliaire en nutriments. Les concentrations ainsi que les ratios des concentrations foliaires de nutriments ont été comparés respectivement avec des valeurs critiques suggérées par

Côté *et al.* (1993) et des valeurs moyennes ainsi que les étendues proposées par Camiré et Ouimet (1992) pour des érablières saines.

1.3 Matériel et méthodes

1.3.1 Aire d'étude

Le site de l'étude se trouve dans une érablière située à 35 Km au nord-est d'Edmundston, dans la région accidentée des Appalaches au Nord-ouest du Nouveau-Brunswick (Figure 1.1a,b). Le substrat géologique est un schiste non-calcaire (Colpitts *et al.*, 1995). Le sol, dérivé d'un till glacial, est classé comme un podzol ferro-humique orthique (Langmaid *et al.*, 1980). Loameuse dans l'horizon C, la texture est de type loam limono-argileux dans les horizons supérieurs. Le terrain est vallonné et très abrupt par endroits, avec une altitude variant de 315 à 400 mètres. Dans la région, la moyenne des températures annuelles est de 3,2°C environ, alors que la moyenne annuelle des précipitations se situe entre 801 et 1200 mm, avec 28% des précipitations sous forme de neige (Van Groenewoud, 1983).

1.3.2 Structure et composition du peuplement

Le peuplement a une structure multi-âge inéquienne, mais le couvert des dominants contient majoritairement des arbres âgés en moyenne de 80 à 90 ans. Selon les critères de Millers *et al.* (1991), la majorité des arbres du peuplement étaient considérés sains et vigoureux pendant la durée de l'expérience. La nature et la composition du peuplement ont été évaluées lors d'un inventaire effectué en été 2005. Il s'agit d'une érablière à bouleau jaune et à hêtre. La végétation est dominée par l'érable à sucre (*Acer saccharum* Marsh), le hêtre à grandes feuilles (*Fagus grandifolia* Ehrh.), le bouleau jaune (*Betula alleghaniensis* Britt.) et l'érable rouge (*Acer rubrum* L.).

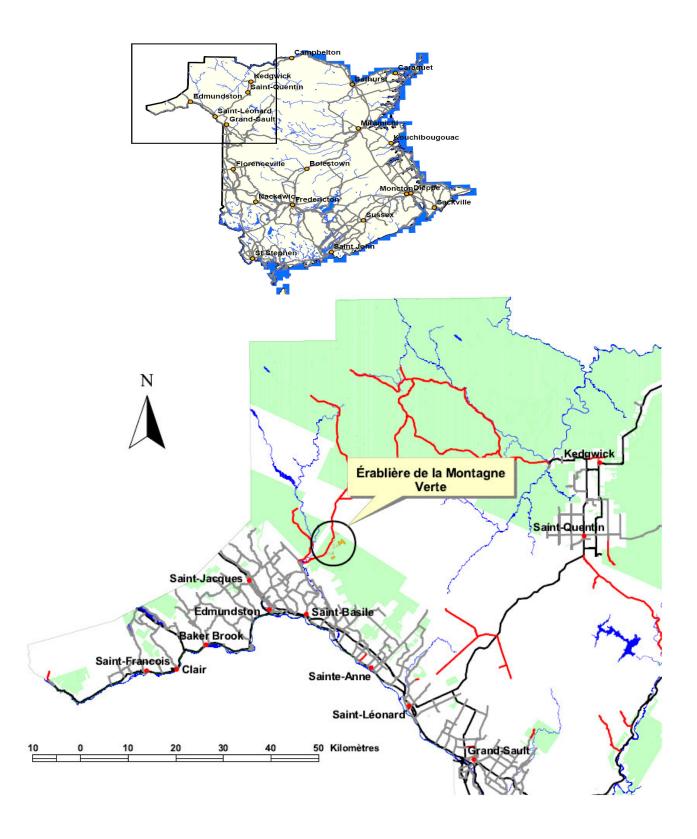


Figure 1.1a. Localisation du site de l'étude.

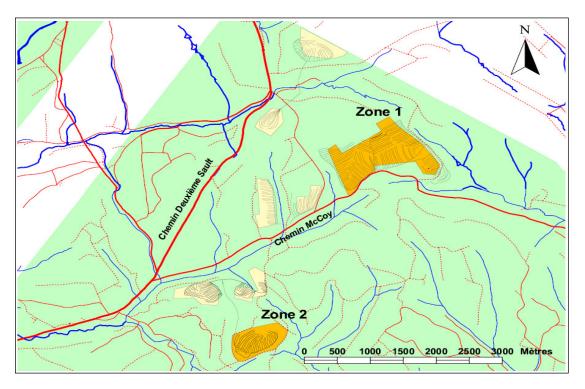


Figure 1.1b. Localisation des zones 1 et 2.

1.3.3 Dispositif expérimental et traitements appliqués

L'établissement du dispositif expérimental a été inspiré par différents travaux antérieurs et les expériences réalisées dans la région (Scott et Chamberland, 1962; Camiré et Ouimet, 1992; Barry et Robichaud, 1994; Barry et Roy, 1998; Barry et Desharnais, 2000). Cent deux (102) arbres issus de deux zones différentes de l'érablière (la zone centrale et une zone plus exposée au sud du peuplement), ont été sélectionnés selon un certain nombre de critères établis pour les besoins de l'étude (Tableau 1.1, Figure 1.1c). Pour avoir plus de souplesse afin de respecter les critères de sélection des arbres-échantillons, il a été préférable de privilégier un dispositif en plan complètement aléatoire et de considérer l'arbre à la fois comme unité d'échantillonnage et unité expérimentale plutôt que d'établir des placettes-échantillons. Ce faisant, la chance que les groupes d'arbres à traiter présente une distribution optimale des caractéristiques des arbres-échantillons a été augmentée et les risques que les groupes d'arbres ne soient pas représentatifs de la variabilité du dispositif ont été minimisés.

Les propriétés chimiques du sol ont été analysées en 2008 pour chaque traitement afin d'évaluer les effets des traitements notamment sur les concentrations en bases échangeables. Quatre paramètres ont été retenus pour évaluer l'état de santé générale et la vigueur des arbres : les concentrations foliaires en nutriments, la mort en cime, la transparence des cimes et la capacité des arbres-échantillons à refermer leurs entailles après la coulée.

Tableau 1.1. Critères de sélection des arbres-échantillons

Critère	Description
Espèce	Érable à sucre (Acer saccharum Marsh)
Localisation	Dans la zone la plus proximale à l'usine
Espacement minimal entre arbres-échantillons adjacents	30 m (rayon de fertilisation: 5 m; zone tampon : 20 m)
DHP	Compris ente 24 et 40 cm (une seule entaille)
Position dans le couvert	Dominant ^a (pas de sur- ni de sous-dominant)
Classe de vigueur ^a	Aucun à léger dépérissement des cimes, Transparence $\leq 25\%$, Mort en cime $\leq 25\%$ Décoloration du feuillage $\leq 25\%$ Absence de défauts au niveau du tronc (carie, chancre, carpophore, fente de plus de 2 cm de profondeur, gélivure, loupe et broussin de plus de 4 cm)

a voir Millers et al. (1991)

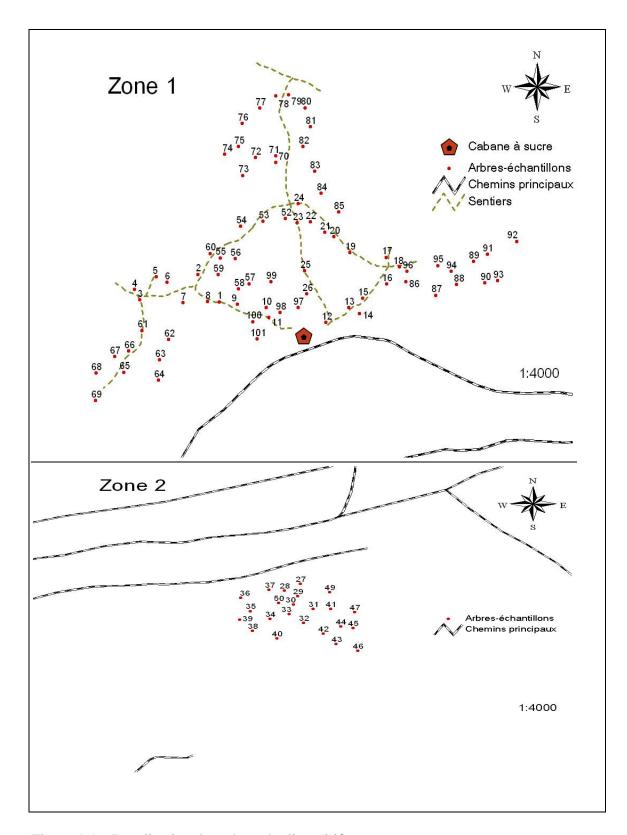


Figure 1.1c. Localisation des arbres du dispositif

La production de sucre des arbres a été analysée dans une étude réalisée parallèlement à celle-ci (Partie 2). Les arbres sélectionnés dans le versant sud de l'érablière devaient, à priori, permettre de déceler d'éventuelles influences de l'exposition sur les effets des traitements en relation notamment avec la production, mais cet aspect a été abandonné parce que les arbres de cette zone n'ont pas pu être collectés. N'ayant observé aucune différence significative entre les effets des traitements sur les paramètres de vigueur pour les deux zones (Figure 1.1c), et donc aucun effet des zones, il a été décidé de regrouper les données sur tous les arbres et de les traiter comme s'ils provenaient d'une seule et même zone.

Préalablement à l'application des fertilisants, l'évaluation de l'état de santé générale et de la vigueur des arbres du dispositif a été effectuée en été 2005 selon le protocole développé par la *North American Maple Project* (NAMP) (Millers *et al.*, 1991). Après la saison de coulée de 2006, et avant la fin du débourrement, les traitements ont été appliqués manuellement sur une surface ayant un rayon de 5 mètres autour de 75 des 102 du dispositif. Les 27 arbres restant ont été utilisés comme témoins et n'ont pas été fertilisés. Le fertilisant utilisé est le *NutriWave 4-1-2* (appelé Nutri dans le texte). Il s'agit de fumier de volaille semi-composté (Tableau 1.2). C'est un fertilisant certifié 100% organique et accepté par l'agence de certification biologique *Ecocert*.

Tableau 1.2. Composition chimique du *NutriWave 4-1-2*

Azote total	4.12%
Phosphore (P ₂ O ₅)	1.18%
Potassium (K ₂ O)	2.07%
Calcium (Ca)	3%
рН	6.3
Matière organique	> 75%
Magnésium (Mg)	0.41%
Zinc (Zn)	294 ppm
Manganèse (Mn)	328 ppm
Fer (Fe)	0.52%
Cuivre (Cu)	66 ppm
Bore B	22 ppm

Source: Envirem Technologies Inc. (2006)

Deux dosages différents de *NutriWave 4-1-2* ont été utilisés : 250Nutri, équivalent à 250 kg N/ha et 125 Nutri, équivalent à 125 kg N/ha. Un traitement constitué d'un mélange de *NutriWave 4-1-2* et de chaux dolomitique (CaMg(CO₃)₂) a également été appliqué: 250Nutri+Dol, équivalent à 250 kg N/ha + 2 T/ha chaux dolomitique. L'amendement à la chaux dolomitique est également un traitement autorisé par les agences de certification biologique. La composition des traitements, ainsi que le nombre de répétitions selon la zone considérée sont présentés au Tableau 1.3.

Tableau 1.3. Traitements de fertilisation

Traitement Composition		Nombre de répétitions Arbres collectés sous vide	Arbres collectés sous gravité
250Nutri	250 kg N/ha	7	18
250Nutri+Dol	250 kg N/ha + 2T (CaMg(CO ₃) ₂)/ha	7	18
125Nutri	125 kg N/ha	7	18
Témoin	n.a	9	18

Le *NutriWave 4-1-2* contient également 3% de calcium et 0,41% de magnésium (Tableau 1.2). De ce fait, en plus d'un apport conséquent en azote, phosphore et potassium, l'application des traitements 250Nutri et 125Nutri représente des ajouts de 187,5 kg Ca/ha et 93,75 kg Ca/ha respectivement, mais également un certain apport de magnésium.

1.3.4 Échantillonnage de sol et méthodes d'analyse

En 2008, 4 érables à sucre - représentant chacun un traitement différent - ont été sélectionnés de manière aléatoire, et trois fosses pédologiques ont été creusées autour de chacun d'eux. Douze échantillons de sol ont ainsi été collectés pour des analyses chimiques post-traitement. Les échantillons recueillis aux fins d'analyses chimiques ont

été prélevés en surface, dans les 15 premiers centimètres de sol, correspondant à la partie supérieure de l'horizon B. Chaque échantillon a ensuite été séché à l'air et tamisé à 2 mm. Les analyses de sol ont été effectuées au Centre Forestier Hugh John Flemming (HJFFC) à Fredericton. Le pH du sol a été mesuré par potentiométrie. L'azote total a été déterminé selon la méthode Kjeldahl et le carbone total par perte au feu au moyen d'une fournaise à induction LECO. Les cations échangeables ont été extraits à l'acétate d'ammonium 1,25 M, et le phosphore disponible avec du bicarbonate de sodium 0,5 M. Les concentrations des nutriments ont ensuite été mesurées au moyen de la technique du plasma inductif (ICP).

1.3.5 Échantillonnage de feuillage et méthodes d'analyse

Des échantillons de feuillage ont été prélevés annuellement sur chacun des arbres-échantillons, entre la mi-juillet et la mi-août. Dans la région, cette période de la saison de croissance précède la coloration des feuilles et correspond au moment où la composition nutritive et la masse foliaires sont les moins variables. De petites branches exposées à la périphérie du tiers supérieur de la cime ont été prélevées au moyen d'un fusil de calibre 12, et une quarantaine de feuilles a ainsi été récoltée sur chacun des arbres du dispositif. Les feuilles ont été placées dans des sacs en papier, puis séchées à l'étuve à 65°C pendant 48 heures avant d'être pulvérisées au moyen d'un moulin Wiley. Les analyses foliaires ont également été effectuées au HJFFC. L'azote a été déterminé par la méthode Kjeldahl. Les éléments P, K, Ca, Mg et Mn ont été extraits par digestion du feuillage dans de l'acide nitrique (HNO₃) et les concentrations des éléments ont été déterminées par ICP.

1.3.6 Observation de l'état des cimes

La vitalité de la cime a été évaluée entre la mi-juillet et la mi-août, pour chaque arbre-échantillon, selon la méthode NAMP (Millers *et al.*, 1991). L'aspect physique des feuilles, leur taille, leur couleur ainsi que la quantité de fines branches mortes sont

observées. À partir de ces observations, deux indicateurs de la vitalité des cimes sont estimés : (1) le pourcentage de transparence qui évalue l'interception de la lumière par la cime ou son opacité, et (2) l'indice de mort en cime qui évalue la présence de fines branches mortes, généralement dans le haut de la cime (Houston *et al.*, 1990).

1.3.7 Évaluation de la fermeture des entailles

La largeur de fermeture des entailles a été mesurée le 17 octobre 2008 pour 46 arbres collectés sous gravité. Les mesures ont été prises pour les entailles de 2006 et 2007, effectuées respectivement le 6 et le 2 mars. Les entailles, effectuées au moyen d'une perceuse, avaient un diamètre initial de 8 mm et une profondeur de 57.15 mm. Au niveau du tronc, les entailles étaient positionnées à hauteur de poitrine (environ 1,3 m du sol). Un pied à coulisse micrométrique a été utilisé pour mesurer le diamètre des entailles, et la largeur de fermeture a été déterminée en calculant la différence entre le diamètre mesuré et celui de la mèche (Huggett *et al.*, 2007). La fermeture des entailles de 2006 a ainsi été mesurée après trois saisons de croissance, et celles de la saison 2007 après deux saisons de croissance.

1.3.8 Analyse des données

Une analyse de variance (ANOVA) a été utilisée pour tester les différences entre les traitements quant à leurs effets sur la chimie du sol. Lorsque le *test* de *F* global de l'ANOVA était significatif, le test *a posteriori Fisher LSD* a été utilisé pour déterminer les différences spécifiques entre les traitements (Côté *et al.*, 1993). La diagnose du statut nutritif foliaire a été réalisée selon une méthodologie combinant l'approche des valeurs critiques modifiées proposée par Côté *et al.* (1993) à celle des déséquilibres nutritionnels exposée par Camiré et Ouimet (1992). Les concentrations foliaires en macronutriments (N, P, K, Ca, et Mg) ont ainsi été comparées aux valeurs critiques modifiées au moyen d'un test de *t.* De plus, la différence de concentration en nutriments entre les traitements a été testée par une analyse de variance (ANOVA). Le

test de Fisher LSD a permis de faire des comparaisons deux à deux lorsque l'ANOVA a révélé des différences significatives. Un test de t a également été utilisé pour comparer les ratios de nutriments foliaires soit à la borne supérieure soit à la borne inférieure de l'étendue de référence établie par Camiré et Ouimet (1992) pour des érablières saine. En dépit de l'existence de plusieurs approches de diagnose, l'interprétation des résultats d'analyse foliaire demeure une opération assez délicate, compte tenu des limitations de chaque approche. Pour cette étude, des analyses foliaires ont été effectuées chaque année et cela a permis de mettre en évidence des variations interannuelles affectant les concentrations en nutriments foliaires aussi bien pour les arbres traités que pour les témoins. De plus, pour ce genre d'études, les différences statistiques ne traduisent pas forcément ce qui se passe sur le plan biologique. Afin d'obtenir un complément d'informations pour une meilleure interprétation des résultats, les fluctuations de concentrations en nutriments foliaires susceptibles d'être attribuées à l'effet des traitements ont été évaluées au moyen de la relation $[(C_x/C_t \times 100) - 100]; C_x$ étant la concentration foliaire moyenne du nutriment pour un groupe d'arbres ayant reçu un traitement de fertilisation x et C_t, la concentration foliaire moyenne du nutriment pour le groupe d'arbres témoins au cours de l'année post-traitement considérée. Cette relation permet d'isoler, dans une certaine mesure, la proportion des fluctuations des nutriments foliaires que l'on pourrait attribuer à l'effet d'un traitement, les variations interannuelles étant « contrôlées » par le rapport avec le groupe d'arbres témoin.

Les indicateurs de la vitalité des cimes (indice de mort en cime et transparence) ont été analysés au moyen d'un *test* de *Kruskal-Wallis* car les données ne suivaient pas une distribution normale. Pour mettre en évidence l'efficacité des traitements à favoriser la fermeture des entailles, les différences entre les largeurs moyennes de fermeture ont été analysées en utilisant des contrastes : 250Nutri *versus* Témoin; 250Nutri+Dol *versus* Témoin; 125Nutri *versus* Témoin; 250Nutri *versus* 250Nutri+Dol. Pour tous les tests, les différences étaient considérées statistiquement significatives lorsque $p \le 0.05$.

1.4 Résultats

1.4.1 Caractéristiques chimiques du sol

Deux ans après l'application des traitements, des différences significatives ont été mises en évidence dans les propriétés chimiques des sols traités par rapport au témoin (Tableau 1.4). Une valeur du pH plus élevée (p<0.05) a été observée dans le sol ayant reçu le 250Nutri+Dol tandis qu'une valeur plus faible de pH a été observée dans celui qui a reçu le 125Nutri. La concentration en matière organique ainsi que l'azote total sont plus faibles de 19% et 14% respectivement dans les sols ayant reçu le 250Nutri+Dol. Des valeurs plus faibles de phosphore disponible ont également été observées dans les sols fertilisés par rapport au témoin. La baisse du phosphore était particulièrement marquée dans le sol ayant reçu le traitement 125Nutri. Concernant les cations basiques, les sols traités avec 250Nutri et 250Nutri+Dol montrent des valeurs de K échangeable plus élevées de 60% et 130% respectivement par rapport au témoin. Dans les sols ayant reçu ces traitements, on retrouve également du Ca échangeable de 50% supérieur à celui du témoin, alors que le Mg échangeable est de près de 100% supérieur dans le sol traité au 250Nutri+Dol. Toutefois, aucun des traitements ne semble avoir modifié significativement le rapport C/N dans le sol.

1.4.2 Concentration foliaire en nutriments

Pendant la durée de l'expérience et indépendamment du traitement appliqué, les concentrations foliaires en nutriments des arbres-échantillons (mg g⁻¹) variaient de : 13,8 à 27,5 pour l'azote; 1,2 à 3,9 pour le phosphore; 4,6 à 12,9 pour le potassium; 1,6 à 10,0 pour le calcium; 0,5 à 1,8 pour le manganèse et 0,2 à 2,3 pour le manganèse. Les valeurs rapportées dans le Tableau 1.5 sont des moyennes calculées sur 25 à 27 arbres. Ces résultats montrent qu'en 2005 (année prétraitement) les concentrations foliaires en azote étaient proches du seuil critique de déficience, mais le test de *t* n'a pas mis en évidence de différence significative entre les valeurs mesurées et le seuil critique de déficience établi pour cet élément.

Tableau 1.4. Caractéristiques chimiques du sol en 2008 (moyenne ± erreur-type)

Traitement	рН	M.O.	N total	C/N	K	Ca	Mg	P		
		(%	(%)		[cmol (+) kg ⁻¹]		[cmol (+) kg]	(mg kg ⁻¹)
250Nutri	4.39±0.01	13.12±0.39	0.39±0.02	19.46±0.23	*0.16±0.01	*0.30±0.01	0.13±0.00	*21.62±0.29		
250Nutri+Dol	*4.65±0.02	*10.13±0.28	*0.31±0.00	19.24±0.32	*0.23±0.01	*0.30±0.00	*0.22±0.01	*20.42±0.42		
125Nutri	*4.34±0.04	11.33±0.67	0.34±0.02	19.41±0.19	0.11±0.01	0.25±0.05	0.13±0.01	*15.05±0.24		
Témoin	4.43±0.02	12.52±0.40	0.36±0.00	20.10±0.48	0.10±0.00	0.20±0.01	0.13±0.00	25.65±0.39		

^{*}Différent du Témoin au seuil α =0.05

En 2006, les arbres traités au 250Nutri avaient un niveau d'azote foliaire comparable à la valeur optimale établie par Côté *et al.* (1993) pour des érablières saines. Pendant toute la durée de l'expérience, la teneur en azote du feuillage des arbres traités est demeurée supérieure ou égale au seuil critique de déficience. En 2006 et 2007, la concentration foliaire en azote des arbres témoins était au-dessous du seuil critique de déficience.

Pour le phosphore, les concentrations foliaires mesurées sont restées au-dessus de la valeur optimale, pendant toute la durée de l'expérience, aussi bien pour les groupes d'arbres traités que pour le groupe témoin. En 2006, tous les arbres fertilisés avaient une teneur en phosphore supérieure à celle des arbres témoins.

Au cours de l'expérience, aucun traitement de fertilisation n'a modifié significativement la teneur en K foliaire des arbres traités par rapport aux témoins. Les concentrations en K mesurées avaient tendance à diminuer pendant l'expérience (y compris pour les arbres témoins), mais le niveau est resté supérieur ou égal au seuil de déficience.

Pendant l'expérience, la teneur en Ca foliaire est restée au-dessous du seuil critique de 8,7 mg g⁻¹ établi pour cet élément. Toutefois, le traitement 250Nutri+Dol semble avoir modifié positivement la concentration en Ca foliaire des arbres traités en 2006 et 2007 par rapport aux témoins. En 2006, une augmentation du calcium foliaire a également été observée chez les arbres qui ont reçu le traitement 250Nutri.

Pour l'année 2006, la teneur en magnésium foliaire des arbres témoins paraissait significativement inférieure au seuil de déficience, alors qu'en 2008 les arbres ayant reçu le traitement 250Nutri+Dol ont vu leur teneur en magnésium foliaire dépasser la valeur de référence optimale. Quant au manganèse, aucune différence significative n'a été mise en évidence entre la valeur obtenue pour les arbres traités par rapport à celle des arbres témoins. Le seuil de toxicité du manganèse n'est pas connu pour la région. Toutefois, les résultats des analyses foliaires réalisées en 2005 montrent que la teneur en manganèse foliaire des arbres du dispositif était comparable aux valeurs rapportées par Houle *et al.*, (2007) pour des érables dépérissants.

Tableau 1.5. Concentrations foliaires en nutriment (mg g⁻¹) et valeurs de référence

Nutriment	Année)		Se Optimum ^a	euil critique ^a		
		250 Nutri	250 Nutri+Dol	125 Nutri	Témoin		
N	2005 2006 2007 2008	19,28 22,11* 18,47 20,14	19,32 20,43 17,96 19,76	19,53 20,51 18,31 19,88	19,77 19,05 • 17,18 • 19,52		22,00
Р	2005 2006 2007 2008	2,01 [®] 2,33*· [®] 1,63 [®] 1,90 [®]	1,92 " 2,33*- " 1,61 " 1,82 "	1,99 " 2,25* 1,65 " 2,02 "	1,94 1,45	1,00	1,30
К	2005 2006 2007 2008	7,07 ° 7,53 ° 6,55 ° 6,24	6,96 * 7,04 * 6,53 * 5,49	7,20 * 7,00 * 6,26 6,08		6,00	7,70
Ca	2005 2006 2007 2008	3,69 [®] 5,69*· [®] 3,72 [®] 4,13 [®]	3,44 [*] 5,86** 4,12** 4,55 [*]	3,25 * 4,68 * 3,67 * 3,81 *	4,41		11,00
Mg	2005 2006 2007 2008	1,11 1,14 1,16* 1,37	1,04 1,13 1,18* 1,54*-	1,03 0,98 1,08 1,25	1,07 0,93 * 0,96 1,22	1,20	1,40
Mn	2005 2006 2007 2008	1,10 1,50 1,10 1,20	1,00 1,40 1,10 1,20	1,10 1,50 1,20 1,30	1,20 1,40 1,00 1,30	-	-

^aCôté et al. (1993)

Le Tableau 1.6 présente les ratios de concentrations foliaires en nutriments. Au cours de l'expérience, les ratios foliaires de nutriments des arbres-échantillons variaient de : 5,71 à 16,45 pour N/P; 1,07 à 4,69 pour N/K; 1,95 à 17,61 pour N/Ca; 8,27 à 38,03 pour N/Mg; 0,11 à 0,54 pour P/K; 0,15 à 1,07 pour P/Ca; 0,84 à 5,58 pour P/Mg; 0,67 à 6,41

^{*}Différent du Témoin au seuil α =0.05

Différent de la valeur critique au seuil α =0.05

pour K/Ca; 3,14 à 17,72 pour K/Mg et 2,03 à 5,83 pour Ca/Mg. Les valeurs rapportées sont des moyennes calculées sur 25 à 27 arbres.

Les ratios N/P et N/K montrent que ces éléments se trouvaient en équilibre en 2005 (avant traitement) et ont gardé cet équilibre pendant la durée de l'expérience. Le ratio N/K restait toutefois supérieur à la valeur de référence proposée par Lozano et Huynh (1989) du début à la fin de l'expérience. En 2005, les ratios N/Ca, P/Ca et K/Ca étaient supérieurs aux valeurs de référence établies pour des érablières saines. L'application de 250Nutri+Dol a permis de rétablir l'équilibre pour le ratio N/Ca en 2006 et pour le K/Ca en 2008.

En 2005 et 2006, le ratio N/Mg excédait la borne supérieure de l'étendue pour tous les traitements. Au cours des années 2007 et 2008, l'équilibre a été rétabli aussi bien pour les arbres traités que les témoins. Pour tous les arbres du dispositif, le ratio P/K se trouvait dans les limites de l'étendue pendant la durée de l'expérience, à l'exception des arbres qui ont reçu les traitements 250Nutri+Dol et 125Nutri qui ont excédé l'étendue en 2006 et 2008 respectivement. Globalement, l'application de fertilisants avait tendance à favoriser le déséquilibre entre P et K par une augmentation du ratio P/K.

Au début de l'expérience, la valeur du ratio P/Mg dépassait également la borne supérieure de l'étendue référence. Le 250Nutri ainsi que le traitement complet ont permis de rétablir l'équilibre entre ces éléments à partir de 2007. En 2008, l'équilibre a également été observé entre ces éléments pour les arbres témoins. Quant au ratio K/Mg, il est resté dans les limites établies pour des arbres sains pendant la durée de l'expérience pour tous les arbres du dispositif, à l'exception des arbres témoins en 2006.

Au cours des années 2005 et 2006, les valeurs du ratio Ca/Mg montrent que ces éléments étaient en équilibre pour tous les arbres du dispositif, par rapport à l'étendue de référence. La valeur de ce ratio a diminué chez les arbres du dispositif en 2007 et 2008 au point où le Ca et le Mg se sont retrouvés en déséquilibre aussi bien chez les arbres traités que chez les témoins en 2007 et/ou 2008. Le déséquilibre était particulièrement marqué chez les arbres ayant reçu les traitements 250Nutri et 250Nutri+Dol.

Tableau 1.6. Ratios de concentrations foliaires et valeurs de référence

Ratio	Année		Traitement				Étendue ^a	Moyenne ^b
		250Nutri	250Nutri+Dol	125Nutri	Témoin			
N/P	2005 2006 2007 2008	9,92 9,95 11,59 11,04	10,11 9,07 11,42 10,99	9,82 9,27 11,30 10,20	10,44 10,25 11,98 11,35	11,50	8,39 - 14,7	
N/K	2005 2006 2007 2008	2,90 3,03 2,90 3,34	2,86 3,02 2,88 3,72	2,77 2,95 2,96 3,36	2,94 2,82 2,86 3,25	2,60	1,73 - 3,47	1,85
N/Ca	2005 2006 2007 2008	5,89 " 4,49 " 5,66 " 5,72 "	6,38 * 4,18 4,71 * 4,81 *	6,55 " 4,80 " 5,32 " 5,80 "	6,05 ^a 4,58 ^a 6,03 ^a 5,74 ^a	2,12	1,21 - 3,02	1,58
N/Mg	2005 2006 2007 2008	19,61 ¹ 22,51 ¹ 16,94 15,22	20,66 [¶] 20,40 [¶] 15,20 13,21	20,30 ^a 23,67 ^a 17,44 16,66	19,58 * 23,33 * 18,40 16,95	11,90	8,20 - 15,7	
P/K	2005 2006 2007 2008	0,31 0,32 0,25 0,31	0,29 0,35 * 0,25 0,34	0,29 0,33 0,27 0,34	0,29 0,28 0,24 0,29	0,22	0,16 - 0,29	
P/Ca	2005 2006 2007 2008	0,62" 0,45" 0,49" 0,54"	0,66 0,47 0,41 0,44	0,67 ° 0,52 ° 0,47 ° 0,58 °	0,59 " 0,46 " 0,51 " 0,51 "	0,18	0,11 - 0,25	0,19
P/Mg	2005 2006 2007 2008	2,04 ^a 2,23 ^a 1,47 1,43	2,18 * 2,35 * 1,34 1,22	2,13 [®] 2,61 [®] 1,56 [®] 1,68 [®]	1,92 " 2,32 " 1,55 " 1,51	1,04	0,75 - 1,33	
K/Ca	2005 2006 2007 2008	2,09" 1,51" 2,00" 1,75"	2,29 " 1,41 " 1,66 " 1,32	2,39" 1,64" 1,83" 1,78"	2,11 ^a 1,67 ^a 2,16 ^a 1,80 ^a	0,82	0,53 - 1,11	0,90
K/Mg	2005 2006 2007 2008	6,78 7,62 5,94 4,69	7,58 7,02 5,42 3,67	7,37 8,10 6,05 5,11	6,81 8,54 * 6,54 5,32	4,71	3,18 - 6,24	7,12
Ca/Mg	2005 2006 2007 2008	3,41 5,12 3,11 [*] 2,94 [*]	3,41 5,25 3,43 2,94	3,25 5,08 3,39 3,03	3,35 5,10 3,15 [*] 3,02 [*]	5,73	3,96 - 7,50	7,60

a Camiré & Ouimet (1992)
b Lozano & Huynh (1989)
Différent de la borne supérieure ou inférieure de l'étendue au seuil α=0,05

Les fluctuations des nutriments foliaires que l'on pourrait attribuer aux effets des traitements sont présentées à la Figure 1.2. Pour la nutrition azotée, en 2006, les arbres traités au 250Nutri avaient une concentration en azote foliaire supérieure de 16% par rapport aux arbres témoins (p<0.05). En 2006, tous les arbres fertilisés avaient une meilleure nutrition foliaire en phosphore que les témoins. Des concentrations foliaires en phosphore supérieures de 20.3%, 20.2% et 16.1% par rapport aux arbres témoins ont été observées pour les arbres ayant reçu les traitements 250Nutri+Dol, 250Nutri et 125Nutri respectivement (p<0.05). En 2007 et 2008, le feuillage des arbres fertilisés avait toujours tendance à avoir une concentration plus élevée en phosphore que celui des arbres témoins, bien que la différence ne fût pas significative.

Aucun traitement de fertilisation n'a entrainé de modifications significatives de la teneur en potassium foliaire des arbres traités par rapport aux témoins. Les traitements 250Nutri et 250Nutri+Dol tendaient à l'influencer positivement en 2006 et/ou 2007, alors qu'une tendance à la diminution du K foliaire a été observée en 2008 chez les arbres traités au 250Nutri+Dol. Le traitement 250Nutri+Dol semble avoir donné les meilleurs résultats en termes de nutrition foliaire en calcium avec des augmentations de 32.8% et de 37.2% observées pour cet élément en 2006 et 2007 respectivement, par rapport aux arbres témoins (p<0.05). Une hausse de 29.1% de la concentration en calcium foliaire a aussi été observée chez les arbres ayant reçu le traitement 250Nutri par rapport aux témoins. Cependant, ces augmentations n'ont pas permis d'atteindre les valeurs seuils de déficience.

Concernant la nutrition foliaire en magnésium, le meilleur résultat a été observé pour le traitement 250Nutri+Dol. En 2008, les arbres qui ont reçu ce traitement montraient une concentration en magnésium foliaire supérieure de 25.7% à celle des témoins. La teneur en manganèse foliaire n'a pas été influencée significativement par les traitements, mais elle tendait à augmenter en 2006 et 2007 chez les arbres fertilisés, alors qu'en 2008, elle avait tendance à diminuer chez ceux qui ont reçu les traitements 250Nutri et 250Nutri+Dol, comparativement aux arbres témoins.

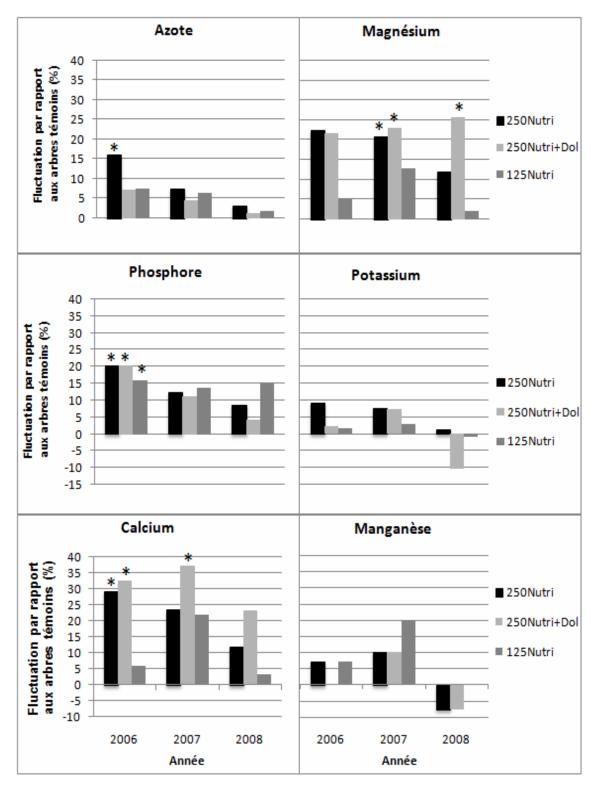


Figure 1.2. Fluctuations des concentrations foliaires moyennes des arbres fertilisés par rapport aux témoins.

1.4.3 État des cimes

L'évolution des indicateurs de la vitalité des cimes est présentée au Tableau 1.7. Les résultats montrent que les arbres sont demeurés en santé pendant toute la durée de l'expérience, c'est-à-dire moins de 25% de mort en cime ou de transparence observé. Jusqu'en 2008, aucune différence n'a été mise en évidence quant à l'efficacité des traitements à modifier le niveau de transparence ou de mort en cime (Tableau 1.7).

1.4.4 Fermeture des entailles

Les arbres traités au 250Nutri ont eu une moyenne de fermeture des entailles de 2006 supérieure (p<0,05) à celle des arbres qui ont reçu les traitements 250Nutri+Dol et témoin (Figure 1.3). Les contrastes montrent également que les arbres qui ont reçu les traitements « Nutri sans chaux » avaient une moyenne de fermeture des entailles supérieure (p=0,03) à celle des arbres témoins (Tableau 1.8). Généralement, les arbres fertilisés avaient tendance à refermer leurs entailles plus rapidement que les arbres témoins. Toutefois, les contrastes n'ont pas révélé de différence entre les traitements pour la fermeture des entailles de 2007.

1.5 Discussion

Les modifications, légères à certains égards et plus substantielles à d'autres, ont été observées au niveau de la chimie du sol suite à l'application des traitements. Des valeurs de pH plus faibles que celles du témoin ont été observées dans le sol traité au 125Nutri (p<0.05), ce qui ne fut toutefois pas le cas pour celui traité au 250Nutri. Cette baisse du pH peut découler de la nitrification de l'azote contenu dans le NutriWave. En effet, suite à un apport d'azote par fertilisation, la nitrification peut entrainer une diminution du pH du sol par la libération d'ions H⁺ (Brady et Weil, 2002). Plusieurs auteurs ont rapporté des résultats montrant une baisse du pH dans les horizons supérieurs des sols d'érablières suite à un apport d'azote par fertilisation (Elvir *et al.*, 2003; Boggs *et al.*, 2005; Timmer *et al.*, 2003;

Tableau 1.7. Analyse des indicateurs de la vitalité des cimes (moyenne ± erreur-type) pour tous les traitements en 2006, 2007 et 2008

	vaic	Valeur moyenne pour chaque traitement				Différence entre les traitements	
	250Nutri	250Nutri+Dol	125Nutri	Témoin			
2006	9 20 ± 0 96	7 40 ± 0 77	7.61 ± 0.88	7.06 ± 0.91	n = 25 à 27	n = 0.04	
2007	$9,20 \pm 0,80$ $9,20 \pm 1,21$	$6,92 \pm 0,66$	$7,01 \pm 0,88$ $8,39 \pm 1,57$	$7,90 \pm 0,81$ $8,26 \pm 1,14$	n = 25 à 27 n = 25 à 27	p = 0.94 $p = 0.63$	
2008	$8,00 \pm 0,87$	$6,80 \pm 0,49$	$8,48 \pm 0,91$	$10,19 \pm 1,12$	n = 25 à 27	p = 0.16	
2006	$13,00 \pm 0,82$	$13,40 \pm 1,65$	$10,87 \pm 1,07$	$11,48 \pm 0,88$	n = 25 à 27	p = 0.35	
2007	$8,00 \pm 0,82$	$8,80\pm1,01$	$9,13 \pm 0,93$	$10,93 \pm 1,34$	n = 25 à 27	p = 0.63	
2008	$10,00 \pm 1,23$	$8,80 \pm 0,93$	$11,09 \pm 2,65$	$11,11 \pm 1,26$	n = 25 à 27	p = 0.45	
	200820062007	2006 $8,20 \pm 0,86$ 2007 $9,20 \pm 1,21$ 2008 $8,00 \pm 0,87$ 2006 $13,00 \pm 0,82$ 2007 $8,00 \pm 0,82$	2006 $8,20 \pm 0,86$ $7,40 \pm 0,77$ 2007 $9,20 \pm 1,21$ $6,92 \pm 0,66$ 2008 $8,00 \pm 0,87$ $6,80 \pm 0,49$ 2006 $13,00 \pm 0,82$ $13,40 \pm 1,65$ 2007 $8,00 \pm 0,82$ $8,80 \pm 1,01$	2006 $8,20 \pm 0,86$ $7,40 \pm 0,77$ $7,61 \pm 0,88$ 2007 $9,20 \pm 1,21$ $6,92 \pm 0,66$ $8,39 \pm 1,57$ 2008 $8,00 \pm 0,87$ $6,80 \pm 0,49$ $8,48 \pm 0,91$ 2006 $13,00 \pm 0,82$ $13,40 \pm 1,65$ $10,87 \pm 1,07$ 2007 $8,00 \pm 0,82$ $8,80 \pm 1,01$ $9,13 \pm 0,93$	2006 $8,20 \pm 0,86$ $7,40 \pm 0,77$ $7,61 \pm 0,88$ $7,96 \pm 0,81$ 2007 $9,20 \pm 1,21$ $6,92 \pm 0,66$ $8,39 \pm 1,57$ $8,26 \pm 1,14$ 2008 $8,00 \pm 0,87$ $6,80 \pm 0,49$ $8,48 \pm 0,91$ $10,19 \pm 1,12$ 2006 $13,00 \pm 0,82$ $13,40 \pm 1,65$ $10,87 \pm 1,07$ $11,48 \pm 0,88$ 2007 $8,00 \pm 0,82$ $8,80 \pm 1,01$ $9,13 \pm 0,93$ $10,93 \pm 1,34$	2006 8,20 ± 0,86 7,40 ± 0,77 7,61 ± 0,88 7,96 ± 0,81 n = 25 à 27 2007 9,20 ± 1,21 6,92 ± 0,66 8,39 ± 1,57 8,26 ± 1,14 n = 25 à 27 2008 8,00 ± 0,87 6,80 ± 0,49 8,48 ± 0,91 10,19 ± 1,12 n = 25 à 27 2006 13,00 ± 0,82 13,40 ± 1,65 10,87 ± 1,07 11,48 ± 0,88 n = 25 à 27 2007 8,00 ± 0,82 8,80 ± 1,01 9,13 ± 0,93 10,93 ± 1,34 n = 25 à 27	

Note : l'analyse des indicateurs de la vitalité des cimes a été effectuée au moyen du *test de Kruskal-Wallis* (distribution non-normale)

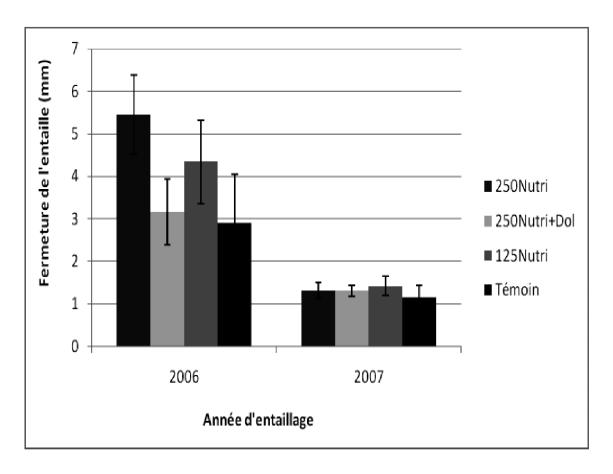


Figure 1.3. Fermeture des entailles de 2006 et 2007 (moyenne ± erreur-type) pour tous les traitements

Tableau 1.8. Efficacité des traitements à favoriser la fermeture des entailles de l'érable à sucre

Contraste	Valeur cor	ntraste (mm)	Valeur-Probabilit	té unilatérale (p)
	2006	2006 2007		2007
250Nutri – Témoin	2,74	0,14	0,02	0,34
250Nutri+Dol - Témoin	0,45	0,14	0,35	0,33
125Nutri – Témoin	1,63	0,25	0,12	0,24
250Nutri - 250Nutri+Dol	2,29	0,00	0,04	0,50

Côté *et al.*, 1995). La baisse de pH observée dans le sol traité au 125Nutri était associée à une diminution de la biodisponibilité en phosphore. Le phosphore peut être fixé, dans les sols acide, par le fer, l'aluminium et le manganèse en solution, ainsi que par les oxydes hydreux de fer et d'aluminium et l'argile (Paré, 1995). L'immobilisation du phosphore par ces éléments le rend indisponible à court terme pour les plantes. Pourtant, une tendance à l'augmentation de la teneur en phosphore du feuillage des arbres fertilisés a également été observée en 2008, par rapport aux arbres témoins. Cela peut s'expliquer par le fait que le phosphore foliaire et dans le sol n'est pas considéré comme problématique sur dans le site de l'étude. Le sol est assez riche en phosphore et la légère baisse de sa concentration dans le sol n'a pas entrainé de diminution dans le feuillage.

La relative stabilité du pH du sol traité au 250Nutri par rapport au témoin peut être expliquée par le fait qu'un plus grand apport de NutriWave correspond également à un apport substantiel de cations basiques dans le sol (Tableau 1.2). En plus de leur effet alcalinisant, les cations basiques peuvent favoriser la minéralisation de la matière organique (Hendershot, Fyles et Lawrence, 1990). Effectivement, des augmentations de K et Ca échangeables ont été observées dans le sol traité au 250Nutri (*p*<0.050), alors que ces cations n'ont pas augmenté significativement dans le sol qui a reçu le traitement 125Nutri. L'augmentation des cations basique dans le sol ayant reçu le traitement 250Nutri aurait suffit à neutraliser les effets acidifiants de la nitrification. Ces résultats suggèrent également qu'il y aurait un seuil à partir duquel les éléments contenus dans le NutriWave peuvent contrebalancer l'effet de la nitrification sur le pH du sol.

Les effets les plus remarquables des traitements 250Nutri et 125Nutri sur la nutrition foliaire en azote et phosphore ont été observés au cours de la première saison de croissance subséquente à l'application des traitements, et ces effets avaient globalement tendance à diminuer au cours de la deuxième et la troisième saison de croissance suivant l'application des traitements. Plusieurs résultats similaires sont rapportés pour des expériences de fertilisation minérale (ou chimique) de type NPK (Timmer *et al.*, 2003).

Une augmentation significative du pH du sol a été observée suite à l'application du traitement complet (250Nutri+Dol). Cette hausse du pH était associée à des accroissements significatifs de K, Ca et Mg échangeables ainsi que des diminutions de l'azote total et de la matière organique dans le sol qui a reçu le traitement complet par rapport au sol témoin. La chaux est un produit alcalinisant et l'augmentation de Ca, K et Mg échangeables peuvent également contribuer à modifier positivement le pH du sol. La hausse du pH a possiblement stimulé l'activité microbienne dans le sol, favorisant ainsi la minéralisation de la matière organique. Kalisz et Stone (1980) ont observé une corrélation linéaire entre la capacité d'échanges cationiques et le pH d'un sol à humus de type mor, dont le pH varie naturellement de 3,2 à 5,6. Cette forte dépendance de la capacité d'échanges cationiques par rapport au pH peut expliquer l'augmentation du K échangeable dans le sol qui a reçu le traitement complet (Wilmot et al., 1996). La baisse significative de la matière organique observée dans les horizons supérieurs du sol suite à l'application de 250Nutri+Dol serait également liée à une plus forte minéralisation de la matière organique. Pour les arbres qui ont reçu le traitement complet, le niveau des éléments dans le feuillage semblait être déterminé par leur niveau dans le sol, à l'exception du potassium. Plusieurs auteurs ont rapporté ce type de relation entre la nutrition foliaire et la chimie du sol (Drohan et al., 2002). En 2008, une forte hausse du potassium, du magnésium et du calcium échangeables a été observée dans le sol traité au 250Nutri+Dol. Au cours de la même année, la concentration en magnésium foliaire a dépassé l'optimum établi pour des érablières saines, alors que la teneur en potassium foliaire n'a pas augmenté. Le fait qu'aucun traitement n'a entrainé de hausse significative de la concentration en potassium foliaire est assez surprenant, mais cela peut être expliqué par l'effet d'antagonisme K-Mg, un phénomène rapporté par plusieurs auteurs (Côté et al., 1995; Long et al., 1997; Moore et al., 2000; Ouimet et al., 1996; Ouimet et Camiré, 1995). Moore et al. (2000) pensent que ce phénomène apparaît quand la disponibilité en Mg devient supérieure à celle du K dans le sol. Dans des travaux où la chaux dolomitique est appliquée seul, l'effet d'antagonisme K-Mg peut s'observer dès la première saison de croissance post-traitement. Dans le cadre de cette étude, l'effet d'antagonisme K-Mg est possiblement apparu très faiblement dans la nutrition foliaire au cours de la troisième saison de croissance subséquente à

l'application du traitement complet (250Nutri+Dol), mais la concentration en potassium foliaire est restée supérieure ou égale au seuil de déficience pendant toute la durée de l'expérience et cet élément ne semble pas être responsable de déséquilibre. L'association du NutriWave 4-1-2 à la chaux dolomitique permettrait donc de limiter l'effet d'antagonisme K-Mg. Dans la fertilisation chimique, du K₂SO₄ est souvent associé à la chaux pour éviter ou corriger le problème d'antagonisme K-Mg (Moore et al., 2000; Wilmot et al., 1996). Les effets des traitements 250Nutri et 250Nutri+Dol sur la nutrition foliaire en calcium et magnésium restaient similaires jusqu'aux saisons de croissance de 2006 et 2007 respectivement, suggérant une solubilisation lente de la chaux dolomitique. Des résultats comparables ont été obtenus par Bernier et al. (1989). Dans une étude réalisée dans une érablière située au Sud du Québec, Fyles et al. (1994) ont également observé que la solubilisation de la chaux était relativement lente. Toutefois, des études récentes ont montré que les effets de la chaux peuvent également apparaître très vite dans les sols acides (Wilmot et al., 1996; Moore et al., 2000). Wilmot et al. (1996) prétendent que la solubilisation lente ou retardée de la chaux peut entrainer une amélioration immédiate du statut nutritif du sol en surface et provoquer un déséquilibre dans la distribution des racines fines au niveau des horizons supérieurs des sols forestiers. Marçais et al. (2000) ont rapporté que la fertilisation complète (NPK+chaux) réduit considérablement la biomasse des racines fines. Dans le guide sur l'aménagement des érablières de Houston et al. (1990), ces auteurs affirment également que l'application de la chaux peut inhiber les endomycorhizes qui améliorent la capacité des arbres à absorber l'eau et les nutriments.

Malgré les effets bénéfiques des fertilisants sur les statuts nutritifs des sols et du feuillage des arbres, le test de Kruskal-Wallis n'a pas mis en évidence de différences significatives entre les traitements quant à leurs effets sur les indicateurs de la vitalité des cimes. Cela peut s'expliquer par le fait que les arbres du dispositif expérimental étaient tous dans des classes de vigueur élevées. Au début de l'expérience, tous les arbres-échantillons étaient sains et vigoureux selon les critères de Millers *et al.* (1991), et de ce fait, une amélioration attribuable aux traitements est plus difficile à démontrer. De plus, l'estimation des symptômes de mort en cime et de transparence est un exercice

assez délicat à cause de la subjectivité des observations visuelles. De nombreuses sources d'erreurs peuvent limiter la détection de l'amélioration de l'état des cimes dans les premières années suivant l'application des fertilisants (Hendershot, 1991). En dépit de toutes les précautions prises dans le choix des protocoles, la sélection des observateurs et leur entrainement, tous les biais ne peuvent être éliminés. Il faut parfois continuer à observer l'état des cimes pendant un certain nombre d'années pour mettre en évidence des différences entre les traitements (Wilmot *et al.*, 1996; Huggett *et al.* 2007).

La capacité des arbres traités à refermer leurs entailles rapidement semble avoir été améliorée par rapport aux témoins, suite à l'application du traitement 250Nutri. Ces résultats corroborent ceux rapportés par Huggett *et al.* (2007), mais s'opposent à ceux obtenus par Noland *et al.* (2006) qui n'ont observé aucun effet de l'application de fertilisants sur la fermeture des entailles. Pour les entailles de 2006, les contrastes montrent que le traitement 250Nutri (sans chaux) a donné une largeur moyenne de fermeture des entailles supérieure à celle observée pour les arbres qui ont reçu le traitement complet et pour les arbres témoins. Ce résultat est étonnant et difficilement explicable car le traitement complet est celui qui a le plus contribué à la nutrition calcique des arbres. Or, il existe des preuves quant aux effets positifs du calcium sur l'activité vasculaire cambiale et la production de cambium au niveau de l'écorce des arbres (Huggett *et al.*, 2007).

1.6 Conclusion

L'étude a révélé que le calcium est l'élément dont la déficience était la plus marquée dans le dispositif. C'est également l'élément qui a le plus souvent contribué aux déséquilibres nutritionnels. La concentration en calcium foliaire était tellement bas qu'aucun des traitements n'a permis de la faire passer au-dessus du seuil de carence au cours de l'expérience. Chez le groupe d'arbres témoins, de légères déficiences en N ont été remarquées en 2006 et 2007, et une déficience en magnésium a été observée en 2006. Cela démontre que ces éléments sont à la limite de leurs seuils de déficience. Même si l'érablière expérimentale est apparemment en bonne santé, elle demeure donc

assez vulnérable. En effet, les problèmes de déséquilibre nutritionnel au niveau d'un site figurent parmi les facteurs prédisposant l'érable à sucre au dépérissement.

L'application des fertilisants a contribué à améliorer les concentrations en nutriments dans le sol et le feuillage des arbres traités par rapport aux témoins. Pour la nutrition foliaire en N, le traitement 250Nutri semble avoir été le plus efficace, alors que le traitement 250Nutri+Dol a donné des meilleurs résultats pour le P, le Ca et le Mg. Les plus fortes augmentations ont été observées en 2006 pour l'azote et le phosphore, c'est-à-dire à la première saison de croissance subséquente à l'application des traitements. Dans le cas des cations, l'évolution des concentrations foliaires dépendait des traitements appliqués. À l'échelle de l'écosystème, chaque élément a un cycle qui lui est propre. Avant d'atteindre le feuillage des arbres, les éléments apportés par fertilisation transitent par différents compartiments et une certaine proportion peut être utilisée ou stockée pour des besoins spécifiques de l'arbre. Il serait donc plus pertinent d'évaluer l'efficacité des traitements par rapport à leur contribution à la nutrition dans les différents compartiments plutôt que de s'en tenir uniquement à la nutrition foliaire. Cela pourrait amener un supplément d'informations pour mieux comprendre le cycle des nutriments et leur processus de translocation entre les différentes parties de l'arbre.

Il ressort de cette étude que la fertilisation organique peut atténuer les effets de la diminution de fertilité des sols et améliorer la vigueur de l'érable à sucre. Comme c'est le cas dans beaucoup d'érablières du Nord-Est américain et de l'Est canadien, cette étude a montré que le calcium est l'élément le plus problématique dans l'érablière étudiée. L'application du 250Nutri+Dol n'ayant pas permis de combler la déficience en calcium, un apport plus massif de cet élément s'avère souhaitable, mais il faudrait également éviter de provoquer d'autres déséquilibres. Le traitement complet a donné le meilleur résultat quant à sa capacité à rendre disponibles les cations dans le sol. De plus, dans les premières années post-traitement, le *NutriWave 4-1-2* à démontré sa capacité à limiter les effets d'antagonisme K-Mg qu'aurait entrainé la chaux dolomitique si elle était appliquée seule. Toutefois, l'association du *NutriWave 4-1-2* a une source naturelle de calcium différente de la chaux dolomitique pourrait être envisagée dans les recherches ultérieures pour éviter le problème d'antagonisme K-Mg. Combiner du

NutriWave-4-1-2 à une source naturelle de calcium telle que la wollastonite (CaSiO₃) pourrait constituer une alternative intéressante dans l'optique d'une production acéricole biologique.

Effets de la fertilisation organique sur les rendements en sucre de l'érable à sucre (*Acer saccharum* Marsh.)

2.1 Résumé

De 2005 à 2008, une expérience a été conduite dans une érablière située au Nord-Ouest du Nouveau-Brunswick en vue d'évaluer les effets de l'engrais organique NutriWave 4-1-2 et de la chaux dolomitique sur la production journalière de sucre. Pour ce faire, soixante-seize (76) érables à sucre (Acer saccharum Marsh) en apparence sains, mais présentant des déficiences foliaires en calcium, ont été sélectionnés et disposés dans un plan complètement aléatoire de quatre traitements de fertilisation (a: équivalent à 125 kg N/ha; b: équivalent à 250 kg N/ha; c: b + 2 T/ha chaux dolomitique; d: témoin). Au printemps 2006, les traitements ont été appliqués aux arbres-échantillons. La production d'eau collectée sous vide et sous gravité ainsi que sa teneur en sucre ont été mesurées et la production de sucre a été calculée quotidiennement pour les saisons 2006 (avant traitement), 2007 et 2008 (après traitement). Les effets des traitements sur les rendements en sucre ont été évalués au moyen d'une approche d'analyse statistique non usuelle dite des « arbres jumelés » s'inspirant de la méthode des bassins jumelés communément utilisée en hydrologie. Dans les années subséquentes à l'application des traitements, des augmentations allant jusqu'à 29,9% de la production de sucre ont été observées pour les arbres sous vide, alors que des diminutions atteignant 21,6% ont été observées pour ceux collectés sous gravité, comparativement aux témoins (p<0,05). Les changements dans la production de sucre semblaient être plus liés aux variations de la production d'eau qu'à celles de la teneur en sucre. Cette étude est l'une des premières à utiliser une méthodologie particulière pour étudier l'effet de la fertilisation sur la production de sucre. Elle propose également une influence du mode de collecte de l'eau sur les effets des fertilisants dans la production de sucre. Les résultats suggèrent que la fertilisation organique peut être utilisée comme méthode sylvicole pour accroître la production des érablières acéricoles équipées de pompe à vide.

Mots clés : Acer saccharum, fertilisation, production de sève et de sucre, acériculture

2.2 Introduction

La fertilisation forestière n'est pas une pratique courante au Canada (Camiré et al., 1997). Quand elle est mise en œuvre, cette méthode sylvicole vise avant tout à rétablir ou à maintenir l'équilibre des nutriments dans les sols forestiers. Toutefois, des producteurs ayant l'habitude d'épandre la cendre de bois sur les érables avoisinant la cabane à sucre prétendent que les arbres ainsi traités croissent plus rapidement et surtout donnent un meilleur rendement en sucre (Scott et Chamberland, 1962). Yawney et Walters (1973) suggèrent que la fertilisation des érablières acéricoles devrait se faire dans le but d'accroître la production de sirop, comme cela se fait pour d'autres plantes cultivées. Depuis le milieu du 20^{ème} siècle, la fertilisation des érables afin d'augmenter la production acéricole a fait l'objet de plusieurs études (Barry et Robichaud, 1994; Barry et Roy, 1998; Noland et al., 2006; Scott et Chamberland, 1962; Watterson et al., 1963). Pour l'essentiel, les résultats rapportés sur des expériences de fertilisation s'adressant à la production acéricole, ont été obtenus pour des arbres collectés sous gravité. La plupart de ces résultats n'ont pas permis d'établir avec certitude les effets de la fertilisation sur les rendements en sucre des érables (Walters, 1982; Huot, 1995). En effet, chez l'érable à sucre (Acer saccharum Marsh), les volumes d'eau produits et leurs concentrations en sucre varient souvent d'une saison à l'autre, d'un jour à l'autre et même d'une heure à l'autre au cours d'une même journée (Laing et al., 1973; Garrett et Dudzik, 1989). Les variations dans les paramètres de production des arbres s'expliquent par des facteurs environnementaux et génétiques (Blum et Gibbs, 1968; Kim et Leech, 1985; Laing et al., 1973; Marvin et al., 1967; Plamondon et Bernier, 1980; Pothier, 1995; Taylor, 1956). Cela rend difficile l'analyse des données et l'interprétation des résultats de ces études à l'aide des méthodes classiques d'analyses statistiques, et pose évidemment des problèmes méthodologiques dont il faut tenir compte dans les dispositifs d'étude (Barry et Robichaud, 1994; Barry et Roy, 1998; Blum et Gibbs, 1968; Yawney et Walters, 1973). De plus, le processus complexe de la coulée de l'eau d'érable n'est pas totalement élucidé. Il est généralement admis que ce phénomène se produit lorsque les températures alternent de part et d'autre du point de congélation moyennant l'existence d'une incision ou entaille dans l'aubier. Lorsque la température baisse au-dessous du point de congélation il se crée, dans les branches fines et dans

l'aubier, une pression négative (succion) en raison du gel de l'eau qui se trouve sur la paroi des éléments de vaisseau et de la compression des gaz (CO₂ entre autres) contenus à l'intérieur de l'arbre (Chapeskie, 1997; Tyree, 1983; Tyree, 1984). En autant que le sol puisse fournir de l'eau, la succion est transmise aux racines qui en absorbe jusqu'au moment où la pression dans l'arbre s'équilibre avec la pression atmosphérique. L'eau devient sucrée au contact du parenchyme du xylème. Quand la température monte audessus de 0°C et que la sève dégèle, diverses forces dont celles attribuables à l'expansion des gaz contenus dans le xylème, à l'osmose créée par la présence de sucres et de minéraux ainsi que la gravité contribuent à créer dans l'aubier une pression positive supérieure à la pression atmosphérique (Roy, 1997). La sève est ainsi entrainée du haut de la cime vers l'entaille, et l'écoulement se fait aussi longtemps que les pressions à l'intérieur de l'arbre resteront supérieures à la pression atmosphérique. Depuis la fin des années 1970, des techniques de collecte sous vide permettent d'obtenir une augmentation de la coulée en abaissant la pression à la sortie.

Par ailleurs, des chercheurs ont observé une forte corrélation entre les productions journalières et annuelles pour des arbres individuels ou des groupes d'arbres voisins soumis aux mêmes conditions environnementales (Barry et Robichaud, 1994; Barry et Roy, 1998; Blum et Gibbs, 1968; Marvin et al., 1967). Ces observations indiquent que la variation du volume d'eau récolté par entaille et sa teneur en sucre dépendent essentiellement des conditions météorologiques prévalant au cours de la saison de coulée. Cela a été vérifié par Pothier (1995) au cours d'une étude réalisée dans une érablière de la station forestière de Duchesnay au Québec. Sur la base de ces observations, Blum et Gibbs (1968) suggèrent de réduire les variabilités des paramètres de production en regroupant les arbres selon leur rendement en eau mesuré pendant une ou plusieurs années antérieures à l'étude. De leur côté, Barry et Robichaud (1994) ont proposé une approche inspirée de la « méthode des bassins jumelés » pour contourner les problèmes posés par la variabilité des paramètres de production. Cette approche, utilisée avec succès dans plusieurs travaux en hydrologie, est adoptée dans la présente étude.

L'objectif de cette étude est d'évaluer les effets de l'application du *NutriWave 4-1-2* et d'un traitement complet (*NutriWave 4-1-2* + Chaux dolomitique), produits acceptables dans un contexte de production acéricole biologique, sur les paramètres de production de sucre (production de sucre, volume et teneur en sucre journaliers) d'un groupe d'arbres sains sélectionnés dans une érablière du Nord-Ouest du Nouveau-Brunswick, collectés sous vide et sous gravité. Les trois hypothèses suivantes ont été testées :

- (1) l'application de *NutriWave 4-1-2* peut augmenter les rendements en sucre des arbres
- (i) par un accroissement de la production d'eau d'érable, et (ii) par une augmentation de la teneur en sucre de l'eau d'érable,
- (2) un traitement complet peu avoir un effet à plus long terme sur la production par rapport au *NutriWave 4-1-2* appliqué seul; et
- (3) le rôle de la fertilisation dans la production de l'érable à sucre est indépendant du mode de collecte de l'eau.

2.3 Matériel et méthodes

2.3.1 Aire d'étude

Le site de l'étude se trouve dans l'Érablière de la Montagne Verte, située à 35 Km au Nord-Est d'Edmundston, dans la région accidentée des Appalaches au Nord-Ouest du Nouveau-Brunswick (Figure 2.1a). Le substrat géologique est un schiste non-calcaire (Colpitts *et al.* 1995). Le sol, dérivé d'un till glacial, est classé comme un podzol ferro-humique orthique (Langmaid *et al.*, 1980). Le sol est caractérisé par un humus de type mor. Loameuse dans l'horizon C, la texture du sol est plutôt de type loam limono-argileux dans les horizons supérieurs. Le terrain est vallonné et très abrupt par endroits, avec une altitude variant de 315 à 400 mètres. Dans la région, la moyenne des températures annuelles est de 3.2°C environ, alors que la moyenne annuelle des précipitations se situe entre 801 et 1200 mm, avec 28% des précipitations sous forme de neige (Van Groenewoud, 1983).

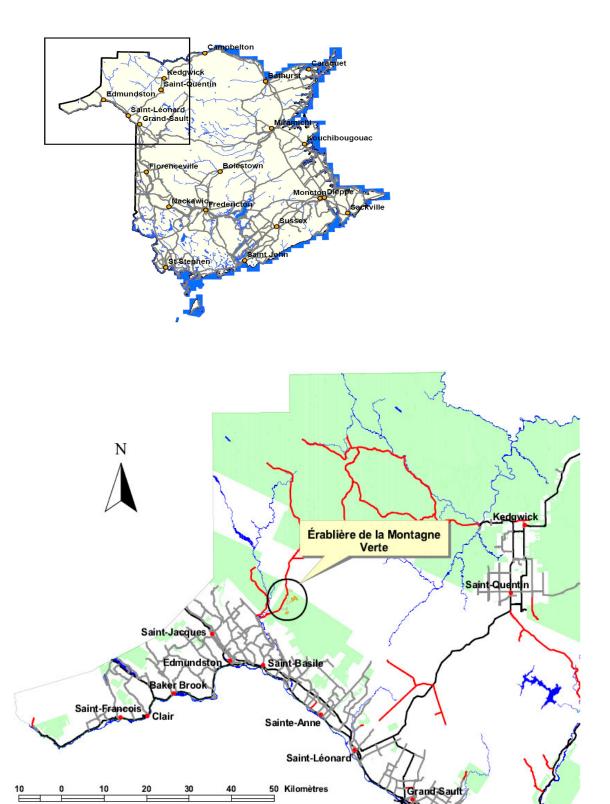


Figure 2.1a. Localisation du site de l'étude.

2.3.2 Structure et composition du peuplement

Le peuplement a une structure multi-âge inéquienne, mais le couvert des dominants contient majoritairement des arbres âgés en moyenne de 80 à 90 ans. Selon les critères de Millers *et al.* (1993), la majorité des arbres du peuplement étaient considérés sains et vigoureux pendant la durée de l'expérience. La nature et la composition du peuplement ont été évaluées lors d'un inventaire effectué en été 2005. Il s'agit d'une érablière à bouleau jaune et à hêtre. La végétation du site est dominée par l'érable à sucre (*Acer saccharum* Marsh) le hêtre à grandes feuilles (*Fagus grandifolia* Ehrh.), le bouleau jaune (*Betula alleghaniensis* Britt.) et l'érable rouge (*Acer rubrum* L.).

2.3.3 Échantillonnage, traitements, et paramètres mesurés

Un dispositif expérimental en plan complètement aléatoire a été établi dans la zone 1 de l'érablière à proximité de la cabane à sucre (Figure 2.1b).

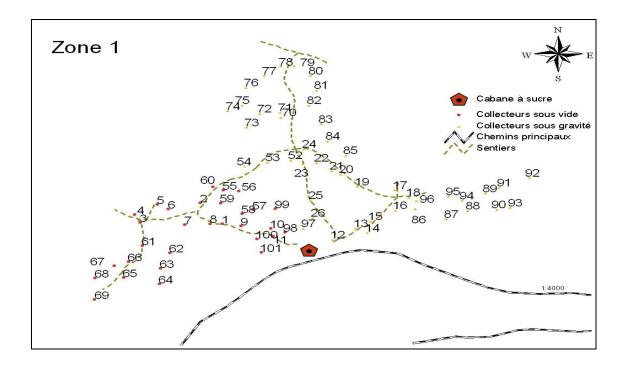


Figure 2.1b. localisation des arbres du dispositif

La taille de l'échantillon a été fixée en se basant sur différents travaux antérieurs du domaine, les expériences réalisées dans la région (Scott et Chamberland, 1962 ; Barry et Robichaud, 1994 ; Barry et Roy, 1998), ainsi que certains critères de faisabilité pratique. Soixante-seize (76) arbres ont été sélectionnés selon un certain nombre de critères établis pour les besoins de l'étude (Tableau 2.1). Pour faciliter le respect des critères de sélection des arbres, plutôt que d'établir des placettes-échantillons, l'arbre est utilisé à la fois comme unité d'échantillonnage et comme unité expérimentale.

Tableau 2.1. Critères de sélection des arbres-échantillons

Critère	Description
Espèce	Érable à sucre (Acer saccharum Marsh)
Localisation	Dans la zone la plus proximale à l'usine
Espacement minimal entre arbres-échantillons adjacents	30 m (rayon de fertilisation: 5 m; zone tampon : 20 m)
DHP	Compris ente 24 et 40 cm (une seule entaille)
Position dans le couvert	Dominant ^a (pas de sur- ni de sous-dominant)
Classe de vigueur ^a	Aucun à léger dépérissement des cimes, Transparence $\leq 25\%$, Mort en cime $\leq 25\%$ Décoloration du feuillage $\leq 25\%$ Absence de défauts au niveau du tronc (carie, chancre, carpophore, fente de plus de 2 cm de profondeur, gélivure, loupe et broussin de plus de 4 cm)

a voir Millers et al. (1991)

Le fertilisant organique utilisé est le *NutriWave 4-1-2* (appelé Nutri dans le texte). Il s'agit de fumier de volaille semi-composté (*i-e*. entreposé pendant moins de trois mois, séché à l'étuve et mis en granules). C'est un fertilisant naturel à relâchement lent (Tableau 2.2), certifié 100% organique et accepté par l'agence de certification biologique *Ecocert*.

Tableau 2.2. Composition chimique du *NutriWave 4-1-2*

Azote total	4.12%
Phosphore (P ₂ O ₅)	1.18%
Potassium (K ₂ O)	2.07%
Calcium (Ca)	3%
pH	6.3
Matière organique	> 75%
Magnésium (Mg)	0.41%
Zinc (Zn)	294 ppm
Manganèse (Mn)	328 ppm
Fer (Fe)	0.52%
Cuivre (Cu)	66 ppm
Bore B	22 ppm

Source: Envirem Technologies Inc. (2006)

Deux dosages de *NutriWave 4-1-2* ont été utilisés : 250Nutri, équivalent à 250 kg N/ha; et 125Nutri, équivalent à 125 kg N/ha. Un traitement complet composé d'un mélange de NutriWave 4-1-2 et de chaux dolomitique (CaMg (CO₃)₂) a également été appliqué : 250Nutri+Dol, équivalent à 250 kg N/ha + 2 T/ha chaux dolomitique. L'amendement à la chaux dolomitique est également un traitement autorisé par les organismes de certification biologique. Après la saison de coulée 2006, et avant la fin du débourrement, les traitements ont été appliqués manuellement sur une surface ayant un rayon de 5 mètres autour de 57 des 76 arbres du dispositif. Les 19 arbres restant ont été utilisés comme témoins. Deux types de collecteurs ont été utilisés pour la récolte de la sève: 30 arbres ont été collectés sous vide et 46 sous gravité. Le design des collecteurs sous vide a été élaboré en tenant compte des besoins spécifiques de l'étude. Leur

capacité est d'une dizaine de litres d'eau d'érable. Ils doivent permettre de maintenir un niveau de vide constant, transmis par le système de tubulure. Les collecteurs sous vide ont été confectionnés par Plastique Polyfab à Québec. Pour la collecte sous gravité, des bidons en plastique ont été reliés à l'entaille par un segment de tubulure, installés de manière à éviter la contamination par les précipitations. Le Tableau 2.3 montre la composition des traitements, ainsi que le nombre de répétitions selon la méthode de collecte utilisée.

Tableau 2.3. Traitements de fertilisation

Traitement	Composition	Nombre de répétitions			
		Arbres collectés sous vide	Arbres collectés sous gravité		
250Nutri	250 kg N/ha	7	12		
250Nutri+Dol	250 kg N/ha + 2T (CaMg(CO ₃) ₂)/ha	7	12		
125Nutri	125 kg N/ha	7	12		
Témoin	n.a	9	10		

La production d'eau d'érable ainsi que la teneur en sucre ont été mesurées quotidiennement pour chaque arbre du dispositif durant les saisons de coulée de 2006 (du 12 mars au 20 avril), 2007 (du 15 mars au 28 avril), et 2008 (du 5 au 27 avril). Les arbres ont été entaillés sur la face sud-est de leur tronc au moyen d'une perceuse munie d'une mèche de 8 mm de diamètre sur 57.2 mm de profondeur. En 2006, l'entaillage a été effectué le 6 mars; en 2007, il a été fait les 1^{er} et 2 mars respectivement pour les arbres collectés sous vide et sous gravité; et en 2008, les 14 et 22 février respectivement pour les arbres collectés sous vide et sous gravité. Pendant les saisons de coulée, les arbres collectés sous vide ont été soumis à une tension de 0.65 atm créée par une pompe à vide dans un système de tubulure. Chacun des arbres était équipé d'un collecteur attaché à un support qui récoltait l'eau d'érable. En début de matinée de chaque journée

de coulée, l'eau récoltée dans chacun des collecteurs a été mesurée au moyen d'un cylindre gradué aux 20 millilitres. Parallèlement, un échantillon d'eau de 50 ml a été prélevé sur chaque arbre pour en déterminer la teneur en sucre. Celle-ci a été mesurée au moyen d'un réfractomètre Abbe 3-L (*Bausch et Lomb*, précision de 0,2%). La quantité de sucre (en grammes/entaille) a été calculée à partir de la teneur en sucre et du volume d'eau d'érable collecté à l'entaille.

Les températures journalières maximale et minimale ont été mesurées dans une station installée au milieu du site de l'étude. Les données manquantes ont été remplacées par celles mesurées à la station météorologique de l'aéroport de St-Léonard, située à environ 50 km de l'érablière, après ajustement pour le site d'études. Par ailleurs, toutes les données météorologiques concernant les précipitations journalières ont été fournies par la station de St-Léonard.

2.3.4 L'approche des arbres jumelés

La grande variabilité journalière et saisonnière des paramètres de production de l'érable à sucre (volume de coulée, teneur en sucre de l'eau d'érable et rendement en sucre des arbres) rend très difficile l'évaluation des effets d'un traitement sur ces paramètres. Cette variabilité est due au fait que la production des arbres est très dépendante des conditions météorologiques. Blum et Gibbs (1968) ont affirmé que la variabilité des paramètres de production de l'érable à sucre pose un problème dont il faut tenir compte dans le dispositif expérimental. Ces auteurs ont suggéré de regrouper les arbres afin de réduire cette variabilité. L'approche des arbres jumelés permet, au moyen d'équations de prédiction établies pendant une période de calibration, de prédire, pour un groupe d'arbres auquel un traitement a été appliqué, les valeurs que l'on devrait obtenir pour les paramètres de production « s'il n'y avait pas eu traitement ». Dans la période post-traitement, deux valeurs seront déterminées pour chaque paramètre de production : une prédite et une observée. Les moyennes de production prédite et observée sont comparées au moyen de tests statistiques appropriés, et si une différence est mise en évidence, elle est attribuée aux effets des traitements.

L'approche des arbres jumelés est inspirée de la méthode des bassins jumelés couramment appliquée en hydrologie pour évaluer les effets des pratiques d'aménagement de la forêt sur le débit et la qualité de l'eau. Cela consiste à sélectionner un minimum de deux bassins adjacents ou voisins sur la base de critères de similarité (aire, géologie, topographie, couvert végétal, précipitation, etc.) et des possibilités pour qu'un seuil jaugeur y soit installé. L'un des bassins est désigné comme le témoin et l'autre (ou les autres) comme le(s) bassin(s) traité(s). Après la désignation des bassins, trois opérations sont effectuées : la calibration du bassin à traiter par rapport au témoin, le traitement du bassin et l'analyse des données collectées en vue de détecter d'éventuels changements attribuables au(x) traitement(s) appliqué(s) au niveau du débit et/ou la qualité de l'eau (Reynolds et Thompson, 1998). La calibration vise à établir une relation mathématique (équation de calibration) pré-traitement entre les variables hydrologiques du bassin témoin et celles du bassin qui subira le traitement. La relation de calibration la plus couramment utilisée entre des bassins jumelés est basée sur le débit annuel dans une analyse de régression linéaire simple, de la forme : $y_x = a + bx$, où y_x est le débit estimé pour le bassin traité; x, le débit observé pour le bassin témoin; a et b étant respectivement l'ordonnée à l'origine et la pente de la droite de régression (Chang, 2006). Une telle équation permettant de prédire les valeurs de débit qu'aurait eu le bassin traité (en absence de traitements), et les différences éventuelles entre les valeurs prédites et celles observées après traitements sont donc attribuées aux effets des traitements appliqués. Deux tests statistiques sont souvent utilisés pour tester les effets des traitements : le test de t apparié pour échantillons dépendants et le test de Wilcoxon pour échantillons appariés (Christensen et al., 2001). L'utilisation du test de t est appropriée quand la variable est distribuée selon la loi normale, alors que le test de Wilcoxon est un test non paramétrique qui s'applique quand la variable suit une distribution normale ou non-normale.

Dans le cadre de travaux de recherche en hydrologie forestière, la période de calibration peut varier de 5 à 10 ans, selon le degré de similarité des bassins, pour l'obtention d'une équation de calibration acceptable (Brooks *et al.*, 1991). Durant la période de calibration, les variables hydrologiques d'intérêt sont mesurées et les influences de facteurs non maitrisés sont mises en évidence. La calibration sert de référence pour

l'évaluation des effets des traitements appliqués sur les variables hydrologiques du (des) bassin(s) traité(s) pendant la période de traitement. En hydrologie forestière, plusieurs types de traitements s'appliquent aux bassins expérimentaux, en passant des éclaircies de faible intensité jusqu'à la coupe à blanc de tout le bassin traité.

L'approche des arbres jumelés a d'abord été suggérée pour évaluer la réponse de l'érable à sucre à des traitements de fertilisation par Yawney et Walters (1974). Cette méthode fut documentée pour la première fois par Barry et Robichaud (1994). Dans plusieurs études en hydrologie où l'approche des bassins jumelés est utilisée, les valeurs appariées résultent d'événements pluvieux. Compte tenu de la physiologie de la coulée de l'eau d'érable, chaque épisode de coulée s'apparentant à un épisode pluvieux, les mesures de coulée d'un même épisode ont été appariées. Il est donc proposé d'assimiler deux arbres ou deux groupes d'arbres voisins à des bassins versants, et de suivre l'évolution de leurs paramètres de production comme on examine la réponse hydrologique des bassins à des traitements sylvicoles.

Quand elle est utilisée dans des études traitant de la production acéricole, le succès de l'approche des bassins jumelés repose sur trois conditions essentielles : 1- l'existence d'une forte corrélation entre les paramètres de production des arbres individuels ou des groupes d'arbres avant l'application des traitements; 2- la validité des équations de prédiction pour la durée de l'étude; 3- l'existence d'une forte corrélation entre les paramètres de production de sucre des mêmes arbres ou des mêmes groupes d'arbres après traitements. La vérification de ces conditions dépend de la conception du dispositif expérimental. Par ailleurs, les travaux réalisés au Nord-Ouest du Nouveau-Brunswick ont montré que les paramètres de production mesurés quotidiennement sur des érables à sucre pendant une saison de coulée suffiraient à l'établissement d'équations de calibration acceptables (Barry et Robichaud, 1994; Barry et Roy, 1998; Barry et Desharnais, 2000).

2.3.5 Analyse des données

Le dispositif expérimental établi pour cette étude a été calibré de manière à permettre l'utilisation de l'approche des arbres jumelés pour suivre les effets des traitements sur la production de l'érable à sucre. En été 2005, 4 groupes d'arbres ont été constitués aléatoirement pour chaque type de collecteur à partir des 76 arbres inclus dans le dispositif expérimental. Un groupe d'arbres a été désigné comme témoin et les trois autres ont subi les traitements de fertilisation au printemps 2006 après la saison de coulée. Plusieurs tests ont été effectués sur les données afin de vérifier les conditions d'application de l'approche des « arbres jumelés ». Des analyses de régression ont été appliquées sur les paramètres de production mesurés pendant la saison de coulée 2006 (année de calibration) afin d'évaluer la corrélation entre les paramètres de production de sucre du groupe d'arbres témoins et de ceux qui devaient subir les traitements. Des équations de prédiction ont été obtenues à partir de ces analyses. De plus, pour chaque type de collecteur, les arbres témoins ont été repartis en deux sous-groupes. Les paramètres de production d'un sous-groupe par rapport à l'autre ont été suivis pendant les saisons de coulée de 2006, 2007 et 2008 afin de vérifier que les valeurs des coefficients de régression se maintiennent d'une année à l'autre, et donc de s'assurer de la validité des équations de prédiction pour la durée de l'étude. Cela a été effectué au moyen d'analyses de régression entre les sous-groupes d'arbres témoins et de comparaisons des pentes obtenues pour les trois saisons de coulée. Pour mettre en évidence d'éventuelles différences entre les pentes des droites de régression, une approche consistant à comparer leurs intervalles de confiance a été utilisée (Kleinbaum et al., 2008). Quand les intervalles de confiance des pentes de deux droites de régression se chevauchent, elles sont considérées parallèles et on conclut que les pentes sont égales.

Les équations de prédiction obtenues pour l'année de calibration ont été utilisées pour déterminer les changements de la production au cours des années 2007 et 2008 (années post-traitement). Cela a permis d'estimer, pour les groupes d'arbres traités, la production journalière qu'on devrait théoriquement obtenir si aucun traitement n'était appliqué. Les valeurs moyennes estimées par régression et celles qui sont observées

pour chaque saison post-traitement ont été comparées au moyen d'un *test* de t apparié ou d'un *test* de *Wilcoxon*, selon la distribution normale ou non-normale de la variable. Les conditions climatiques étant « contrôlées » par la comparaison avec le groupe d'arbres témoin, les changements observés dans la production en 2007 et 2008 sont attribués aux effets des traitements. Les analyses statistiques ont été effectuées au moyen du logiciel SPSS 15.0 (version 2006). Pour tous les tests, les différences étaient considérées statistiquement significatives pour $p \le 0.05$.

2.4 Résultats et discussion

2.4.1 Description des saisons de coulée (arbres témoins)

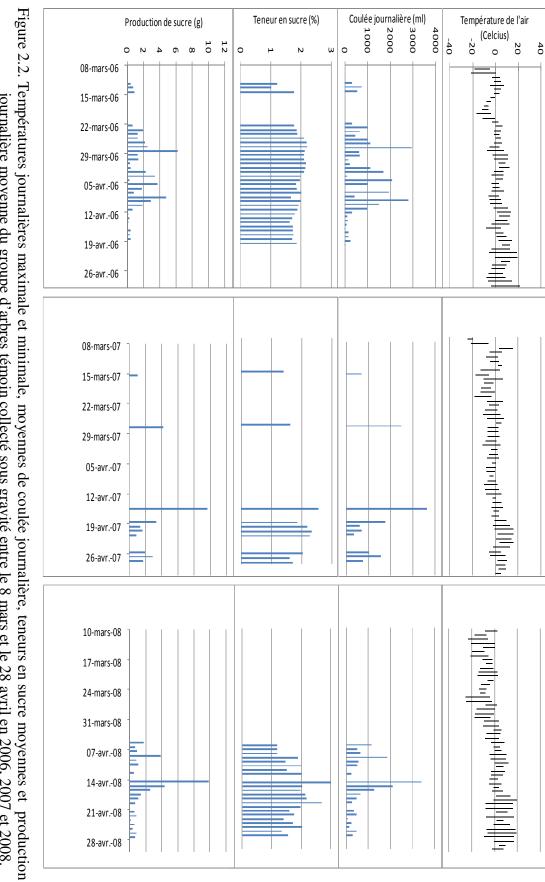
Les premières coulées ont été observées le 12 mars en 2006, le 15 mars en 2007 et le 5 avril en 2008 (Figures 2.2, 2.3). Quand la coulée commence tard, la saison des sucres a tendance à être courte, car dès la fin avril les arbres commencent à débourrer. Or le niveau de production d'une érablière est influencé non seulement par la teneur en sucre des arbres et le volume moyen de coulée journalière, mais également par le nombre de journées de coulée se produisant dans la saison. Ce nombre est dépendant des conditions météorologiques, sachant que des températures oscillant autour du point de congélation sont nécessaires pour produire l'événement de coulée. Au printemps 2006, les conditions météorologiques ont été particulièrement favorables à la coulée. Pour les arbres collectés sous gravité, trente-trois (33) journées de coulée ont été mesurées en 2006, alors qu'on n'en a mesuré que 10 en 2007 et 22 en 2008. Quant aux arbres collectés sous vide, 33 journées de coulées ont été mesurées en 2006, 17 en 2007 et 23 en 2008. D'importantes variations interannuelles ont été constatées au niveau des paramètres de production de sucre au cours des trois années de l'expérience pour les deux méthodes de collecte utilisées (Tableau 2.4). La saison 2006 fut de loin la plus productive avec un rendement moyen de 157 g et 47 g de sucre à l'entaille, pour les arbres collectés sous vide et sous gravité respectivement. La saison 2007 a été médiocre. C'était l'une des pires saisons enregistrées pour l'érablière avec une production moyenne de l'ordre de 70 g de sucres à l'entaille pour les arbres collectés sous vide et

27 g pour ceux collectés sous gravité. En 2008, la production était également assez faible. En moyenne, pour la durée de l'expérience, les arbres collectés sous vide ont produit à peu près 3 fois plus de sucre que ceux collectés sous gravité (105 g et 35 g de sucre à l'entaille respectivement).

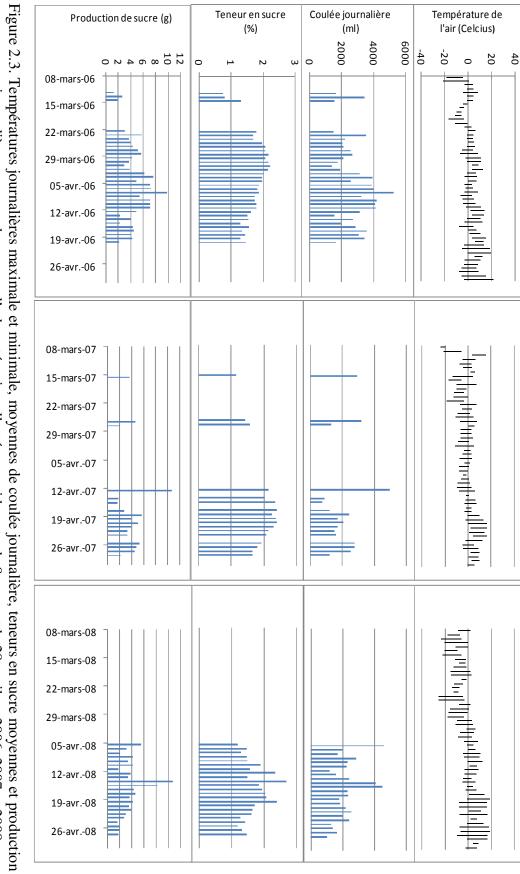
En termes de volume de coulée, les érables collectés sous vide ont produit en moyenne 3,4 fois plus d'eau que ceux collectés sous gravité (60,3 litres et 17,9 litres d'eau à l'entaille respectivement). Par ailleurs, le mode de collecte ne semble pas avoir d'influence significative sur la teneur en sucre de l'eau d'érable, même si l'eau des arbres collectés sous gravité avait tendance à être légèrement plus sucrée que celle des arbres sous vide en 2006 et 2008, c'est-à-dire durant les deux saisons de plus forte production.

La variabilité des paramètres de production entre arbres individuels était très marquée pour les trois saisons de coulée étudiées (Tableau 2.4). Au cours de la période d'étude, la production saisonnière maximale de sucre des arbres témoins collectés sous vide (229,9 g de sucre) a été enregistrée sur l'arbre n° 55 en 2006. La même année, soit le 7 avril 2006, cet arbre a également produit 7,9 litres d'eau, ce qui représente la coulée journalière maximale mesurée pour un arbre témoin collecté sous vide au cours de l'expérience. C'est également sur l'arbre n° 55 que la production journalière maximale de sucre (18,3 g) ainsi que la valeur journalière maximale de teneur en sucre (4,4%) ont été mesurées le 14 avril 2008. Pour les arbres témoins collectés sous gravité, la production saisonnière maximale (80,3 g) a été mesurée sur l'arbre n° 85 en 2006.

Les valeurs maximales de coulée et de production journalières de sucre (7,5 litres d'eau et 21,7 g de sucre respectivement) ont été mesurées sur l'arbre n° 80 le 15 avril 2007, alors que la valeur journalière maximale de teneur en sucre pour les témoins sous gravité, soit 6,8 %, a été mesurée sur ce même arbre le 19 avril 2008. Les valeurs rapportées dans le Tableau 2.4 pour les paramètres de production des arbres sous gravité sont comparables à celles obtenues par Barry et Roy (1998). Les variations



journalière moyenne du groupe d'arbres témoin collecté sous gravité entre le 8 mars et le 28 avril en 2006, 2007 et 2008.



journalière moyenne du groupe d'arbres témoin collecté sous vide entre le 8 mars et le 28 avril en 2006, 2007 et 2008.

interannuelles du volume et conséquemment de la production de sucre observées pour les paramètres de production aussi bien pour les arbres collectés sous vide que pour ceux collectés sous gravité confirment ce qui a été rapporté dans d'autres études (Barry et Robichaud, 1994; Barry et Roy, 1998; Blum et Gibbs, 1968; Kim et Leech, 1985; Laing *et al.*, 1973; Plamondon et Bernier, 1980; Pothier, 1995; Taylor, 1956; Yawney et Walters, 1973). Ces observations renforcent également la proposition qu'une approche statistique classique n'est pas pleinement appropriée pour étudier les effets de traitement sylvicole sur la production de sucre de l'érable, et supportent l'utilisation d'une méthode d'analyse telle que celle proposée, soit l'approche des arbres jumelés.

Par ailleurs, les Figures 2.2 et 2.3 montrent une grande similarité entre le profil de la production saisonnière de sucre et celui de la production d'eau d'érable. Les variations de la production journalière de sucre sont ainsi plus étroitement liées aux variations du volume de coulée qu'à celles de la teneur en sucre. Cela pourrait s'expliquer par le fait que les variations interjournalières de la teneur en sucre pour un érable donné sont généralement moins importantes par rapport aux variations de volume d'eau produit. Plusieurs auteurs ont observé un certain maintien de la teneur en sucre de l'eau d'érable d'une année à l'autre, révélant un certain déterminisme génétique de ce paramètre (Forget, 1996; Snow, 1964).

- 2.4.2 Relation entre les paramètres de production des groupes d'arbres
- 2.4.2.1 Relation entre les sous-groupes d'arbres témoins

L'une des conditions essentielles à l'application de l'approche des arbres jumelés est la forte corrélation existant entre arbres individuels et entre groupes d'arbres voisins soumis aux mêmes conditions environnementales. Pour les deux méthodes de collecte utilisées dans le cadre de l'étude, des coefficients de corrélation variant de 0,79à 0,99 ont été observés entre les sous-groupes d'arbres témoins pour les différents paramètres de production. La validité des équations de prédiction pour la durée de l'expérience constitue un autre préalable à l'application de l'approche des arbres jumelés. La comparaison des équations de régression linéaire entre les paramètres de

Tableau 2.4. Valeurs moyenne, minimale et maximale du volume d'eau, de la teneur en sucre et de la production des érables à sucre témoins en 2006, 2007 et 2008

	Arbres	collectés sous y	<i>r</i> ide	Arbre	s collectés sous g	ravité
	2006	2007	2008	2006	2007	2008
Volume d'eau (l/entaille)						
						$15.60 \pm$
Moyenne \pm ET)	93.09 ± 7.87	36.78 ± 2.64	51.06 ± 5.22	24.93 ± 2.93	13.19 ± 1.65	1.72
Valeur saisonnière maximale	137.89	52.97	71.96	35.46	23.53	20.28
Valeur saisonnère minimale	63.38	29.21	27.89	5.45	5.10	3.86
Valeur journalière maximale	7.9	7.40	6.80	4.68	7.48	4.80
Teneur en sucre (%)						
Moyenne \pm ET)	$1,71 \pm 0.06$	1.98 ± 0.09	1.63 ± 0.08	1.86 ± 0.04	1.96 ± 0.11	1.80 ± 0.10
Valeur saisonnière maximale	2.21	2.41	2.69	2.20	2.56	3.02
Valeur saisonnière minimale	0.76	1.16	1.19	1.00	1.5	1.18
Valeur journalière maximale	2.70	3.40	4.4	3.00	3.4	6.8
Production de sucre (g/entaille)						
(8		$71.00 \pm$				32.18 ±
Moyenne \pm ET)	157.02 ± 11.91	13.38	86.39 ± 8.47	46.67 ± 6.22	27.10 ± 3.80	4.21
Valeur saisonnière maximale	229.85	93.10	132.93	80.33	50.60	49.33
Valeur saisonnière minimale	111.71	52.90	57.53	11.10	10.90	9.98
Valeur journalière maximale	15.08	15.54	18.30	10.15	21.69	13.44
Nombre de jours avec						
un volume mesurable	33	17	23	33	10	22

production journalière des sous-groupes d'arbres témoins a permis de vérifier cette condition pour les deux types de collecteurs (Tableau 2.5). Les résultats des analyses de régression montrent que les pentes des droites sont différentes de zéro (p<0.01) pour les trois paramètres de production journalière considérés (volume, teneur en sucre et quantité de sucre), et ceci pour les trois saisons de coulée. De plus, pour les deux méthodes de collecte utilisées, les intervalles de confiance à 95% des pentes de régression se chevauchent entre les années pour chacun des paramètres de production. L'existence de ce parallélisme entre les droites obtenues pour les trois saisons de coulées constitue une bonne indication que les équations de prédiction obtenues pendant l'année de calibration entre le groupe d'arbres témoin et les groupes d'arbres traités sont valides pour la durée de l'étude. Pour les sous-groupes d'arbres témoins collectés sous vide, les coefficients de détermination (R2) sont moins élevés, comparativement à ceux obtenus pour les sous-groupes collectés sous gravité. Pour ces derniers, la relation est très forte notamment pour le volume d'eau et la production de sucre (R² variant de 0,85 à 0,99), mais elle reste plutôt moyenne pour la teneur en sucre (R² variant de 0,63 à 0,67). Cette dernière observation concorde avec celles de Barry et Robichaud (1994) et supporte l'hypothèse que la teneur en sucre des arbres serait moins dépendante des conditions environnementales que la coulée.

2.4.2.2 Relation entre les groupes d'arbres témoin et traités

Les tableaux 2.6 et 2.7 présentent les relations entre les groupes d'arbres traités et le groupe d'arbres témoin pour chaque mode de collecte. Comme cela a été le cas pour les deux sous-groupes d'arbres témoins, une forte corrélation a été observée entre les paramètres de production des groupes d'arbres traités et ceux du groupe d'arbres témoins non seulement au cours de l'année de calibration mais également pendant les années post-traitement. Indépendamment du traitement appliqué et de la méthode de collecte utilisée, le coefficient de corrélation de Pearson (R) variait de 0,82 à 0,99 pour les trois saisons de coulée étudiées. L'existence de cette corrélation entre les paramètres de production des mêmes groupes d'arbres avant et après traitement avec une forte

Tableau 2.5. Analyse de régression linéaire entre les paramètres de production journalière des sous-groupes d'arbres témoins collectés sous vide et sous gravité en 2006, 2007 et 2008.

	Paramètre	Année	Équation	p	R ²	n	IC
a) Arbres so	ous vide						
	Volume (mL)						
		2006	Y = 58.98 + 0.84 x	0.000	0.68	33	[0.63; 1.06]
		2007 2008	Y = 545.17 + 0.75 x $Y = 129.75 + 0.82 x$	0.000 0.000	0.64 0.77	16 23	[0.43; 1.07] [0.62; 1.02]
	Teneur en sucre ((%)					
		2006	Y = -0.12 + 0.99 x	0.000	0.75	33	[0.79; 1.19]
		2007 2008	Y = 0.39 + 0.87 x $Y = -0.15 + 0.99 x$	0.000 0.000	0.78 0.71	16 23	[0.60; 1.14] [0.70; 1.27]
	Quantité de sucre	e (g)					
		2006	Y = -0.09 + 0.83 x	0.000	0.65	33	[0.61; 1.06]
		2007 2008	Y = 1.51 + 0.74 x $Y = -0.74 + 1.00 x$	0.000 0.000	0.63 0.88	16 23	[0.41; 1.06] [0.83; 1.18]
b) Arbres so	ous gravité						
	Volume (mL)						
		2006	Y = -73.79 + 1.09 x	0.000	0.85	33	[0.92; 1.26]
		2007 2008	Y = 1.16 + 1.06 x $Y = 82.08 + 0.93 x$	0.000 0.000	0.96 0.98	9 22	[0.88; 1.25] [0.87; 0.99]
	Teneur en sucre (%)					
		2006	Y = 0.23 + 0.96 x	0.000	0.67	33	[0.71; 1.22]
		2007 2008	Y = 0.50 + 0.77 x $Y = 0.05 + 1.23 x$	$0.007 \\ 0.000$	0.67 0.63	9 21	[0.28; 1.26] [0.78; 1.69]
	Quantité de sucre	(g)					
		2006	Y = -0.12 + 1.21 x	0.000	0.86	33	[1.03; 1.39]
		2007 2008	Y = 0.01 + 1.12 x Y = 0.16 + 1.13 x	0.000	0.99 0.96	9 21	[1.00; 1.24] [1.02; 1.23]

p : probabilité que la pente soit nulle

R² : coefficient de détermination n : nombre de journée de coulée

IC : intervalle de confiance de la pente au seuil $\alpha = 0.05$

probabilité (*p*<0,000) a permis de vérifier la troisième condition d'application de l'approche des arbres jumelés. De plus, cette forte corrélation existant entre les sousgroupes d'arbres témoins et entre les groupes d'arbres traités et le groupe témoin constitue une importante indication que la méthode d'analyse statistique proposée peut être utilisée avec un haut niveau de confiance pour cette étude (Barry et Roy, 1998).

Les résultats montrent également que, selon les années de coulée, les conditions environnementales déterminent de 78% à 95% les variations de la production d'eau des érables collectés sous vide et de 91% à 99% les variations de la production d'eau des arbres sous gravité (Tableaux 2.6 et 2.7). De plus, les conditions environnementales expliquent de 68% à 97% les variations de la teneur en sucre des arbres selon les années de coulée, indépendamment de la méthode de collecte utilisée (Tableaux 2.6 et 2.7). En outre, environ 82% à 96% des variations dans la production de sucre des arbres collectés sous vide et à peu près 90% à 99% de celle des arbres collectés sous gravité sont liées aux conditions environnementales (Tableaux 2.6 et 2.7). Ces résultats sont comparables à ceux rapportés par Pothier (1995) et rendent plus crédibles les assertions faites précédemment concernant la similarité de profil entre la production journalière d'eau et de sucre d'érable. En effet, les conditions environnementales affectent ces deux paramètres dans des proportions presque identiques, selon la méthode de collecte considérée.

- 2.4.3 Analyse des effets des traitements sur la production de sucre
- 2.4.3.1 Cas des arbres collectés sous vide

Pour chaque paramètre de production, la comparaison des équations de régression linéaire entre le groupe d'arbres témoin et les groupes d'arbres traités indique un chevauchement des intervalles de confiance des pentes des droites obtenues en 2007 et 2008 (après traitement) avec celles des droites de calibration respectives (p<0.05), à l'exception de l'intervalle de confiance de la pente de l'année 2008 pour le paramètre production de sucre des arbres traités au 250Nutri+Dol (Tableau 2.6). Pour

Tableau 2.6. Analyse de régression linéaire entre les paramètres de production journalière du groupe d'arbres témoins et ceux des groupes d'arbres traités collectés sous vide en 2006, 2007 et 2008.

Année	Traitement	Équation	p	R²	n	IC		
Volume (mL)								
2006	250Nutri 250Nutri+Dol 125Nutri	Y = -225.86 + 1.12 x $Y = -590.22 + 1.29 x$ $Y = 26.52 + 0.84 x$	0.000 0.000 0.000	0.93 0.95 0.92	33 33 33	[1.01; 1.23] [1.18; 1.39] [0.75; 0.93]		
2007	250Nutri 250Nutri+Dol 125Nutri	Y = 174.46 + 1.07 x $Y = -83.02 + 1.06 x$ $Y = 458.22 + 0.73 x$	0.000 0.000 0.000	0.85 0.78 0.78	17 17 17	[0.82; 1.32] [0.74; 1.37] [0.52; 0.95]		
2008	250Nutri 250Nutri+Dol 125Nutri	Y = -72.62 + 1.07 x $Y = -215.07 + 1.24 x$ $Y = -434.03 + 1.03 x$	0.000 0.000 0.000	0.87 0.86 0.90	23 23 23	[0.88; 1.26] [1.01; 1.46] [0.88; 1.19]		
Teneur en sucre	2 (%)							
2006	250Nutri 250Nutri+Dol 125Nutri	Y = 0.03 + 0.90 x $Y = -0.01 + 0.94 x$ $Y = -0.02 + 0.98 x$	0.000 0.000 0.000	0.97 0.89 0.83	33 33 33	[0.84; 0.95] [0.82; 1.07] [0.82; 1.15]		
2007	250Nutri 250Nutri+Dol 125Nutri	Y = -0.10 + 1.02 x $Y = -0.03 + 1.03 x$ $Y = -0.48 + 0.73 x$	0.000 0.000 0.000	0.92 0.71 0.74	17 17 17	[0.86; 1.18] [0.66; 1.39] [0.49; 0.97]		
2008	250Nutri 250Nutri+Dol 125Nutri	Y = 0.04 + 0.90 x $Y = -0.32 + 1.27 x$ $Y = 0.14 + 0.93 x$	0.000 0.000 0.000	0.94 0.68 0.70	23 23 23	[0.80; 1.01] [0.88; 1.66] [0.65; 1.21]		
Quantité de suc	re (g)							
2006	250Nutri 250Nutri+Dol 125Nutri	Y = -0.41 + 1.06 x $Y = -0.32 + 1.10 x$ $Y = 0.36 + 0.74 x$	0.000 0.000 0.000	0.93 0.96 0.92	33 33 33	[0.95; 1.17] [1.01; 1.18] [0.66; 0.82]		
2007	250Nutri 250Nutri+Dol 125Nutri	Y = 0.19 + 1.08 x $Y = -1.29 + 1.39 x$ $Y = 0.80 + 0.71 x$	0.000 0.000 0.000	0.82 0.90 0.90	17 17 17	[0.80; 1.35] [1.14; 1.64] [0.58; 0.84]		
2008	250Nutri 250Nutri+Dol 125Nutri	Y = -0.46 + 1.09 x $Y = -1.72 + 1.76 x$ $Y = -0.54 + 0.99 x$	0.000 0.000 0.000	0.96 0.96 0.84	23 23 23	[0.99; 1.20] [1.58; 1.93] [0.79; 1.18]		

p : probabilité que la pente soit nulle

R²: coefficient de détermination

n : nombre de journée de coulée

IC : intervalle de confiance de la pente au seuil $\alpha = 0.05$

Tableau 2.7. Analyse de régression linéaire entre les paramètres de production journalière du groupe d'arbres témoins et ceux des groupes d'arbres traités collectés sous gravité en 2006, 2007 et 2008.

Année	Traitement	Équation	p	R²	n	IC
Volume (mL)						
2006	250Nutri 250Nutri+Dol 125Nutri	Y = -12.23 + 1.30 x $Y = -81.49 + 1.33 x$ $Y = -19.62 + 1.31 x$	0.000 0.000 0.000	0.95 0.97 0.97	33 33 33	[1.19; 1.41] [1.25; 1.41] [1.22; 1.40]
2007	250Nutri 250Nutri+Dol 125Nutri	Y = -291.12 + 1.26 x $Y = 82.46 + 0.95 x$ $Y = -140.07 + 1.16 x$	0.000 0.000 0.000	0.98 0.91 0.96	10 10 10	[1.11; 1.41] [0.70; 1.20] [0.96; 1.35]
2008	250Nutri 250Nutri+Dol 125Nutri	Y = -112.85 + 1.32 x $Y = -97.72 + 1.22 x$ $Y = -33.41 + 1.29 x$	0.000 0.000 0.000	0.99 0.97 0.99	22 22 22	[1.26; 1.38] [1.11; 1.32] [1.22; 1.36]
Teneur en suc	re (%)					
2006	250Nutri 250Nutri+Dol 125Nutri	Y = -0.25 + 1.06 x $Y = -0.10 + 0.99 x$ $Y = -0.25 + 1.06 x$	0.000 0.000 0.000	0.79 0.68 0.79	33 33 33	[0.86; 1.26] [0.74; 1.24] [0.86; 1.26]
2007	250Nutri 250Nutri+Dol 125Nutri	Y = -0.01 + 0.98 x $Y = 0.23 + 0.85 x$ $Y = 0.31 + 0.81 x$	0.000 0.000 0.000	0.84 0.90 0.93	10 10 10	[0.63; 1.33] [0.61; 1.08] [0.62; 0.99]
2008	250Nutri 250Nutri+Dol 125Nutri	Y = 0.23 + 0.86 x $Y = 0.22 + 0.92 x$ $Y = 0.35 + 0.81 x$	0.000 0.000 0.000	0.80 0.81 0.86	22 22 22	[0.66; 1.06] [0.71; 1.13] [0.66; 0.97]
Quantité de su	ucre (g)					
2006	250Nutri 250Nutri+Dol 125Nutri	Y = 0.06 + 1.32 x $Y = -0.14 + 1.33 x$ $Y = -0.01 + 1.21 x$	0.000 0.000 0.000	0.97 0.98 0.98	33 33 33	[1.24; 1.40] [1.25; 1.40] [1.14; 1.27]
2007	250Nutri 250Nutri+Dol 125Nutri	Y = -0.33 + 1.17 x $Y = 0.67 + 0.78 x$ $Y = 0.27 + 0.95 x$	0.000 0.000 0.000	0.98 0.90 0.96	10 10 10	[1.02; 1.31] [0.57; 0.99] [0.79; 1.10]
2008	250Nutri 250Nutri+Dol 125Nutri	Y = -0.32 + 1.37 x $Y = -0.37 + 1.48 x$ $Y = -0.09 + 1.31 x$	0.000 0.000 0.000	0.99 0.98 0.98	22 22 22	[1.30; 1.44] [1,22; 1,36] [1.23; 1.39]

p : probabilité que la pente soit nulle

R² : coefficient de détermination

n : nombre de journée de coulée

IC : intervalle de confiance de la pente au seuil $\alpha = 0.05$

un paramètre donné, le chevauchement des intervalles de confiance des pentes des droites obtenues après l'application d'un traitement à celle établie pendant la période de calibration suggère l'existence d'un parallélisme et cela constitue une forte indication que l'application du traitement n'a pas eu d'influence (p=0,05) sur la relation entre les groupes d'arbres traités et le groupe d'arbres témoins (Kleinbaum et al., 2008). En d'autres termes, il n'y a pas d'interaction entre les effets d'un traitement et le niveau de ce paramètre, et les modifications (accroissement ou diminution) de ce paramètre qui résulte de l'application du traitement resteront constantes quel que soit le niveau de production des arbres. Par contre la mise en évidence d'une différence significative entre les pentes obtenues dans les années subséquentes à l'application d'un traitement et celle établie pendant la période de calibration, comme c'était le cas de la production en 2008 des arbres traités au 250Nutri+Dol, signifie que l'application du traitement a affecté la relation entre le groupe d'arbres traités et le groupe témoin. L'effet de ce traitement sur la production des arbres n'était donc pas constant en 2008 et dépendait du niveau de production initial des arbres témoins. La Figure 2.4 montre qu'en 2008, soit

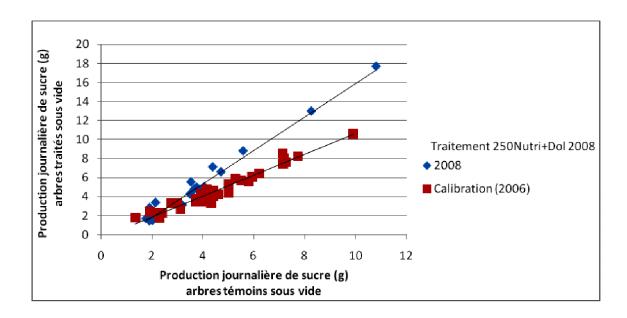


Figure 2.4. Comparaison de régressions entre les moyennes de production journalière de sucre des groupes d'arbres témoin et traité au 250Nutri+Dol avant (2006) et deux ans après traitement (2008).

deux années après l'application du traitement 250Nutri+Dol, ce dernier faisait augmenter le rendement en sucre des arbres traités pour des journées de forte production, alors qu'il entrainait l'effet inverse lors des journées de faible production (p<0.05).

Les effets des traitements sur la production de sucre découlent de la combinaison des effets sur la teneur en sucre et sur la production d'eau d'érable. En 2007, les traitements 250Nutri et 125Nutri ont entraîné des augmentations de la production de sucre des arbres de 16,99% (p=0,00) et 9,53% (p=0,03) respectivement (Tableau 2.8, Figure 2.5). Les effets de ces traitements sur la production de sucre n'étaient pas significatifs en 2008. De son côté, le traitement 250Nutri+Dol n'a pas eu d'effet significatif sur la production en 2007, mais il 1'a fait augmenter de 29,97% (p=0,00) en 2008 (Tableau 2.8, Figure 2.5). Les effets des ces traitements sur la production de sucre semblent découler essentiellement des modifications du volume d'eau d'érable. En 2007, les traitements 250Nutri et 125Nutri ont entrainé des augmentations significatives de la coulée de 13,17% et 11,83% respectivement, alors que le traitement 250Nutri+Dol l'a fait augmenter de 11,33% en 2008 (Tableau 2.8, Figure 2.5). Parallèlement, ces résultats montrent qu'il y a eu des accroissements sensibles de la teneur en sucre suite à l'application des traitements 250Nutri (6,38% en 2007) et 250Nutri+Dol (7,71% en 2007 et 14,41 en 2008).

Les modifications observées au niveau de la coulée et de la teneur en sucre des arbres suite à l'application des traitements résultent probablement des modifications de leur vigueur, de la croissance et d'une certaine augmentation de l'activité photosynthétique qui a permis de produire plus d'amidon (Halman *et al.*, 2008; Wargo, 1978). L'application de *NutiWave 4-1-2* constitue, entre autres, un ajout de calcium et de magnésium (Tableau 2.2). Plusieurs travaux portant sur l'érable à sucre ont permis de mettre en évidence des corrélations positives entre les minéraux foliaires et la photosynthèse et/ou l'amidon des tissus racinaires et/ou la teneur en sucre de l'eau d'érable (Leaf et Watterston, 1964; Wargo *et al.*, 2002). Les travaux de St. Clair et Lynch (2004) ont montré que l'application de cations basiques, notamment le calcium, stimule la photosynthèse chez l'érable à sucre. L'apport de nutriments par la fertilisation

Tableau 2.8. Productions de sucre, teneurs en sucre et volumes d'eau prédits et observés (moyenne ± erreur-type) sous vide en 2007 et 2008 pour les traitements appliqués.

Traitement	Année	Valeur observée (g)	Valeur prédite (g)	Différence entre l Jours de coulée	es moyennes p
Production de sucre	(g)				
	• • • •		2.2.2.2.		
250Nutri	2007	4.61 ± 0.61	3.45 ± 0.54	n = 17	0.00
	2008	3.81 ± 0.49	3.72 ± 0.46	n = 23	0.50
250Nutri+Dol	2007	4.44 ± 0.75	4.19 ± 0.56	n = 17	0.49
2501(4411)201	2008	5.15 ± 0.79	3.96 ± 0.48	n = 23	0.00
125Nutri	2007	3.70 ± 0.38	3.38 ± 0.38	n = 17	0.03
	2008	3.31 ± 0.47	3.23 ± 0.32	n = 23	0.55
Teneur en sucre (%)					
250Nutri	2007	1.92 ± 0.10	1.81 ± 0.08	n = 17	0.00
250114411	2008	1.56 ± 0.08	1.54 ± 0.08	n = 17 $n = 23$	0.22
		-10 0 — 0100			
250Nutri+Dol	2007	2.01 ± 0.11	1.86 ± 0.09	n = 17	0.03
	2008	1.81 ± 0.13	1.58 ± 0.08	n = 23	0.00
125Nutri	2007	1.93 ± 0.08	1.92 ± 0.09	n = 17	0.83
123Nuu1	2007	1.93 ± 0.08 1.71 ± 0.09	1.92 ± 0.09 1.63 ± 0.08	n = 17 $n = 23$	0.83
	2008	1.71 ± 0.09	1.03 ± 0.06	$\Pi = 2S$	0.13
Volume (mL)					
250Nutri	2007	2429 ± 295	2146 ± 285	n = 17	0.03
2501 1 011	2007	2429 ± 293 2358 ± 232	2140 ± 283 2326 ± 227	n = 17 $n = 23$	0.63
	2000	2330 ± 232	2320 ± 221	11 – 23	0.03
250Nutri+Dol	2007	2149 ± 305	2124 ± 326	n = 17	0.88
	2008	2594 ± 269	2330 ± 260	n = 23	0.02
	•06=		4=0 < - : -		
125Nutri	2007	2009 ± 211	1796 ± 213	n = 17	0.05
	2008	1912 ± 220	1930 ± 169	n = 23	0.32

permet également une meilleure croissance radiale de l'érable à sucre, et la formation de nouvelles branches fines au niveau de la cime des arbres (Barry et Roy, 1998; Huggett *et al.*, 2007; Moore et Ouimet, 2006; Safford, 1973; Wargo *et al.*, 2002). La relation entre les caractéristiques physiques de l'érable et sa production de sucre a été étudiée par Blum (1973), et il suggère que des arbres de plus gros diamètre ont tendance à

produire plus d'eau et de sucre. De plus, une meilleure croissance radiale devrait favoriser la formation de vaisseaux conducteurs de plus grande taille dans le xylème. Il se pourrait également qu'une plus grande croissance radiale de l'érable à sucre s'accompagne de la formation de plus de parenchymes de rayon. Morselli *et al.* (1978) ont observé que les érables pourvus de gros rayons vasculaires ont de meilleurs rendements eau et en sucre. Wallner et Gregory (1980) ont rapporté que les érables qui montrent un niveau élevé de sucre dans leur sève possèdent également une proportion significativement plus élevée de parenchymes de rayon que ceux qui ont une sève moins sucrée. Ils ont conclu que les parenchymes de rayon améliorent la capacité de stockage d'amidon du xylème.

Les effets des traitements 125Nutri et 250Nutri sur la production d'eau et/ou de sucre d'érable semblent avoir été rapides mais de courtes durées puisqu'aucune différence significative n'a été observée au niveau de la production d'eau ni de sucre des groupes d'arbres traités par rapport au témoin dès la deuxième année post-traitement (2008). Toutefois il serait pertinent de continuer à mesurer la coulée pendant encore plusieurs saisons afin d'avoir une meilleur idée des effets à long terme de ces traitements. Quand au traitement 250Nutri+Dol, ses effets significatifs sur la production d'eau ne sont apparus qu'en 2008, c'est-à-dire deux années après son application. Moore et al. (2000) ont observé, dans une érablière au nord de Québec, que les effets de la chaux sur la croissance des érables à sucre apparaissent dès la première année après traitement, alors que les effets sur la vitalité des cimes ne sont visibles que vers deux ou trois années après traitement. Des effets similaires sur la croissance ont également été observés lors d'essais de fertilisation effectués à Saint-Hippolyte (Québec) au moyen d'un mélange d'engrais riches en cations basiques (Liu et al., 1994). L'application de chaux a pour effet de faciliter la minéralisation de la matière organique et d'augmenter la disponibilité de l'azote minéral. Des résultats concernant l'influence du pH du sol et de l'apport de cations basiques par la fertilisation sur la colonisation mycorhizienne et la biomasse des racines fines ont été rapportés dans plusieurs études. Marçais et al. (2000) ont observé que le chaulage entraine une plus grande synthèse d'acides aminés et une diminution de la quantité de sucres solubles arrivant aux racines, réduisant ainsi le

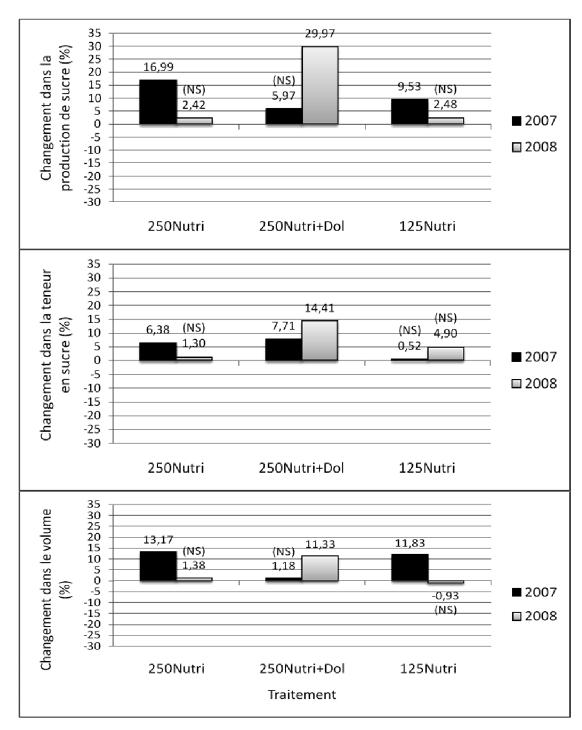


Figure 2.5. Changement dans les valeurs saisonnières des paramètres de production de sucre des arbres collectés sous vide. Ces valeurs représentent des augmentations (ou diminution) du paramètre de production en pourcentage de la valeur prédite. Celle-ci a été calculée au moyen des équations de régression établies avant traitement. Changement = (valeur observée pour le paramètre – valeur prédite pour le paramètre) / valeur prédite pour le paramètre.

développement des mycorhizes, notamment ceux qui se trouvent dans les 10 premiers centimètres de sol et qui jouent un rôle déterminant dans la résistance à la sécheresse des racines fines. Les mêmes auteurs ont rapporté que le chaulage n'a pas d'effet sur la biomasse de racines fines alors que la fertilisation complète (NPK+chaux) la réduit considérablement. Dans un guide sur l'aménagement des érablières (Houston et al., 1990), on affirme également que l'application de la chaux peut inhiber les endomycorhizes qui vivent en étroite association avec les racines des érables à sucre et qui améliorent leur capacité à absorber l'eau et les nutriments. Ces résultats donnent des indications au sujet des effets de la fertilisation complète (chaux+NPK) sur la biomasse de racines fines et la capacité de l'érable à sucre à absorber de l'eau, mais ne fournissent pas assez de renseignements sur le synchronisme de ces effets. Par ailleurs, plusieurs auteurs dont Fyles et al. (1994) ont observé une dissolution lente de la chaux dans les sols forestiers. Ce phénomène, qui entraine un enrichissement des horizons de surface en nutriments immédiatement après l'application des traitements, peut résulter en des changements dans la distribution des racines. Celles-ci auront tendance à se développer dans les horizons de surface (Wilmot et al., 1996). Le délai observé dans la production pour les arbres ayant reçu le traitement complet pourrait être lié à la réduction de la biomasse racinaire fine et/ou à un déséquilibre de la distribution des racines dans les différents horizons du sol lors de la première saison post-traitement. Les arbres qui ont reçu les traitements Nutri sans chaux auraient été mieux pourvus en racines fines au cours de la première saison de coulée post-traitement, comparativement à ceux traités au 250Nutri+Dol. Toutefois, les systèmes racinaires ayant reçu ce dernier traitement auraient bénéficié durant la seconde année de conditions favorable créées par l'augmentation de fertilité due à une plus grande dissolution et une meilleure distribution des nutriments disponibles. Ceci est une hypothèse qui devra faire l'objet de travaux ultérieurs.

2.4.3.2 Cas des arbres collectés sous gravité

Les effets des traitements sur la production des arbres collectés sous gravité sont différents de ceux des arbres collectés sous vide. Le traitement 250Nutri+Dol a

influencé la relation entre le groupe d'arbres traités et le groupe témoin pour les paramètres volume et production de sucre en 2007 (Tableau 2.7). Lors des grosses journées de coulée (volume > 200 mL), ce traitement semble avoir entrainé une réduction de la coulée et de la production de sucre (Figures 2.6 et 2.7). Le traitement 125Nutri a eu un effet semblable sur la relation entre les groupes d'arbres témoins et traités en 2007, pour le paramètre production de sucre (Tableau 2.7). En effet, les arbres qui ont reçu ce traitement produisaient moins de sucre lors des grosses journées de coulée (Figure 2.8).

Même s'ils ont entrainé des augmentations de la teneur en sucre en 2008, les traitements 250Nutri+Dol et 125Nutri n'ont pas influencé significativement la production de sucre au cours des deux années post-traitement (Tableau 2.9, Figure 2.9). Par contre, l'application du traitement 250Nutri a fait diminuer la production de sucre de 21,63% en 2007 et de 15,12% en 2008 (p=0,00) (Tableau 2.9, Figure 2.9). Pour les arbres collectés sous gravité, tous les fertilisants appliqués ont entrainé des diminutions de volumes de coulée, quand ils ont eu des effets significatifs (p=0,05) sur ce paramètre en 2007 et 2008 (Tableau 2.9, Figure 2.9).

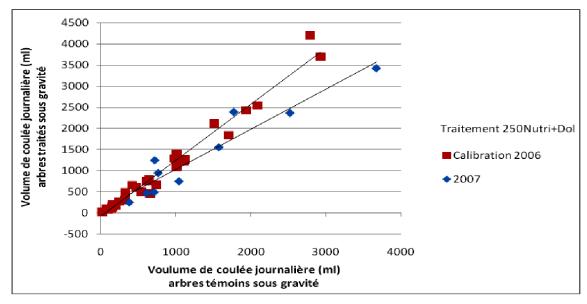


Figure 2.6. Comparaison de régressions entre les moyennes de entre les moyennes de volumes de coulées journalières des groupes d'arbres témoin et traité au 250Nutri+Dol avant (2006) et un an après traitement (2007).

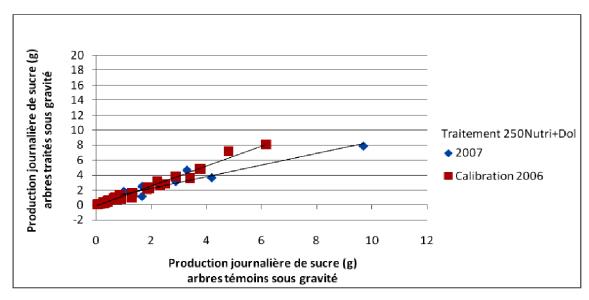


Figure 2.7. Comparaison de régressions entre les moyennes de production journalière de sucre des groupes d'arbres témoin et traité au 250Nutri+Dol avant (2006) et un an (2007) après traitement.

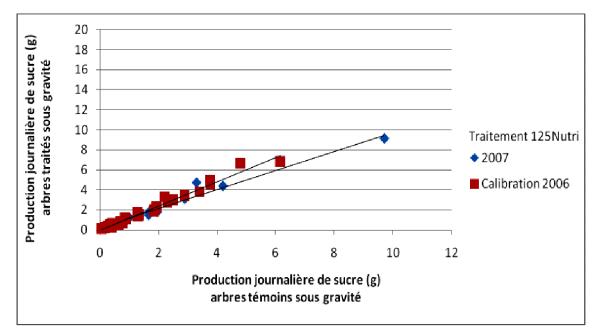


Figure 2.8. Comparaison de régressions entre les moyennes de production journalière de sucre des groupes d'arbres témoin et traité au 125Nutri avant (2006) et un an après traitement (2007).

Les résultats obtenus pour les arbres sous gravité sont différents de ce qui était attendu et divergent parfois de ceux observés pour les arbres sous vide. Sachant que les arbres collectés sous gravité font partie du même peuplement et sont soumis aux mêmes

Tableau 2.9. Productions de sucre, teneurs en sucre et volumes d'eau prédits et observés (moyenne ± erreur-type) sous gravité en 2007 et 2008 pour les traitements appliqués.

Traitement	Année	Valeur observée (g)	Valeur prédite (g)	Différence entre Jours de coulée	
Production de sucre (g)					
250Nutri	2007	3.00 ± 0.98	3.82 ± 1.09	n = 10	0.00
	2008	1.74 ± 0.64	2.05 ± 0.61	n = 22	0.00
250Nutri+Dol	2007	2.89 ± 0.68	3.65 ± 1.10	n = 10	0.24
	2008	1.87 ± 0.69	1.86 ± 0.61	n = 22	0.31
125Nutri	2007	2.98 ± 0.80	3.44 ± 1.00	n = 10	0.07
	2008	1.88 ± 0.61	1.81 ± 0.56	n = 22	0.54
Teneur en sucre (%)					
250Nutri	2007	1.91 ± 0.13	1.89 ± 0.11	n = 10	0.68
	2008	1.77 ± 0.10	1.74 ± 0.10	n = 22	0.39
250Nutri+Dol	2007	1.89 ± 0.11	1.85 ± 0.12	n = 10	0.30
	2008	1.88 ± 0.10	1.69 ± 0.10	n = 22	0.00
125Nutri	2007	1.90 ± 0.10	1.84 ± 0.13	n = 10	0.22
	2008	1.82 ± 0.09	1.67 ± 0.11	n = 22	0.01
Volume (ml)					
250Nutri	2007	1445 ± 419	1774 ± 427	n = 10	0.01
	2008	821 ± 233	909 ± 228	n = 22	0.00
250Nutri+Dol	2007	1389 ± 328	1740 ± 435	n = 10	0.06
	2008	764 ± 217	858 ± 233	n = 22	0.02
125Nutri	2007	1448 ± 387	1779 ± 430	n = 10	0.02
	2008	883 ± 229	908 ± 230	n = 22	0.76

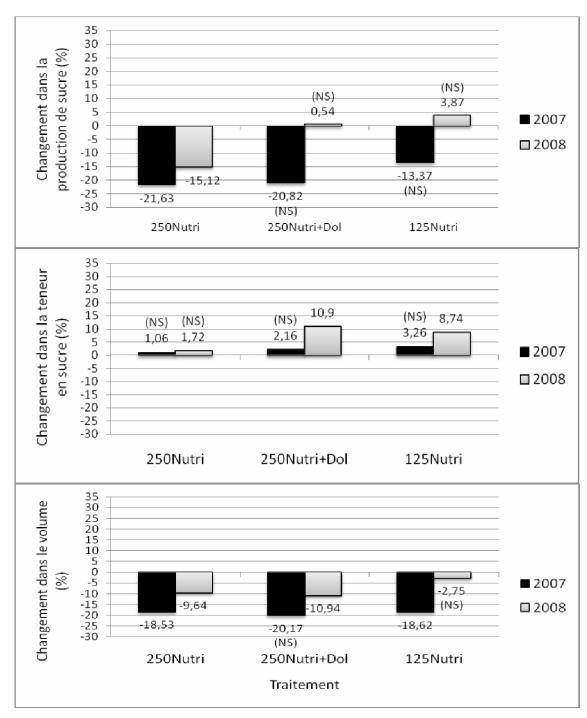


Figure 2.9. Changement dans les valeurs saisonnières des paramètres de production de sucre des arbres collectés sous gravité. Ces valeurs représentent des augmentations (ou diminution) du paramètre de production en pourcentage de la valeur prédite. Celle-ci a été calculée au moyen des équations de régression établies avant traitement. Changement = (valeur observée pour le paramètre – valeur prédite pour le paramètre) / valeur prédite pour le paramètre.

conditions environnementales que ceux collectés sous vide, le contraste observé au niveau des résultats pour le deux catégories d'arbres (sous vide et sous gravité) devrait être lié au type de collecte.

Des calculs simples pratiqués sur les données brutes de coulée pour des arbres individuels collectés sous gravité montrent également que les érables ayant ce comportement ont eu une production moyenne d'eau inférieure à la moitié de celle observée par arbre pour le troisième tiers de chacune des saisons subséquentes à l'application des traitements (résultats non rapportés). Ces observations constituent une bonne indication de l'existence d'un lien entre le phénomène de ralentissement ou d'arrêt de la coulée observé chez certains arbres fertilisés et des processus physiologiques qui ont lieu vers la fin de la saison de coulée. Huggett et al. (2007) ont observé que l'ajout de calcium permet une cicatrisation plus rapide des blessures chez les arbres fertilisés par rapport aux témoins. L'efficacité des traitements de fertilisation à favoriser la fermeture des entailles a été examinée (voir chapitre 1) et les résultats montraient une meilleure capacité des arbres fertilisés, notamment ceux qui ont subi les traitements 250Nutri et 125Nutri à refermer leurs entailles plus rapidement que les arbres témoins. Les arbres fertilisés auraient donc passé l'hiver avec un meilleur stock de nutriments que les témoins, et quand les conditions de températures redeviennent favorables aux activités physiologiques permettant la cicatrisation des blessures, les arbres traités auraient été mieux pourvus en nutriments, et ceux-ci auraient permis aux premières étapes de la cicatrisation de se faire plus rapidement. Il se pourrait également que des éléments spécifiques entrant dans la composition des traitements soient favorables à une meilleure compartimentalisation des blessures d'entaillage. Dans une étude réalisée dans la même région, Barry et Roy (1998) avaient également observé que l'application d'une combinaison de cations basiques et d'azote n'avait pas eu d'effets positifs sur la production de sucre d'arbres collectés sous gravité au cours des deux années suivant l'application du traitement.

Pendant les saisons de coulée, des observations faites sur le terrain ont révélé une tendance des arbres individuels ayant subi un traitement de fertilisation à produire

moins d'eau, voire cesser de couler au début ou au milieu du troisième tiers de la saison des sucres. Ce comportement était inexistant pour la période de calibration et n'a pas été observé chez les arbres collectés sous vide au cours de l'étude. L'absence de ce comportement chez les arbres fertilisés collectés sous vide pourrait être liée à l'effet perturbateur du vide sur la compartimentalisation des entailles pendant la saison de coulée. Toutefois, il est prématuré de tirer des conclusions à partir de ces observations, le dispositif d'étude existant ne le permettant pas. De plus, la fermeture des entailles des arbres collectés sous vide n'a pas été analysée pour permettre de comparer la vitesse de cicatrisation entre les deux méthodes de coulée. Des travaux plus approfondis sur les mécanismes de cicatrisation, particulièrement dans les systèmes sous vide, sont nécessaires pour répondre aux interrogations soulevées.

2.5 Conclusion

Cette étude a examiné les effets de la fertilisation organique à base de fumier de volaille sur la production de sucre des érables à sucre en apparence sains, présentant une déficience marquée en calcium foliaire. Des arbres collectés sous vide ont vu leur niveau de production de sucre augmenter de 16,99% et 9,53% respectivement, un an après l'application des traitements 250Nutri et 125Nutri et revenir à leur niveau initial la deuxième année. Pour les arbres collectés sous vide, l'application d'un traitement complet (250Nutri + chaux dolomitique) n'a pas modifié significativement la production au cours de la première année, mais elle a entrainé une augmentation de 29.97% de la production au cours de la deuxième année post-traitement. Quant aux arbres collectés sous gravité, les traitements 125Nutri et 250Nutri+Dol n'ont pas affecté significativement la production de sucre au cours des deux premières années posttraitement, alors que le traitement 250Nutri a fait diminuer la production de sucre de 21.63% en 2007 et de 15.12% en 2008. Cet effet du traitement 250Nutri sur la production de sucre était notamment associé à une diminution du rendement en eau des arbres. En favorisant une cicatrisation plus hâtive des entailles des arbres collectés sous gravité (chapitre 1), ce traitement aurait influencé négativement la production d'eau, et

conséquemment la production de sucre. En effet, indépendamment de la méthode de collecte de l'eau d'érable, les modifications de la production de sucre semblent découler essentiellement des effets des traitements sur la production d'eau, même si des accroissements significatifs de la teneur en sucre ont également été observés, notamment chez les arbres ayant reçu le traitement complet.

Cette étude est l'une des premières à utiliser une méthode d'analyse basée sur les « arbres jumelés » pour examiner l'effet de la fertilisation sur le rendement en sucre de l'érable. Elle est également une des premières à proposer qu'il existe une influence de la méthode de collecte de l'eau sur l'effet des fertilisants sur la production de sucre des érables. De nos jours, les exploitations acéricoles qui visent une production commerciale sont généralement équipées d'un système de collecte sous vide. Les résultats permettent donc de considérer la fertilisation organique comme un moyen de faire augmenter la production de sucre de ces exploitations en plus des effets bénéfiques sur la santé générale des érables. Les effets du *NutriWave 4-1-2* appliqué seul sur la production des arbres sont apparus dès la première saison de coulée après l'application du produit, mais semblent de courte durée parce qu'ils n'étaient pas significatifs à la deuxième saison post-traitement. Le traitement complet (NutriWave 4-1-2 + chaux dolomitique) prouve des effets significatifs à partir de la deuxième saison posttraitement, et l'on peut supposer que ses effets seront maintenus sur une plus longue période. Concernant les arbres collectés sous gravité, même si une baisse de production a été enregistrée pour les arbres traités au 250Nutri dans les premières années posttraitement, il ne serait pas approprié de tirer des conclusions de manière hâtive. La vigueur des arbres est un facteur essentiel pour une production acéricole soutenue, et il est établi que la fertilisation améliore la croissance et la vigueur des arbres dans des sols acides. Ainsi, même s'il a fait diminuer la production des arbres collectés sous gravité au cours des premières années post-traitement, ce traitement sylvicole peut augmenter potentiellement leur capacité de production à long terme. Il serait donc pertinent de poursuivre l'expérience pendant un certain nombre d'années afin de documenter les effets à long terme de ces traitements sur la production de sucre des arbres.

CONCLUSION GÉNÉRALE

Lorsque réalisé dans l'optique de la production acéricole, l'aménagement d'une érablière vise à optimiser la production de sucre et à assurer la vigueur et la santé générale du peuplement à long terme. En plus des interventions sylvicoles classiques ayant des objectifs d'éducation et d'entretien, la fertilisation forestière au moyen de solutions fertilisantes adaptées, respectueuses des principes de l'aménagement durable de l'acériculture, peut être intéressante pour combler les besoins en nutriments de certaines érablières, dans la mesure où des perturbations de natures diverses semblent affecter l'équilibre nutritionnel de ces écosystèmes.

Deux objectifs spécifiques ont été poursuivis dans le cadre de cette étude : (1) évaluer les effets du NutriWave 4-1-2 et d'un traitement complet (NutriWave 4-1-2 + chaux dolomitique) sur la vigueur et l'état de santé général de l'érable à sucre, et (2) évaluer les effets de ces fertilisants sur les rendements en sucre d'arbres en production. Pour répondre à ces objectifs, plusieurs hypothèses ont été formulées, et cela a conduit à l'utilisation de méthodes d'analyse appropriées pour suivre les effets des traitements sur la chimie du sol, la nutrition foliaire des arbres ainsi que des paramètres de vigueur tels que la mort en cime, la transparence des cimes et la capacité des arbres à refermer leurs entailles. De plus, une approche méthodologique non-usuelle dite des « arbres jumelés » a été utilisée pour analyser les effets des traitements sur les rendements en sucre des arbres. D'une manière générale, les résultats de cette étude montrent que l'application de NutriWave 4-1-2 et du traitement complet a modifié les propriétés chimiques du sol, la nutrition foliaire et favorisé une fermeture plus hâtive des entailles des arbres traités par rapport aux témoins au cours de la première et/ou de la deuxième année posttraitement. Les effets du NutriWave 4-1-2 appliqué seul sur la production sont apparus dès la première saison de coulée post-traitement. Des augmentations de la production de sucre allant jusqu'à 16,9% ont été observées pour les arbres collectés sous vide, alors que le 250Nutri a entrainé une baisse de production de 21,6% pour les arbres collectés sous gravité qui ont reçu ce traitement. Cette baisse de production pourrait être liée à l'effet du fertilisant sur la capacité des arbres collectés sous gravité à refermer leurs entailles. En effet, les arbres qui ont reçu du NutriWave 4-1-2 seul semblaient montrer

une capacité à refermer plus hâtivement leurs entailles au cours des deux premières années post-traitement. On n'a pas observé de différence entre les traitements quand à leur capacité d'améliorer la vitalité des cimes des arbres fertilisés au cours des trois premières années post-traitement, mais il serait pertinent de poursuivre les observations sur une plus longue période pour évaluer si des effets significatifs apparaissent entre les traitements. Les effets du traitement complet (*NutriWave 4-1-2* + chaux dolomitique) sur les rendements en sucre sont apparus à partir de la deuxième saison post-traitement, avec une augmentation de la production de sucre de 29,9%. Ce traitement semble avoir procuré de meilleures conditions pour la nutrition des arbres en cations basiques en modifiant le pH du sol et en améliorant le statut nutritif foliaire, notamment en Ca et Mg. Le traitement complet est également susceptible de donner les effets les plus prolongés dans le temps, d'autant plus que l'association du NutriWave 4-1-2 à la chaux dolomitique semble avoir limité l'effet d'antagonisme K-Mg, mis en évidence dans plusieurs études traitant du chaulage des érablières. La poursuite de l'étude est souhaitable pour estimer la durée des effets observés, déterminer la rotation et mieux équilibrer la composition du traitement complet. L'utilisation d'une source de calcium différente de la chaux dolomitique pourrait également être envisagée pour les travaux ultérieurs, afin de minimiser les risques de l'apparition de l'effet d'antagonisme K-Mg. La wollastonite, source naturelle de calcium à relâchement lent disponible au Canada, pourrait alors constituer une alternative intéressante. D'autres travaux sont également nécessaires afin de trouver une méthode adaptée et économiquement faisable pour l'application de ce type de fertilisant dans l'environnement encombré des érablières acéricoles.

La raison d'être de cette étude était d'examiner les possibilités de réduire les impacts de la perte de fertilité des sols d'érablière sur la santé des arbres. Cette étude nous a permis de vérifier nos hypothèses de départ, à l'exception de celle selon laquelle les effets de la fertilisation sur la production ne dépendaient pas du mode de collecte de l'eau. D'ailleurs, la mise en évidence de l'influence de la méthode de collecte de l'eau sur l'effet des fertilisants sur la production de sucre des érables a été l'un des résultats intéressants de cette étude. La baisse de production observée chez des arbres fertilisés collectés sous gravité dans les premières années subséquentes à l'application des

traitements ne doit toutefois pas servir de prétexte pour ne pas recommander la fertilisation. Cette intervention sylvicole doit se faire avant tout dans l'optique d'améliorer leur vigueur et de réduire la prédisposition des peuplements aux risques de dépérissement. Les problèmes de déséquilibre nutritionnel des sols forestiers, notamment la déficience en calcium, observés dans Nord-Est américain et l'Est canadien, constituent un sujet de grande préoccupation aussi bien pour des chercheurs que pour des praticiens. En effet, ces déséquilibres pourraient entre autres entraîner des modifications de la composition spécifique des peuplements, compte tenu que des changements dans l'environnement sont susceptibles de profiter à certaines espèces. Pour l'acériculture, l'envahissement du hêtre observé dans de nombreuses érablières pourrait être un phénomène, en ce sens, assez inquiétant. Dans l'optique de favoriser un développement durable et d'assurer la pérennité des ressources forestières, il est indispensable de poursuivre l'amélioration des connaissances sur la nutrition de l'érable à sucre, le cycle biogéochimique des nutriments, ainsi que la dynamique de la composition forestière, en relation notamment avec les stress imposés par les activités humaines, tels que l'acidification et les changements climatiques.

RÉFÉRENCES

Assamoi, A.J. 2008. Effets de la fertilisation organique à base de fumier de volailles sur la physiologie et la nutrition du sapin de Noël en plantation. Thèse de maîtrise inédite, Université de Moncton, Edmundston.

Bailey S.W., Horsley S.B., Long R.P. et Hallett R.A. 2004. Influence of edaphic factors on sugar maple nutrition and health on the Allegheny Plateau. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 68:243-252.

Barry, R. et Desharnais, J. 2000. Effets de la fertilisation sur les concentrations foliaires en macronutriments dans une érablière du Nord-Ouest du Nouveau-Brunswick (Rapport de recherche). École des sciences forestières, Université de Moncton.

Barry, R., et Robichaud, E. 1994. *Effects of fertilization on maple sap and sugar production* (Research report). New Brunswick Department of Natural Resources and Forestry Canada – Maritime Region.

Barry, R., et Roy, L. 1998. *Effects of fertilization on sugar production* (Research report, phase 4). New Brunswick Maple Producers Co-op Ltd. National Research Council of Canada. North American Maple Syrup Council.

Bélanger, M. 1998. L'aménagement durable des érablières en vue de la production acéricole. Revue de littérature sur l'aménagement durable des érablières en vue de la production acéricole, présenté au groupement forestier de l'Est-du-Lac Temiscouata. Service d'extension en foresterie de l'Est-du-Québec.

Bernier, B. et Brazeau, M. 1988. Nutrient deficiency symptoms associated with sugar maple dieback and decline in Quebec Appalachians. *Can. J. For. Res.*, 18: 762-767.

Bernier, B., Paré, D. et Brazeau, M. 1989. Natural stresses, nutrient imbalances and forest decline in southeastern Quebec. *Wat. Air Soil Pollut.*, 48: 239-250.

Blum, B.M., 1973. Relation of sap and sugar yields to physical characteristics of sugar maple trees. *For. Sci.*, 19 (3): 175–179.

Blum, B.M., et Gibbs, C. B. 1968. *Variation of sugar maple sap yield and its influence on experimental design*. USDA For. Serv. Res. Pap. NE-108. 8 p.

Boggs, J.L., McNulty, S.G., Gavazzi, M.J. et Moore Myers, J. 2005. Tree growth, foliar chemistry, and nitrogen cycling across a nitrogen deposition gradient in southern Appalachian deciduous forests. *Can. J. For. Res.*, 35: 1901-1913.

Brady, N.C., et Weil, R.R. 2002. *The nature and properties of soils* (13th Éd.). Pearson Education, Prentice Hall, New Jersey.

Brooks, K. N., Ffolliott, P. F., Gregersen, H. M. et Thames, J. L. 1991. *Hydrology and the Management of Watersheds*. Iowa State University Press/Ames.

Burns, R. M. et Honkala, B. H. 1990. *Silvics of North America* (Volume 2, Hardwoods). Forest Service. United States Department of Agriculture

Camiré, C. 1995. Sol. *In L'érable à sucre : caractéristiques, écologie et aménagement* (p. 63-65). Québec: Ministère des Ressources Naturelles N° RN95-3050.

Camiré, C., et Ouimet, R. 1992. L'analyse foliaire et les prescriptions d'amendements et de fertilisation dans les érablières dépérissantes du Québec. In La recherche sur le dépérissement : un premier pas vers le monitoring des forêts : comptes rendus du colloque organisé par la Direction de la Recherche du

Ministère des Forêts, en collaboration avec le Conseil de la recherche forestière du Québec, 1992 (p. 139-147). Sainte-Foy : Direction de la recherche, Ministère des Forêts du Québec.

Camiré, C., Ouimet, R. et Moore, J.D. 1997. La fertilisation et le chaulage des érablières [En ligne]. Disponible : http://www.centreacer.qc.ca/publications/colloques/1997/pdf/camire.pdf

Chang, M. 2006. *Forest hydrology: an introduction to water and forests* (2^e éd.). London: Taylor et Francis Group, CRC Press.

Chapeskie, D. 1997. L'industrie du sirop d'érable en Ontario [en ligne]. Disponible : http://www.omafra.gov.on.ca/french/crops/facts/maple.htm

Christensen, C. C., Butler, J. W. et Garceau, A. C. 2001. *1999 Paired site study Lower Wabash River Basin Indiana* (Research report). Indiana Department of Environmental Management. Office of Water Quality. Assessment Branch. Surveys Section.

Colpitts, C.M., Fahmy, S.H., MacDougall, J.E., Ng, T.M.T., McInnis, B.G. et Zelazny, V.F. 1995. *Les sols forestiers du Nouveau-Brunswick* (Numéro de contribution du CRTRB 95-38). Direction de l'aménagement du bois. Ministère des ressources naturelles et de l'énergie du Nouveau-Brunswick.

Côté, B. 1997. La monoculture d'érable et l'acidification des sols [En ligne]. Disponible : http://www.centreacer.qc.ca/publications/colloques/1997/pdf/cote.pdf

Côté, B., Hendershot, W.H. et O'Halloran, I. 1993. Response of sugar maple to seven types of fertilization in southern Quebec: growth and nutrient status. *In* R.F. Huettl and D. Mueller-Dombois (Éds.), *Forest decline in the Atlantic and Pacific region* (p. 162-174). Berlin: Springer-Verlag.

Côté, B., O'Halloran, I., Hendershot, W. et Spankie, H. 1995. Possible interference of fertilization in the natural recovery of a declining sugar maple stand in southern Quebec. *Plant Soil*, 169: 471-480.

Dizengremel, P. 1997. Contribution de la recherche en écologie forestière à la compréhension de l'effet des stress dans les érablières [En ligne]. Disponible : http://www.centreacer.qc.ca/publications/colloques/1997/pdf/dizeng.pdf

Drohan, P.J., Stout, S.L. et Petersen, G.W. 2002. Sugar maple (*Acer saccharum* Marsh.) decline during 1979-1989 in northern Pennsylvania. *For. Ecol. and Manag.*, 170: 1-17.

Duchesne, L., Ouimet, R., Houle, D. 2002. Basal area growth of sugar maple in relation to acid deposition, stand health and soil nutrient. *J. Environ. Qual.*, 31: 1676-1683.

Duchesne, L., Ouimet, R. et Morneau, C. 2003. Assessment of sugar maple health based on basal area growth pattern. *Can. J. For. Res.*, 33: 2074-2080.

Elvir, J.A., Wiersma, G.B., White, A.S. et Fernandez, I.J. 2003. Effects of chronic ammonium sulphate treatment on basal area increment in red spruce and sugar maple at the Bear Brook Watershed in Maine. *Can. J. For. Res.*, 33: 862-869.

Envirem Technologies Inc. 2006. [En ligne]. Disponible: http://www.envirem.com/greenshousegold/index/index.cfm.

Feldkirchner D. C., Wang C., Gower S. T., Kruger E. L. et Ferris J. 2003. Effects of nutrient and paper mill biosolids amendments on the growth and nutrient status of hardwood forests. *For. Ecol. and Manag.*, 177: 95-116.

Forget, E. 1996. Variations environnementales et génétiques de la teneur en sucre de la sève de l'érable à sucre. Mémoire de maîtrise inédit, Université Laval, Québec.

- Fyles, J.W., Côté, B., Courchesne, F., Hendershot, W.H. et Savoie, S. 1994. Effects of base cation fertilization on soil and foliage nutrient concentrations, and litter-fall and throughfall nutrient fluxes in a sugar maple forest. *Can. J. For. Res.* 24:542–549.
- Garrett, P.W. et Dudzik, K.R. 1989. Ray tissues as an indirect measure of relative sap-sugar concentration in sugar maple. Broomall, PA: USDA, For. Serv., Northeastern For. Exp. Stn., Resarch paper NE-626
- Gregory, R.A. et Wallner, W.E. 1979. Histological relationship of *Phytobia setosa* to *Acer saccharum*. *Can. J. Bot.* 57: 403-407.
- Guay, S. et Rodrigue, S. 2001. *Guide d'aménagement des érablières*. Syndicat des producteurs de bois de la Beauce. Québec.
- Halman, J.M., Schaberg, P.G., Hawley, G.J. et Eagar, C. 2008. Calcium addition at the Hubbard Brook Experimental Forest increases sugar storage, antioxidant activity and cold tolerance in native red spruce (*Picea rubens*). *Tree Physiol.*, 28: 855-862.
- Hendershot, W.H. 1991. Fertilization of sugar maple showing dieback symptoms in the Quebec Appalachians, Canada. *Fertil. Res.*, 27:63-70.
- Hendershot, W. H., Fyles, J. W. et Lawrence, M. 1990. Nutrient availability in FH horizon samples amended with fertilizer and lime. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.*, 21: 933-939.
- Houle, D., Ouimet, R. et Duchesne, L. 2001. Les pluies acides et la forêt québécoise. *Le naturaliste canadien*, 125 : 208-212.
- Houle, D., Paquin, R., Camiré, C., Ouimet, R. et Duchesne, L. 1997. Bilan nutritif de l'érablière du bassin versant du Lac Clair (Duchesnay, Quebec) [En ligne]. Disponible : http://www.centreacer.qc.ca/publications/colloques/1997/pdf/houle.pdf
- Houle, D., Tremblay, S. et Ouimet, R. 2007. Foliar and wood chemistry of sugar maple along a gradient of soil acidity and stand health. *Plant Soil*, 300:173–183.
- Houston, D. R., Allen, D. C. et Lachance, D. 1990. *Aménagement de l'érablière : Guide de protection de la santé des arbres* (Rapport d'information LAU-X-92F). Forêts Canada. Région du Québec.
- Huggett, B. A., Schaberg, P. G., Hawley, G. J. et Eagar, C. 2007. Long-term calcium addition increases growth release, wound closure, and health of sugar maple (*Acer saccharum*) trees at the Hubbard Brook Experimental Forest. . *Can. J. For. Res.*, 37: 1692-1700.
- Huot, M. 1995. Sylviculture de l'érablière pour la production acéricole. *In L'érable à sucre : caractéristiques, écologie et aménagement* (p. 319-328). Québec: Ministère des Ressources Naturelles N° RN95-3050.
- Hutchinson, T.C., Watmough, S.A., Sager, E.P.S. et Karagatzides, J.D. 1999. The impact of simulated acid rain and fertilizer application on a mature sugar maple (*Acer saccharum* Marsh.) forest in central Ontario Canada. *Wat. Air Soil Pollut.*, 109: 17–39.
- Kalisz, P.J., et Stone, E.L. 1980. Cation exchange capacity of acid forest humus layers. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 44: 407-413.
- Kim, Y.T. et Leech, R.H. 1985. Effects of climatic conditions on sap flow in sugar maple. *For. Chron.* 61(4): 303-307.

- Kleinbaum, D., Kupper, L., Nizam, A. et Muller, K. E. 2008. *Applied regression analysis and other multivariable methodes* (4^e éd.). Belmont: Thomson Brooks/Cole Editions.
- Laing, F.M., Morselli, M.F. et Marvin, J.W. 1973. *Variations in sap flow rate of individual sugar maples*. Vt. Agr. Exp. Sta. Res. Rep. MP 76. Univ. Vt., Burlington.
- Langmaid K. K., MacMillan, J.K. et Losier J. G. (1980). *Soils of Madawaska county New Brunswick* (Eighth report of the New Brunswick soil survey). Agriculture Canada.
- Lavoie, J. 1999. Amendements avec fumier de volaille comme source d'azote en production de pommes de terre et son effet sur la qualité de transformation. *In: Cahier de conférence de l'Atelier sur la gestion du sol et de l'eau du ACRH* (p. 15). Grand-Sault, Nouveau-Brunswick.
- Leaf, A. L. et Watterston, K. G. 1964. Chemical analysis of sugar maple sap and foliage as related to sap and sugar yields. *For. Sci.*, 10: 288-292.
- Likens, G.E; Driscoll, C.T., Buso, D.C., Siccama, T.G, Johnson, C.E., Lovett, G.M., Fahey, T.J., Reiners, W.A., Ryan, D.F., Martin, C.W. et Bailey, S.W. 1998. The biogeochemistry of calcium at Hubbard Brook. *Biogeochemistry*, 41: 89-173.
- Liu, G., Côté, B. et Fyles, J. W. 1994. Effects of base cation fertilization on the nutrient status, free amino acids and some carbon fractions of the leaves of sugar maple (*Acer saccharum* Marsh.). *Plant and Soil*, 160: 79-86.
- Long, P.L., Horsley, S.B. et Lilja, P.R. 1997. Impact of forest liming on growth and crown vigor of sugar maple and associated hardwoods. *Can. J. For. Res.* 27: 1560-1573.
- Lozano, F.C., and Huynh, K.D. 1989. Foliar diagnosis of sugar maple decline by DRIS. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.* 20: 1895-1914.
- Mader, D.L. et Thompson, B.W. 1969. Foliar and soil nutrients in relation to sugar maple decline. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.*, 33: 794-800.
- Majcen, Z., Bédard, S., Meunier, S., Groleau, L., Boulay, P., Hamel, J., Boulay, E. et Leblond, J.F. 2006. *Forêt d'enseignement et de recherche Mousseau* (Synthèse des travaux 1981-2005, hors série). Direction de la recherche forestière, Ministère des ressources Naturelles et de la Faune. Gouvernement du Québec.
- Marçais, B., Bouhot-Delduc, L. et Le Tacon, F. 2000. Effets possibles des changements globaux sur les micro-organismes symbiotiques et pathogènes et les insectes ravageurs des forêts. *Rev. For. Franc.*, 52: 99-118
- Marvin, J.W., Morselli, M.F. et Laing F.M. 1967. A correlation between sugar concentration and volume yields in sugar maple: an 18-year study. *For. Sci.*, 13: 346-351.
- Millers, I., Lachance, D., Burkman, W. G. et Allen, D. C. 1991. *North American sugar maple decline project: organization and methods.* USDA For. Serv. Gen. Tech. Rep. NE-154.
- Moore, J.D. 1999. Effet du chaulage sur la nutrition, la vigueur et la croissance de l'érable à sucre à la station forestière de Duchesnay. Mémoire de maîtrise inédit, Université Laval, Québec.
- Moore, J-D., Camiré, C. et Ouimet, R. 2000. Effects of liming on the nutrition, vigor, and growth of sugar maple at the Lake Clair Watershed, Quebec, Canada. *Can. J. For. Res.*, 36: 1834–1841.
- Moore, J-D., et Ouimet, R. 2006. Ten-year effect of dolomitic lime on the nutrition, crown vigour, and growth of sugar maple. *Can. J. For. Res.*, 36: 1834–1841.

Morselli, M., Marvin, J. W. et Laing, F. M. 1978. Image-analysing computer in plant science: more and larger vascular rays in sugar maples of high sap and sugar yield. *Can. J. Bot.*, 56: 983-986.

Noland, T. L. 2003. 1998 ice storm impact on sugar bushes of eastern Ontario. For. Chron., 79 (1): 75-81.

Noland, T. L., McVey, G., et Chapeskie, D. 2006. *Ice storm and fertilization effects on root starch, sap productivity and sweetness, diameter growth, and tap hole closure in sugar maple stands of eastern Ontario* (Forest Research note No. 68). Ontario Forest Research Institute.

Ouimet, R. et Camiré, C. 1995. Foliar deficiencies of sugar maple stands associated with soil cation imbalances in the Quebec Appalachians. *Can. J. Soil. Sci.*, 75: 169-175.

Ouimet, R., Camiré, C. et Furlan, V. 1996. Effects of soil K, Ca and Mg saturation and endomycorrhization on growth and nutrient uptake of sugar maple seedlings. *Plant soil*, 179: 207-216.

Paré, D. 1995. Le cycle des éléments nutritifs dans l'érablière. *In L'érable à sucre : caractéristiques, écologie et aménagement* (p.103-112). Québec: Ministère des Ressources Naturelles N° RN95-3050.

Plamondon, A. P. et Bernier, P. Y. 1980. Modélisation de la coulée de l'érable à sucre (*Acer saccharum* Marsh.) à partir d'éléments météorologiques. *Can. J. For. Res.*, 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. *Can. J. For. Res.*, 25: 1815-1820.

Reynolds, E. R. C. et Thompson, F. B. 1998. *Forest, climate, and hydrology*. Regional impacts. The United Nations University.

Roy, G.l 1997. Aménagement forestier et la coulée de la sève. *In: Colloque régional sur l'érable à Granby*. Québec, Canada

Safford, L.O. 1973. Fertilization increases diameter growth of birch-beech-maple trees in New Hampshire. USDA For. Serv., Northeastern For. Exp. Stn., research note: NE-182.

Schaberg P. G., Tilley J. W., Hawley G. J., DeHayes D. H. et Bailey S. W. 2005. Associations of calcium and aluminum with the growth and health of sugar maple trees in Vermont. *For. Ecol. Manag.* 223: 159–169.

Scott, A., et Chamberland, E. 1962. *Essai de fertilisation des érables à sucre* (Expérience No LA-53-46). Ste-Anne-de-la-Pocatière, QC: Université Laval, Faculté d'agriculture.

Snow, A.G. Jr. 1964. Maple sugaring and research. *J. For.*, 62 (2):83-88.

Statistique Canada 2006. Recensement de l'agriculture de 2006 [En ligne]. Disponible : http://www.statcan.gc.ca/ca-ra2006/analysis-analyses/nb-fra.htm.

St.Clair, S. B., et Lynch, J. P. 2004. Base cation stimulation of mycorrhization and photosynthesis of sugar maple on acid soils are coupled by foliar nutrient dynamics. *New Phytologist*, 165: 581–590.

St.Clair, S.B., Sharpe, W.E. et Lynch, J.P. 2008. Key interactions between nutrient limitation and climatic factors in temperate forests: a synthesis of the sugar maple literature. *Can. J. For. Res.*, 38: 401-414.

Taylor, F. H. 1956. Variation in sugar content of maple sap. Vt. Agric. Expt. Sta. Bull. 587.

Timmer, V.R., Teng, Y. et Pedlar, J. 2003. Soil and leaf analysis of fertilized sugar maple stand after ice storm damage. *For. Chron.*, 79 (1): 99-105.

Tyree, M.T. 1983. Maple sap uptake, exudation, and pressure changes correlated with freezing exotherms and thawing endotherms. *Plant Physiol.*, 73: 277-285.

Tyree, M.T. 1984. Maple sap exudation: how it happens. *Maple Syrup Journal*, 4 (1): 10-11.

Valin, R. 1950. *Traitement des érablières et des massifs forestiers* (Bulletin numéro 3). Ministère des Terres et Forêts. Québec, Canada.

Van Groenewoud, H. 1983. *Summary of climatic data pertaining to Climatic Regions of New Brunswick*. Maritimes Forest Research Centre. Canadian Forestry Service. Department of the Environment.

Wallner, W.E. et Gregory, R.A. 1980. Relationship of sugar concentrations in sugar maple to ray tissue and parenchyma flecks caused by *Phytobia setosa*. *Can. J. For. Res.*, 10: 312-315.

Walters, R.S. 1982. Sugarbush management. *In Sugar maple research: sap production, processing, and marketing of maple syrup*. USDA For. Serv., Northeastern For. Exp. Stn., General technical rep. NE-72: 25-37.

Wargo, P.M. 1979. Starch storage and radial growth in woody roots of sugar maple. *Can. J. For. Res.*, 9: 49-56.

Wargo, P. M, Minocha, R., Wong, B. L., Long, R. P., Horsley, S. B. et Hall, T. H. 2002. Measuring changes in stress and vitality indicators in limed sugar maple on the Allegheny Plateau in north-central Pennsylvania. *Can. J. For. Res.*, 32: 629–641.

Waring, R.H. et Schlesinger, W.H. 1985. Forest ecosystems: concepts and management. Orlando, Florida: Academic Press.

Watterson, K. G., Leaf, A. L., et Engelken, J. H. 1963. Effects of N, P, and K Fertilisation on Yield and Sugar Content of Sap of Sugar Maple Trees. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.*, 27: 236-238.

Wilmot, T. R., Esllsworth, D. S. et Tyree, M. T. 1996. Base cation fertilisation and liming effects on nutrition and growth of Vermont sugar maple stands. *For. Ecol. Manag.*, 84: 123-134.

Wilmot, T. R., Esllsworth, D. S. et Tyree, M. T. 1995. Relationships among crown condition, growth, and stand nutrition in seven northern Vermont sugarbushes. *Can. J. For. Res.*, 25: 386-397.

Yawney, H. W., et Walters, R. S. 1973. Special forest crop and forest utilization. *In Forest fertilization Symposium Proceedings*. USDA For. Serv. Gen. Tech. Rep. NE-3 pp. 122-131.