

Mise à jour des seuils de fertilité des sols pour diagnostiquer les carences en calcium, potassium et phosphore chez l'érable à sucre

Rock Ouimet, Jean-David Moore et Louis Duchesne

Résumé

L'objectif de cette étude est de déterminer la précision des seuils de fertilité des sols existants pour diagnostiquer les carences en calcium (Ca), potassium (K) et phosphore (P) chez l'érable à sucre (*Acer saccharum* Marsh.) et d'en proposer de nouveaux s'il y a lieu. Les seuils de fertilité ont d'abord été analysés à partir de données provenant de 246 érablières au Québec, puis validés avec ceux de 64 autres stations situées dans le domaine de l'érable à sucre. En ce qui concerne le Ca, la combinaison de la saturation en Ca de l'horizon minéral B du sol (seuil : $\leq 28,4$ %), du rapport calcium/magnésium (Ca/Mg : $\leq 5,322$) et de la saturation en Ca ($\leq 59,7$ %) de l'humus a fourni la meilleure précision (80,5 %) pour diagnostiquer la carence foliaire en Ca. Pour le K, l'un ou l'autre seuil concernant le rapport K/Mg dans l'humus ($\leq 0,324$) ou dans l'horizon B ($\leq 0,436$), ou le rapport Ca/Mg dans l'humus ($\leq 4,382$) fournissait le diagnostic le plus précis (76,3 %). En ce qui concerne le P, la combinaison de la saturation en bases ($\leq 33,4$ %) et de la saturation en Mg ($\leq 9,6$ %) de l'horizon B et le rapport K/Mg de l'humus ($\leq 0,187$) a fourni un diagnostic conservateur, avec une précision de 72,3 %. La précision des seuils a été la même pour les sites des Appalaches et ceux des Laurentides ($p \geq 0,53$). Ces nouveaux seuils de carences dans les sols permettent un diagnostic plus précis que ceux suggérés auparavant.

Mots clés : *Acer saccharum*, sol forestier, carence minérale, méthode diagnostique.

Abstract

*The objective of this study was to determine the accuracy of current soil thresholds for diagnosing calcium (Ca), potassium (K), and phosphorus (P) deficiencies in sugar maple (*Acer saccharum* Marsh.), and to propose better thresholds if possible. The analysis of the thresholds was first performed using 246 maple stands in Québec, which were then validated using 64 other sites located in the sugar maple range. With respect to Ca, the combination of Ca saturation of the mineral B horizon (threshold: $\leq 28.4\%$), the humus calcium/magnesium ratio (Ca/Mg: ≤ 5.322) and Ca saturation ($\leq 59.7\%$) predicted foliar Ca deficiency with the best overall accuracy (80.5%). For K, either optimum thresholds of the K/Mg ratio in the humus (≤ 0.324) or in the upper B (≤ 0.436) soil horizons, or the humus Ca/Mg ratio (≤ 4.382), provided the diagnosis with the best overall accuracy (76.3%). For P, the combination of base saturation ($\leq 33.4\%$) and Mg saturation ($\leq 9.6\%$) of the mineral B horizon, and of the humus K/Mg ratio (≤ 0.187), yielded a conservative diagnosis with an accuracy of 72.3%. The accuracy of the soil thresholds remained the same for sites in the Appalachians and the Laurentians ($p \geq 0.53$). The new soil thresholds provide a better diagnosis than the ones suggested in the past.*

Keywords: *Acer saccharum*, forest soil, mineral deficiency, diagnostic assay.



Ministère des Ressources naturelles
Direction de la recherche forestière
2700, rue Einstein
Québec (Québec) G1P 3W8
Téléphone : 418 643-7994
Télécopieur : 418 643-2165
Courriel : recherche.forestiery@mrn.gouv.qc.ca
Site Internet : www.mrn.gouv.qc.ca

Introduction

Les érablières constituent une ressource importante pour le Québec. En 2011, le ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation du Québec y comptait plus de 13 500 producteurs et productrices acéricoles regroupés au sein de 7 357 entreprises détentrices d'un contingent (MAPAQ 2011), pour 42,7 millions d'entailles en exploitation. La valeur des produits de l'érable à la ferme est estimée à près de 283 millions de dollars pour une récolte d'environ 101,9 millions de livres de sirop. La valeur des entreprises acéricoles est estimée à plus de 1,8 milliard de dollars, en incluant la valeur du fonds de terre au privé. La production du Québec compte pour 91 % du total canadien et 71,4 % du total mondial.

Le jardinage acérico-forestier est devenu le mode d'aménagement privilégié au Québec car il permet de protéger le potentiel d'entailage tout en assurant l'approvisionnement en matière ligneuse. Or, ce mode d'aménagement seul ne suffit pas toujours à améliorer la santé et la vigueur des érablières en raison des divers facteurs de stress environnementaux que celles-ci subissent depuis plusieurs années : précipitations acides (OUMET et DUCHESNE 2009), écarts climatiques et épidémies d'insectes ravageurs (PAYETTE *et al.* 1996) ainsi que la perte d'essences compagnes (monoculture) (CÔTÉ 1997). À plus ou moins long terme, ces facteurs influencent la diversité biologique et le cycle biogéochimique des éléments nutritifs dans les érablières.

La croissance et la santé de l'érable à sucre (*Acer saccharum* Marsh.) sont fortement influencées par le statut nutritif de l'arbre (BERNIER et BRAZEAU 1988a, 1988b, 1988c; HENDERSHOT et JONES 1989; HEISEY 1995, WILMOT *et al.* 1995; LONG *et al.* 2009; MOORE *et al.* 2012), lequel dépend en grande partie des propriétés physico-chimiques du sol (MADER et THOMPSON 1969, OUMET et CAMIRÉ 1995, LONG *et al.* 2009). Bien que des normes foliaires soient disponibles pour évaluer le statut nutritionnel de l'érable à sucre (LOZANO et HUYNH 1989, HORSLEY *et al.* 2000, VIZCAYNO-SOTO *et al.* 2004), les seuils correspondants pour les sols n'ont pas été tellement documentés. Cette lacune est probablement due en partie à l'échantillonnage laborieux qui est nécessaire pour prendre en compte la grande variabilité spatio-temporelle et verticale des propriétés physico-chimiques des sols, de même que celle de leur géologie, de leur position topographique, de leur drainage et même des méthodes employées

dans les différents laboratoires pour déterminer les éléments nutritifs disponibles. Malgré ces inconvénients, l'échantillonnage du sol demeure une pratique plus courante que l'échantillonnage foliaire pour diagnostiquer les éléments nutritifs limitatifs. En effet, ce dernier doit se dérouler sur une période très courte (de la mi-juillet à la mi-août), c'est-à-dire pendant que la biomasse foliaire a un statut nutritionnel stable (DUCHESNE *et al.* 2001).

OUMET et CAMIRÉ (1995) ont étudié la relation entre les propriétés physico-chimiques du sol et la composition du feuillage dans 246 érablières situées majoritairement dans les Appalaches du Québec (Figure 1). Cette base de données unique a permis de suggérer des seuils préliminaires pour plusieurs des propriétés des sols, lesquels permettent de maintenir une nutrition équilibrée pour l'érable à sucre au Québec, en particulier pour le Ca, le Mg et le K (Tableau 1). Ces seuils sont basés sur les teneurs échangeables obtenues par extraction à l'aide de sels neutres (NH_4NO_3 ; STUANES *et al.* (1984) ou NH_4Cl 1 M) de deux horizons diagnostiques du sol. Le premier horizon est l'horizon H (ou Ah, Ahe). Cet horizon, généralement organique, est caractérisé par de la matière organique très décomposée ayant un haut degré d'humification, et dont les structures originelles des tissus sont devenues indiscernables. Cet horizon est fréquemment mélangé avec des particules minérales, en particulier près de la limite avec l'horizon minéral sous-jacent. Le deuxième horizon diagnostique est la portion supérieure de l'horizon B (les premiers 10-15 cm). Cet horizon minéral est typiquement enrichi de matière organique et de sesquioxydes de fer et d'aluminium, créant le changement caractéristique de sa couleur qui dénote l'oxydation.

Les indicateurs de fertilité du sol présentés au tableau 1 et leurs seuils ont été employés dans l'application informatique DELFES, développée à la Direction de la recherche forestière (DRF) du MRN pour faire le diagnostic des éléments nutritifs à partir du feuillage et du sol chez l'érable à sucre (OUMET *et al.* 2003, 2010). Cette application permet de convertir des résultats d'analyses de sol d'érablières, obtenus à partir de méthodes d'extraction variées, en des valeurs équivalentes à des extraits obtenus par des sels neutres; elle permet aussi de calculer la valeur des indicateurs de fertilité du sol et de déterminer ainsi la présence de carences nutritionnelles.

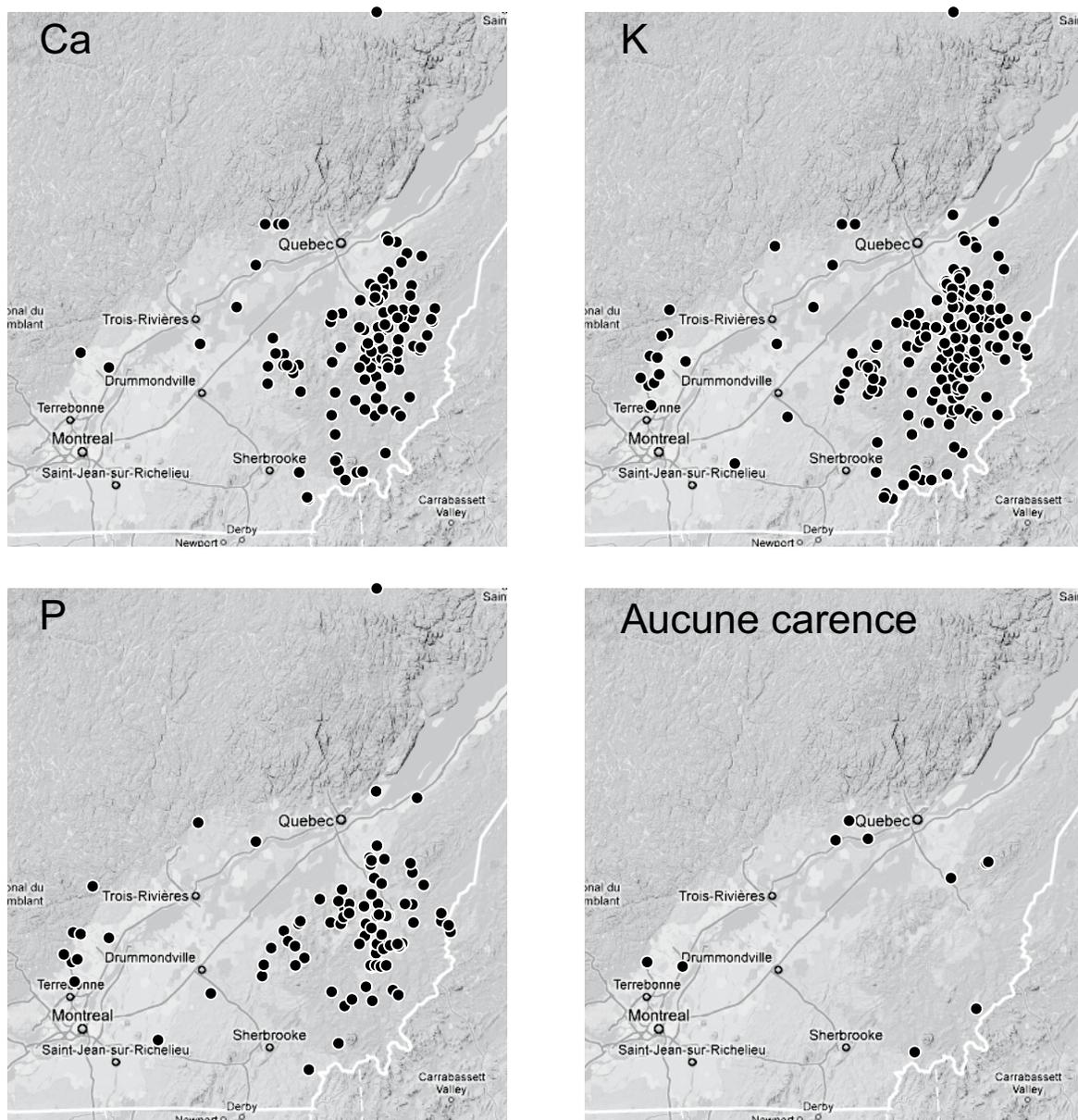


Figure 1. Emplacement des sites montrant des carences foliaires parmi les 246 érabières étudiées par OUMET et CAMIRÉ (1995).

Tableau 1. Seuils préliminaires de fertilité pour les sols d'érabières tirés de OUMET et CAMIRÉ (1995) et utilisés dans les deux premières versions de DELFES (v. 1.0 et 1.2). Ces seuils sont basés sur les rapports et la saturation en cations échangeables du complexe d'échange du sol dans deux horizons diagnostiques : l'humus (H-Ah) et l'horizon B supérieur du sol minéral.

Horizon du sol	Saturation		Rapport		
	Ca (%)	Mg (%)	Ca/Mg	K/Mg	Ca/H+Al ¹
H-Ah	60	< 10	6	0,5	1
B	50	< 10	4	1	1

¹H+Al: acidité échangeable.

L'application DELFES est couramment employée pour déterminer les carences nutritionnelles dans les érablières au Québec. L'objectif de cette étude est de vérifier la précision des diagnostics obtenus à partir des indicateurs suggérés au Tableau 1 et de définir, si possible, de nouveaux seuils de fertilité des sols pour diagnostiquer les éléments nutritifs limitatifs chez l'érable à sucre, tel qu'il serait fait selon les normes foliaires disponibles.

1. Matériel et méthodes

1.1 Statut nutritif de référence

Le statut nutritif de référence est basé sur la composition d'un échantillon représentatif de la biomasse foliaire de l'érable à sucre. Les normes du *Diagnostic and Recommendation Integrated System* (DRIS) pour l'érable à sucre, mises au point par LOZANO et HUYNH (1989), ont servi à évaluer la présence de carences foliaires. Avec la technique du DRIS, la valeur des indices de chacun des rapports entre éléments nutritifs peut être positive ou négative, mais la somme des indices est toujours égale à zéro. Pour un élément nutritif donné, une valeur négative de l'indice DRIS représente un état de nutrition sous-optimal, tandis qu'une valeur positive représente un état de nutrition supra-optimal (consommation de luxe). L'équilibre idéal est atteint lorsque les indices DRIS de chacun des éléments nutritifs et la somme de leurs valeurs absolues (appelée « indice de déséquilibre nutritif » ou IDN) s'approche de zéro. Les normes DRIS de LOZANO et HUYNH (1989) ont été employées par le passé pour diagnostiquer les carences en éléments nutritifs chez l'érable à sucre (LEECH et KIM 1990, PARÉ *et al.* 1993, CÔTÉ et CAMIRÉ 1995, CÔTÉ *et al.* 1995, OUMET *et al.* 1995, BURKE et RAYNAL 1998, MOORE *et al.* 2000, ROY *et al.* 2002, MOORE et OUMET 2006, CASSON *et al.* 2012). Dans cette étude, nous avons considéré qu'un indice DRIS ≤ -15 était indicatif d'une véritable carence nutritive de l'élément correspondant. Ce seuil a donc été utilisé pour classer la présence ou l'absence de carence d'un élément nutritif donné; c'est cette classification qui a servi de référence pour déterminer et évaluer la performance des variables du sol et de leurs seuils à pouvoir détecter la présence de carences.

1.2 Données de calibration

Les données de calibration associées à l'évaluation du lien sol – statut foliaire ont été obtenues à partir de 246 érablières étudiées par OUMET et CAMIRÉ (1995). Cette base de données contenait toutes les variables

nécessaires à l'évaluation de leurs valeurs DRIS à partir des concentrations foliaires (N, P, K, Ca et Mg) et des variables des horizons H et B du sol (pH et concentrations des cations échangeables Ca, K, Mg, acidité d'échange [H+Al], CEC et saturation en base). Les sols de ces érablières étaient des podzols et des brunisols (GROUPE DE TRAVAIL SUR LA CLASSIFICATION DES SOLS 1998) ou des podzols et cambisols (FAO 1998), de texture variant de sable loameux à loam et de drainage variant de bon à imparfait. Entre la mi-juillet et la mi-août 1989, le feuillage, l'humus (horizon FH, H ou Ah) et les 10 premiers centimètres de l'horizon minéral B avaient été échantillonnés, en 10 points distribués le long d'un transect dans chaque érablière, selon les indications du guide accompagnant le Programme de lutte contre le dépérissement (ANONYME 1989). À chacun de ces points, un érable à sucre dominant ou codominant a été sélectionné et deux branches ont été prélevées à la mi-cime à l'aide d'une perche télescopique équipée d'un sécateur. Les deux horizons de sol ont été prélevés séparément. Plus de détails sur ces données sont présentés dans OUMET et CAMIRÉ (1995).

1.3 Données de validation

Nous avons parcouru la littérature scientifique se rapportant aux propriétés physico-chimiques des sols des érablières, au statut nutritif foliaire de celles-ci, à leur croissance et à leur santé dans le nord-est des États-Unis et l'est du Canada. Dans six études, nous avons pu retracer les données complètes de composition foliaire et de sol : 1) FYLES *et al.* (1994) et HENDERSHOT et COURCHESNE (1991); 2) OUMET *et al.* (1995); 3) CÔTÉ et CAMIRÉ (1995); 4) LONG *et al.* (1997); 5) MOORE et OUMET (2006) et MOORE *et al.* (2008); 6) OUMET *et al.* (2008). Nous avons aussi en notre possession une base de données comprenant 16 érablières du Réseau d'étude et de surveillance des écosystèmes forestiers (RÉSEF; PÉRIÉ et OUMET 2003), pour un total de 64 sites formant une base de données de validation. Bien que les méthodes d'analyses physico-chimiques aient pu différer d'une étude à l'autre, seulement celles utilisant un sel neutre comme agent d'extraction ont été sélectionnées. Nous avons présumé que les différences entre les divers produits extractifs des éléments disponibles dans les sols n'influençaient pas de façon importante les indicateurs de fertilité du sol (STUANES *et al.* 1984), et qu'il était donc possible de faire un diagnostic directement à partir des données analytiques. Quelques détails sur les études indépendantes retenues pour valider nos indicateurs de fertilité du sol sont fournis ici (OUMET *et al.* 2013) :

1) La station d'érablière de la Station de biologie des Laurentides montrait un dépérissement de l'ordre de 20 %; d'après les auteurs (FYLES *et al.* 1994), elle montrait des insuffisances en azote (N) et en Ca. Cette étude a été retenue malgré le fait qu'il n'a pas été possible de calculer les indices DRIS parce que les concentrations foliaires en P étaient manquantes dans la publication. Le diagnostic de carence posé par les auteurs a donc été utilisé. Les propriétés physico-chimiques du sol de cette érablière (extraction au BaCl_2 0,1 M) ont été publiées par HENDERSHOT et COURCHESNE (1991).

2) Un total de 18 érablières de la région de la Beauce ont été étudiées pour évaluer la relation entre leur taux d'endomycorhization, leur taux de dépérissement et leur statut nutritif foliaire et celui du sol (extraction au NH_4Cl 1 M) (OUMET *et al.* 1995). Les sites étaient situés principalement sur des sols riches en Mg, et montraient des combinaisons de carences en P, K et Ca d'après les indices DRIS.

3) Dans leur étude, CÔTÉ et CAMIRÉ (1995) ont analysé la chimie du sol (extraction au BaCl_2 0,1 M) et du feuillage de l'éérable à sucre dans trois sites au Québec montrant des états de santé et des statuts nutritifs différents. Le site sans symptôme de dépérissement à l'arboretum de Morgan avait une carence foliaire en P et en K d'après les indices DRIS pour ces éléments. Le site de Saint-Hyppolyte montrait des symptômes de dépérissement légers, mais comme les indices DRIS n'étaient pas sous le seuil fixé (-15), il a été considéré sans carence. Le site d'Entrelacs montrait des symptômes modérés de dépérissement. Le feuillage indiquait une carence en K d'après les indices DRIS.

4) La quatrième étude retenue comprend, entre autres, les moyennes de deux traitements d'amendement avec de la chaux dolomitique ($22,4 \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}$) sur des sites situés à la *Susquehannock State Forest*, PA. Les sols appartiennent à la section des hauts plateaux de l'Allegheny (Appalaches) qui n'a pas subi la glaciation. Les données publiées 8 ans après traitement ont été retenues (LONG *et al.* 1997). Nous avons présumé que l'aluminium (Al) extrait au KCl représentait l'acidité d'échange (H+Al), que les échantillons prélevés à 0-5 cm de profondeur correspondaient à l'humus et que ceux prélevés à 5-10 cm de profondeur correspondaient à l'horizon B supérieur (cations basiques extraits au NH_4OAc 1 M). Les analyses foliaires provenant des parcelles témoins indiquaient que le Ca était le principal élément limitatif. L'amendement en chaux a amélioré la nutrition en Ca des érables d'après l'augmentation observée de l'indice DRIS du Ca;

cependant, le K est devenu insuffisant et le Ca, malgré son amélioration, est demeuré insuffisant. Néanmoins, la réaction de croissance des érables à l'amendement a été spectaculaire, probablement en raison de l'amélioration du statut du sol en Ca et de la diminution de son acidité échangeable ou de la toxicité due à Al dans les cinq premiers centimètres de sol.

5) La cinquième étude retenue, un site dont le sol est pauvre et acide et où les érables étaient en dépérissement, situé à la Station forestière de Duchesnay dans les Laurentides, a été l'objet d'une expérience de chaulage en 1994. Les parcelles ont reçu une de huit doses de chaux dolomitique variant de 0 à $50 \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}$. Pour cette expérience, les données 10 ans après traitement ont été retenues (MOORE et OUMET 2006, MOORE *et al.* 2008). Les échantillons de sol à 0-12 cm de profondeur se rapportaient à l'humus, tandis que ceux de 12 à 20 cm de profondeur représentaient l'horizon B minéral (extraction au NH_4Cl 1 M). D'après le statut nutritif du feuillage des érables témoins, l'élément le plus limitatif était le Ca, suivi du K. L'ajout de chaux a réduit les indices DRIS du N, P et K en proportion avec la dose de chaux appliquée, tandis que les indices DRIS du Ca et Mg ont augmenté avec la dose de chaux. Dans le sol, les deux horizons ont montré des changements proportionnels à la dose de chaux. Le chaulage a causé une augmentation spectaculaire de la croissance et la disparition du dépérissement.

6) Les résultats d'une expérience de 10 ans sur l'acidification ou l'alcalinisation des sols d'érablières ont été publiés en 2008 (OUMET *et al.* 2008). Deux sites contrastants ont été l'objet de l'expérience : a) un site à la Forêt expérimentale de Duchesnay dans les Laurentides, qui avait un sol peu fertile (sable loameux) et b) un site à Saint-Hilaire-de-Dorset dans les Appalaches, dont le sol avait une très bonne fertilité (loam). Les données retenues de cette expérience sont celles prises 10 ans après traitement. Le site de Duchesnay était carencé en Ca d'après les indices DRIS. Les traitements ont influencé principalement l'humus, alors que les propriétés chimiques de l'horizon B (extraction au NH_4Cl 1 M) n'ont pas montré de réaction aux traitements. Le site de Dorset montrait principalement des carences en P et K d'après les indices DRIS. Sa saturation en Mg dans le sol était élevée, tandis que son rapport Ca/Mg était bas dans l'horizon B. Ceci s'explique par le fait que le site se trouve dans une région dont les sols contiennent des minéraux riches en Mg (p. ex. chlorite) provenant de la formation géologique de Compton et Caldwell.

7) Le Réseau d'étude et de surveillance des écosystèmes forestiers (RESEF) est un ensemble de stations forestières protégées pour y effectuer le suivi à long terme. Il a démarré ses activités au milieu des années 1980 et s'étend sur tout le Québec méridional (PÉRIÉ *et al.* 2006). Présentement, 16 érablières sont suivies. Le suivi du taux de dépérissement dans ces stations a été effectué durant les années 1990. De plus, le sol et le feuillage ont été échantillonnés aux 5 ans durant les années 1985-2000. Les propriétés physico-chimiques de sol ont été obtenues par extraction au NH_4Cl 1 M.

1.4 Analyses statistiques

Avec les données de calibration, les relations ont été analysées entre toutes les données de sol (pH, concentrations, saturations et rapports entre les éléments échangeables) et les diagnostics obtenus avec les indices DRIS foliaires pour trois éléments nutritifs (Ca, K et P) pris individuellement. L'analyse statistique employée a été la technique d'arbre de régression dans la procédure *ctree* du module *party* dans l'application R (HOTHORN *et al.* 2006). Cette technique d'analyse est plus appropriée que les méthodes linéaires pour classer les données sur la base des meilleures variables de prévision. De plus, elle permet de s'ajuster aux interactions et phénomènes non linéaires lorsque plusieurs variables prédictives sont employées, comme c'est le cas ici. L'analyse d'arbre de régression n'a pas été effectuée sur le N et le Mg en raison du manque de cas de carences observées pour ces éléments dans les données de calibration ($n = 0$ et 1 observation, respectivement, pour la carence en N et Mg).

Étant donné que l'analyse d'arbre de régression n'a pas donné de résultats probants pour le K, l'évaluation des seuils optimaux pour détecter la présence de carence en K a été effectuée pour les variables indicatrices suggérées par OUIMET et CAMIRÉ (1995). Les seuils optimaux de ces variables ont été

déterminés à partir d'analyses nommées *Receiver Operating Characteristics* (ROC) réalisées à l'aide du module *pROC* v. 1.4.3 dans l'application R (ROBIN *et al.* 2011). FAWCETT (2006) présente une excellente introduction à l'analyse ROC. Brièvement, l'analyse ROC permet d'exprimer, pour diverses valeurs de seuils de carence possibles, la proportion de cas diagnostiqués correctement comme carencés (sensibilité) et la proportion de cas correctement diagnostiqués comme non carencés (spécificité). Le seuil optimal correspond à la valeur pour laquelle la somme de la sensibilité et de la spécificité (indice de Youden) est la plus élevée, alors que la précision globale d'un indicateur diagnostique est donnée par la moyenne de la sensibilité et de la spécificité. Les valeurs de sensibilité et de spécificité ainsi que les intervalles de confiance à 95 % ($\text{IC}_{95\%}$) des seuils diagnostiques ont été estimés par la méthode *bootstrap* stratifiée ($n = 2000$), où le même nombre de cas de carence et de non-carence sont sélectionnés aléatoirement à chaque répétition. La méthode *bootstrap* est basée sur la procédure Monte-Carlo qui permet d'estimer la distribution de l'erreur sur un grand nombre de simulations (ROBIN *et al.* 2011). Les performances des variables indicatrices du sol pour détecter les carences foliaires ont été comparées entre elles en calculant leur précision par la méthode *bootstrap*.

2. Résultats

2.1 Occurrence des carences dans le feuillage

Parmi les cinq éléments nutritifs examinés dans les données de calibration, le K était le plus fréquemment insuffisant d'après les indices DRIS du feuillage, suivi du Ca et du P (Tableau 2). L'occurrence de carence en N était nulle, tandis que celle en Mg était de un cas seulement sur les 246. Les proportions des occurrences de carence des données de validation sont similaires à celles des données de calibration.

Tableau 2. Fréquence des carences nutritionnelles observées pour divers éléments dans les bases de données de calibration et de validation, sur la base d'indices foliaires DRIS ≤ -15 .

Base de données	n	Fréquence de carence de chaque élément				
		N	P	K	Ca	Mg
Calibration	246	0	95	212	125	1
Validation	64	0	16	43	46	0

2.2 Évaluation des indicateurs de fertilité du sol

2.2.1 Calcium

L'arbre de décision, qui partitionne les occurrences de carence en Ca à partir des données de calibration, a donné une précision de 80,5 % (Figure 2), par la combinaison de la saturation en Ca dans l'horizon B, du rapport Ca/Mg et de la saturation en Ca dans l'humus. Quelques-uns des seuils de ces variables du sol sont près de ceux qui avaient déjà été suggérés par OUMET et CAMIRÉ (1995) (Tableau 1). Par exemple, les seuils de saturation en Ca de l'humus (59,7 % pour l'arbre de décision contre 60 % pour OUMET et CAMIRÉ [1995] au Tableau 1) et du rapport Ca/Mg de l'humus (5,322 contre 6) sont rapprochés. Par contraste, les seuils de la saturation en Ca dans l'horizon B sont plus éloignés l'un de l'autre (28,4 % contre 50 %). Les observations classées dans les branches 3 et 7 de l'arbre de décision sont bien diagnostiquées, avec la majorité des cas montrant respectivement la présence et l'absence de carence en Ca. Les branches 4 et 6 fournissent cependant un diagnostic moins précis.

Dans le but d'évaluer la performance de l'arbre de décision, les performances de chacun des indicateurs de fertilité du sol utilisés par DELFES 1.2 (Tableau 1) pour diagnostiquer les carences en Ca et celles de l'arbre de décision de la figure 2 sont mises en graphique ROC (Figure 3). Dans cette figure, le critère généralement employé par DELFES et portant le label « DELFES », se définit comme ceci : l'un des deux horizons doit présenter des valeurs se situant sous les seuils du Tableau 1. Il ressort de ce graphique que parmi tous les indicateurs de fertilité du sol étudiés, celui de l'arbre de décision est le plus performant, c'est-à-dire qu'il offre la meilleure combinaison de sensibilité et de spécificité. Il est notamment plus précis statistiquement que le second meilleur indicateur, celui utilisé par DELFES 1.2 (précision de 80,5 % contre 75,2 %, $p = 0,010$). L'indicateur le plus conservateur (c'est-à-dire avec la plus grande spécificité) est la combinaison de tous les indicateurs du tableau 1 et de leurs seuils (tous les indicateurs 1 à 9 dans la Figure 3), avec une spécificité de 96,7 % (IC₉₅ : 93,4 – 99,2 %), mais avec une sensibilité de seulement 22,4 % (IC₉₅ : 15,2 – 29,6 %) pour une précision globale de 59,6 %.

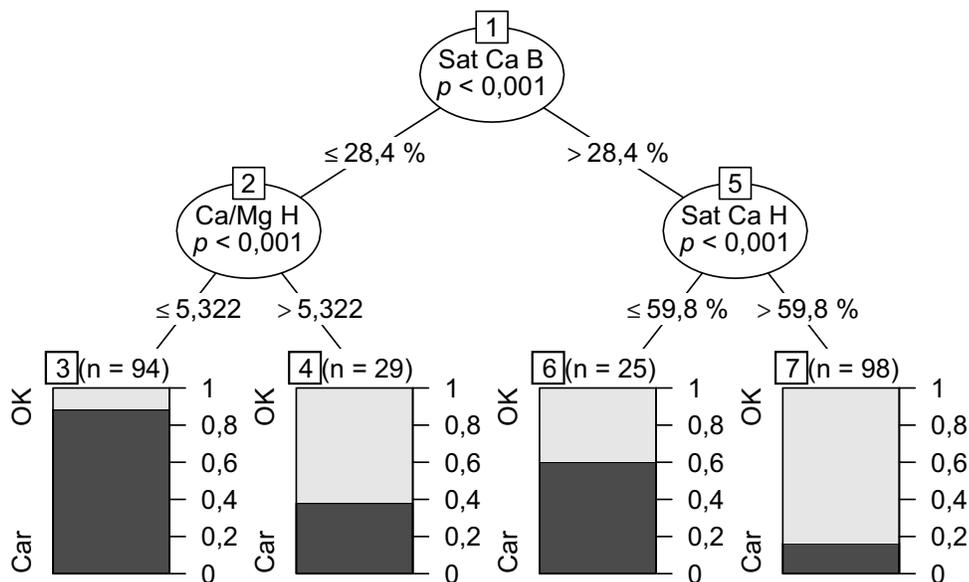


Figure 2. Arbre de décision servant à diagnostiquer la carence en Ca de l'érable à sucre, sur la base des données de calibration. Sat Ca B : saturation en Ca de l'horizon B (%); Ca/Mg H : rapport Ca/Mg dans l'humus; Sat Ca H : saturation en Ca dans l'humus (%). Les branches terminales montrent le nombre d'observations dans chaque groupe et le résultats de classification, les barres foncées représentant le pourcentage d'observations ayant une carence en Ca (Car).

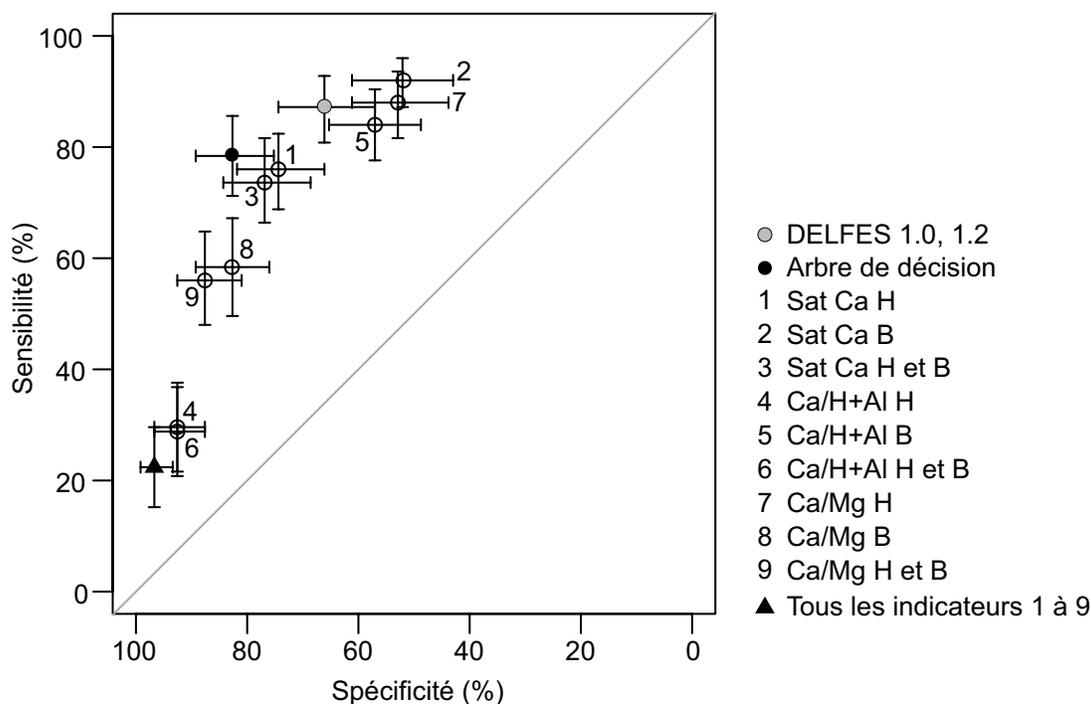


Figure 3. Graphique ROC de la performance d'indicateurs de fertilité du sol pour détecter la carence en Ca dans les érablières, avec leurs intervalles de confiance à 95 % (méthode *bootstrap*). Les indicateurs (cercles blancs et chiffres) sont ceux suggérés par OUIMET et CAMIRÉ (1995) et décrits au tableau 1. L'indicateur « DELFES v. 1.0, 1.2 » (cercle gris) correspond à la performance des indicateurs 1 et 2 pris ensemble. En comparaison, la performance de l'arbre de décision de la figure 2 (cercle noir) y est aussi présentée.

2.2.2 Potassium

Pour diagnostiquer les carences en K, l'analyse ROC des variables indicatrices de la fertilité du sol (Tableau 1) a permis de déterminer des seuils critiques optimaux pour les rapports Ca/Mg et K/Mg dans les deux horizons du sol (Tableau 3). Tous les seuils dans ce tableau sont plus bas que ceux recommandés dans le passé (Tableau 1). Par exemple, le seuil du rapport K/Mg dans l'horizon B du sol est de 0,324, contre 1 dans le tableau 1. Cependant, cette différence dans les seuils a quand même entraîné des changements importants dans la précision du diagnostic de la carence en K (précision de 71,0 % contre 52,5 %, selon que le seuil du rapport K/Mg utilisé est l'optimal [Tableau 3] ou l'original [Tableau 1], $p < 0,001$, Figure 4). Si l'on utilise uniquement le rapport K/Mg de l'horizon B avec un seuil de 1 (point n° 2 dans la Figure 4), on arrive à un diagnostic très libéral (c'est-à-dire peu spécifique : spécificité de 5,9 % [IC₉₅ : 0 – 14,7 %]). Parmi l'ensemble des combinaisons de variables

indicatrices et de seuils étudiés, la combinaison de l'un ou l'autre des seuils diagnostiques optimaux de trois indicateurs (rapport K/Mg dans les deux horizons et rapport Ca/Mg dans l'humus [point n° 7 dans la Figure 4]) a fourni la meilleure performance globale pour diagnostiquer la carence en K, avec une sensibilité de 82,1 % (IC₉₅ : 76,9 – 87,3 %) et une spécificité de 70,6 % (IC₉₅ : 52,9 – 85,3 %), pour une précision globale de 76,3 % (Figure 4). Cependant, ce groupe de variables indicatrices a seulement 69 % de probabilité d'être plus précis que le seul rapport K/Mg de l'humus, avec son seuil fixé originellement à une valeur de 0,5 (Tableau 1) (précision de 76,3 % contre 70,9 %, $p = 0,314$). L'indicateur ayant la plus grande spécificité pour diagnostiquer la présence de carence en K est la combinaison des trois indicateurs mentionnés plus haut (point n° 8 dans la Figure 4 : toutes les trois variables indicatrices avec leurs seuils présentés au Tableau 4), avec une spécificité de 100 % (IC₉₅ : 100 – 100 %), mais avec une sensibilité de seulement 21,7 % (IC₉₅ : 16,5 – 27,8 %), pour une précision globale de 60,8 %.

Tableau 3. Seuils planchers optimaux individuels et combinés des rapports Ca/Mg et K/Mg échangeables dans le sol pour détecter la carence en K, et indices de Youden correspondants.

Horizon du sol	Ca/Mg			K/Mg		
	Valeur	Désignation	Indice de Youden	Valeur	Désignation	Indice de Youden
H-Ah	4,382	(A)	133,0	0,324	(B)	143,2
B	1,721	(C)	109,3	0,436	(D)	137,1
Combinaison	(A) ou (B) ou (D)		152,7	(A) et (B) et (D)		121,7

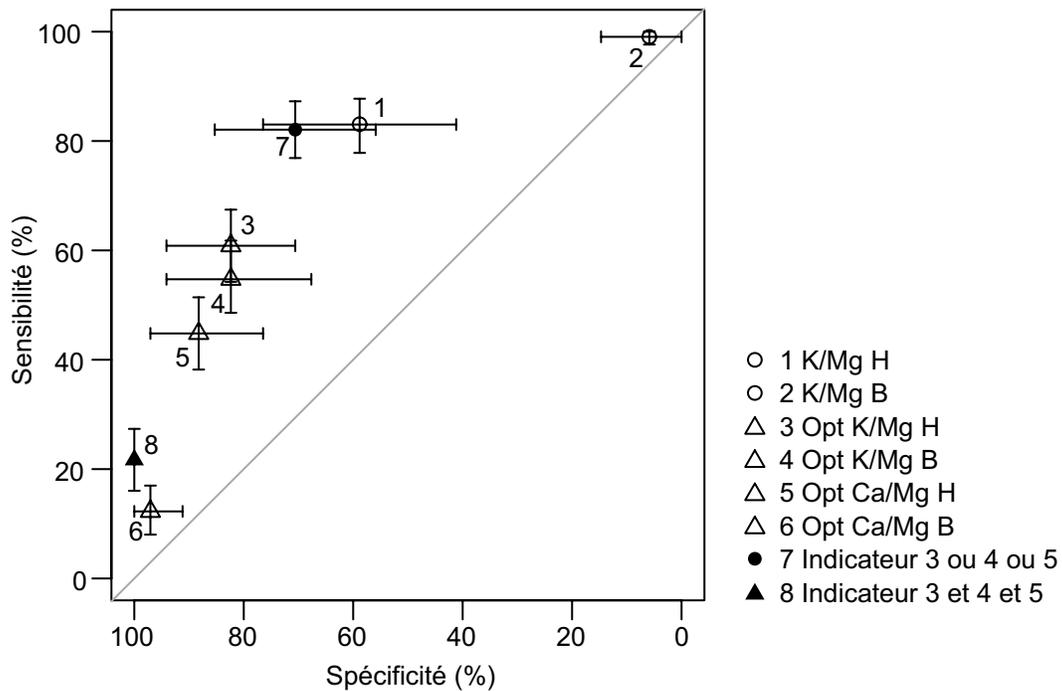


Figure 4. Graphique ROC de la performance des indicateurs de fertilité du sol pour détecter la carence en K dans les érablières, avec leurs intervalles de confiance à 95 %. Les indicateurs sont ceux suggérés par OUIMET et CAMIRÉ (1995) et décrits au tableau 1 (cercles blancs), ainsi que les seuils critiques optimaux obtenus par analyse ROC (triangles noir et blancs et cercle noir) présentés au tableau 4.

Tableau 4. Comparaison des performances des indicateurs de présence de carence en Ca, K et P entre les bases de données de calibration et de validation, en ce qui concerne leur précision et les intervalles de confiance à 95 % (IC₉₅) de la sensibilité et de la spécificité. Les indicateurs sont ceux ayant les indices de Youden les plus élevés (Ca : arbre de décision à la Figure 2; K : la combinaison des indicateurs (1 ou 2 ou 4) au Tableau 3; P : arbre de décision à la Figure 5).

Élément	Précision (%)		Différence <i>p</i>	IC ₉₅ (sensibilité) (%)		IC ₉₅ (spécificité) (%)	
	Calibration	Validation		Calibration	Validation	Calibration	Validation
Ca	80,52	87,44	0,141	71,2 - 85,6	67,4 - 91,3	76,0 - 89,3	83,3 - 100
K	76,33	69,16	0,322	76,9 - 87,3	81,4 - 97,7	52,9 - 85,3	28,6 - 71,4
P	72,34	71,88	0,948	43,2 - 63,2	43,7 - 87,5	87,4 - 96,0	62,5 - 87,5

2.2.3 Phosphore

L'analyse par arbre de régression a produit un arbre de décision qui permet de diagnostiquer la présence de carence en P à partir des analyses du sol avec une précision de 72,3 %, et qui est très conservateur (spécificité de 92,0 % [IC_{95} : 87,4 – 96,0 %], sensibilité de 52,6 % [IC_{95} : 43,2 – 63,2 %]). Dans cet arbre de décision, les variables indicatrices prédictives sont la saturation en bases et en Mg de l'horizon B du sol et le rapport K/Mg de l'humus (Figure 5). À notre connaissance, c'est la première fois qu'un tel arbre de décision permet de diagnostiquer la présence de carence en P dans les érablières. Les observations dans les branches 3 et 6 de l'arbre de décision sont bien classifiées, avec la majorité des observations montrant respectivement l'absence et la présence de carence en P, tandis que les branches 4 et 7 de l'arbre ne permettent pas de faire un diagnostic sûr.

2.3 Validation des variables indicatrices et leur seuil

La performance des indicateurs de fertilité du sol ayant le plus grand indice de Youden (Ca : arbre de décision de la Figure 2; K : la combinaison des indicateurs 1 ou 2 ou 4 dans le Tableau 3; P : arbre de décision de la Figure 5) a été testée avec les données de validation. Les résultats sont présentés à la figure 6. Il n'y a pas de différence de sensibilité ou de spécificité entre les indicateurs employés avec les données de calibration et de validation, à l'exception de la spécificité du diagnostic pour la carence en P. Cependant, la précision globale des indicateurs de fertilité du sol pour diagnostiquer les carences en Ca, K ou P, calculée avec les données de validation, était la même que celle trouvée avec les données de calibration ($p \geq 0,141$; Tableau 4).

Les formations physiographiques distinctes n'ont pas influencé la performance globale de ces indicateurs avec les données de validation. Leur précision pour diagnostiquer les carences en Ca, K et P était similaire ($p \geq 0,530$), quelle que soit la formation physiographique (Laurentides ou Appalaches; Tableau 5).

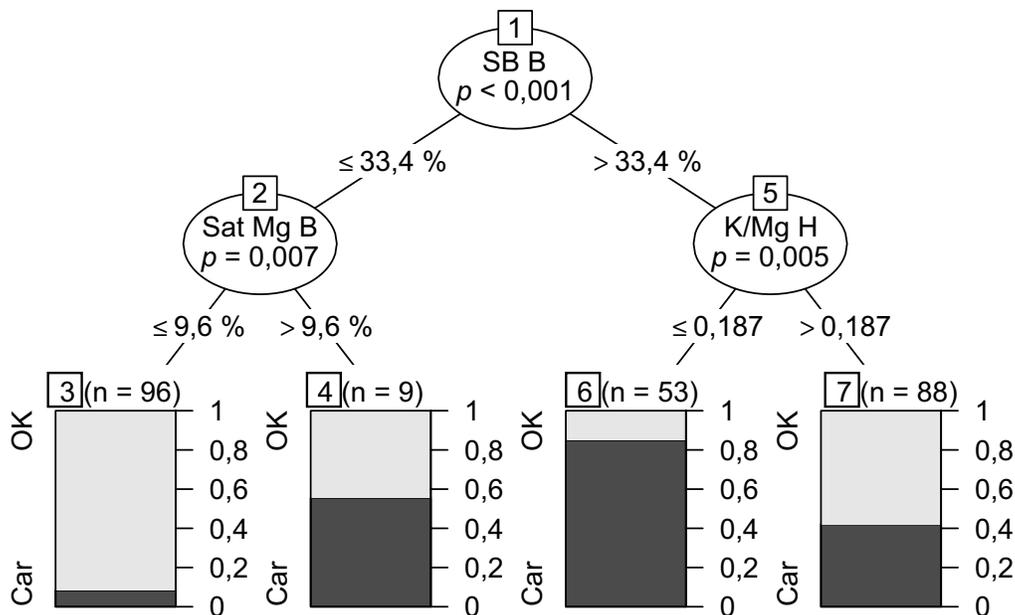


Figure 5. Arbre de décision pour diagnostiquer la carence en P de l'érable à sucre, sur la base des données de calibration. SB B : saturation en bases de l'horizon B du sol (%); Sat Mg B : saturation en Mg de l'horizon B (%); K/Mg H : rapport K/Mg de l'humus. Les branches terminales montrent le nombre d'observations dans chaque groupe et le résultat de classification, les barres foncées représentant le pourcentage d'observations ayant une carence en P (Car).

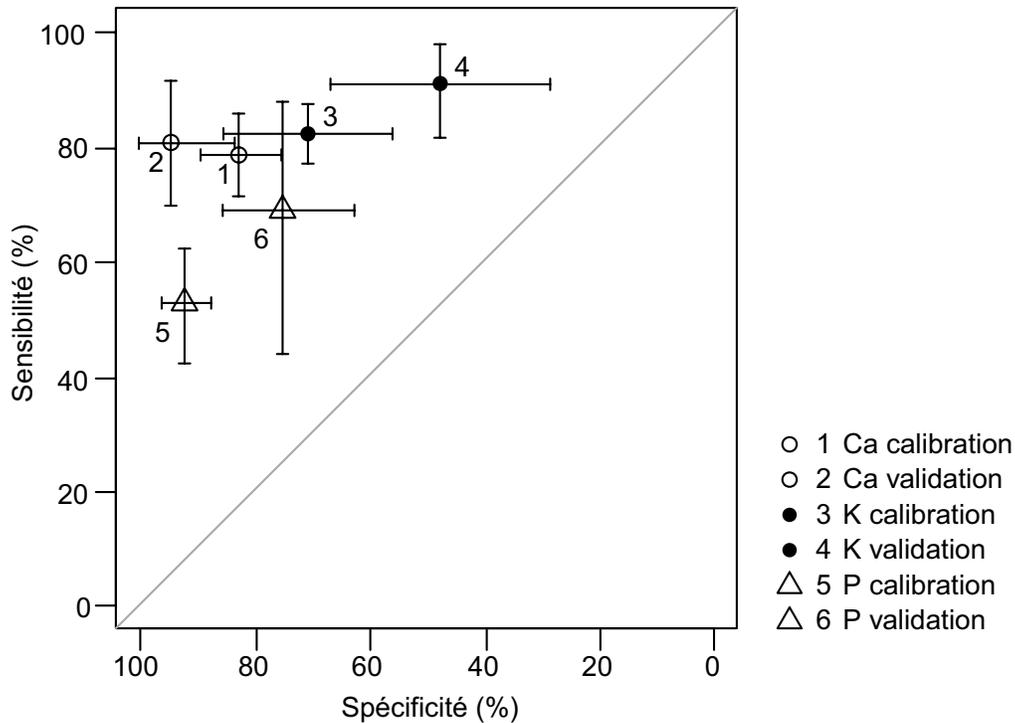


Figure 6. Comparaison entre les résultats des données de calibration et de validation des indicateurs de fertilité du sol avec leurs intervalles de confiance à 95 % pour diagnostiquer les déficiences en Ca, K et P. Les indicateurs sont ceux ayant l'indice de Youden le plus élevé (Ca: arbre de décision de la Figure 2; K: la combinaison des indicateurs 1 ou 2 ou 4 du Tableau 4; P: arbre de décision de la Figure 5).

Tableau 5. Comparaison de la précision des indicateurs de fertilité du sol de présence de carence en Ca, K et P entre les formations physiographiques (Appalaches et Laurentides) pour les données de validation. Les indicateurs sont ceux ayant les indices de Youden les plus élevés (Ca : arbre de décision à la Figure 2; K : la combinaison des indicateurs (1 ou 2 ou 4) au Tableau 3; P : arbre de décision à la Figure 5).

Formation physiographique	n	Précision (%)		
		Ca	K	P
Appalaches	35	89,0	58,3	68,0
Laurentides	29	85,7	65,7	60,9
Différence (p)		0,663	0,530	0,653

3. Discussion

3.1 Variables indicatrices de la fertilité du sol et leur seuil

L'analyse par arbre de régression du diagnostic des carences en Ca et P montre que les variables de saturation dans le sol sont de meilleures variables explicatives que celles de concentration en valeur absolue. Cela s'explique probablement par l'étendue des propriétés des sols rencontrées dans les bases de données de calibration et de validation, ainsi que par la variabilité causée par la profondeur de sol échantillonnée dans chaque cas. Les arbres de décision, avec l'analyse ROC des indicateurs de carence en K, améliorent considérablement le diagnostic de l'occurrence de carence en Ca, K ou P dans les érablières du Québec, par rapport aux seuils recommandés dans les versions antérieures de DELFES.

On a rapporté des relations étroites entre le statut foliaire en Ca, la teneur en Ca du sol et la productivité et la santé dans les érablières dans l'est du Canada et le nord-est des États-Unis (p. ex. : LONG *et al.* 2009, BARIBAULT *et al.* 2010). Parmi ces études, BAILEY *et al.* (2004) ont évalué ces relations dans des sites sur le plateau des Allegheny dans les états de New York et Pennsylvanie. Ils ont établi à 2 % le seuil minimal de saturation en Ca dans l'horizon B supérieur permettant de distinguer les érablières susceptibles au dépérissement de celles protégées de ce syndrome. Ce seuil est beaucoup plus bas que celui obtenu dans cette étude-ci (28,4 %). Les raisons qui expliquent cette grande différence ne sont pas claires; leur seuil est basé sur l'observation de la présence du dépérissement dans les érablières, tandis que le nôtre est basé sur le statut foliaire en Ca, un indicateur beaucoup plus sensible du statut en Ca de l'érablière. Malheureusement, BAILEY *et al.* (2004) n'ont pas rapporté la capacité d'échange cationique (CEC) dans leur article, ce qui fait qu'on ne peut évaluer si les valeurs de CEC étaient différentes des nôtres pour calculer les valeurs de saturation. D'un autre point de vue, un érable à sucre carencé en Ca réagit généralement très fortement à l'ajout en Ca sur le plan de la croissance, de la nutrition et de la vigueur des cimes (HUGGETT *et al.* 2007, MOORE *et al.* 2010, LONG *et al.* 2011, MOORE *et al.* 2012), ce qui démontre la réelle possibilité de carence en Ca chez cette essence.

Le peu de résultats probants obtenus avec l'analyse par arbre de régression des cas de carence en K peut être attribué à la rareté des cas d'absence de carence en K dans les données de calibration (seulement 13,8 % des observations). En revanche, l'analyse ROC a permis de trouver des seuils critiques optimaux des variables indicatrices de la fertilité du sol avec un certain pouvoir prédictif. Les seuils qui maximisent la somme de la sensibilité et de la spécificité mènent généralement à des modèles ayant de meilleures performances prévisionnelles que les seuils fixés par les analyses par arbre de régression (SANTIKA 2011). L'un des avantages de l'analyse par arbre de régression est la possibilité de sélectionner plusieurs variables explicatives selon un critère de maximisation (ou de minimisation). Par contraste, dans l'analyse ROC, le choix des variables explicatives est laissé à l'utilisateur. La précision globale du diagnostic de présence de carence en K est légèrement plus basse que celle pour la carence en Ca (76,3 % contre 80,5 %). Au Québec, les carences en K sont associées principalement au dépérissement de l'érable à sucre dans les Appalaches (BERNIER et BRAZEAU 1988a), et la réaction de cette essence à l'ajout de K est bonne dans les cas où l'on a diagnostiqué une telle carence (OUIMET et FORTIN 1992, FYLES *et al.* 1994, WILMOT *et al.* 1996).

La carence en P est aussi commune dans les cas étudiés. La faible sensibilité du diagnostic de carence en P, lors de l'utilisation de l'arbre de décision, est probablement due à l'absence de variables sur la disponibilité du P dans la base de données. Le P disponible dans le sol est la variable la plus étroitement corrélée à l'accroissement en diamètre de l'érable à sucre sur le Bouclier canadien en Ontario (GRADOWSKI et THOMAS 2006). Encore dans cette province, l'analyse de 36 érablières a montré que le P était plus limitatif que le Ca, K ou le Mg (CASSON *et al.* 2012). Au Québec, PARÉ et BERNIER (1989a, 1989b) ont noté la présence de symptômes de carence foliaire en P sous l'influence de l'acidification dans les érablières ayant des humus de type mull. Ces sols ont généralement une saturation en bases plus grande que les sols déjà acides. Ceci pourrait expliquer en partie l'arbre de décision obtenu, où la carence en P est associée principalement à des sols dont la saturation en bases est plus grande que 33,4 %. Encore aujourd'hui, ces sols reçoivent une charge annuelle d'acidité importante par les dépôts atmosphériques (OUIMET et DUCHESNE 2009).

Il n'a pas été possible de tester des variables indicatrices de la présence de carence foliaire en Mg dans cette étude, en raison du manque d'observations de celle-ci dans les sites échantillonnés au Québec. Cependant, des carences en Mg ont déjà été rapportées dans les Appalaches (HALLETT *et al.* 2006) et les Laurentides (BERNIER et BRAZEAU 1988b). Le rôle du Mg dans la nutrition de l'érable à sucre mérite d'être investigué plus à fond. En effet, lorsqu'on a chaulé des érables carencés en Ca avec de la chaux contenant diverses concentrations de Mg, les arbres ont réagi plus fortement au traitement avec la chaux plus riche en Mg (MOORE et OUIMET 2010). Ainsi, la nutrition en Mg de l'érable à sucre pourrait être plus importante que prévu jusqu'à maintenant.

3.2 Diagnostic du statut nutritif de l'érable

Le diagnostic de la présence de carence en éléments nutritifs dans l'érable est une tâche complexe qui peut avoir des conséquences importantes sur son aménagement. En raison de la haute teneur du feuillage en éléments nutritifs, l'échantillonnage foliaire a toujours été la méthode privilégiée pour diagnostiquer le statut nutritif de l'érable et, conséquemment, les besoins nutritionnels de celle-ci. Cependant, la mise au point de normes foliaires représente une tâche ardue qui requiert beaucoup de ressources concentrées dans une période d'échantillonnage très courte, généralement de la mi-juillet à la mi-août.

Par ailleurs, l'emploi des normes de LOZANO et HUYND (1989) dans l'analyse que nous avons faite peut être critiqué, puisque celles-ci ne proviennent pas du Québec. Cependant, elles demeurent les seules présentement disponibles dans la littérature scientifique. Pour classifier les cas de carence foliaire, la fixation du seuil des indices DRIS à ≤ -15 a permis, du moins en partie, de s'assurer que les seuils critiques mis au point pour les sols soient associés à des sites vraiment carencés. Considérant que les normes foliaires sont perfectibles, les seuils des variables indicatrices de la fertilité des sols mis au point ici représentent jusqu'à présent les meilleures valeurs disponibles pour diagnostiquer les carences en Ca, K et P dans les érables du Québec.

La principale cause des carences nutritionnelles diagnostiquées dans les érables dans l'est du Canada et le nord-est des États-Unis est probablement le changement de fertilité du sol.

L'acidification récente des sols forestiers est de plus en plus documentée dans ces régions (BAILEY *et al.* 2005, COURCHESNE *et al.* 2005, MILLER et WATMOUGH 2009). L'apport de fertilisant ou l'amendement en chaux est devenu un traitement envisageable pour restaurer la santé et la croissance de l'érable à sucre dans les érables montrant des symptômes de dépérissement, particulièrement grâce à de nouveaux épandeurs mécaniques pouvant se déplacer facilement dans les érables sans les endommager. Cependant, comme il a été démontré, les résultats des tests réalisés à partir des analyses du sol ne sont pas précis à 100 %. Par conséquent, avant de prescrire l'ajout d'éléments nutritifs pour améliorer la santé d'une érable, les aménagistes forestiers doivent considérer d'autres indicateurs de santé, tels le taux de croissance et de mortalité du peuplement, son taux de dépérissement, le taux de succès de sa régénération en érable à sucre, et exclure d'autres facteurs qui pourraient potentiellement en influencer la nutrition et la santé. Par ailleurs, l'ajout de produits fertilisants, principalement ceux à base de N et de P, peut causer des changements indésirables dans l'écosystème forestier, entre autres, par la contamination des eaux de surface. Ce risque est particulièrement grand si des mesures de protection (p. ex. : délimitation de zones tampons autour des plans d'eau et des habitations et prise en compte de la vitesse et de la direction du vent) n'entourent pas l'épandage en forêt de fertilisants contenant du P. D'autres conséquences possibles de l'apport d'amendements à des sols forestiers sont le lessivage du nitrate dans ces sols et l'accélération de la minéralisation de la matière organique au sol (KREUTZER 1995). Par conséquent, l'application d'éléments nutritifs par la fertilisation ou le chaulage ne devrait être recommandée qu'après une analyse rigoureuse du feuillage ou du sol. À cet effet, nous recommandons le plus récent guide d'évaluation de l'état de santé des érables (ANNECOU *et al.* 2012) pour établir un diagnostic précis de la situation.

Conclusion

Il a été possible de diagnostiquer avec une certaine précision la présence de carence en éléments nutritifs majeurs (Ca, K et P) chez l'érable à sucre à partir des analyses du sol. Les analyses par arbre de régression et ROC ont permis d'établir des seuils critiques optimaux de variables indicatrices de la fertilité du sol pour détecter les carences en ces éléments nutritifs et ce, avec une plus grande précision que les seuils précédents. La sensibilité et la spécificité des

indicateurs de fertilité du sol variaient selon l'élément en cause et la combinaison d'indicateurs de fertilité retenue. La précision des indicateurs et de leurs seuils était similaire entre les données de calibration et celles de validation, et entre les deux formations physiographiques comprises dans les données de validation, soit les Appalaches et les Laurentides. Par conséquent, ces variables indicatrices de la fertilité du sol et leurs seuils représentent les valeurs les plus à jour pour les sols d'érablières dans ces régions où les seuils des indicateurs sont valides. L'utilisation des indicateurs de fertilité du sol ayant la meilleure précision globale pour faire le diagnostic des éléments limitatifs dans les érablières est donc recommandée. Pour une prudence accrue, les indicateurs de fertilité du sol ayant la plus grande spécificité pourraient être privilégiés, afin d'éviter le plus possible l'épandage inutile de produits fertilisants dans des érablières qui ne sont pas réellement carencées. Ces nouveaux seuils ont été incorporés dans la version 1.3 de DELFES, disponible gratuitement dans le site internet du MRN (www.mrn.gouv.qc.ca/publications/forets/connaissances/recherche/Ouimet-Rock/DELFE1-3.zip). Les graphiques présentés dans cette note de recherche fournissent ainsi une fourchette de sensibilité et de spécificité que pourra utiliser le conseiller forestier, avec discernement, selon l'état de santé de l'érablière.

Remerciements

Cette note de recherche est une contribution des projets de recherche 112310063 et 112310066 à la Direction de la recherche forestière du ministère des Ressources naturelles du Québec. Nous tenons à remercier les deux réviseurs anonymes pour leurs judicieux commentaires sur une version précédente du document, ainsi que M. Mohammed Lamhamedi, éditeur associé, et Mmes Sylvie Bourassa, Maripierre Jalbert et Denise Tousignant, à la communication, pour avoir effectué l'édition de cette note de recherche.

Références bibliographiques

- ANNECOU, C., J.-D. MOORE et R. OUIMET, 2012. *État de santé des érablières : démarche diagnostique*. Centre ACER. 60 p.
- ANONYME, 1989. *Programme de lutte contre le dépérissement des érablières. Guide technique sur l'échantillonnage foliaire, l'échantillonnage de sol et l'évaluation du dépérissement 1989*. Gouvernement du Québec, ministère de l'Énergie et des Ressources. 47 p.
- BAILEY, S.W., S.B. HORSLEY, R.P. LONG, et R.A. HALLETT, 2004. *Influence of edaphic factors on sugar maple nutrition and health on the Allegheny Plateau*. Soil Sci. Soc. Amer. J. 68 : 243-252.
- BAILEY, S.W., S.B. HORSLEY et P.L. LONG, 2005. *Thirty years of change in forest soils of the Allegheny Plateau, Pennsylvania*. Soil Sci. Soc. Am. J. 69 : 681-690.
- BARIBAUT, T.W., R.K. KOBE et D.E. ROTHSTEIN, 2010. *Soil calcium, nitrogen, and water are correlated with aboveground net primary production in northern hardwood forests*. For. Ecol. Manage. 260 : 723-733.
- BERNIER, B. et M. BRAZEAU, 1988a. *Foliar nutrient status in relation to sugar maple decline in the Quebec Appalachians*. Can. J. For. Res. 18 : 754-761.
- BERNIER, B. et M. BRAZEAU, 1988b. *Magnesium deficiency symptoms associated with sugar maple dieback in a Lower Laurentians site in southeastern Quebec*. Can. J. For. Res. 18 : 1265-1269.
- BERNIER, B. et M. BRAZEAU, 1988c. *Nutrient deficiency symptoms associated with sugar maple dieback and decline in the Quebec Appalachians*. Can. J. For. Res. 18 : 762-767.
- BURKE, M.K. et D.J. RAYNAL, 1998. *Liming influences growth and nutrient balances in sugar maple (Acer saccharum) seedlings on an acidic forest soil*. Environ. Exp. Bot. 39 : 105-116.
- CASSON, N., M. EIMERS et S. WATMOUGH, 2012. *An assessment of the nutrient status of sugar maple in Ontario: indications of phosphorus limitation*. Environ. Monit. Assess. 184 : 5917-5927.
- CÔTÉ, B., 1997. *La monoculture d'érable et l'acidification des sols*. Colloque 1997 du Centre ACER. Publication 142. 6 p. [www.centreaecer.qc.ca/uploaded/Publications/142_Fr.pdf].
- CÔTÉ, B. et C. CAMIRÉ, 1995. *Application of leaf, soil, and tree ring chemistry to determine the nutritional status of sugar maple on sites of different levels of decline*. Water, Air, Soil Pollut. 83 : 363-373.
- CÔTÉ, B., I. O'HALLORAN, W.H. HENDERSHOT et H. SPANKIE, 1995. *Possible interference of fertilization in the natural recovery of a declining sugar maple stand in Quebec*. Plant Soil 168-169 : 471-480.

- COURCHESNE, F., B. CÔTÉ, J.W. FYLES, W.H. HENDERSHOT, P.M. BIRON, A.G. ROY et M.C. TURMEL, 2005. *Recent change in soil chemistry in a forested ecosystem of southern Québec, Canada*. Soil Sci. Soc. Am. J. 69 : 1298-1313.
- DUCHESNE, L., R. OUMET, C. CAMIRÉ et D. HOULE, 2001. *Seasonal nutrient transfers by foliar resorption, leaching, and litter fall in a northern hardwood forest at Lake Clair Watershed, Quebec, Canada*. Can. J. For. Res. 31 : 333-344.
- FAO, 1998. *World reference base for soil resources*. Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome, Italie. [www.fao.org/docrep/W8594E/W8594E00.htm].
- FAWCETT, T., 2006. *An introduction to ROC analysis*. Pattern Recogn. Lett. 27 : 861-874.
- FYLES, J.W., B. CÔTÉ, F. COURCHESNE, W.H. HENDERSHOT et S. SAVOIE, 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.
- GRADOWSKI, T. et S.C. THOMAS, 2006. *Phosphorus limitation of sugar maple growth in central Ontario*. For. Ecol. Manage. 226 : 104-109.
- GROUPE DE TRAVAIL SUR LA CLASSIFICATION DES SOLS, 1998. *Le système canadien de classification des sols*. Agriculture et Agroalimentaire Canada, Publication 1646, 187 p. [sis.agr.gc.ca/siscan/references/1998sc_a.html].
- HALLETT, R.A., S.W. BAILEY, S.B. HORSLEY et R.P. LONG, 2006. *Influence of nutrition and stress on sugar maple at regional scale*. Can. J. For. Res. 36 : 2235-2246.
- HEISEY, R.M., 1995. *Growth trends and nutritional status of sugar maple stands on the appalachian plateau of Pennsylvania, U.S.A.* Water, Air, Soil Pollut. 82 : 675-693.
- HENDERSHOT, W.H. et F. COURCHESNE, 1991. *Comparison of soil solution chemistry in zero tension and ceramic-cup tension lysimeters*. J. Soil Sci. 42 : 577-583.
- HENDERSHOT, W.H. et A.R.C. JONES, 1989. *Maple decline in Quebec : a discussion of possible causes and the use of fertilizers to limit damage*. For. Chron. 65 : 280-287.
- HORSLEY, S.B., R.P. LONG, S.W. BAILEY, R.A. HALLETT, et T.J. HALL, 2000. *Factors associated with the decline disease of sugar maple on the Allegheny Plateau*. Can. J. For. Res. 30 : 1365-1378.
- HOTHORN, T., K. HORNIK et A. ZEILEIS, 2006. *Unbiased recursive partitioning: A conditional inference framework*. J. Comput. Graph. Stat. 15 : 651-674.
- HUGGETT, B.A., P.G. SCHABERG, G.J. HAWLEY et C. EAGAR, 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.
- KREUTZER, K., 1995. *Effects of forest soil liming on soil processes*. Plant Soil 168-169 : 447-470.
- LEECH, R.H. et Y.T. KIM, 1990. *Methods to investigate fertilization as a means to improve growth and sugar yield of sugar maple*. Comm. Soil Sci. Plant Anal. 21 : 2029-2051.
- LONG, P.L., S.B. HORSLEY et P.R. LILJA, 1997. *Impact of forest liming on growth and crown vigor of sugar maple and associated hardwoods*. Can. J. For. Res. 27 : 1560-1573.
- LONG, R.P., S.B. HORSLEY, R.A. HALLET et S.W. BAILEY, 2009. *Sugar maple growth in relation to nutrition and stress in the northeastern United States*. Ecol. Applic. 19 : 1454-1466.
- LONG, R.P., S.B. HORSLEY et T.J. HALL, 2011. *Long-term impact of liming on growth and vigor of northern hardwoods*. Can. J. For. Res. 41 : 1295-1307.
- LOZANO, F.C. et K.D. HUYNH, 1989. *Foliar diagnosis of sugar maple decline by DRIS*. Commun. Soil Sci. Plant Anal. 20 : 1895-1914.
- MADER, D.L. et B.W. THOMPSON, 1969. *Foliar and soil nutrients in relation to sugar maple decline*. Soil Sci. Soc. Am. J. 33 : 794-800.
- MAPAQ, 2011. *Monographie de l'industrie acéricole du Québec, 2^e édition*. Gouvernement du Québec, ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation, Direction générale des politiques agroalimentaires et Direction du développement et des initiatives économiques. 43 p. [www.mapaq.gouv.qc.ca/fr/Publications/Monographie_acericole.pdf].

- MILLER, D.E. et S. WATMOUGH, 2009. *Soil acidification and foliar nutrient status of Ontario's deciduous forest in 1986 and 2005*. Environ. Pollut. 157 : 664-672.
- MOORE, J.-D. et R. OUIMET, 2006. *Ten-year effect of dolomitic lime on the nutrition, crown vigor and growth of sugar maple*. Can. J. For. Res. 36 : 1834-1841.
- MOORE, J.-D., et R. OUIMET, 2010. *Effects of two Ca fertilizer types on sugar maple vitality*. Can. J. For. Res. 40 : 1985-1992.
- MOORE, J.-D., C. CAMIRÉ et R. OUIMET, 2000. *Effects of liming on the nutrition, vigor, and growth of sugar maple at the Lake Clair Watershed, Québec, Canada*. Can. J. For. Res. 30 : 725-732.
- MOORE, J.-D., L. DUCHESNE et R. OUIMET, 2008. *Soil properties and maple-beech regeneration a decade after liming in a northern hardwood stand*. For. Ecol. Manage. 255 : 3460-3468.
- MOORE, J.-D., R. OUIMET et L. DUCHESNE, 2012. *Soil and sugar maple response 15 years after dolomitic lime application*. For. Ecol. Manage. 281 : 130-139.
- OUIMET, R. et C. CAMIRÉ, 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. et L. DUCHESNE, 2009. *Dépôts atmosphériques dans les forêts au Québec : retombées actuelles en forêt et tendances au cours des 20 à 30 dernières années*. Nat. Can. 133 : 56-64.
- OUIMET, R. et J.-M. FORTIN, 1992. *Growth and foliar nutrient status of sugar maple: incidence of forest decline and reaction to fertilization*. Can. J. For. Res. 22 : 699-706.
- OUIMET, R., C. CAMIRÉ et V. FURLAN, 1995. *Endomycorrhizal status of sugar maple in relation to tree decline and foliar, fine-roots and soil chemistry in the Beauce region, Quebec*. Can. J. Bot. 73 : 1168-1175.
- OUIMET, R., L. DUCHESNE et C. CAMIRÉ, 2003. *DELFE3 : diagnostic des éléments limitatifs selon le feuillage de l'érable à sucre et le sol. Version 1.0*. Gouvernement du Québec, ministère des Ressources naturelles, Direction de la recherche forestière. [www.mrn.gouv.qc.ca/publications/forets/connaissances/recherche/Ouimet-Rock/DELFE3.zip].
- OUIMET, R., J.D. MOORE et L. DUCHESNE, 2008. *Effects of experimental acidification and alkalization on soil and growth and health of Acer saccharum Marsh.* J. Plant Nutr. Soil Sci. 171 : 858-871.
- OUIMET, R., L. DUCHESNE et C. CAMIRÉ, 2010. *DELFE3 : diagnostic des éléments limitatifs de l'érable à sucre selon le sol : Version 1.2*. Gouvernement du Québec, ministère des Ressources naturelles et de la Faune, Direction de la recherche forestière. [www.mrn.gouv.qc.ca/publications/forets/connaissances/recherche/Ouimet-Rock/DELFE1-2.zip].
- OUIMET, R. J.-D. MOORE et L. DUCHESNE, 2013. *Soil thresholds update for diagnosing foliar calcium, potassium, or phosphorus deficiency of sugar maple*. Comm. Soil Sci. Plant Anal. (sous presse).
- PARÉ, D. et B. BERNIER, 1989a. *Origin of the phosphorus deficiency observed in declining sugar maple stands in the Quebec Appalachians*. Can. J. For. Res. 19 : 24-34.
- PARÉ, D. et B. BERNIER, 1989b. *Phosphorus-fixing potential of Ah and H horizons subjected to acidification*. Can. J. For. Res. 19 : 132-134.
- PARÉ, D., W.L. MEYER et C. CAMIRÉ, 1993. *Nutrient availability and foliar nutrient status of sugar maple saplings following fertilization*. Soil Sci. Soc. Am. J. 57 : 1107-1114.
- PAYETTE, S., M.-J. FORTIN et C. MORNEAU, 1996. *The recent sugar maple decline in southern Quebec: probable causes deduced from tree rings*. Can. J. For. Res. 26 : 1069-1078.
- PÉRIÉ, C. et R. OUIMET, 2003. *Le réseau d'étude et de surveillance des écosystèmes forestiers québécois*. Gouvernement du Québec, Direction de la recherche forestière, ministère des Ressources naturelles, de la Faune et des Parcs. Note de recherche forestière n° 122. 8 p. [www.mrn.gouv.qc.ca/publications/forets/connaissances/recherche/Perie-Catherine/Note122.pdf].

- PÉRIÉ, C., R. OUIMET et L. DUCHESNE, 2006. *Évolution contemporaine des principales caractéristiques dendrométriques des stations du RÉSEF*. Gouvernement du Québec, ministère des Ressources naturelles et de la Faune, Direction de la recherche forestière. Mémoire de recherche forestière n° 149. 146 p. [www.mrn.gouv.qc.ca/publications/forets/connaissances/recherche/Perie-Catherine/Memoire149.pdf].
- ROBIN, X., N. TURCK, A. HAINARD, N. TIBERTI, F. LISACEK, J.C. SANCHEZ et M. MULLER, 2011. *pROC: an open-source package for R and S+ to analyze and compare ROC curves*. BMC Bioinformatics 12 : 1471-2105.
- ROY, G., A. SAUVESTY, F. PAGE, H.R. VAN HULST et C. ANSSEAU, 2002. *A comparison of soil fertility and leaf nutrient status of sugar maples (Acer saccharum) in relation to microrelief in two maple forests in Quebec*. Can. J. Soil Sci. 82 : 23-31.
- SANTIKA, T., 2011. *Assessing the effect of prevalence on the predictive performance of species distribution models using simulated data*. Glob. Ecol. Biogeogr. 20 : 181-192.
- STUANES, A.O., G. OGNER et M. OPEM, 1984. *Ammonium nitrate as extractant for soil exchangeable cations, exchangeable acidity and aluminium*. Comm. Soil Sci. Plant Anal. 15 : 773-778.
- VIZCAYNO-SOTO, G. et B. CÔTÉ, 2004. *Boundary-line approach to determine standards of nutrition for mature trees from spatial variation of growth and foliar nutrient concentrations in natural environments*. Comm. Soil Sci. Plant Anal. 35 : 2965-2985.
- WILMOT, T.R., D.S. ELLSWORTH et M.T. TYREE, 1995. *Relationships among crown condition, growth, and stand nutrition in seven northern Vermont sugarbushes*. Can. J. For. Res. 25 : 386-397.
- WILMOT, T.R., D.S. ELLSWORTH et M.T. TYREE, 1996. *Base cation fertilization and liming effects on nutrition and growth of Vermont sugar maple stands*. For. Ecol. Manage. 84 : 123-134.



La Direction de la recherche forestière a pour mandat de participer activement à l'orientation de la recherche et à l'amélioration de la pratique forestière au Québec, dans un contexte d'aménagement forestier durable, en réalisant des travaux de recherche scientifique appliquée. Elle développe de nouvelles connaissances, du savoir-faire et du matériel biologique et contribue à leur diffusion ou leur intégration au domaine de la pratique. Elle subventionne aussi des recherches en milieu universitaire, le plus souvent dans des créneaux complémentaires à ses propres travaux.

**Ressources
naturelles**

Québec 

ISSN 0834-4833
ISBN 978-2-550-66815-2
ISBN (pdf) 978-2-550-66816-9
F.D.C. 114.5
L.C. SD297.S775
Dépôt légal 2013
Bibliothèque nationale du Québec
© 2013 Gouvernement du Québec