

# Évolution du statut nutritif des sapinières à la Forêt Montmorency entre 1967 et 2011

Rock Ouimet, Jean-David Moore et Louis Duchesne

## Résumé

Cette étude avait pour objectif d'évaluer l'évolution du statut nutritif des sapinières de la Forêt Montmorency en se basant sur des analyses foliaires faites en 1967, 1988 et en 2011. La composition minérale des aiguilles du sapin baumier (*Abies balsamea*) a grandement fluctué au cours de ces 45 ans. Entre 1967 et 2011, nous avons observé une baisse de 5,7 % des teneurs en azote dans le feuillage, de 13,5 % des teneurs en potassium (aiguilles âgées de 1 an) et de 18 % des teneurs en magnésium (aiguilles âgées de 2 et de 3 ans). En 1988, les teneurs étaient en général beaucoup plus faibles que celles observées lors des 2 autres campagnes d'échantillonnage. Cette baisse peut s'expliquer en partie par le choix des peuplements visités, la hausse des précipitations acides depuis le début des années 1970, les épidémies d'insectes ravageurs et les extrêmes climatiques. Les teneurs en potassium du feuillage âgé de 1 an demeurent plus faibles que celles rapportées ailleurs dans la littérature pour le sapin baumier. La baisse des teneurs en potassium et en magnésium de 1967 à 2011 laisse croire à une perte de fertilité des sols dans cette région au cours des 45 dernières années.

**MOTS CLÉS :** *Abies balsamea*, concentrations foliaires, monitoring, potassium, Québec

## Abstract

The objective of this study was to use foliage analyses conducted in 1967, 1988 and 2011, to assess the evolution of the nutritional status of balsam fir (*Abies balsamea*) stands at the Montmorency Forest (Québec). The elemental composition of balsam fir needles varied greatly over the 45-year study period. Between the 1967 analysis and that of 2011, the foliar nitrogen concentration decreased by 5.7%; the potassium concentration in 1-year-old needles, by 13.5%, and the magnesium concentration in 2- and 3-year-old needles, by 18%. The mineral concentrations in the tissues analysed in 1988 were much lower than those of the other 2 samplings. This decrease can be explained partly by the choice of the stands sampled, the increase of atmospheric acid precipitation since the 1970s, the effects of past insect outbreaks, and climatic extremes. Potassium concentrations in 1-year-old needles were lower than values reported elsewhere for balsam fir. The decreases in foliar potassium and magnesium concentrations from 1967 to 2011 suggest a loss of soil fertility in this region over the last 45 years.

**KEYWORDS:** *Abies balsamea*, foliar concentrations, monitoring, potassium, Québec

## Introduction

Depuis le milieu des années 1980, des symptômes visuels de carence foliaire ont été rapportés sporadiquement dans les forêts formées de sapin baumier (*Abies balsamea*) et d'épinette blanche (*Picea glauca*) dans la réserve faunique des Laurentides (RFL) au Québec. Cette région a été particulièrement touchée par les épidémies de la tordeuse des bourgeons de l'épinette (*Choristoneura fumiferana*) et d'arpenteuse de la pruche (*Lambdina fuscicollis fuscicollis*), les extrêmes climatiques, la coupe forestière (à 2 reprises) et les précipitations acides (Ouimet et collab., 2013). Cet ensemble de perturbations, parfois chroniques, soulève des inquiétudes concernant la résilience de la fertilité des sols de ces forêts et le maintien de leur productivité. Par exemple, l'évaluation du bilan en éléments nutritifs à l'échelle du bassin versant du lac Laflamme, situé à la Forêt Montmorency dans la RFL, montre que les pertes annuelles en potassium (K) des sols ont été substantielles de 1980 à 2005, particulièrement durant et après l'épidémie de la tordeuse des bourgeons de l'épinette (Duchesne et Houle, 2008; Houle et collab., 2009). Les exportations par la récolte forestière ont pu aussi causer des pertes importantes en éléments nutritifs. Dans ce bassin versant, les réserves en

K disponibles dans le sol des sapinières âgées de 55 ans sont d'environ 60 kg·ha<sup>-1</sup>, une valeur à peu près égale à la quantité de K stockée dans la biomasse des arbres (Tremblay et collab., 2012). De plus, la coupe forestière cause l'augmentation du lessivage en K du sol pendant quelques années (Tremblay et collab., 2009), notamment en raison de l'augmentation de la température du sol et du taux de minéralisation de la matière organique.

L'objectif de cette étude était d'évaluer l'évolution du statut nutritif des sapinières de la Forêt Montmorency en se basant sur des analyses foliaires faites en 1967, 1988 et en 2011. L'analyse foliaire permet d'évaluer les conditions actuelles du statut nutritif des peuplements forestiers car la majorité des éléments nutritifs sont concentrés dans cette partie des arbres (van den Driessche, 1974; figure 1).

Rock Ouimet (ingénieur forestier pédologue, Ph. D.), Jean-David Moore, (ingénieur forestier, M. Sc.), et Louis Duchesne (ingénieur forestier, M. Sc.), sont des chercheurs de l'équipe Écosystèmes et Environnement à la Direction de la recherche forestière du ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs du Québec.

rock.ouimet@mffp.gouv.qc.ca



Figure 1. L'analyse foliaire permet d'évaluer les conditions actuelles du statut nutritif des peuplements forestiers.

## Matériel et méthodes

### Milieu d'échantillonnage

Les données de la présente étude proviennent de la Forêt Montmorency, la forêt expérimentale de l'Université Laval, située dans la RFL, à environ 80 km au nord de la ville de Québec, au Canada (47° 17' N., 71° 9' O.). Cette péninsule est montagneuse (600-1 100 m d'altitude); la pente du terrain varie de 0 à 30 %, avec une moyenne d'environ 10 %. La température moyenne annuelle à cet endroit est de -0,6°C, et les précipitations annuelles sont de 1 300 mm, dont 33 % tombent sous forme de neige (moyennes 1971-2000 de la station météo n° 7042388 d'Environnement Canada). La végétation est dominée par le sapin baumier (80 %) en association avec le bouleau à papier (*Betula papyrifera*), l'épinette blanche et l'épinette noire (*Picea mariana*). Les sols pierreux, relativement profonds et généralement de texture sableuse, sont classifiés principalement dans le grand groupe des podzols ferro-humiques ou humo-ferriques (Groupe de travail sur la classification des sols, 1998). L'humus de ces sols est un mor de 5 à 15 cm d'épaisseur. Le matériel parental est un till acide dérivé de la roche mère locale, ici des roches ignées et métamorphiques datant du Précambrien (granite, gneiss granitique, mangerite), avec comme minéraux dominants le quartz, le feldspath et les plagioclases (Ouimet et Duchesne, 2005).

### Périodes d'échantillonnage foliaire

Le premier échantillonnage a été réalisé du 13 au 21 septembre 1967, dans le cadre de travaux de maîtrise à l'Université Laval (Allaire, 1969; Brazeau, 1969) et les principaux résultats ont été publiés en 1973 (Allaire et collab., 1973; Brazeau et Bernier, 1973). On peut trouver dans ces références la composition minérale des aiguilles en azote (N), phosphore (P), K, calcium (Ca), magnésium (Mg), manganèse (Mn), zinc (Zn), fer (Fe) et aluminium (Al), âgées de 1, 2 et 3 ans de sapins baumiers provenant de 20 sapinières matures.

Un second échantillonnage a été réalisé en septembre 1988 dans 11 sapinières réparties dans divers secteurs à la Forêt Montmorency par le professeur Bernard Bernier de l'Université Laval. La composition minérale moyenne des aiguilles en N, P, K, Ca, Mg, Mn, Zn et Fe a été publiée dans un rapport (Bernier et Brazeau, 1991). Ces peuplements étaient différents de ceux échantillonnés en 1967, car ces derniers avaient été coupés. Dans leur rapport, Bernier et Brazeau (1991) mentionnent que plusieurs des peuplements échantillonnés en 1988 étaient tout de même encore jeunes et avaient subi une éclaircie précommerciale quelques années auparavant.

Nous avons réalisé un troisième échantillonnage du 12 octobre au 8 décembre 2011 dans 9 sapinières matures de la Forêt Montmorency. Comme les campagnes précédentes, le feuillage a été prélevé dans le tiers supérieur de 10 arbres dans chaque peuplement. Dans tous les cas, les aiguilles des 3 premières années de croissance ont été récoltées séparément; cependant, en 2011, des aiguilles des deuxième et troisième années ont été prélevées dans seulement 5 des 9 peuplements échantillonnés.

### Analyses de laboratoire

À chaque période d'échantillonnage, les aiguilles ont été séchées à 65°C, broyées, puis dissoutes dans des acides concentrés pour déterminer leur composition minérale, selon diverses méthodes de mesure qui ont évolué au fil du temps. Cependant, bien que ces méthodes se soient raffinées avec les années, il est de notre avis qu'elles demeurent comparables étant donné qu'elles visaient toujours à déterminer les concentrations totales. Il est à noter que les teneurs en Al des aiguilles dans l'échantillonnage de 1988 n'ont pas été publiées.

### Analyses statistiques

Nous avons considéré que chaque année d'échantillonnage correspondait à un échantillon de sapinières parmi la population de toutes les sapinières de la Forêt Montmorency. L'analyse de variance a permis de tester l'effet du temps sur la composition minérale du feuillage des peuplements, en présumant que ces derniers étaient répartis de façon complètement aléatoire. Dans cette analyse, nous avons employé un modèle de régression linéaire généralisé, avec comme variables dépendantes les concentrations foliaires de chaque élément, et comme variables indépendantes, l'année d'échantillonnage, l'âge des aiguilles et leur interaction. Nous avons considéré que les 3 âges des aiguilles n'étaient pas indépendants les uns des autres; pour en tenir compte, nous avons intégré dans l'analyse une structure d'autocorrélation temporelle (symétrie composée). En présence de résidus hétérogènes lors de l'analyse de régression, nous les avons rendus homogènes en permettant aux variances de varier selon les variables indépendantes. Cette analyse de régression a été réalisée à l'aide de la fonction *gls* du module *nlme* de R (Pinheiro et collab., 2013). Les moyennes obtenues des modèles, dites « moyennes ajustées », pour les différents âges des aiguilles et années d'échantillonnage ont été comparées à

l'aide du module lsmeans de R (Lenth, 2013) et de l'ajustement de Tukey-Kramer.

Nous avons aussi procédé à une analyse discriminante linéaire de la composition foliaire des peuplements dans le temps, en prenant chaque âge des aiguilles séparément. Cette analyse de type multivariée permet d'évaluer le degré de ressemblance entre des groupes établis, en l'occurrence les années d'échantillonnage, en formant des nouvelles variables (les composantes) à partir de combinaisons linéaires orthogonales de la composition minérale du feuillage. Pour cette analyse, les données de composition minérale foliaire ont été transformées préalablement (transformation en valeurs de log-ratio isométriques ou LRI) (van den Boogaart et Tolosana Delgado, 2013), afin d'éviter les biais mathématiques, la non-normalité de la distribution et la redondance des variables exprimées en concentrations (Parent et collab., 2012). Cette analyse a été effectuée à l'aide de la fonction lda du module MASS de R (Venables et Ripley, 2002).

## Résultats

### **Évolution des concentrations foliaires des différents éléments**

#### **Azote**

Les teneurs en N du feuillage des sapins ont diminué en moyenne de 5,7% (changement moyen  $\pm$  erreur type:  $-0,76 \pm 0,23$  g·kg<sup>-1</sup>) au cours des 45 ans de suivi ( $p = 0,004$ ; figure 2). Cependant, cette évolution a grandement varié selon l'âge des aiguilles. La teneur en N des aiguilles de 1 an a légèrement augmenté de 1967 à 1988, pour ensuite diminuer en 2011. Celle des aiguilles de 2 ans n'a pas changé significativement dans le temps ( $p \geq 0,654$ ), tandis que celle des aiguilles de 3 ans a d'abord baissé de 1967 à 1988 ( $p < 0,001$ ), puis remonté en 2011 à une teneur qui ne différait pas significativement de celle de 1967 ( $p = 0,910$ ). En 2011, les teneurs moyennes en N des aiguilles de 1, 2 et 3 ans étaient respectivement de  $13,0 \pm 0,3$ ,  $12,6 \pm 0,4$  et  $12,7 \pm 0,4$  g·kg<sup>-1</sup>.

#### **Phosphore**

Les teneurs en P du feuillage du sapin baumier ont varié principalement selon l'âge des aiguilles, et ont diminué avec celui-ci ( $p < 0,001$ ; figure 2). Les teneurs moyennes globales en P des aiguilles âgées de 1, 2 et 3 ans sont respectivement de  $2,05 \pm 0,02$ ,  $1,56 \pm 0,02$  et  $1,39 \pm 0,02$  g·kg<sup>-1</sup>. Les teneurs en P selon l'âge des aiguilles n'ont pas changé avec l'année d'échantillonnage ( $p_{\text{âge} \times \text{année}} = 0,254$ ). L'analyse a tout de même permis de déceler une baisse des teneurs en P de 1967 à 1988 chez les aiguilles de 2 et de 3 ans ( $p = 0,007$ ). Par contre, cette baisse a disparu en 2011, et les teneurs en P à cette date sont remontées à des teneurs similaires à celles mesurées en 1967 ( $p = 0,501$ ).

#### **Potassium**

Les teneurs en K du feuillage du sapin baumier échantillonné à la Forêt Montmorency ont fluctué grandement au cours des 45 ans de suivi (figure 2). Elles ont d'abord connu une baisse majeure de 1967 à 1988, passant en moyenne de

$4,51 \pm 0,04$  à  $1,91 \pm 0,06$  g·kg<sup>-1</sup> ( $p = 0,004$ ). Par contre, elles sont remontées, en 2011, à des valeurs similaires à celles de 1967 ( $p \geq 0,772$ ), sauf pour les aiguilles de 1 an, où elles ont aussi augmenté, mais sont restées 13,5% plus basses que les teneurs mesurées en 1967 ( $4,40 \pm 0,11$  g·kg<sup>-1</sup> en 2011 vs  $5,09 \pm 0,08$  g·kg<sup>-1</sup> en 1967;  $p < 0,001$ ).

#### **Calcium**

En général, le Ca s'accumule dans le feuillage avec l'âge des aiguilles ( $p < 0,001$ ; figure 2). Dans ce cas-ci, les aiguilles de sapin baumier de 2 et de 3 ans possédaient respectivement en moyenne  $1,4 \pm 0,2$  et  $2,6 \pm 0,2$  g Ca·kg<sup>-1</sup> de plus que les aiguilles âgées de 1 an. On a noté une baisse notable des teneurs en Ca du feuillage de 1967 à 1988 ( $p < 0,001$ ). Par contre, dans les aiguilles de tous âges en 2011, les teneurs en Ca étaient revenues aux valeurs observées en 1967 ( $p \geq 0,099$ ).

#### **Magnésium**

La teneur en Mg du feuillage a aussi baissé de 1967 à 1988 ( $p < 0,001$ ), puis remonté de 1988 à 2011 ( $p \leq 0,004$ ; figure 2). Cependant, en 2011, bien que la teneur en Mg dans les aiguilles de 1 an soit remontée aux valeurs mesurées en 1967 ( $1,49 \pm 0,05$  g·kg<sup>-1</sup>,  $p = 0,984$ ), celle des aiguilles de 2 et de 3 ans est demeurée environ 18% plus faible que la valeur moyenne de 1967 ( $p \leq 0,008$ ).

#### **Manganèse et zinc**

Les teneurs en Mn et Zn du feuillage ont suivi les mêmes tendances que celles du K, du Ca et du Mg (figure 2). Elles ont diminué de 1967 à 1988 ( $p < 0,001$ ), puis remonté en 2011 à des valeurs similaires à celles de 1967, et ce, quel que soit l'âge des aiguilles ( $p \geq 0,096$ ).

#### **Fer et aluminium**

La teneur en Fe du feuillage a augmenté de 1967 à 1988 ( $p < 0,001$ ), puis est redescendue en 2011 aux valeurs mesurées en 1967 ( $0,055 \pm 0,004$  g·kg<sup>-1</sup>,  $p \geq 0,731$ ; figure 2). La teneur en Al du feuillage est demeurée la même en 1967 et en 2011 ( $p = 0,553$ ). La teneur en Al a augmenté cependant avec l'âge des aiguilles, passant de  $0,193 \pm 0,007$  g·kg<sup>-1</sup> dans les aiguilles de 1 an, à  $0,231 \pm 0,019$  g·kg<sup>-1</sup> dans les aiguilles de 2 ans et à  $0,257 \pm 0,021$  g·kg<sup>-1</sup> dans les aiguilles de 3 ans ( $p < 0,001$ ).

### **Différences de composition foliaire entre les années**

L'analyse discriminante démontre bien que la composition foliaire en 1988 était très différente de celle de 1967 et de 2011, peu importe l'âge des aiguilles (figure 3). À l'exception du Fe et de l'Al, tous les éléments analysés contribuèrent à la première composante. Les teneurs en éléments majeurs contribuèrent principalement à la deuxième composante. Le recouplement des étendues de composition foliaire en 1967 et en 2011 indique que celle-ci n'était pas très différente entre ces 2 années.

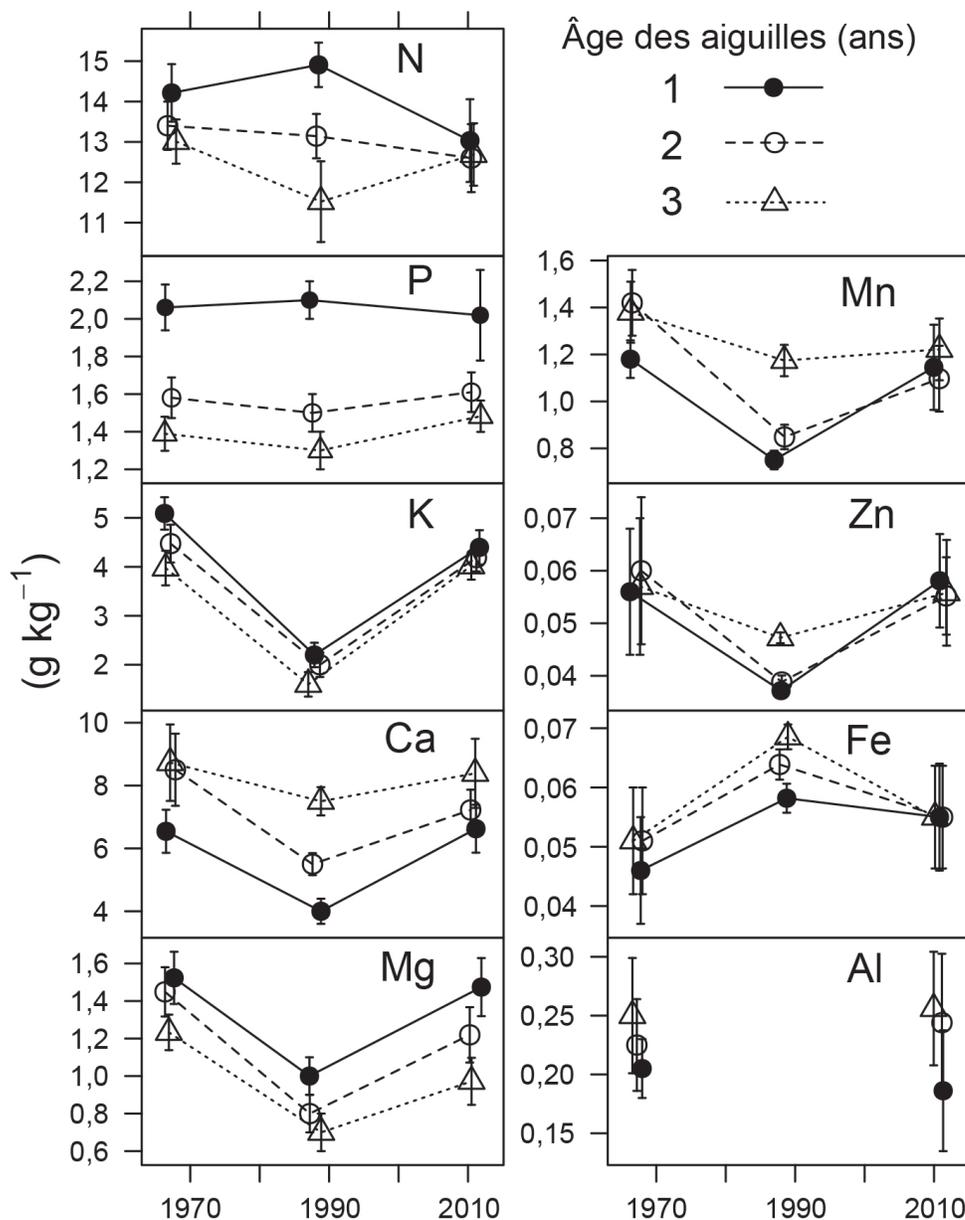


Figure 2. Évolution des concentrations foliaires en N, P, K, Ca, Mg, Mn, Zn, Fe et Al dans les sapinières de la Forêt Montmorency entre 1967 et 2011, en fonction de l'âge des aiguilles (1, 2 et 3 ans). Les points (moyennes brutes ± 1 écart-type) sont légèrement décalés le long de l'axe des années pour réduire leur superposition.

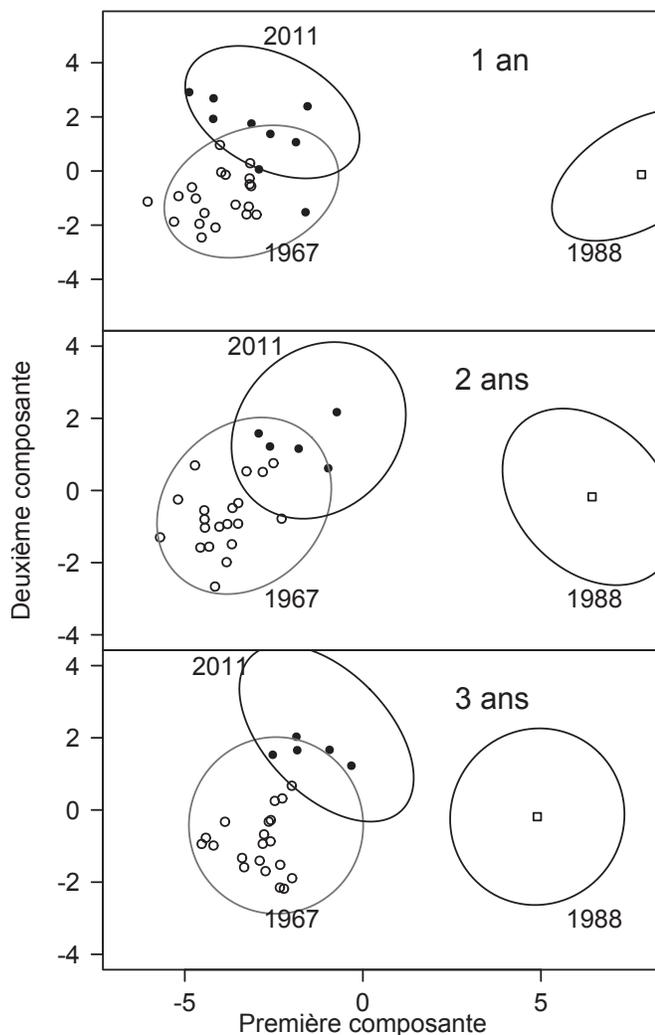
### Discussion

Le suivi sur 45 ans de la composition minérale du feuillage du sapin baumier à la Forêt Montmorency indique que les valeurs de 2011 sont comparables à celles mesurées en 1967, à l'exception des teneurs en N, K et Mg, dont la baisse est statistiquement significative entre 1967 et 2011 pour certains âges d'aiguilles (figure 2).

#### Les échantillons de 1988

Plusieurs hypothèses peuvent expliquer la baisse importante en K, Ca, Mg, Mn et Zn observée en 1988 dans le feuillage du sapin baumier, comparativement aux valeurs

mesurées en 1967 et en 2011. D'abord, le choix des peuplements échantillonnés (plus jeunes en 1988 qu'en 1967 et en 2011) a pu influencer la composition minérale du feuillage. Il semble que la concentration foliaire en certains éléments des jeunes sapins soit plus faible que celle des sapins plus matures (Ouimet et Moore, 2015), probablement en raison de leur taux de croissance plus élevé, particulièrement à la suite de l'éclaircie précommerciale. Cette fluctuation pourrait aussi s'expliquer par le changement dans les dépôts atmosphériques acides durant cette période. Les retombées acides ont augmenté considérablement dans la RFL à partir des années 1970 et jusqu'à la fin des années 1980, atteignant plus de 30 kg SO<sub>4</sub>·ha<sup>-1</sup>, pour ensuite diminuer à



**Figure 3.** Graphique de la composition foliaire des aiguilles, âgées de 1, 2 et 3 ans, selon les 2 premières composantes résultant de l'analyse discriminante et selon les années d'échantillonnage dans les sapinières. Les ellipses représentent l'espace qui inclut 95% de la distribution théorique de la composition minérale du feuillage chaque année d'échantillonnage. L'ellipse de la composition foliaire en 2008 a été obtenue par simulation en connaissant la moyenne et l'écart-type des concentrations foliaires.

environ  $10 \text{ kg SO}_4 \cdot \text{ha}^{-1}$  au cours des années 2010, probablement en partie à la suite de l'Accord Canada – États-Unis sur la qualité de l'air signé en 1991 (Environnement Canada, 2005). Bien que les dépôts atmosphériques azotés interceptés par le feuillage puissent contribuer à la nutrition des forêts (Houle et collab., 1999), les dépôts acides engendrent le lessivage des minéraux du sol (Duchesne et Houle 2006, 2008) et du feuillage des arbres (Houle et collab., 1999).

La baisse de la composition minérale du feuillage en 1988 pourrait aussi s'expliquer, en partie, par un effet « post-tordeuse ». En effet, la dernière épidémie de la tordeuse des bourgeons de l'épinette, qui a sévi de 1977 à 1979 et de 1981

à 1984 à la Forêt Montmorency, a bouleversé le cycle des éléments nutritifs dans ces écosystèmes (Houle et collab., 2009). Grâce à la mesure de l'indice de végétation par différence normalisée (*NDVI* en anglais), on a rapporté un accroissement de la biomasse foliaire des forêts dans la RFL de 1982 à 1991 (Pouliot et collab., 2009). La plupart des jeunes peuplements à la Forêt Montmorency ont également subi une éclaircie précommerciale durant cette période. Cela a pu créer un effet de dilution des éléments contenus dans le feuillage des arbres. Cette augmentation de la biomasse foliaire a ensuite cessé de 1996 à 2003 (Neigh et collab., 2008).

Le climat pourrait aussi expliquer les changements observés en 1988 dans la composition minérale foliaire du sapin baumier. Par ses écarts, il peut jouer un rôle notable dans la croissance et la nutrition des arbres (Duquesnay et collab., 2000). Pendant la saison de végétation de 1986, on a relevé 3 extrêmes climatiques à la Forêt Montmorency (Ouimet et collab., 2013) : la température maximale journalière la plus basse ( $25,5^\circ\text{C}$ ), le plus petit nombre de jours chauds ( $> 25^\circ\text{C}$ ) ( $n = 2$ ) et le plus haut taux moyen de précipitations ( $10,7 \text{ mm} \cdot \text{jour}^{-1}$ ). De pareils extrêmes climatiques n'avaient pas été enregistrés au cours des 44 premières années d'opération de la station météo (de 1965 à 2008).

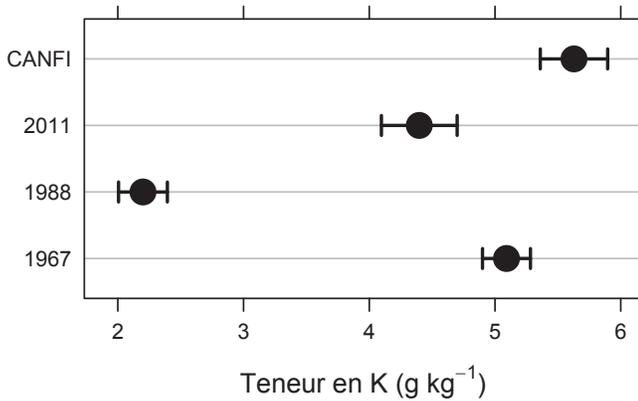
L'augmentation en 1988 des teneurs en N dans les aiguilles âgées de 1 an et la baisse simultanée des teneurs en N dans celles de 3 ans peuvent s'expliquer par la relocalisation du N des aiguilles plus âgées vers les plus jeunes. Le N et le P sont les principaux éléments touchés par ce processus physiologique (Nambiar et Fife, 1991). Ce processus pourrait être plus important chez les jeunes arbres qui présentent une demande importante en N pour soutenir une croissance supérieure.

#### La situation en 2011

Le fait que la composition minérale du feuillage mesurée en 2011 soit comparable à celle mesurée en 1967 n'exclut pas nécessairement que ces sapinières souffrent de carences minérales. Une expérience récente a démontré que les jeunes sapinières à la Forêt Montmorency ont réagi fortement à la fertilisation en K (Ouimet et Moore, 2015), ce qui donne à penser que ces peuplements n'arrivent pas à combler leurs besoins en cet élément. L'échantillonnage de 1988 concorde avec cette hypothèse. Les teneurs en K mesurées à ce moment dans le feuillage étaient loin en dehors des limites de variabilité rencontrées en général chez le sapin baumier (figure 4). Il demeure que toutes les teneurs en K du feuillage de 1 an des arbres échantillonnés dans ce secteur étaient plus faibles que la moyenne des valeurs rapportées dans la littérature ( $p < 0,001$ ).

Les plus faibles teneurs en K dans le feuillage des sapins de la Forêt Montmorency peuvent avoir plusieurs causes :

- La faible disponibilité du K dans le sol (Duchesne et Houle, 2006);
- Les épidémies de la tordeuse des bourgeons de l'épinette, qui entraînent des pertes de K du sol par lessivage (Houle et collab., 2009);



**Figure 4.** Teneurs moyennes en K du feuillage de 1 an des sapins de la Forêt Montmorency échantillonnées de 1967 à 2011, et moyenne que l'on trouve dans la littérature (valeurs présentes dans la base de données CANFI (Paré et collab., 2012). Les barres d'erreur représentent l'intervalle de confiance de 99 %.

- La récolte forestière (la plupart des peuplements à la Forêt Montmorency ont été récoltés 2 fois au cours du 20<sup>e</sup> siècle), ce qui entraîne des pertes de K par 1) l'exportation des troncs d'arbres hors de l'écosystème (le bois de sapin est très riche en K) (Ouimet et Moore, 2015) et 2) le lessivage hors du sol (Tremblay et collab., 2009);
- Les précipitations acides, qui contribuent au lessivage des éléments minéraux du sol (Ouimet et collab., 2006).

De plus, 2 études récentes réalisées dans cette région indiquent que les carences en K peuvent provoquer une baisse de croissance du sapin (Ouimet et Moore, 2015) et de l'épinette blanche (Ouimet et collab., 2013).

En publiant ces données sur la composition minérale du feuillage du sapin baumier à la Forêt Montmorency (tableau 1), nous souhaitons que son suivi se poursuive dans les décennies à venir. Les tissus récoltés en 2011 ont été archivés et sont disponibles auprès des auteurs pour des analyses futures.

**Remerciements**

Nous tenons à remercier Julie Bouliane, ingénieure forestière responsable de l'aménagement forestier à la Forêt Montmorency, pour son aide dans le choix des peuplements à échantillonner en 2011, Benoît Toussaint et Jacques Martineau, techniciens spécialistes, pour leur aide au conditionnement des échantillons, le personnel du Laboratoire de chimie organique et inorganique de la Direction de la recherche forestière, pour les nombreuses analyses chimiques des tissus foliaires et leur contrôle de qualité, et Denise Tousignant, pour son aide précieuse à la révision linguistique de cet article. ◀

**Références**

ALLAIRE, D., 1969. Contenu en oligoéléments dans le feuillage du sapin baumier (*Abies balsamea* (L.) mill.). Mémoire de maîtrise, Université Laval, Québec, 79 p.

ALLAIRE, D., B. BERNIER et Y. LAFLAMME, 1973. Microelement status of balsam fir in the southern Laurentians. *Canadian Journal of Forest Research*, 3: 379-386.

BERNIER, B. et M. BRAZEAU, 1991. Recherches sur le dépérissement et le statut nutritif de l'érablière au Québec. Chapitre 4.2. Statut nutritif du sapin baumier. Rapport final (non publié). Département des sciences forestières, Université Laval, Québec, p. 192-196.

BRAZEAU, M., 1969. Relations entre le contenu en éléments majeurs du feuillage et la croissance du sapin baumier dans la Forêt Montmorency. Mémoire de maîtrise, Université Laval, Québec, 96 p.

BRAZEAU, M. et B. BERNIER, 1973. Composition minérale du feuillage du sapin baumier selon les modalités d'échantillonnage et relations avec quelques indices de croissance. *Le Naturaliste canadien*, 100: 265-275.

DUCHESNE, L. et D. HOULE, 2006. Base cation cycling in a pristine watershed of the Canadian boreal forest. *Biogeochemistry*, 78: 195-216.

DUCHESNE, L. et D. HOULE, 2008. Impact of nutrient removal through harvesting on the sustainability of the boreal forest. *Ecological Applications*, 18: 1642-1651.

DUQUESNAY, A., J.L. DUPOUEY, A. CLEMENT, E. ULRICH et F. LE TACON, 2000. Spatial and temporal variability of foliar mineral concentration in beech (*Fagus sylvatica*) stands in northeastern France. *Tree Physiology*, 20: 13-22.

ENVIRONNEMENT CANADA, 2005. Évaluation scientifique 2004 des dépôts acides au Canada. Environnement Canada, Ottawa, 440 p.

GROUPE DE TRAVAIL SUR LA CLASSIFICATION DES SOLS, 1998. Le système canadien de classification des sols. Agriculture et Agroalimentaire Canada, Publication 1646, Ottawa, 187 p.

**Tableau 1.** Composition foliaire moyenne (g · kg<sup>-1</sup>) du feuillage du sapin baumier à la Forêt Montmorency selon les années (écart-type entre parenthèses). Nombre d'échantillons : 1967, n = 20; 1988, n = 11; 2011, n = 9; \*n = 7; †n = 18; ‡n = 5; §n = 2.

Élément	Âge des aiguilles (1967)			Âge des aiguilles (1988)			Âge des aiguilles (2011)		
	1 an	2 ans	3 ans	1 an	2 ans	3 ans	1 an	2 ans	3 ans
N	14,21 (0,71)	13,40 (0,60)	13,01 (0,55)	14,91 (0,55)	13,14 (0,55)	11,52 (1,00)	13,03 (1,02)	12,60‡ (0,84)	12,69‡ (0,77)
P	2,06 (0,12)	1,58 (0,11)	1,39 (0,09)	2,10 (0,10)	1,50 (0,10)	1,30 (0,10)	2,02 (0,24)	1,61‡ (0,11)	1,48‡ (0,08)
K	5,09 (0,33)	4,47 (0,39)	3,97 (0,35)	2,20 (0,25)	2,00 (0,25)	1,60 (0,25)	4,40 (0,35)	4,19‡ (0,28)	4,02‡ (0,28)
Ca	6,54 (0,69)	8,50 (1,15)	8,73 (1,22)	4,00 (0,40)	5,50 (0,35)	7,50 (0,45)	6,63 (0,76)	7,22‡ (0,64)	8,39‡ (1,10)
Mg	1,52 (0,14)	1,45 (0,13)	1,23 (0,09)	1,00 (0,10)	0,80 (0,10)	0,70 (0,10)	1,47 (0,15)	1,22‡ (0,15)	0,97‡ (0,13)
Fe	0,046* (0,009)	0,051 (0,009)	0,051 (0,010)	0,058 (0,002)	0,064 (0,003)	0,069 (0,002)	0,055 (0,009)	0,055‡ (0,009)	0,055‡ (0,009)
Mn	1,18† (0,26)	1,42 (0,30)	1,38 (0,28)	0,75 (0,04)	0,85 (0,05)	1,17 (0,07)	1,15 (0,18)	1,10‡ (0,14)	1,22‡ (0,13)
Zn	0,056‡ (0,012)	0,060 (0,014)	0,057 (0,013)	0,037 (0,001)	0,039 (0,001)	0,047 (0,001)	0,058 (0,009)	0,055‡ (0,007)	0,056‡ (0,007)
Al	0,205§ (0,080)	0,225 (0,090)	0,250 (0,105)				0,186 (0,051)	0,244‡ (0,059)	0,256‡ (0,048)

- HOULE, D., L. DUCHESNE et R. BOUTIN, 2009. Effects of a spruce budworm outbreak on element export below the rooting zone: A case study for a balsam fir forest. *Annals of Forest Science*, 66: 707(1-9).
- HOULE, D., R. OUIMET, R. PAQUIN et J.-G. LAFLAMME, 1999. Interactions of atmospheric deposition with a mixed hardwood and a coniferous forest canopy at the Lake Clair Watershed (Duchesnay, Quebec). *Canadian Journal of Forest Research*, 29: 1944-1957.
- LENTH, R.V., 2013. lsmeans: Least-squares means. R package version 1.10-4. Disponible en ligne à : <http://cran.r-project.org/web/packages/lsmeans>. [Visité le 15-03-10].
- NAMBIAR, E.K.S. et D.N. FIFE, 1991. Nutrient retranslocation in temperate conifers. *Tree Physiology*, 9: 185-207.
- NEIGH, C.S.R., C.J. TUCKER et J.R.G. TOWNSHEND, 2008. North American vegetation dynamics observed with multi-resolution satellite data. *Remote Sensing of Environment*, 112: 1749-1772.
- OUIMET, R. et L. DUCHESNE, 2005. Base cation weathering and release rates from soils and watersheds in three calibrated forest catchments on the Canadian Shield, Quebec, Canada. *Canadian Journal of Soil Science*, 85: 245-260.
- OUIMET, R. et J.D. MOORE, 2015. Effects of fertilization and liming on tree growth, vitality and nutrient status in boreal balsam fir stands. *Forest Ecology and Management*, 345: 39-49.
- OUIMET, R., J.D. MOORE, L. DUCHESNE et C. CAMIRÉ, 2013. Etiology of a recent white spruce decline: Role of potassium deficiency, past disturbances, and climate change. *Canadian Journal of Forest Research*, 43: 66-77.
- OUIMET, R., P.A. ARP, S.A. WATMOUGH, J. AHERNE et I. DEMERCHANT, 2006. Determination and mapping critical loads of acidity and exceedances for upland forest soils in Eastern Canada. *Water, Air and Soil Pollution*, 172: 57-66.
- PARÉ, D., B.D. TITUS, B. LAFLEUR, D.G. MAYNARD et E. THIFFAULT, 2012. Canadian Tree Nutrient Database. Disponible en ligne à : <https://apps-scf-cfs.rncan.gc.ca/calc/bundles/biomasse/files/data/Canadian%20Tree%20Species%20Nutrient%20Database.zip>. [Visité le 15-03-10].
- PARENT, S.É., L.E. PARENT, D.E. ROZANNE, A. HERNANDES et W. NATALE, 2012. Nutrient balance as paradigm of plant and soil chemometrics., Dans: Issaka, R.N. (édit.). *Soil Fertility*. Intech, Rijeka, p. 83-114
- PINHEIRO, J., D. BATES, S. DEBROY, D. SARKAR et R DEVELOPMENT CORE TEAM, 2013. nlme: Linear and Nonlinear Mixed Effects Models. Package R version 3.1-113. Disponible en ligne à : <http://cran.r-project.org/web/packages/nlme/index.html>. [Visité le 15-03-10].
- POULIOT, D., R. LATIFOVIC et I. OLTHOF, 2009. Trends in vegetation NDVI from 1 km AVHRR data over Canada for the period 1985-2006. *International Journal of Remote Sensing*, 30: 149-168.
- TREMBLAY, S., R. OUIMET, D. HOULE et L. DUCHESNE, 2012. Base cation distribution and requirement of three common forest ecosystems in eastern Canada based on site-specific and general allometric equations. *Canadian Journal of Forest Research*, 42: 1796-1809.
- TREMBLAY, Y., A.N. ROUSSEAU, A.P. PLAMONDON, D. LÉVESQUE et M. PRÉVOST, 2009. Changes in stream water quality due to logging of the boreal forest in the Montmorency Forest, Québec. *Hydrological Processes*, 23: 764-776.
- VAN DEN BOOGAART, K.G. et R. TOLOSANA DELGADO, 2013. *Analysing compositional data with R*. Springer, New York, 258 p.
- VAN DEN DRIESSCHE, R., 1974. Prediction of mineral nutrient status of trees by foliar analysis. *Botanical Review*, 40: 347-394.
- VENABLES, W.N. et B.D. RIPLEY, 2002. *Modern applied statistics with S*. 4<sup>e</sup> édition. Springer, New York, 495 p.