

le naturaliste canadien

LA SOCIÉTÉ PROVANCHER
D'HISTOIRE NATURELLE
DU CANADA

Revue de diffusion des connaissances en sciences naturelles et en environnement

Tiré à part

Simulation d'une augmentation des apports atmosphériques en azote dans trois écosystèmes forestiers du Québec

Jean-David Moore, Daniel Houle

Volume 133, numéro 2 – Été 2009

Page 55-59

Simulation d'une augmentation des apports atmosphériques en azote dans trois écosystèmes forestiers du Québec

Jean-David Moore, Daniel Houle

Résumé

Depuis quelques années, un nombre grandissant de forêts de feuillus et de résineux du Nord-est américain montrent des signes de saturation en azote (N), à l'image du phénomène similaire rencontré en Europe et qui provoque un dépérissement. Ce phénomène se manifeste lorsque la quantité de N reçue par un écosystème dépasse sa capacité d'assimilation. Pendant trois ans, des ajouts répétés de N (trois et dix fois le taux actuel de dépôt atmosphérique) ont été réalisés dans une érablière, une sapinière et une pessière dans le but de vérifier 1) si ces trois écosystèmes forestiers représentatifs montraient des signes de saturation en N et 2) s'ils sont susceptibles de réagir à une augmentation des apports atmosphériques en N. Nos observations indiquent, qu'aux taux actuels de dépositions atmosphériques, les trois écosystèmes forestiers étudiés ne sont pas saturés en N. De plus, la forte rétention du N, préalablement appliqué dans la pessière et la sapinière, indique que ces deux écosystèmes boréaux ne sont pas près d'être affectés par le phénomène de saturation en N. Toutefois, nos observations, jumelées à celle d'autres travaux au Canada, suggèrent que les érablières situées sur des stations dont les sols sont pauvres en cations basiques seraient plus sensibles à une augmentation des apports atmosphériques en N que celles situées sur des stations plus riches.

Introduction

Les pluies acides, phénomène largement médiatisé au cours des années 1980, constituent encore aujourd'hui un problème pour les écosystèmes aquatiques (Légare et collab., 2008) et terrestres (Ouimet et Duchesne, 2009) qui ne parviennent pas à neutraliser naturellement l'acidité des précipitations. Les dépôts acides proviennent en grande partie de la transformation du dioxyde de soufre (SO_2 ; combustibles fossiles) et des oxydes d'azote (NO_x ; combustion des carburants des véhicules automobiles) en polluants secondaires comme l'acide sulfurique (H_2SO_4), l'acide nitrique (HNO_3), et aussi, l'ammonium (NH_4). Les pluies acides ont donc à la fois le potentiel d'acidifier les sols et de les enrichir en azote. Bien que la quantité de soufre présente dans les précipitations ait diminué au cours des 20 dernières années dans le Nord-est américain, les dépôts en azote (N) sont demeurés élevés. Les dépôts en N atteignent les 10 - 15 $\text{kg ha}^{-1} \text{an}^{-1}$ dans le nord-est des États-Unis (Driscoll et collab., 2001). Ainsi, un nombre grandissant de forêts de feuillus et de résineux montrent des signes de saturation en N dans cette région (Fenn et collab., 1998; Aber et collab., 2003). Bien que les dépôts en N soient aussi élevés dans le sud du Québec, il existe peu d'information en ce qui concerne leurs effets sur les écosystèmes forestiers. Les dépôts en N dans le nord-est de l'Amérique du Nord demeurent toutefois moins élevés que dans certaines régions d'Europe, où ils peuvent dépasser les 25 $\text{kg ha}^{-1} \text{an}^{-1}$.

Le phénomène de saturation en N du milieu forestier se manifeste lorsque la quantité de N reçue par un écosystème dépasse sa capacité d'assimilation par les arbres, les plantes, le sol ou les autres organismes, entraînant ainsi un lessivage élevé de nitrate dans la solution de sol. Ce lessivage des nitra-

tes peut provoquer plusieurs effets indésirables, notamment une perte accrue d'éléments nutritifs (p. ex. : Ca, Mg) et une acidification du sol. Ces changements induiraient alors un déséquilibre nutritionnel, un ralentissement de croissance et de productivité, et éventuellement le dépérissement des écosystèmes touchés.

Des expériences d'addition répétées de N sous forme de fertilisant ont été effectuées dans le Nord-est américain afin d'étudier la réaction de différents écosystèmes forestiers à des intensités variables de dépôts de N (Fenn et collab., 1998). Toutefois, une seule étude de ce type a été faite au Canada, en Ontario (Moayeri et collab., 2001), où des symptômes de saturation en N dans une érablière ont été observés. De plus, à notre connaissance, ce type d'étude n'avait jamais été réalisé auparavant dans les forêts boréales nord-américaines et dans les érablières québécoises.

Pendant trois ans, des ajouts répétés de N (trois et dix fois le taux actuel de dépôt atmosphérique) ont été réalisés dans une érablière, une sapinière et une pessière dans le but de vérifier 1) si ces trois écosystèmes forestiers représentatifs de trois grandes régions forestières québécoises montraient des signes de saturation en N et 2) s'ils étaient sensibles à une augmentation des apports atmosphériques en N. Bien que les quantités de N ajoutées dans cette étude puissent paraître

Les auteurs sont respectivement ingénieur forestier et biologiste, et chercheurs scientifiques à la Direction de la recherche forestière du ministère des Ressources naturelles et de la Faune du Québec.

jean-david.moore@mrnf.gouv.qc.ca

élevées, certains chercheurs prétendent que l'intensification de l'agriculture et de l'industrialisation occasionnera, inévitablement, une forte augmentation des dépôts atmosphériques en N (Galloway, 1995; Asner et collab., 2001).

Aires d'étude et méthode

Parmi les aires d'étude, on trouve une érablière à bouleau jaune, une sapinière et une pessière noire. Ces écosystèmes reçoivent différentes intensités de dépôts atmosphériques de N selon un gradient sud-nord, de plus élevé dans l'érablière à plus faible dans la pessière (tableau 1). Le dispositif expérimental de chacune des aires était composé de neuf parcelles échantillons (10 x 10 m dans les forêts boréales résineuses; 15 x 15 m dans l'érablière). Cinq arbres dominants ou codominants de l'espèce principale du peuplement ont été sélectionnés dans chacune de ces parcelles à l'automne 2000, soit un total de 45 arbres dans chacune des aires. Le NH_4NO_3 , dilué dans l'eau, a été appliqué sur les parcelles à l'aide d'un vaporisateur (figure 1), selon la dose de N établie pour chacune des aires (0, 3 et 10 fois les dépôts atmosphériques actuels de N; tableau 2). L'azote a été appliqué cinq fois l'an (de juin à octobre) durant trois années consécutives, de 2001 à 2003.



Figure 1. Application mensuelle d'azote à l'aide d'un pulvérisateur.

Afin d'évaluer la disponibilité des éléments nutritifs pour les arbres, l'eau du sol a été récoltée hebdomadairement de mai à novembre de chacune des années à l'aide de lysimètres enfouis dans le sol à des profondeurs de 30 et 60 cm. Des feuilles ou des aiguilles, selon le cas, et deux barrettes de bois de chacun des arbres à l'étude ont été prélevées en 2003

Tableau 1. Caractéristiques des trois sites d'étude.

Caractéristiques	L'érablière	La sapinière	La pessière noire
Latitude	46° 57' 00" N	47° 17' 00" N	49° 12' 45" N
Longitude	71° 40' 00" O	71° 14' 00" O	73° 39' 00" O
Région	Portneuf	Réserve faunique des Laurentides	Réserve faunique Ashuapmushuan
Élévation (m)	390	770-860	400-450
Température moyenne annuelle (°C)	3,4	-0,4	1,2
Précipitation (mm an ⁻¹)	1300	1133	823
Dépôts atmosphériques en N (kg ha ⁻¹ an ⁻¹)	8,5	5,7	3,0
Autres traits distinctifs	Dépérissement de l'érable à sucre	Importante quantité de débris ligneux au sol	Épais couvert de mousse au sol
Végétation			
Type forestier	Érablière à bouleau jaune	Sapinière à mousse	Pessière noire à mousse
Âge du peuplement (année)	Vieille inéquienne	60	60
Fermeture du couvert (%)	variable	100	95
Origine du peuplement	Coupe partiel (~1940)	Coupe totale	Feux
Sol			
Type d'humus	Podzol Orthic Ferro-Humic	Podzol Orthic Ferro-Humic	Podzol Humo-Ferric
Humus type	Mor-moder	Mor	Mor
Épaisseur moyenne du dépôt (m)	1-3	3-15	>1
Profondeur d'enracinement (m)	0,70	0,60	0,30
Roche-mère	Gneiss granitique	Gneiss charnockitique et granitoidorthopyroxène	Gneiss charnockitique, plagioclase, biotite et hornblende

Tableau 2. Quantité de N ajoutée, sous forme de NH_4NO_3 , dans les trois sites d'étude. Les valeurs ($\text{kg ha}^{-1} \text{an}^{-1}$) représentent trois (faible dose) et dix (forte dose) fois les dépôts atmosphériques annuels de N de chacun des sites.

Dose	L'érablière	La sapinière	La pessière noire
Témoin	0	0	0
Faible	26	17	9
Forte	85	57	30

afin d'évaluer leur statut nutritif et leur croissance radiale, respectivement. De plus, dans l'érablière, le pourcentage de feuillage manquant des érables a été estimé afin d'obtenir leur taux de dépérissement. Le lecteur en saura davantage sur la méthode utilisée en consultant Moore et Houle (2008) et Houle et Moore (2008).

Résultats et discussion

Effet de l'ajout de N sur le sol

Les concentrations en N dans l'eau du sol des parcelles non traitées de chacune des trois aires d'étude ont été faibles et stables au cours des trois années d'échantillonnage, ce qui indique que ces écosystèmes ne montraient aucun signe de saturation en N. En revanche, des augmentations de N dans la solution de sol ont été observées dans les parcelles fertilisées. Toutefois, ces augmentations étaient de courte durée, et les concentrations de N revenaient, souvent dans les jours suivant le traitement, aux faibles valeurs observées dans les témoins.

Un lessivage sous la zone racinaire pourrait expliquer la « disparition » du N de la solution de sol. Toutefois, l'estimation de la quantité de N perdue par lessivage a révélé que moins de 5 % du N appliqué aurait été lessivé (Moore et Houle, 2008). Par conséquent, plus de 95 % du N appliqué aurait été retenu dans chacun des trois écosystèmes à l'étude, probablement à cause de l'absorption du N par les racines et les microbes du sol. Ces résultats nous indiquent que ces

écosystèmes ne sont toujours pas saturés en N, à la suite de trois années de fertilisation en N d'intensité faible et forte, ce qui équivaut à 9 et 30 années de dépôts atmosphériques d'azote, respectivement. L'érablière de Duchesnay fait exception; il s'agit de l'écosystème qui reçoit la plus forte quantité de N atmosphérique parmi ceux qui ont été étudiés (tableau 1). En effet, des concentrations élevées en N ont été observées dans le sol (60 cm) de l'une des trois parcelles soumises à de fortes doses de N, deux et trois ans après traitement, ce qui suggère que cette parcelle est désormais saturée en N (figure 2).

Effet de l'ajout de N sur la nutrition des arbres

Les écosystèmes résineux boréaux

De façon générale, la fertilisation en N a eu peu d'effet sur la nutrition des arbres des deux écosystèmes boréaux, à la suite de trois années de traitements expérimentaux. L'ajout de N dans la sapinière n'a pas eu d'influence sur la nutrition des sapins. L'azote appliqué dans cet écosystème n'a pas été lessivé dans le sol ni dilué dans une plus grande biomasse foliaire (Moore et Houle, 2008). De plus, la faible abondance des arbustes, herbacées et mousses en sous-étage, indique que ces strates de végétation ont joué un rôle mineur dans la captation du N appliqué. Dans ce contexte, il semble plus probable que la grande quantité de débris ligneux (figure 3) ainsi que la matière organique du sol aient joué un rôle important dans l'accumulation (immobilisation) du N. D'ailleurs, au Massachusetts, on a observé que la matière organique du sol d'un peuplement résineux avait retenu de 68 à 84 % du N ajouté (Magill et collab., 2000). Un traceur du N (^{15}N), ajouté au moment des épandages, sera analysé prochainement, ce qui devrait nous indiquer avec plus de certitude les endroits où s'accumule le N dans cet écosystème.

Les fertilisations de N (faible et forte doses) durant trois années dans la pessière noire ont fait augmenter les

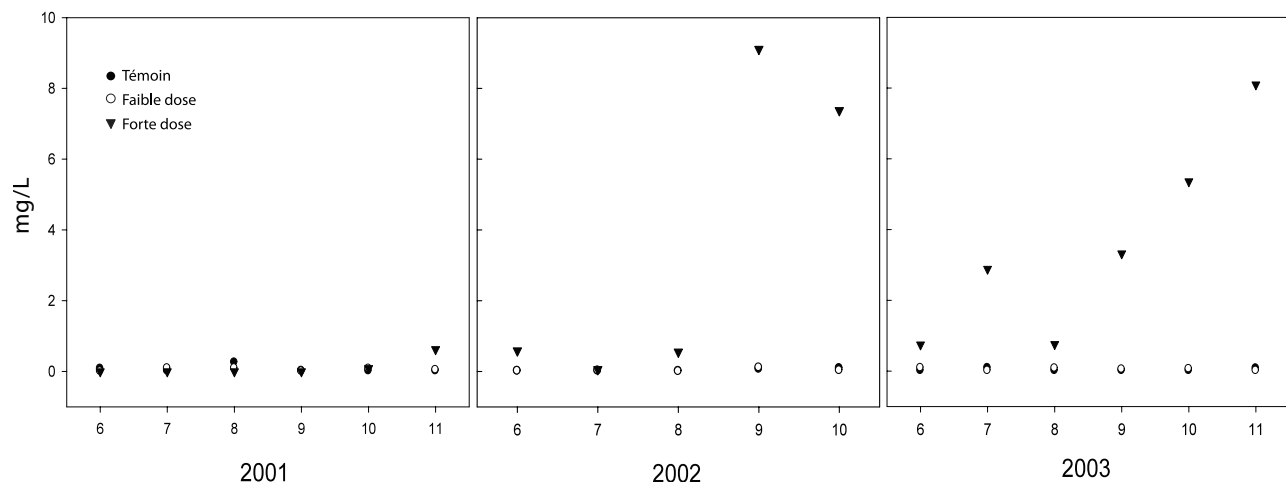


Figure 2. Évolution de la moyenne mensuelle des concentrations de nitrate dans l'eau du sol des parcelles témoins et fertilisées au bassin du lac Clair au cours des trois années suivant le traitement.



Figure 3. Débris ligneux dans les parcelles de la sapinière.

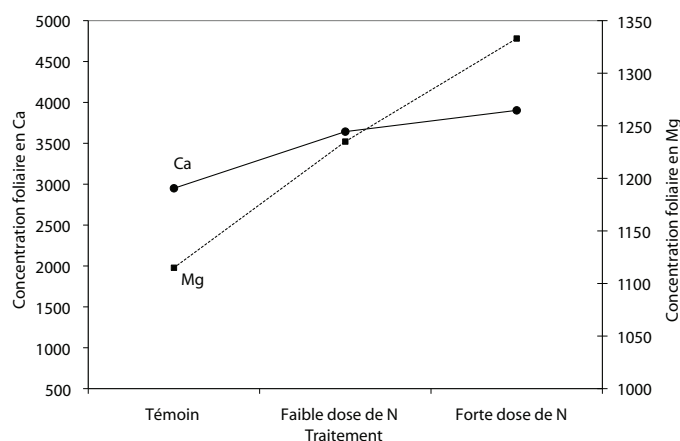


Figure 4. Effet de la fertilisation en N sur la nutrition foliaire en calcium et magnésium de l'épinette noire, trois ans après traitement.

concentrations foliaires en calcium (Ca) et en magnésium (Mg) de l'épinette noire (figure 4), tandis que la fertilisation à forte dose a fait augmenter les concentrations foliaires en N.

L'érablière

L'ajout de N dans l'érablière a eu des effets marqués sur la nutrition de l'érable à sucre. En effet, les concentrations foliaires en Ca, Mg et potassium (K) ont chuté à la suite du traitement à forte dose (figure 5). Il faut noter que la nutrition foliaire en Ca et en Mg des érables de cet écosystème était déjà très perturbée, et ce, en l'absence du traitement expérimental (voir témoin de la figure 5; Moore et Ouimet, 2006). Les carences observées de ces deux éléments sont parmi les pires rapportées dans la littérature (voir synthèse dans Moore et Houle, 2008). À titre de comparaison, les valeurs de nutrition foliaire en Ca et en Mg d'un érable en bonne santé se situeraient, respectivement, au-dessus de 8700 et 1200 mg kg⁻¹ (Côté et collab., 1993). Les valeurs obtenues dans l'érablière sont donc bien en dessous des seuils de carence établis pour le Ca et Mg (figure 5). Contrairement à ces observations, la nutrition foliaire en Ca d'érables situés en Ontario n'a pas été modifiée par des ajouts de N (212 kg de N ha⁻¹ an⁻¹; Hutchinson et collab., 1998), plus élevés que ceux qui ont été

appliqués dans notre étude (tableau 2). Toutefois, ces aires d'études étaient situées sur des sols beaucoup plus riches en cations basiques que ceux de l'érablière de Duchesnay. Ainsi, il appert qu'une augmentation des dépôts atmosphériques en N perturberait davantage la nutrition de l'érable à sucre sur les stations dont les sols sont déjà pauvres en cations basiques.

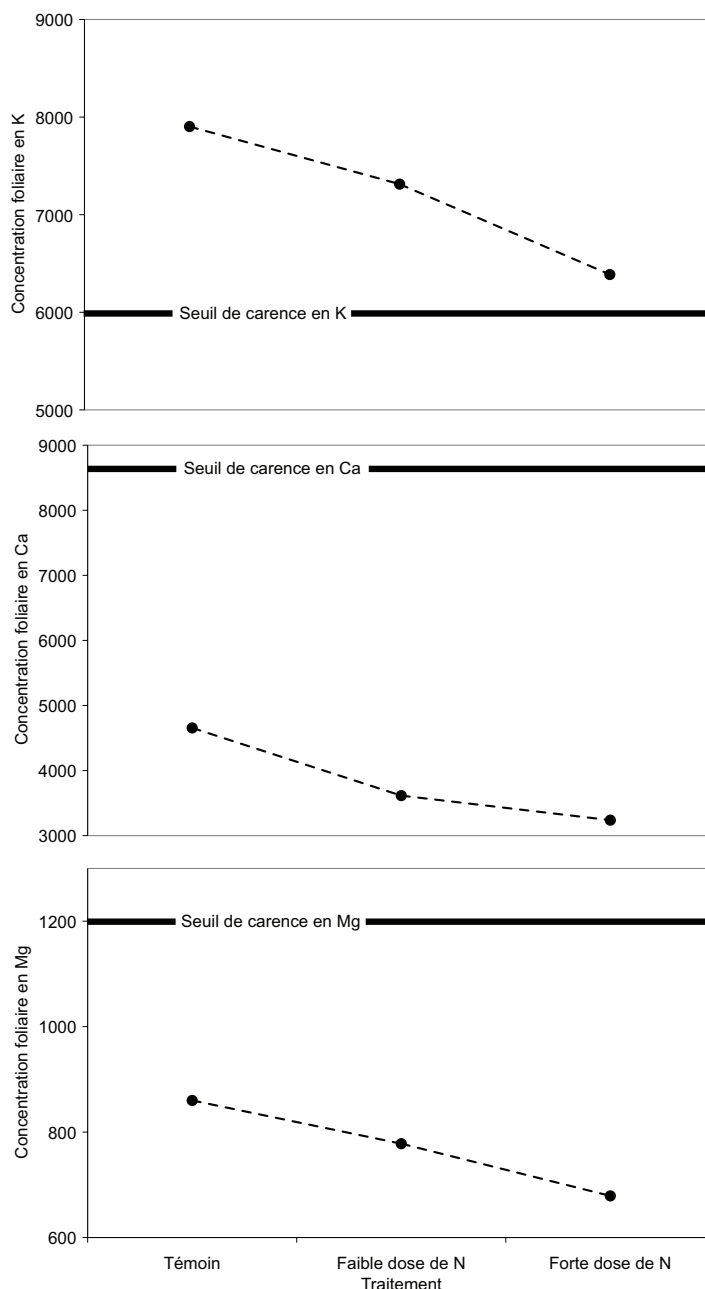


Figure 5. Effet de la fertilisation en N sur les concentrations foliaires (mg kg⁻¹) en cations basiques (K, Ca et Mg) de l'érable à sucre, trois ans après traitement. Le seuil de carence indique la concentration foliaire en dessous de laquelle l'arbre est considéré carencé pour un élément donné.

Effet de l'ajout de N sur la croissance et la vigueur des arbres

Les écosystèmes résineux boréaux

La similitude des patrons de croissance des arbres traités et non traités de chacun des deux écosystèmes boréaux nous indique que la croissance radiale des arbres sur ces stations n'a pas été influencée par les trois années (2001-2003) de fertilisation en N. L'absence de réaction de la croissance s'expliquerait par la forte rétention du N par les mousses et sphaignes (pessière), les débris ligneux (sapinière) et par les microorganismes du sol. Dans ce contexte, il semble que l'amélioration de la nutrition foliaire en N dans la pessière noire n'ait pas été suffisante pour stimuler la croissance des arbres. Aussi, la concentration en N relativement haute des aiguilles des arbres non traités de la sapinière (~1,5 %) suggère que les besoins nutritionnels en N des sapins étaient déjà comblés.

L'érablière

Aucun changement de croissance radiale ou de vigueur n'a été observé pour les arbres traités dans l'érablière et ce, malgré l'importante baisse des concentrations en Ca du feuillage des érables fertilisés. Il est toutefois possible que l'absence de réaction de croissance et de vigueur de l'érable à sucre soit attribuable au délai trop court depuis le début de la fertilisation en N.

Conclusion

Les observations faites au cours de cette étude indiquent, qu'aux taux actuels de dépositions atmosphériques en N, les trois écosystèmes forestiers étudiés ne sont pas saturés en N. Le sol des parcelles des sites boréaux soumis à trois années de fortes doses de N (10 fois les dépôts atmosphériques en N pour un site donné), a reçu l'équivalent de 30 années de dépôts en N. Toutefois, aucune hausse permanente de nitrate n'a été observée dans ces sols (malgré quelques hausses temporaires), ce qui indiquerait qu'une saturation en N aurait été induite expérimentalement.

La situation de l'érablière de Duchesnay semble toutefois plus problématique. En effet, nos résultats montrent que le phénomène de saturation a été induit dans l'une des trois parcelles de l'érablière soumise à une forte dose de N. De plus, la forte baisse des concentrations en cations basiques du feuillage des érables à sucre des parcelles traitées est préoccupante, compte tenu de la faible disponibilité de ces cations dans ces sols, de la faible vigueur des érables sur cette station et du lien qui existe entre la nutrition en cations basiques et la vigueur de l'érable à sucre (voir synthèse dans Moore et collab., 2008). De façon générale, nos observations, jumelées à celle d'autres études canadiennes, suggèrent que les érablières situées sur des stations pauvres en cations basiques réagiraient plus à une augmentation des apports atmosphériques de N que celles situées sur des stations plus riches. Par contre, la forte capacité de rétention du N dans la pessière et la sapinière nous permet d'avancer que ces deux écosystèmes boréaux ne sont pas près d'être affectés par le phénomène de saturation en N.

Remerciements

Nous tenons à remercier Jean Gagné et Mario St-Germain, de la Direction de la recherche forestière, et l'équipe technique de l'Unité de gestion de Roberval et Saint-Félicien pour leur contribution à la réussite de ce projet. ◀

Références

- ABER, J.D., C.L. GOODALE, S.V. OLLINGER, M.L. SMITH, A.H. MAGILL, M.E. MARTIN, R.A. HALLETT et J.L. STODDARD, 2003. Is nitrogen deposition altering the nitrogen status of Northeastern Forests? *BioScience*, 53: 375-389.
- ASNER, G.P., A.R. TOWNSEND, W.J. RILEY, P.A. MATSON, J.C. NEFF et C.C. CLEVELAND, 2001. Physical and biogeochemical controls over terrestrial ecosystem responses to nitrogen deposition. *Biogeochemistry*, 54: 1-39.
- CÔTÉ, B., W. HENDERSHOT et I. O'HALLORAN, 1993. Response of sugar maple to seven types of fertilization in southern Quebec: growth and nutrient status. Dans: R.F. Huettl, et D. Mueller-Dombois (édit.), *Forest decline in the Atlantic and Pacific region*. Springer-Verlag, Berlin, p. 162-174.
- DRISCOLL, C.T., G.B. LAWRENCE, A.T. BULGER, T.J. BUTLER, C.S. CRONAN, C. EAGAR, K.F. LAMBERT, G.E. LIKENS, J.L. STODDARD et K.C. WEATHERS, 2001. Acidic deposition in the Northeastern United States: Sources, inputs, ecosystem effects and management strategies. *Bioscience*, 51: 180-198.
- FENN, M.E., M.A. POTH, J.D. ABER, J.S. BARON, B.T. BORMANN, D.W. JOHNSON, A.D. LEMLY, S.G. MCNULTY, D.F. RYAN et R. STOTTEMYER, 1998. Nitrogen excess in North American ecosystems: Predisposing factors, ecosystem responses, and management strategies. *Ecological Applications*, 8: 706-733.
- GALLOWAY, J.N., 1995. Acid deposition: perspectives in time and space. *Water, Air, Soil and Pollution*, 85: 15-24.
- HOULE, D. et J.-D. MOORE, 2008. Soil solution, foliar concentrations and tree growth response to 3-year of ammonium-nitrate addition in two boreal watersheds of Québec, Canada. *Forest Ecology and Management*, 255: 2049-2060.
- HUTCHINSON, T.C., S.A. WATMOUGH, E.P.S. SAGER et J.D. KARAGATZIDES, 1998. Effects of excess nitrogen deposition and soil acidification on sugar maple (*Acer saccharum*) in Ontario, Canada: an experimental study. *Canadian Journal of Forest Research*, 28: 299-310.
- LÉGARÉ, S., P. LABONTÉ et L. CHAMPOUX, 2008. Impacts des pluies acides sur la faune benthique des lacs québécois. *Naturaliste canadien*, 132 (2): 67-74.
- MAGILL, A., J. ABER, G. BERNTSON, W. MCDOWELL, K. NADELHOFFER, J. MELILLO et P. STEUDLER, 2000. Long-term nitrogen additions and nitrogen saturation in two temperate forests. *Ecosystems*, 3: 238-253.
- MOAYERI, M., B. SIMPSON, P. ARP et N. FOSTER, 2001. Evaluating critical soil acidification loads and exceedances for tolerant hardwood stands at Turkey Lakes, Ontario. *Ecosystems*, 4: 555-567.
- MOORE, J.-D. et R. OUIMET, 2006. Ten-years effect of dolomitic lime on the nutrition, crown vigor and growth of sugar maple. *Canadian Journal of Forest Research*, 36: 1834-1841.
- MOORE, J.-D., L. DUCHESNE et R. OUIMET, 2008. Soil properties and maple-beech regeneration a decade after liming in a northern hardwood stand. *Forest Ecology and Management*, 255: 3460-3468.
- MOORE, J.-D. et D. HOULE, 2008. Tree and soil response to chronic nitrogen addition in a northern hardwood forest of Québec, Canada. *Environmental Monitoring and Assessment*, sous presse. DOI: 10.1007/s10661-008-0427-y
- OUIMET, R., et L. DUCHESNE, 2009. Dépôts atmosphériques dans les forêts au Québec: retombées actuelles et tendances au cours des 20 à 30 dernières années. *Naturaliste canadien*, 133 (1): 56-64.

Erratum

Dans notre article publié dans le *Naturaliste canadien*, volume 133, numéro 1, et intitulé « Améliorer la fertilité du sol et la régénération de l'érable à sucre par le chaulage », une erreur s'est glissée à l'avant dernière ligne de la première colonne de la page 54. On aurait dû lire « ... passant de 13 % dans les témoins à 3 %... ».

Jean-David Moore, Louis Duchesne et Rock Ouimet