

# 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

## **Dépôts atmosphériques dans les forêts au Québec *RETOMBÉES ACTUELLES ET TENDANCES AU COURS DES 20 À 30 DERNIÈRES ANNÉES***

*Rock Ouimet et Louis Duchesne*

Volume 133, numéro 1 – Hiver 2009

Pages 56-64

# Dépôts atmosphériques dans les forêts au Québec

## RETOMBÉES ACTUELLES ET TENDANCES AU COURS DES 20 À 30 DERNIÈRES ANNÉES

Rock Ouimet et Louis Duchesne

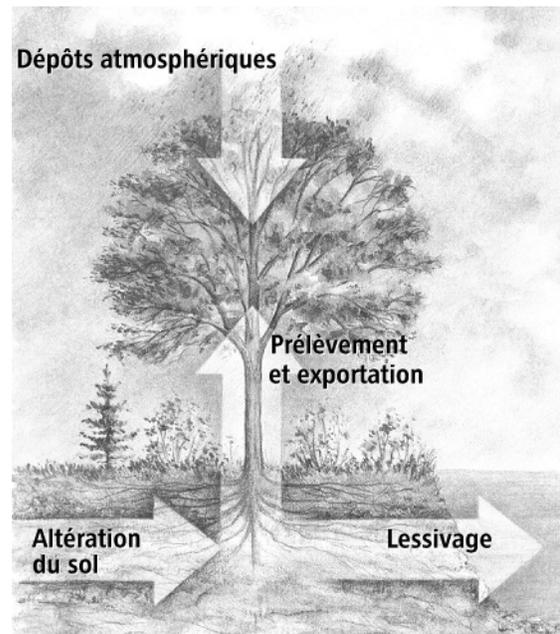
### Résumé

Les dépôts atmosphériques sont une source importante d'éléments nutritifs pour les écosystèmes forestiers, mais aussi une source d'acidité. L'objectif de cette étude est de présenter le portrait récent (1999-2002) des retombées atmosphériques dans les forêts du Québec, ainsi que leurs tendances au cours des 20 à 30 dernières années. Les données proviennent de la compilation nationale des dépôts totaux durant la période 1999-2002 et des principaux réseaux de monitoring des dépôts atmosphériques humides au Québec durant les années 1977 à 2005. Les dépôts totaux moyens actuels dans les forêts du Québec de N, Ca, Mg, K et Na sont respectivement de 5,8, 2,0, 0,5, 0,4 et 2,1 kg ha<sup>-1</sup>a<sup>-1</sup>. Les dépôts annuels moyens de Cl, SO<sub>4</sub> et H<sup>+</sup> en forêt sont respectivement de 3,5, 16,7 et 0,6 kg ha<sup>-1</sup>a<sup>-1</sup>. Les dépôts humides de tous ces éléments, particulièrement de SO<sub>4</sub>, montrent une tendance à la baisse au cours des années 1977 à 2005, à l'exception des dépôts de Na qui sont demeurés constants. La réduction par décennie de 38 % des dépôts de SO<sub>4</sub> est le fruit des programmes canado-américains de réduction des émissions de SO<sub>2</sub>, démarrés au cours des années 1980. Par contre, la baisse des dépôts en cations basiques a mitigé la remontée du pH des précipitations dans les écosystèmes forestiers, ce qui fait que ces dépôts atmosphériques sont générateurs de quantités variables d'acidité. Par conséquent, l'acidité des précipitations demeure encore aujourd'hui l'objet de préoccupations pour le maintien de l'intégrité et la santé des écosystèmes forestiers.

### Introduction

Pourquoi le forestier, le biologiste, ou l'écologiste s'intéresserait-il aux dépôts atmosphériques dans les écosystèmes forestiers? Pour au moins deux raisons. D'abord, les dépôts atmosphériques apportent, aux écosystèmes forestiers qui n'ont pas d'écoulement latéral (*seepage*), de nombreux éléments nutritifs essentiels à leur maintien et leur croissance. Ils sont, avec le lent processus d'altération chimique des minéraux du sol, les seules sources naturelles qui renouvellent les réserves d'éléments nutritifs dans les écosystèmes forestiers (figure 1). À long terme, si les entrées d'éléments nutritifs ne compensent pas les pertes attribuables à la récolte de biomasse, aux feux de forêts ou au lessivage, l'écosystème forestier s'en trouvera appauvri, avec comme conséquence possible des changements dans sa composition (p. ex. diversité biologique) et sa dynamique (p. ex. croissance et productivité).

Deuxièmement, les dépôts atmosphériques n'apportent pas que des éléments nutritifs aux écosystèmes naturels; ils y apportent aussi des polluants (acides sulfurique et nitrique, ozone, plomb, mercure, etc.) pouvant menacer certaines espèces ou l'intégrité des écosystèmes forestiers. Les apports atmosphériques qui ont fait le plus l'objet d'études et de monitoring intensifs à ce jour sont les dépôts acides humides, communément appelés « précipitations acides ». Les précipitations acides influencent divers paramètres du cycle des éléments nutritifs en forêt, dont le lessivage du sol est l'un des plus importants (Reuss et Johnson, 1985). En effet, certains éléments présents dans le sol, comme le calcium et le magnésium, contribuent à neutraliser l'acidité des précipitations.



**Figure 1. Entrées et sorties d'éléments des écosystèmes forestiers.**

Les dépôts atmosphériques et l'altération chimique des sols sont les deux seules entrées naturelles d'éléments nutritifs dans ces écosystèmes, tandis que l'exportation de la matière ligneuse par la récolte et le feu et les pertes par drainage en sont les deux principales sorties.

Rock Ouimet et Louis Duchesne sont chercheurs scientifiques à la Direction de la recherche forestière, ministère des Ressources naturelles et de la Faune du Québec.

rock.ouimet@mrnf.gouv.qc.ca

En jouant ce rôle, ces éléments sont alors lessivés du sol et donc moins disponibles pour la nutrition des arbres.

Depuis les années 1950, les dépôts acides provenant de l'atmosphère ont lessivé des quantités substantielles de cations basiques—principalement le calcium—des sols forestiers du nord-est de l'Amérique du Nord. Par exemple, on estime que plus de la moitié des réserves de calcium disponible dans les sols ont été perdues à la forêt expérimentale de Hubbard Brook au New Hampshire depuis 1950 (Driscoll et collab., 2001). Au Québec, on a noté le même phénomène d'appauvrissement en calcium des sols forestiers en raison des dépôts acides à la forêt expérimentale de Duchesnay (Houle et collab., 1997), ainsi qu'au bassin Hermine (Courchesne et collab., 2005), deux bassins versants situés dans la région des Basses-Laurentides. Bien que les conséquences de ces pertes de cations basiques ne soient pas encore entièrement connues, il a été démontré, au Québec, que l'acidification des sols forestiers est un facteur prédisposant au dépérissement des érablières (Duchesne et collab., 2002; Ouimet et collab., 2008) et à l'envahissement du hêtre à grandes feuilles (*Fagus grandifolia*) dans ces dernières (Duchesne et collab., 2005a; Duchesne et collab., 2005b).

Depuis la fin de la dernière décennie, le Québec a réussi à diminuer de plus de 60 % ses émissions de SO<sub>2</sub> (un précurseur de l'acide sulfurique) par rapport aux émissions de 1980. L'Ontario a atteint un objectif similaire, alors que les États-Unis auront réduit de plus de 50 % (par rapport aux émissions de 1980) leurs émissions de SO<sub>2</sub> d'ici 2010. Comme résultat, les émissions de SO<sub>2</sub> ont diminué de 53 % entre 1985 et 2000 dans l'est du Canada (Ontario et plus à l'est) en raison des baisses d'émissions dans les secteurs de la production d'électricité, et de l'exploitation minière et des fonderies de métaux non ferreux (Niemi, 2005). Malgré le succès obtenu sur le plan des réductions, il semble que celles-ci ne seront pas suffisantes pour que l'ensemble des milieux naturels affectés par l'acidification récupère. Les données les plus récentes indiquent que la charge critique en acidité des sols forestiers est dépassée dans 37,6 % du territoire forestier des provinces de l'Est du Canada (Québec et plus à l'est), dans 31,6 % des forêts au Québec (NEG/ECP Forest Mapping Group, 2007). Le Québec s'est donc engagé à trouver un terrain d'entente avec les autres provinces de l'Est du Canada pour réaliser une réduction additionnelle de 50 % de ses émissions de SO<sub>2</sub>. De même manière, le gouvernement du Québec a signé une entente avec les provinces de l'Est du Canada et les États de la Nouvelle-Angleterre pour s'attaquer spécifiquement au problème des précipitations acides et du mercure.

L'objectif de cette étude est d'estimer les quantités de dépôts totaux annuels des principaux éléments nutritifs dans le Québec forestier, obtenues à partir de la compilation nationale des mesures effectuées dans les stations de monitoring des dépôts atmosphériques durant les années 1999 à 2002, ainsi que de rendre compte des tendances des dépôts humides au cours des 20 à 30 dernières années.

## Matériel et méthodes

### *Retombées actuelles de dépôts atmosphériques*

Nous avons obtenu les estimations des retombées atmosphériques totales (moyennes 1999-2002) de la Direction de recherche en mesure et analyse d'Environnement Canada (Shaw et collab., 2006). Ces dépôts estimés comprennent les dépôts totaux annuels moyens en N-NO<sub>3</sub>, N-HNO<sub>3</sub>, N-NH<sub>4</sub>, S-SO<sub>4</sub>, S-SO<sub>2</sub>, Ca, Mg, K, Na et Cl exprimés en kilogramme à l'hectare. Les dépôts totaux représentent la somme des dépôts humides (apportés par la pluie et la neige) et des dépôts secs.

Les dépôts humides de cette base de données ont été estimés par interpolation des mesures effectuées dans les stations de monitoring qui sont archivées dans la base de données nationale sur la chimie atmosphérique (NAtChem, accessible en ligne à : <http://www.msc.ec.gc.ca/natchem/>). NAtChem est une installation d'archivage et d'analyse des données, exploitée par le Service météorologique du Canada, des mesures effectuées dans les réseaux de monitoring des précipitations et de la qualité de l'air en Amérique du Nord. Dans ces réseaux, seuls des collecteurs de dépôts humides sont employés pour recueillir les échantillons de précipitations qui seront analysés. Combinées aux données mesurées de précipitations, les concentrations sont transformées en quantités à l'hectare par année.

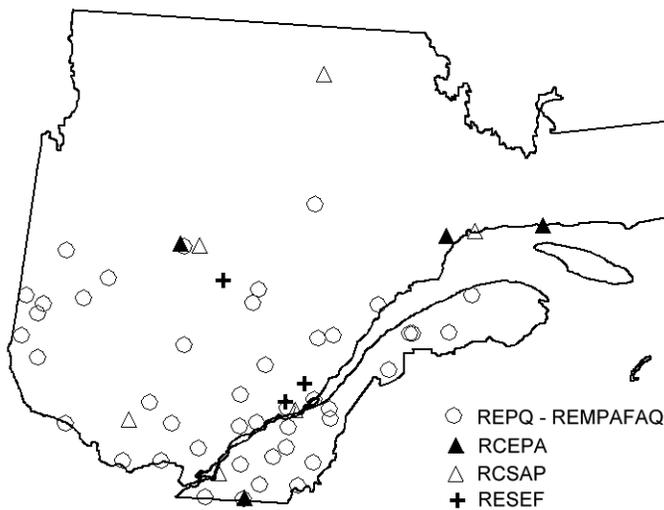
Quant aux dépôts secs de cette base de données, ils ont été extrapolés à partir des concentrations de gaz ou particules dans l'air mesurées dans les stations de monitoring du Réseau canadien d'échantillonnage des précipitations et de l'air (RCEPA) et du *Clean Air Status and Trends Network* (CASTNET) des États-Unis. Ces concentrations ont ensuite été combinées aux valeurs inférées de la vitesse de retombée des dépôts secs aux stations du RCEPA à l'aide du modèle *Regional Deposition Model* (RDM) (Brook et collab., 1999; Zhang et collab., 2001; Zhang et collab., 2003). Les dépôts secs en S et en N représentent environ le tiers des dépôts humides de ces éléments au Québec (Vet et collab., 2005). Les quantités de dépôts secs varient aussi selon le type de couverture végétale. Nous avons sélectionné les données de dépôts secs uniquement des couverts forestiers (moyennes pondérées pour les types de couverts forestiers feuillu, mixte et résineux) déterminés selon la caractérisation des couvertures végétales du Service géologique américain (USGS, 1999). Les résultats présentés ici couvrent donc seulement les forêts cartographiées au Québec. Finalement, les données de précipitations totales moyennes annuelles 1960-1990 du ministère des Ressources naturelles et de la Faune (Noël, 2002) ont été utilisées pour dresser un portrait comparatif.

Dans cette étude, les retombées atmosphériques totales annuelles moyennes en hydrogène (H<sup>+</sup>) ont été estimées en soustrayant les anions des cations (exprimés en équivalent ha<sup>-1</sup>a<sup>-1</sup>), en considérant que tous les composés d'azote ammoniacal (NH<sub>4</sub>) sont transformés en nitrate dans les écosystèmes forestiers, et ceux du soufre (SO<sub>2</sub>), en sulfate (SO<sub>4</sub>).

Les dépôts d'azote et de sulfate représentent donc la somme de leurs composés apparentés. Les dépôts de  $H^+$  ainsi calculés représentent le potentiel d'acidité que peuvent générer les retombées atmosphériques dans les écosystèmes forestiers (UBA, 2004).

**Tendances temporelles**

Nous avons analysé les tendances temporelles des retombées humides au Québec au cours des 20 à 30 dernières années à partir des mesures effectuées dans les stations de monitoring de la qualité des précipitations et qui sont, pour la majorité, archivées dans la base de données NATChem. Les données sélectionnées proviennent de quatre réseaux de monitoring de l'atmosphère (figure 2) :



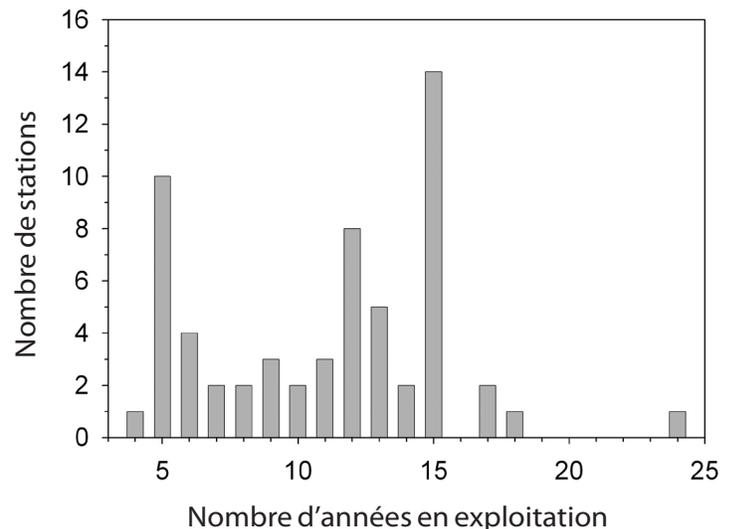
**Figure 2. Localisation des stations des différents réseaux de mesure des dépôts atmosphériques dans le Québec méridional.**

1. le Réseau d'échantillonnage des précipitations du Québec (REPQ; renommé le Réseau de surveillance de la qualité des précipitations (RSQP) depuis le début de 2008), qui a vu le jour en 1981, auquel s'est adjoint le Réseau de mesure des polluants atmosphériques en milieu forestier et agricole du Québec (REMPAFAQ), qui a été implanté entre 1988 et 1992;
2. le RCEPA, un réseau canadien de surveillance de la qualité de l'air non urbain, qui a pour but d'étudier les tendances régionales des pluies acides ainsi que la composition chimique des précipitations, des particules et des gaz;
3. le Réseau canadien de surveillance de l'air et des précipitations (RCSAP), du Service météorologique du Canada, dont le rôle est d'étudier les tendances régionales des pluies acides ainsi que la composition chimique des précipitations, des particules et des gaz. Mis en œuvre vers le milieu de 1983, ce réseau a remplacé et modernisé deux réseaux plus anciens - le Réseau canadien d'échantillonnage des précipitations (CANSAP) et le Réseau de surveillance de l'air et des précipitations (RSAP). L'intégration du RSAP dans le nouveau réseau donne accès à des données depuis 1977;

4. le Réseau d'étude et de surveillance des écosystèmes forestiers (RÉSEF) de la Direction de la recherche forestière du ministère des Ressources naturelles et de la Faune du Québec, qui comprend trois bassins versants forestiers calibrés faisant l'objet d'un suivi intensif des apports atmosphériques, des flux d'éléments dans l'écosystème et des sorties. La plus ancienne de ces stations, le bassin versant du lac Laflamme à la Forêt Montmorency de l'Université Laval, a commencé à être en activité comme station du RCEPA en 1981, puis a été reprise par le RÉSEF en 1998. La seconde station, le bassin versant du lac Clair à la Forêt expérimentale de Duchesnay, est en activité depuis 1988, tandis que la troisième, le bassin versant du lac de la Tirasse, situé dans la Réserve faunique d'Ashuapmuchuan, l'est depuis 1996.

Ainsi, au total, on disposait de données annuelles sur au moins quatre ans dans 60 stations d'échantillonnage concernant la qualité des précipitations dans le Québec méridional. L'histogramme à la figure 3 présente le nombre de stations selon le nombre d'années d'activité. Les données disponibles s'étendent de 1977 à 2005 et la majorité des stations avaient, au moment de l'étude, de 9 à 15 années d'activité pour lesquelles des données étaient disponibles.

Pour évaluer les tendances des dépôts atmosphériques humides, nous avons d'abord effectué une simple analyse de régression de chacun des paramètres en fonction des années, séparément pour chaque station. Ensuite, nous avons effectué une analyse longitudinale (de mesures répétées) comprenant toutes les stations afin de déterminer si une tendance générale se dégageait. Nous avons considéré que la tendance temporelle était pertinente lorsque la pente de la régression était significative au seuil de probabilité  $P < 0,10$  pour les analyses des stations individuelles et  $\leq 0,05$  pour



**Figure 3. Nombre de stations de mesures des dépôts atmosphériques selon le nombre d'années où elles furent en exploitation, entre 1977 et 2005.**

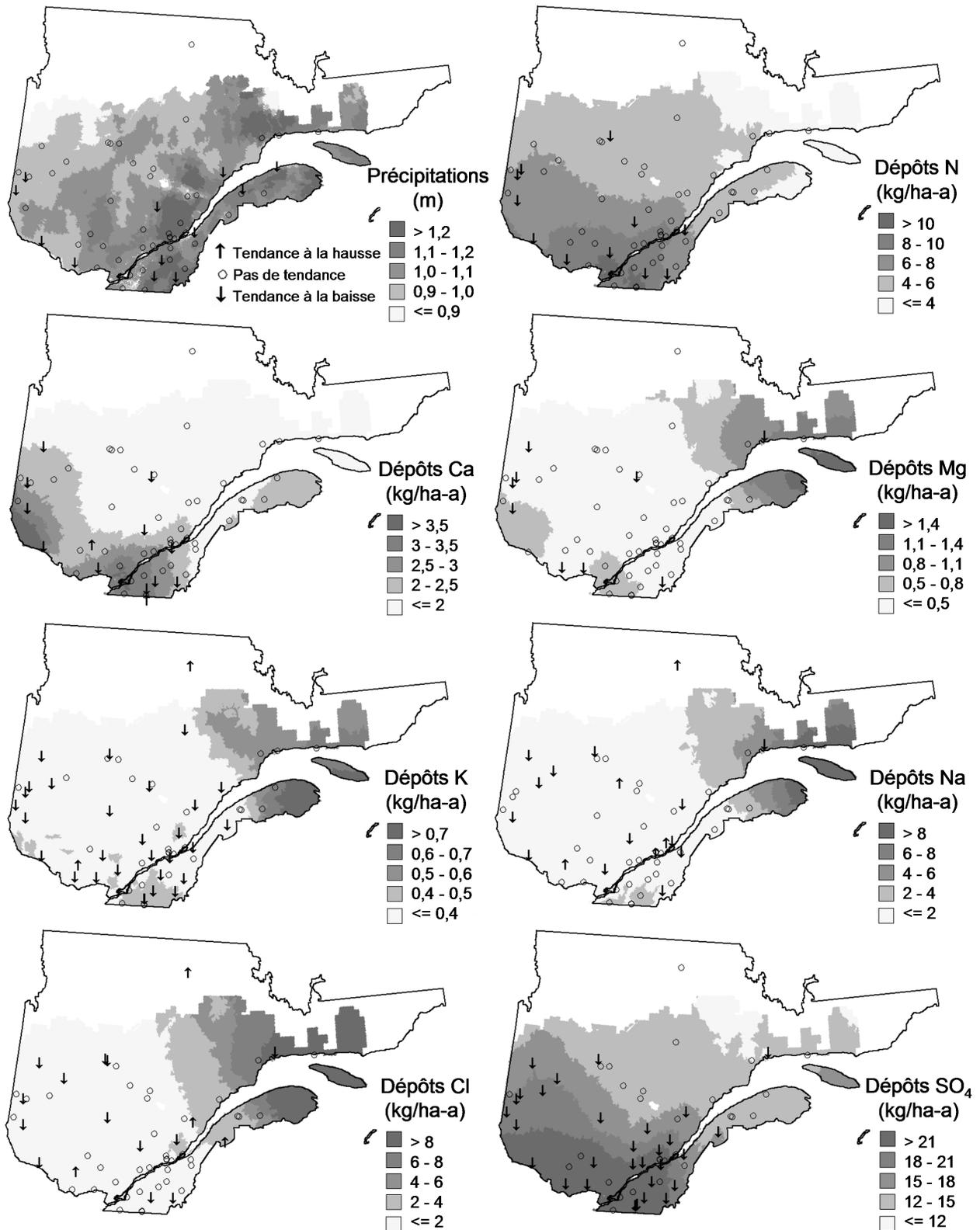


Figure 4. Précipitations totales annuelles (moyennes 1961-1990) et dépôts totaux (secs et humides ; moyennes 1999-2002) en azote (N), calcium (Ca), magnésium (Mg), potassium (K), sodium (Na), chlore (Cl) et sulfate (SO<sub>4</sub>) dans les forêts du Québec méridional et leurs tendances observées dans les stations de mesure au cours des ans entre 1977 et 2005.

les analyses globales. Les procédures PROC REG et PROC MIXED de SAS (SAS Institute, 2002) ont été employées pour réaliser les analyses statistiques. L'homogénéité de la variance a été vérifiée chaque fois par l'examen graphique des résidus en fonction des valeurs prédites et la normalité des résidus l'a été par l'analyse de leur distribution (PROC UNIVARIATE de SAS).

## Résultats

### Quantités et tendance par station

#### Précipitations totales

Dans le Québec méridional, les précipitations totales moyennes annuelles (moyenne  $\pm$  écart type) sont de  $1\,060 \pm 130$  mm (figure 4). Elles se concentrent le long du fleuve Saint-Laurent, particulièrement dans les secteurs plus en altitude. Une tendance significative à la baisse des précipitations totales a été notée dans 12 des 60 stations de mesures durant les années 1977 à 2005. Lorsque les stations sont analysées globalement, les précipitations totales annuelles ont diminué statistiquement, mais très peu, soit d'environ 0,5 % par décennie ou de  $0,48 \pm 0,12$  mm  $a^{-1}$  entre 1977 et 2005 (tableau 1).

#### Azote (N)

Les apports atmosphériques de N dans les écosystèmes forestiers ont varié de 2 à 11 kg  $ha^{-1}a^{-1}$  entre 1999 et 2002 (figure 4). Ils étaient en moyenne de  $5,8 \pm 1,8$  kg  $ha^{-1}a^{-1}$ . Ils suivaient un gradient diminuant du sud au nord. Moins de 13 % du territoire forestier cartographié recevaient plus de 8 kg N  $ha^{-1}a^{-1}$  durant cette période. Les nitrates ( $NO_3$ ) représentaient  $64 \pm 4$  % des retombées de N. Seulement 11 des 60 stations indiquaient une tendance à la baisse significative des dépôts humides au cours des 20 à 30 dernières années. Cependant, analysés globalement, les dépôts humi-

des de N ont diminué d'environ 11 % par décennie, soit  $64 \pm 11$  g  $ha^{-1}a^{-1}$ , entre 1977 et 2005 (tableau 1).

#### Calcium (Ca)

Les apports atmosphériques de Ca dans les écosystèmes forestiers ont varié de 1 à 4 kg  $ha^{-1}a^{-1}$  entre 1999 et 2002 (figure 4). Ils suivaient un gradient diminuant du sud-ouest au nord-est. Moins de 6 % du territoire forestier cartographié recevaient plus de 3 kg Ca  $ha^{-1}a^{-1}$  durant cette période. Seulement 13 des stations montraient une tendance (11 à la baisse et deux à la hausse) des dépôts humides de Ca au cours des 20 à 30 dernières années. Cependant, analysés globalement, les dépôts humides de Ca ont diminué d'environ 10,6 % par décennie, soit  $20 \pm 8$  g  $ha^{-1}a^{-1}$ , entre 1977 et 2005 (tableau 1).

#### Magnésium (Mg)

Les apports atmosphériques de Mg dans les écosystèmes forestiers ont varié de près de 0 à 1,6 kg  $ha^{-1}a^{-1}$  entre 1999 et 2002 (figure 4). Ils étaient plus élevés au nord-est et au sud-ouest, et bas dans le centre du Québec. Environ 7 % du territoire forestier cartographié recevaient plus de 1,1 kg Mg  $ha^{-1}a^{-1}$  durant cette période. Seulement neuf stations indiquaient une tendance significative à la baisse des dépôts humides au cours des 20 à 30 dernières années. Analysés globalement cependant, les dépôts humides de Mg ont diminué d'environ 6,2 % par décennie, soit  $4 \pm 1$  g  $ha^{-1}a^{-1}$ , entre 1977 et 2005 (tableau 1).

#### Potassium (K)

Les apports atmosphériques de K dans les écosystèmes forestiers ont varié de près de 0 à 0,8 kg  $ha^{-1}a^{-1}$  entre 1999 et 2002 (figure 4). Ils étaient plus élevés au nord-est et au sud, et bas dans le centre du Québec. Environ 7 % du territoire forestier cartographié recevaient plus de 0,6 kg K  $ha^{-1}a^{-1}$

Tableau 1. Quantité (moyenne  $\pm$  écart-type) des dépôts atmosphériques totaux (1999-2002) et tendance globale temporelle des dépôts atmosphériques humides durant la période s'étendant de 1977 à 2005 dans l'ensemble des stations de mesures. La tendance est exprimée en pourcentage par 10 ans par rapport à la moyenne.

Variable	Quantité	Tendance (% par 10 ans)	P > F
Précipitations totales (mm $a^{-1}$ )	$1060 \pm 130$	-0,5	< 0,001
Dépôts totaux de N (g $ha^{-1} a^{-1}$ )	$5,8 \pm 1,8$	-11,0	< 0,001
Dépôts totaux de Ca (g $ha^{-1} a^{-1}$ )	$2,0 \pm 0,6$	-10,6	0,014
Dépôts totaux de Mg (g $ha^{-1} a^{-1}$ )	$0,5 \pm 0,3$	-6,2	< 0,001
Dépôts totaux de K (g $ha^{-1} a^{-1}$ )	$0,4 \pm 0,1$	-19,3	< 0,001
Dépôts totaux de Na (g $ha^{-1} a^{-1}$ )	$2,1 \pm 2,4$	-3,5	0,209
Dépôts totaux de Cl (g $ha^{-1} a^{-1}$ )	$3,5 \pm 4,3$	-6,1	0,049
Dépôts totaux de $SO_4$ (g $ha^{-1} a^{-1}$ )	$16,7 \pm 4,3$	-38,2	< 0,001
Dépôts totaux de H (g $ha^{-1} a^{-1}$ )	$0,6 \pm 0,2$	-19,7	< 0,001
pH des dépôts humides (unité $a^{-1}$ )	$4,52 \pm 0,2$	+2,0	< 0,001

durant cette période. Une tendance significative des dépôts humides de K a été observée dans 30 stations (à la baisse dans 28 et à la hausse dans 2) au cours des 20 à 30 dernières années. Analysés globalement, les dépôts humides de K ont diminué d'environ 19,3 % par décennie, soit  $8 \pm 2 \text{ g ha}^{-1}\text{a}^{-1}$ , entre 1977 et 2005 (tableau 1).

#### *Sodium (Na)*

Les apports atmosphériques de Na dans les écosystèmes forestiers ont varié de près de 0 à  $10 \text{ kg ha}^{-1}\text{a}^{-1}$  entre 1999 et 2002 (figure 4). Ils suivaient un gradient augmentant d'ouest en est. Environ 7 % du territoire forestier cartographié recevaient plus de  $6 \text{ kg Na ha}^{-1}\text{a}^{-1}$  durant cette période. Une tendance significative des dépôts humides de Na a été observée dans 18 stations (à la baisse dans 13 et à la hausse dans 5) au cours des 20 à 30 dernières années. Analysés globalement, les dépôts humides de Na en forêt n'ont pas changé entre 1977 et 2005 (tableau 1).

#### *Chlore (Cl)*

Les apports atmosphériques de Cl dans les écosystèmes forestiers ont également varié de près de 0 à  $10 \text{ kg ha}^{-1}\text{a}^{-1}$  entre 1999 et 2002 (figure 4). Ils étaient en moyenne de  $3,5 \pm 4,3 \text{ kg ha}^{-1}\text{a}^{-1}$ . Comme le Na, ils suivaient un gradient qui augmentait d'ouest en est. Environ 8 % du territoire forestier cartographié recevaient plus de  $6 \text{ kg ha}^{-1}\text{a}^{-1}$  de Cl durant cette période. Une tendance significative des dépôts humides de Cl a été observée dans 17 stations (à la baisse dans 13 et à la hausse dans 4) au cours des 20 à 30 dernières années. Pris globalement, les dépôts humides de Cl en forêt ont baissé d'environ 6,1 % par décennie, soit  $21 \pm 11 \text{ g ha}^{-1}\text{a}^{-1}$ , entre 1977 et 2005 (tableau 1).

#### *Sulfate (SO<sub>4</sub>)*

Les apports atmosphériques de SO<sub>4</sub> dans les écosystèmes forestiers ont varié de près de 10 à plus de  $25 \text{ kg ha}^{-1}\text{a}^{-1}$  entre 1999 et 2002 (figure 4). Ils étaient en moyenne de  $16,7 \pm 4,3 \text{ kg ha}^{-1}\text{a}^{-1}$ . Comme le N, ils suivaient un gradient qui diminuait du sud au nord. Environ 31 % du territoire forestier cartographié recevaient plus de  $18 \text{ kg SO}_4 \text{ ha}^{-1}\text{a}^{-1}$ ; 22 % en recevaient  $20 \text{ kg SO}_4 \text{ ha}^{-1}\text{a}^{-1}$  et plus durant cette période. Cependant, une tendance significative à la baisse des dépôts humides de SO<sub>4</sub> a été observée dans 32 stations au cours des 20 à 30 dernières années. Pris globalement, les dépôts humides de SO<sub>4</sub> ont baissé d'environ 38,2 % par décennie, soit  $638 \pm 42 \text{ g ha}^{-1}\text{a}^{-1}$ , entre 1977 et 2005 (tableau 1).

#### *Hydrogène (H<sup>+</sup>)*

Les apports atmosphériques générateurs de H<sup>+</sup> dans les écosystèmes forestiers ont varié de moins de 0,4 à plus de  $1,0 \text{ kg ha}^{-1}\text{a}^{-1}$  entre 1999 et 2002 (figure 5). Ils étaient en moyenne de  $0,6 \pm 0,2 \text{ kg ha}^{-1}\text{a}^{-1}$ . Comme les dépôts de N et de SO<sub>4</sub>, ils suivaient un gradient diminuant du sud au nord. Environ 18 % du territoire forestier cartographié recevaient plus de  $0,8 \text{ kg H}^+ \text{ ha}^{-1}\text{a}^{-1}$  durant cette période. Treize stations montraient une tendance à la baisse des dépôts humides de

H<sup>+</sup> au cours des 20 à 30 dernières années. Pris globalement, les dépôts humides de H<sup>+</sup> ont diminué d'environ 19,7 % par décennie, soit  $4 \pm 1 \text{ g ha}^{-1}\text{a}^{-1}$ , entre 1977 et 2005 (tableau 1).

#### *pH des précipitations*

En lien avec les dépôts d'hydrogène, le pH des précipitations dans les stations de mesure a eu tendance à augmenter durant les années 1977 à 2005. L'augmentation était observable dans 20 stations (figure 5). Globalement, l'augmentation était nettement significative statistiquement, mais faible, de l'ordre d'environ 2 % par décennie, soit 0,1 unité de pH, entre 1977 et 2005 (tableau 1).

## Discussion

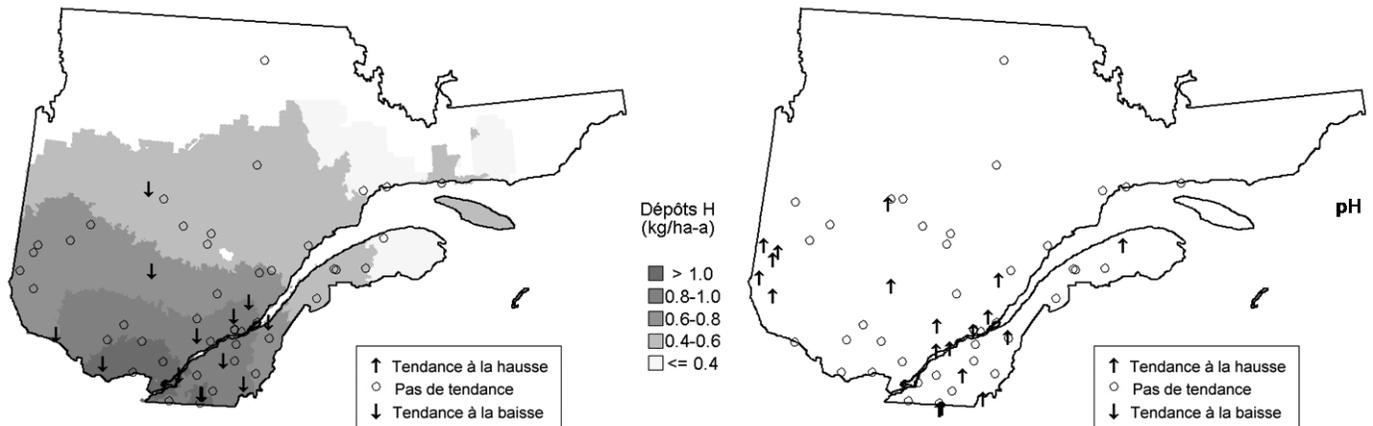
### *Précipitations*

La baisse légère des précipitations totales enregistrée au cours des années 1977 à 2005 ne concorde pas avec les études des tendances observées à plus long terme. Les précipitations totales auraient plutôt légèrement augmenté durant la période 1950-1998 dans le sud du Canada (Zhang et collab., 2000). Cependant, l'analyse de Zhang et de ses collègues a été réalisée à partir de bases de données différentes, les résultats étant basés sur des données spatialisées, ce qui entraînerait la réduction des extrêmes mesurés.

Le patron des précipitations moyennes dans le Québec méridional ne correspond pas à celui des dépôts totaux d'aucun des éléments étudiés, ce qui donne à penser que les tendances observées dans les dépôts atmosphériques seraient occasionnées par le changement de concentration dans les précipitations ou par le changement de quantité de fraction sèche des dépôts totaux. Les dépôts atmosphériques dépendraient beaucoup plus de la fraction sèche, particulièrement en ce qui concerne le Ca et le Mg. Pour ces deux éléments, la proportion des dépôts totaux en dépôts secs atteint 70 % et plus en forêt (Houle et collab., 1999). Quant à la baisse des précipitations observée ici, elle est trop faible pour expliquer la baisse observée des dépôts en éléments. Les tendances observées dans les dépôts atmosphériques humides au Québec sont similaires aux tendances à long terme observées entre 1981 et 1998 aux États-Unis (Nilles et Conley, 2002) et celles rapportées à la station forestière d'Hubbard Brook au New Hampshire entre 1963 et 1982 (Likens et collab., 1984).

### *Dépôts en éléments nutritifs*

Les apports atmosphériques annuels de N sont relativement faibles comparés au N accumulé dans la forêt boréale ( $\approx 120 \text{ kg ha}^{-1}$  dans la biomasse épigée,  $\approx 600 \text{ kg ha}^{-1}$  dans l'humus et  $> 2000 \text{ kg ha}^{-1}$  dans le sol minéral (Cole et Rapp, 1981). Bien que la majorité de ce N déposé soit directement absorbée par le feuillage des arbres (Houle et collab., 1999), son impact sur la croissance semble faible, voire nul. Les expériences récentes (1980 et plus récent) d'ajout chronique en N dans les forêts n'indiquent généralement aucune réaction significative sur le plan de la croissance en volume



**Figure 5. Dépôts atmosphériques totaux (secs et humides) estimés en hydrogène (H<sup>+</sup>) dans les forêts cartographiées au Québec entre 1999 et 2002 et tendances observées des dépôts humides en H<sup>+</sup> et du pH dans les stations de mesures au cours des ans entre 1977 et 2005.**

des arbres (p. ex. Houle et Moore, 2008); on observe même l'accroissement de la mortalité dans certains cas (Wallace et collab., 2007) probablement en raison de l'abaissement à la tolérance au froid des arbres. Les mécanismes physiologiques en jeu sont expliqués par DeHayes et collab. (1999). Par ailleurs, il n'y a, jusqu'à maintenant, aucune évidence que les dépôts de N entraînent un lessivage du NO<sub>3</sub> dans les eaux de drainage dans l'est de l'Amérique du Nord; on a observé que le NO<sub>3</sub> est retenu à 94 % dans les bassins versants forestiers étudiés (Watmough et collab., 2005). En Europe, on a démontré qu'au-dessus du seuil critique d'environ 10 kg N ha<sup>-1</sup>, le lessivage du NO<sub>3</sub> vers les cours d'eau augmentait avec les dépôts atmosphériques de N (Dise et collab., 1998; Stoddard et collab., 2001). Malgré la légère tendance à la baisse observée dans les dépôts humides au cours des 20 à 30 dernières années, environ 13 % du territoire québécois recevait, au tournant du XXI<sup>e</sup> siècle, encore des retombées de plus de 8 kg N ha<sup>-1</sup>, soit près du seuil critique de saturation en N. Les retombées de N demeurent donc préoccupantes étant donné les cibles proposées en Amérique du Nord. Actuellement, on considère qu'environ un tiers de l'oxyde nitreux (NO<sub>x</sub>) présent dans l'atmosphère du globe est d'origine humaine et provient principalement de l'épandage d'engrais azotés et de l'utilisation de combustibles fossiles et de bois. Depuis le milieu du XVIII<sup>e</sup> siècle, la concentration atmosphérique de NO<sub>x</sub> a augmenté d'environ 17 % (GIEC, 2001).

Les dépôts atmosphériques totaux en Ca sont actuellement faibles dans les forêts au Québec (2,0 ± 0,7 kg ha<sup>-1</sup>a<sup>-1</sup>). Leur distribution suit celles du SO<sub>4</sub> du H<sup>+</sup> et du N (figure 4). La baisse des dépôts humides de Ca est attribuée principalement à la réduction des émissions de particules fines des procédés industriels (principalement dans les cimenteries), de combustion des carburants fossiles et d'incinération des déchets (Likens et collab., 1998), ce qui concorde avec la distribution observée du SO<sub>4</sub> et du N. De plus, environ la moitié des dépôts atmosphériques en Ca dans les forêts proviennent des dépôts secs (Houle et collab., 1999).

Contrairement aux dépôts atmosphériques de Ca, les dépôts atmosphériques totaux de Mg, K, Na et Cl proviennent majoritairement du golfe du Saint-Laurent. Leur importance dans les dépôts suit d'ailleurs leur concentration (g kg<sup>-1</sup>) dans l'eau de mer (Stumm et Morgan, 1981) : Cl > Na > Mg > Ca ≈ K, qui en est probablement la principale source. Par contre, il est difficile d'expliquer la tendance à la baisse des dépôts humides en Mg et K au cours des 20 à 30 dernières années si l'eau de mer est leur seule source. Les baisses des dépôts humides en Mg ont surtout été enregistrées dans l'ouest et le sud-ouest de la province (figure 4), tandis que celles en K ont surtout été enregistrées là où les dépôts atmosphériques sont déjà faibles (≤ 0,4 kg ha<sup>-1</sup>a<sup>-1</sup>), ce qui suggère que ces éléments pourraient provenir aussi d'autres sources (poussières, chemins non pavés, etc.).

Comparativement aux apports nets provenant du processus d'altération chimique des sols d'origine granitique, les retombées atmosphériques en Ca et Mg représenteraient donc actuellement environ le cinquième des apports nets en ces éléments dans les écosystèmes forestiers au Québec (tableau 2). Pour ce qui est du K, les apports nets dans les forêts proviendraient en grande majorité du sol, tandis que pour le Na, près de la moitié proviendrait de l'atmosphère.

### Dépôts acides

Les retombées atmosphériques humides ayant connu la tendance à la baisse la plus importante au cours des 20 à 30 dernières années sont celles de SO<sub>4</sub>. Ces observations s'expliquent par les mesures de réduction des émissions du précurseur du SO<sub>4</sub> (le SO<sub>2</sub>) dans le cadre des programmes de contrôle des émissions de SO<sub>2</sub> du Programme de lutte contre les pluies acides dans l'est du Canada de 1985 (PLCPA), qui a été lancé en 1985 et subséquentement formalisé par une série d'accords fédéraux-provinciaux bilatéraux (Environnement Canada, 1994) et des dispositions adoptées sur les dépôts acides aux É.-U. (le Titre IV et les Phases 1 et 2 des *Clean Air Act Amendments* (CAAA) de 1990 des É.-U. (U.S. EPA, 1990). Les réductions sont prévues jusqu'en 2010 puisque c'est l'an-

Tableau 2. Valeurs moyennes des dépôts atmosphériques totaux en cations basiques dans les forêts au Québec (période 1999-2002) et comparaison avec les valeurs moyennes d'éléments issus de l'altération chimique des sols d'origine granitique, principalement dans le nord-est de l'Amérique du Nord.

Élément	Source d'apport (kg ha <sup>-1</sup> a <sup>-1</sup> )		Proportion de l'apport en dépôt atmosphérique (%)
	Atmosphère	Altération chimique du sol*	
Ca	2.0 ± 0.6	6.8 ± 3.2	23
Mg	0.5 ± 0.3	2.0 ± 0.5	20
K	0.4 ± 0.1	5.1 ± 2.2	7
Na	2.1 ± 2.4	2.5 ± 0.6	46

\* Source : (Ouimet et Duchesne, 2005)

née à laquelle le programme de la CAAA des mesures de contrôle des émissions de SO<sub>2</sub> sera appliqué intégralement (les réductions prévues au programme PLCPA de 1985 de réduction des émissions de SO<sub>2</sub> ont été appliquées intégralement à partir de 1994; Environnement Canada, 1994).

Les dépôts atmosphériques humides de N, générateurs potentiels d'acidité, ont connu une diminution légère au cours des 20 à 30 dernières années au Québec. Cette baisse est probablement un effet indirect des programmes de réduction des sources d'émissions de SO<sub>2</sub> au Canada et aux É.-U., réduisant du même coup les émissions des précurseurs de N (NO<sub>x</sub>, NH<sub>3</sub>) à partir de ces sources, car les émissions de N ont commencé à diminuer très légèrement qu'à partir de 1996 jusqu'en 2001 dans l'est des États-Unis (Vet et collab., 2005).

Les retombées atmosphériques humides en H<sup>+</sup> ont suivi de près celles de SO<sub>4</sub> et de N. Malgré une légère tendance à la baisse au cours des 20 à 30 dernières années, elles demeurent élevées dans certaines régions du Québec méridional. Cette situation s'explique en partie par le fait que la baisse des dépôts humides de SO<sub>4</sub> a été accompagnée de la baisse des dépôts humides de cations basiques qui neutralisaient une partie de l'acidité générée par les anions. On a déjà trouvé que le dépérissement des érables était associé aux dépôts de H<sup>+</sup> et à l'acidité du sol (Duchesne et collab., 2002). Il a aussi été démontré, sous nos conditions, que des apports d'acidité équivalent à 1 kg ha<sup>-1</sup> a<sup>-1</sup> de H<sup>+</sup> dans les sols forestiers entraînaient à moyen terme la réduction substantielle de la fertilité des sols d'érablières (Courchesne et collab., 2005) et prédisposait les érables au dépérissement (Ouimet et collab., 2008). L'évaluation du pouvoir tampon des écosystèmes forestiers (charge critique) indique que la santé d'une portion du territoire forestier est à risque en raison des dépôts d'acidité encore élevés, principalement dans l'est du Canada (Ouimet et collab., 2006) et le nord-est des États-Unis (McNulty et collab., 2007).

En 2008, le problème des précipitations acides n'est pas encore entièrement résolu. Des réductions supplémentaires des émissions de NO<sub>x</sub>, de NH<sub>3</sub> et de SO<sub>2</sub> seront nécessaires de la part des États-Unis et du Canada pour réduire les

dépôts de H<sup>+</sup> dans les forêts du Québec en deçà de leur charge critique (Moran, 2005).

### Remerciements

Cette étude est une contribution du projet de recherche n° 112310070, de la Direction de la recherche forestière du ministère des Ressources naturelles et de la Faune du Québec (MRNF), sur les charges critiques en acidité des écosystèmes forestiers. Nous tenons à remercier les membres de la Direction de recherche en mesure et analyse d'Environnement Canada pour avoir fourni la compilation 1999-2002 des dépôts atmosphériques totaux à l'échelle du Québec. Nous remercions aussi, pour leur constante collaboration, l'équipe de Ghyslain Jacques, responsable du RSQP et du REMPFAAQ au ministère du Développement durable, de l'Environnement et des Parcs (MDDEP). Le REMPFAAQ est financé par trois ministères provinciaux : le MDDEP, le ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation et le MRNF. ◀

### Références

- BROOK, J., L. ZHANG, D. FRANCO et J. PADRO, 1999. Description and evaluation of a model of deposition velocities for routine estimates of air pollutant dry deposition over North America, Part I: Model development. *Atmospheric Environment*, 33: 5037-5052.
- COLE, D.W. et M. RAPP, 1981. Elemental cycling in forest ecosystems. Dans: D. E. Reichle (édit.). *Dynamic properties of forest ecosystems*. Cambridge University Press, Cambridge, UK., p. 341-409.
- 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 Science Society of America Journal*, 69: 1298-1313.
- DEHAYES, D.H., P.G. SCHALBERG, G.J. HAWLEY et G.R. STRIMBECK, 1999. Acid rain impacts on calcium nutrition and forest health. *BioScience*, 49: 789-800.
- DISE, N.B., E. MATZNER et P. GUNDERSEN, 1998. Synthesis of nitrogen pools and fluxes from European forest ecosystems. *Water Air and Soil Pollution*, 105: 143-154.
- DRISCOLL, C.T., G.B. LAWRENCE, A.J. 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 and inputs, ecosystems effects, and management strategies. *BioScience*, 51: 180-198.

- DUCHESNE, L., J.-D. MOORE et R. OUMET 2005a. Envahissement du hêtre dans les érablières dépérissantes au Québec. *Le Naturaliste canadien*, 130 (1): 56-59.
- DUCHESNE, L., R. OUMET et D. HOULE, 2002. Basal area growth of *Acer saccharum* in relation to acid deposition, stand health and soil nutrients. *Journal of Environmental Quality*, 31: 1676-1683.
- DUCHESNE, L., R. OUMET, J.-D. MOORE et R. PAQUIN, 2005b. Change in structure and composition of maple-beech stands following sugar maple decline in Québec, Canada. *Forest Ecology and Management*, 208: 223-236.
- ENVIRONNEMENT CANADA, 1994. Rapport annuel concernant les ententes fédérales-provinciales sur le programme de lutte contre les pluies acides de l'est du Canada 1994. N<sup>o</sup>. Cat. EN40-11/29-1994F (Disponible à [http://www.ns.ec.gc.ca/reports/pdf/acid\\_rain\\_94\\_f.pdf](http://www.ns.ec.gc.ca/reports/pdf/acid_rain_94_f.pdf); visité le 30 avril 2008), Gatineau, Québec.
- GIEC, 2001. The scientific basis. Dans: Houghton, J.T., Y. Ding, D.J. Griggs, M. Noguer, P.J. van der Linden et D. Xiaosu (édit). Contribution du Groupe de travail I au troisième rapport d'évaluation du Groupe intergouvernemental d'experts sur l'évolution du climat, Cambridge University Press, R.-U.
- HOULE, D. et J.-D. MOORE, 2008. Soil solution, foliar concentrations and tree growth response to three-year of ammonium-nitrate addition in two boreal forests of Québec, Canada. *Forest Ecology and Management*, 255: 2049-2060.
- HOULE, D., R. OUMET, R. PAQUIN et J.-G. LAFAMME, 1999. Interactions of atmospheric deposition with a mixed hardwood and coniferous forest canopy at the Lake Clair Watershed (Duchesnay, Québec). *Revue canadienne de recherche forestière*, 29: 1944-1957.
- HOULE, D., R. PAQUIN, C. CAMIRÉ, R. OUMET et L. DUCHESNE, 1997. Response of the Lake Clair Watershed (Duchesnay, Québec) to changes in precipitation chemistry (1988-1994). *Revue canadienne de recherche forestière*, 17: 1813-1821.
- LIKENS, G.E., F.H. BORMANN, R.S. PIERCE, J.S. EATON et R.E. MUNN, 1984. Long-term trends in precipitation chemistry at Hubbard Brook, New Hampshire. *Atmospheric Environment*, 18: 2641-2647.
- LIKENS, G.E., C.T. DRISCOLL, D.C. BUSO, T.G. SICCAMA, C.E. JOHNSON, G.M. LOVETT, T.J. FAHEY, W.A. REINERS, D.F. RYAN, C.W. MARTIN et S.W. BAILEY, 1998. The biogeochemistry of calcium at Hubbard Brook. *Biogeochemistry*, 41: 89-173.
- MCNULTY, S.G., E.C. COHEN, J.A. MOORE MYERS, T.J. SULLIVAN, et H. LI, 2007. Estimates of critical acid loads and exceedances for forest soils across the conterminous United States. *Environmental Pollution* 149: 281-292.
- MORAN, M., 2005. Les mesures de contrôle des émissions actuelles et proposées: comment les dépôts acides seront-ils affectés? Dans: Évaluation scientifique 2004 des dépôts acides au Canada. Service météorologique du Canada, Environnement Canada, Ottawa, p. 99-162.
- NEG/ECP FOREST MAPPING GROUP, 2007. Mapping forest sensitivity to atmospheric acid deposition. 2006-2007 Annual Report. Committee on the Environment of the Conference of New England Governors and Eastern Canadian Premiers, Halifax, NS.
- NIEMI, D., 2005. Les émissions polluantes en cause dans les dépôts acides en Amérique du Nord. Dans: Évaluation scientifique 2004 des dépôts acides au Canada. Service météorologique du Canada, Environnement Canada, Ottawa, p. 99-162.
- NILLES, M.A. et B.E. CONLEY, 2001. Changes in the chemistry of precipitation in the United States, 1981-1998. *Water Air and Soil Pollution*, 130: 409-414.
- NOËL, J., 2002. Relations entre la végétation, le milieu physique, les perturbations naturelles et le climat dans le Québec méridional. Ministère des Ressources naturelles et de la Faune du Québec, Direction de la recherche forestière, document cartographique, 27 p.
- OUMET, 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.
- OUMET, R. et L. DUCHESNE, 2005. Base cation weathering and release rates from soils and watersheds in three calibrated forest catchments on the Canadian Shield, Québec, Canada. *Revue canadienne de la science du sol*, 85: 245-260.
- OUMET, R., J.-D. MOORE, et L. DUCHESNE, 2008. Effects of experimental acidification and alkalinization on soil, growth and health of *Acer saccharum* Marsh. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science* (sous presse).
- REUSS, J.O. et D.W. JOHNSON, 1985. Effect of soil on the acidification of water by acid deposition. *Journal of Environmental Quality*, 14: 26-31.
- SAS INSTITUTE, 2002. SAS/STAT User's Guide, Version 9.1, Release 9.1 TS Level 1M3 edition. SAS Publishing, Cary, NC, USA.
- SHAW, M., R.J. VET, et L. ZHANG, 2006. Analyzed data fields from the National Atmospheric Chemistry Database (NAChem) and Analysis Facility. Air Quality Research Division, Service météorologique du Canada, Environnement Canada, Toronto, Ontario, ON.
- STODDARD, J., T. TRAAEN et B. SKJELKVÅLE, 2001. Assessment of nitrogen leaching at ICP-Waters sites (Europe and North America). *Water Air and Soil Pollution*, 130: 781-786.
- STUMM, W. et J.J. MORGAN, 1981. Aquatic chemistry. An introduction emphasizing chemical equilibria in natural waters. John Wiley & Sons, New York.
- UBA, 2004. Manual on methodologies and criteria for modelling and mapping critical loads and levels and air pollution effects risks, and trends. Chapter 5. Mapping critical loads. UNECE Convention on Long-range Transboundary Air Pollution, Berlin, Germany.
- U.S. EPA, 1990. Texte complet des *Clean Air Act Amendments* de 1990. (Disponible à <http://www.epa.gov/oar/caa/caaa.txt>; visité le 30 avril 2008), U.S. Environmental Protection Agency.
- USGS, 1999. Global land cover characterization database (GLCC Version 2 - Simple Biosphere Model categories). (Disponible à [http://edc2.usgs.gov/glcc/na\\_int.php](http://edc2.usgs.gov/glcc/na_int.php); visité le 30 avril 2008).
- VET, R., J. BROOK, C. RO, M. SHAW, J. NARAYAN, L. ZHANG, M. MORAN et M. LUSIS, 2005. Les réactions de l'atmosphère suite aux changements dans les émissions. Dans: Évaluation scientifique 2004 des dépôts acides au Canada. Service météorologique du Canada, Environnement Canada, Ottawa, p. 15-98.
- WALLACE, Z.P., G.M. LOVETT, J.E. HART et B. MACHONA, 2007. Effects of nitrogen saturation on tree growth and death in a mixed-oak forest. *Forest Ecology and Management*, 243: 210-218.
- WATMOUGH, S.A., J. AHERNE, C. ALEWELL, P.A. ARP, S.W. BAILEY, T.A. CLAIR, P. DILLON, L. DUCHESNE, C. EIMERS, I. FERNANDEZ, N. FOSTER, T. LARSEN, E.K. MILLER, M. MITCHELL et S. PAGE, 2005. Sulphate, nitrogen and base cation budgets at 21 forested catchments in Canada, the United States and Europe. *Environmental Monitoring and Assessment*, 109:1-36.
- ZHANG, L., J. BROOK et R. VET, 2003. A revised parameterization for gaseous dry deposition in air-quality models. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 3: 2067-2082.
- ZHANG, L., S. GONG, J. PADRO et L. BARRIE, 2001. A size-segregated particle dry deposition scheme for an atmospheric aerosol module. *Atmospheric Environment*, 35: 549-560.
- ZHANG, X., L.A. VINCENT, W.D. HOGG et A. NIITSOO, 2000. Temperature and precipitation trends in Canada during the 20th Century. *Atmosphere-Ocean*, 38: 395-429.