

Les pluies acides et la forêt québécoise

Daniel Houle, Rock Ouimet et Louis Duchesne

La forêt boréale représente un des plus grands écosystèmes au Canada. En dépit de son importance écologique et économique critique, on connaît assez peu les processus qui régissent le cycle des éléments nutritifs et qui influencent la croissance de ce type de forêts. Une telle information est essentielle à une meilleure compréhension du développement à long terme de cette forêt en relation avec les effets de l'exploitation commerciale et des perturbations naturelles et anthropiques telles que les feux, la défoliation par les insectes, les changements climatiques et la pollution atmosphérique, dont notamment les précipitations acides.

On considère qu'une précipitation (pluie, neige ou brouillard) est acide lorsque son pH est inférieur à 5,6, ce qui correspond à l'équilibre de l'eau avec le CO_2 atmosphérique. L'abaissement du pH sous ce seuil est causé principalement par le rejet dans l'atmosphère de substances acidifiantes produites par l'activité anthropique. Les principaux composés responsables de l'acidité des précipitations sont le dioxyde de soufre (SO_2) et les oxydes d'azote (NO_x). Lorsqu'ils sont libérés dans l'atmosphère, ces composés entrent en contact avec des molécules d'eau et forment respectivement de l'acide sulfurique (H_2SO_4) et de l'acide nitrique (HNO_3). Bien que le SO_2 provienne principalement de la combustion du charbon effectuée dans les centrales thermiques et les fonderies, les NO_x proviennent en grande partie de la combustion de l'essence par les véhicules motorisés. On estime généralement que 75 % des pluies acides qui se déversent sur le Québec sont produites à l'extérieur de ses frontières, principalement aux États-Unis, dans la région du Midwest américain, et en Ontario.

Le Québec a instauré, au début des années 1980, des politiques de contrôle des émissions de SO_2 et de NO_x visant particulièrement la protection des milieux aquatiques. En 1991, ces efforts ont permis une réduction de plus de 65 % des émissions québécoises de SO_2 . Les États-Unis et le reste du Canada se sont également engagés à réduire leurs émissions en signant un accord sur la qualité de l'air en 1991. En 1994-1995, l'accord a permis la réduction des émissions de SO_2 de 54 % au Canada et de 50 % aux États-Unis par rapport aux émissions de 1980. Pour ce qui est des NO_x , l'objectif de réduction était mineur, de l'ordre de 10 % pour l'an 2000 (Anonyme, 1996).

Ainsi, on a pu observer au cours des deux dernières décennies, une baisse marquée des concentrations de SO_4 dans les précipitations de nombreux endroits en Amérique du Nord. Les chercheurs s'attendaient donc à une récupéra-

tion des écosystèmes aquatiques et forestiers. Ces écosystèmes ont été largement taxés dans les décennies précédentes et, un peu comme les citoyens après une réduction d'impôt, ils s'attendaient à une amélioration de leur situation. Or, on sait toutefois aujourd'hui que plusieurs lacs et rivières situés en Ontario, au Québec, dans les provinces maritimes et dans le nord-est des États-Unis n'ont pas montré de signes d'amélioration (Stoddard *et al.*, 1999).

Au milieu des années 1990, des chercheurs américains ont sonné l'alarme concernant les sols forestiers. Le D^r Likens et son équipe ont montré que les sols de la forêt expérimentale de Hubbard Brook, située au New Hampshire, avaient perdu plus de 50 % de leur réservoir de cations basiques à la suite de l'effet cumulatif des précipitations acides qui ont affecté ces sols pendant plusieurs décennies (Likens *et al.*, 1996). Ces chercheurs concluaient finalement que la récupération des sols forestiers sera beaucoup plus lente que prévue. Et comme les sols et les dépôts dans le bassin versant qui entourent les eaux de surface influencent grandement la réaction du milieu aquatique, la baisse du pouvoir tampon (capacité à neutraliser un apport d'acidité) du sol a eu comme conséquence de limiter l'amélioration de la qualité des eaux de surface à la forêt de Hubbard Brook et possiblement, à plus grande échelle, dans plusieurs autres régions.

Une diminution du pouvoir tampon du sol signifie aussi, en d'autres termes, une perte de cations basiques dans la partie superficielle du sol, c'est-à-dire dans la zone où les racines des arbres sont principalement localisées. Cette perte de cations basiques fait craindre une perte de fertilité puisque les cations basiques sont des éléments nutritifs importants pour la croissance de la forêt.

Comment les pluies acides agissent-elles pour diminuer la fertilité des sols ?

La figure 1 illustre l'effet des précipitations acides sur le contenu en cations basiques des sols en prenant comme exemple le calcium (Ca). Lorsque l'eau de pluie pénètre dans le sol, les ions H^+ qu'elle contient vont déplacer le Ca disponible (partie de gauche) des sites d'échanges, tout en acidifiant le sol. Le Ca ainsi délogé sera pris en charge par le

Daniel Houle est biologiste;
Rock Ouimet et Louis Duchesne sont ingénieurs forestiers
au ministère des Ressources naturelles du Québec.

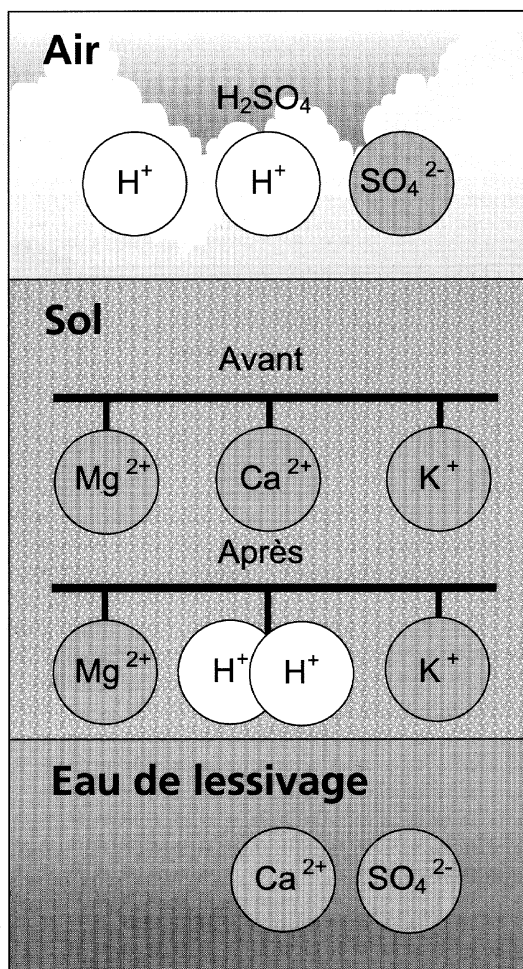


Figure 1. Effet des précipitations acides sur le contenu en cations basiques des sols. Les protons (H^+) apportés par l'acide sulfurique (H_2SO_4) déplacent les ions calcium (Ca^{2+}) des sites d'échanges qui sont ensuite évacués, accompagnés d'un ion sulfate (SO_4^{2-}), avec la solution de sol qui quitte la zone racinaire des sols forestiers.

SO_4 apporté par les précipitations, qui agit alors comme un « accompagnateur de charges positives »; ainsi, le Ca sera exporté hors de la zone racinaire, en direction des cours d'eau. En plus d'acidifier les sol et de diminuer sa réserve en cations basiques, ce mécanisme augmente aussi la biodisponibilité du fer, du manganèse et de l'aluminium qui peuvent atteindre des concentrations toxiques pour la végétation.

Pour la province de Québec, une étude a confirmé que les précipitations acides avaient aussi un effet sur la fertilité des sols. En effet, un bilan en Ca a été réalisé entre 1988 et 1994 pour la zone des racines d'une érablière dans la forêt de Duchesnay par une équipe de recherche du ministère des Ressources naturelles (MRN) (Houle *et al.*, 1997). Les entrées de Ca dans cette zone du sol proviennent des pré-

cipitations ($2,0 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{an}^{-1}$) et des réactions d'altération ($2,4 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{an}^{-1}$). L'altération est le processus par lequel les minéraux contenus dans le sol sont rendus disponibles et renouvellent le réservoir échangeable. Pour leur part, l'immobilisation dans la biomasse ligneuse ($1,9 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{an}^{-1}$) et les pertes par drainage ($7,3 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{an}^{-1}$) constituent les sorties. Ainsi, le bilan net se calcule comme suit :

$$\text{Entrée} - \text{Sortie} = (2,0 + 2,4) - (1,9 + 7,3) = -4,9$$

Ce bilan indique que le réservoir de Ca échangeable dans la zone des racines se vide au rythme de $4,9 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{an}^{-1}$. Étant donné la taille déjà faible de ce réservoir ($200 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1}$), il devrait être épuisé dans environ 40 ans si les pertes se maintiennent au niveau de 1988-1994. Le magnésium (Mg) et le potassium (K), autres minéraux essentiels pour la végétation, affichaient également des bilans annuels négatifs pour la zone des racines. Ces résultats laissent présager une diminution de la productivité forestière à court terme pour cette forêt.

Qu'en est-il pour la forêt boréale québécoise? L'équipe de recherche du MRN se penche actuellement sur la question. Dans les prochaines lignes, on discutera des méthodes de suivi des écosystèmes forestiers et des résultats obtenus à ce jour.

Le monitoring des écosystèmes forestiers et les pluies acides

Les effets des précipitations acides sur les écosystèmes forestiers, tant à l'échelle temporelle que spatiale, ne peuvent être étudiés qu'à partir d'un suivi étroit et continu de plusieurs stations. Les sites d'étude utilisés par le MRN comprennent les stations du « Réseau de mesure des polluants atmosphériques en milieu agricole et forestier au Québec (REMPAFAQ) », les stations du « Réseau de surveillance des écosystèmes forestiers (RESEF) » et finalement trois bassins versants calibrés qui font l'objet d'un échantillonnage plus intensif.

Le RESEF (figure 2) est formé de 29 stations (dont 14 en forêt boréale), établies de façon permanente sur l'ensemble du territoire québécois et réparties dans diverses régions écologiques. Ces stations sont situées dans des zones protégées : terres publiques, parcs, centres éducatifs forestiers, réserves écologiques et propriétés corporatives. Les stations résineuses ont une superficie d'un quart d'hectare et les feuillues, d'un demi-hectare. Elles sont toutes entourées d'une zone de protection de 100 m et situées à au moins 50 km de sources locales de pollution. La plupart se trouvent à moins de 2 km d'un poste d'échantillonnage des polluants atmosphériques et des paramètres climatiques du REMPFAQ.

Chaque station a fait l'objet d'un inventaire écologique détaillé. Chaque arbre y est numéroté et mesuré et son âge est estimé. En mesurant les cernes annuels des tiges (dendrochronologie), on analyse les anomalies de croissance et on reconstitue l'historique du peuplement. Tous les arbres de 9 cm et plus de diamètre à hauteur de poitrine font l'objet d'un bilan de santé. Tous les cinq ans, un bilan nutritif de cha-

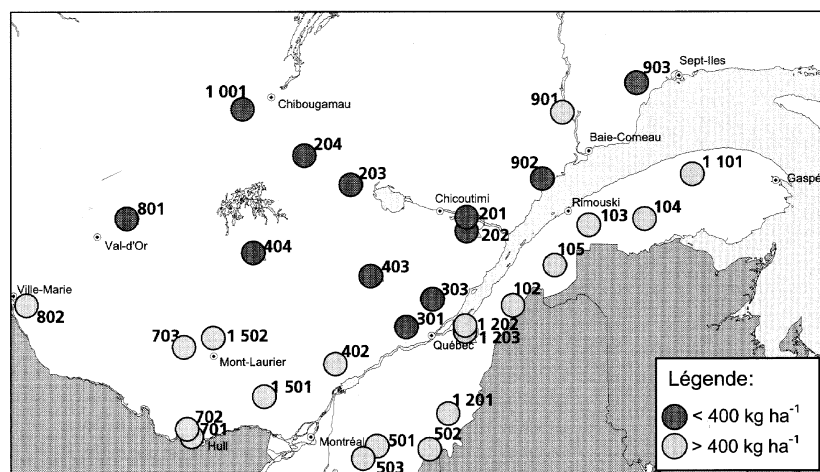
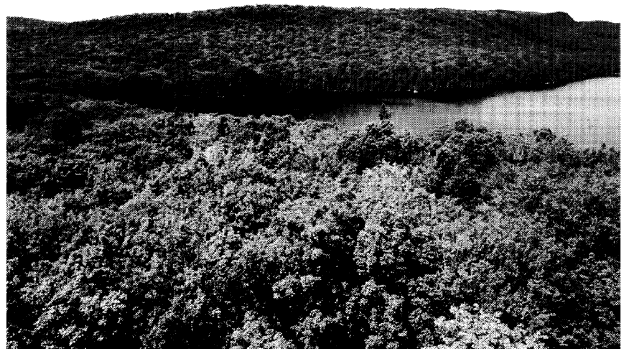


Figure 2. Tailles des réservoirs de calcium échangeable dans les stations du RESEF.

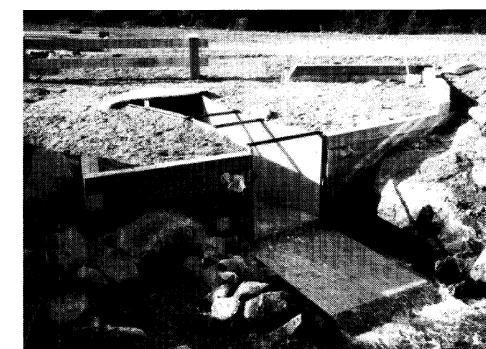
cune des stations est établi en procédant à des analyses chimiques du feuillage et du sol forestier. D'autres variables telles que le taux de dépérissement, le statut nutritif des arbres, la croissance en diamètre et en hauteur, et la régénération sont également suivies, à intervalle de cinq ans.

Parmi les stations du RESEF, trois sites représentatifs des trois grandes zones forestières du Québec (sites indiqués par les symboles en noir sur la figure 2) ont été sélectionnés pour des études de bassins versants calibrés. Le premier, établi en 1987, est une érablière à bouleau jaune et hêtre, localisée à la station forestière de Duchesnay. Le deuxième, dominé par la sapinière à bouleau blanc, a été créé en 1981 à la Forêt Montmorency et pris en charge par la Direction de la recherche forestière du MRN en 1999. Le troisième bassin, en fonction depuis 1997, est situé dans la réserve faunique Ashuapmushuan et il est dominé par la pessière noire à mousses.

Chacun des trois bassins versants comprend trois sites d'échantillonnage principaux: une éclaircie, un peuplement et un exutoire. L'éclaircie est une station de suivi météorologique équivalente à une station du REMPLAFAQ.



Érablière du bassin versant du lac Clair.



Appareil de mesure du débit à l'exutoire.

Les données telles que la température, l'humidité relative, la vitesse et la direction des vents, la radiation solaire et les précipitations sont mesurées en continu et une moyenne horaire est enregistrée à l'aide d'un système automatique d'acquisition de données. Des échantillons d'eau de précipitation y sont également prélevés hebdomadairement et analysés chimiquement. Ces échantillons d'eau nous permettent d'évaluer la quantité d'éléments que reçoit la forêt.

Le peuplement est une parcelle de forêt représentative du bassin versant et dont les dimensions sont similaires à celles du RESEF. Les eaux de lessivage du feuillage et celles du sol sont aussi recueillies hebdomadairement.

De plus, la température et l'humidité du sol sont mesurées en continu grâce à un système automatisé d'acquisition de données.

L'exutoire est le point de sortie de l'eau d'écoulement de l'ensemble du bassin versant. Le débit y est mesuré en continu afin d'établir un bilan hydrologique pour le bassin. Des échantillons y sont aussi prélevés et analysés hebdomadairement afin de déterminer les tendances dans la qualité de l'eau, ainsi que pour calculer des bilans en éléments nutritifs pour le bassin versant entier.

Jusqu'ici, les résultats obtenus à l'aide de ces stations nous ont permis de faire des constats préliminaires sur la santé de la forêt boréale.

Les réservoirs de cations basiques dans les sols forestiers

Une étude préliminaire de la taille des réservoirs de Ca échangeable sur l'ensemble des stations du RESEF nous laisse croire qu'une grande partie de la forêt boréale pourrait être sensible aux effets des précipitations acides (figure 2). En effet, plusieurs de ces stations ont des réservoirs de Ca



Lysimètre à tension servant à récolter l'eau du sol.

échangeable inférieurs à 400 kg ha^{-1} , ce qui peut être considéré comme de petits réservoirs contrairement aux stations situées plus au sud. En plus de ces appréhensions, les exportations de cations échangeables attribuables au prélèvement de la matière ligneuse lors des activités forestières pourraient aussi contribuer à la baisse de fertilité de ces sites. Des actions proportionnelles à l'importance de la réduction de la taille des réservoirs des cations basiques échangeables seraient à adopter sans délai afin de respecter le développement durable. Par exemple, dans les secteurs peu affectés, l'ébranchage sur le parterre de coupe pourrait permettre de conserver une plus grande quantité de cations basiques. Par contre, dans les secteurs fortement affectés, d'autres mesures, comme la fertilisation pourraient être envisagées.

Les charges critiques en S et N et leurs effets sur la production ligneuse

Afin de connaître l'étendue de l'effet des précipitations acides, une estimation préliminaire des charges critiques a été réalisée pour l'ensemble des stations du RESEF (Ouimet *et al.*, 2001). La « charge critique » est définie comme « la quantité maximale d'apport atmosphérique de S et de N qui ne causera pas de dommages significatifs à long terme aux écosystèmes et à leurs fonctions d'après les connaissances actuelles ». Nous avons donc vérifié si les apports atmosphériques en acidité dépassaient la capacité de neutralisation de ces écosystèmes.

Les charges critiques ont été calculées en utilisant un modèle de conservation de masse qui requiert des données de dépôt annuel des précipitations et de sa chimie et une description détaillée des propriétés des sols forestiers. Le modèle requiert également des données sur les besoins nutritionnels de la végétation. Ce modèle a déjà été utilisé pour estimer les charges critiques de S et de N pour les forêts de la Scandinavie et d'Europe. Le principal critère retenu liant la réaction de la végétation à l'acidification du sol est le rapport $(\text{Ca} + \text{K} + \text{Mg})/\text{Al}$ de l'eau du sol. Lorsque le rapport de ces éléments est inférieur à une valeur de un (1), nous observons une baisse de croissance marquée pour les principales essences commerciales du Québec. En connaissant l'impact des dépôts acides sur ce rapport, il est alors possible d'évaluer les charges critiques pour un écosystème forestier donné.

L'estimation des charges critiques indique que 18 stations du RESEF reçoivent des dépôts acides en excès (dépassement $> 0 \text{ keq ha}^{-1} \text{ an}^{-1}$; figure 3). Les peuplements affectés sont principalement ceux de la forêt boréale situés sur le bouclier canadien. Par contre, les stations situées en Abitibi, au Bas-Saint-Laurent et en Gaspésie ne seraient pas affectées par les dépôts actuels.



Collecteur automatique des précipitations.



Profil de sol.

Afin de vérifier si la croissance de la forêt est associée au dépassement des charges critiques, dans un rayon de 50 km de chacune des stations, nous avons sélectionné les placettes-échantillons permanentes d'inventaire forestier du MRN dont les caractéristiques de composition en essences, du dépôt de surface et du drainage étaient similaires à celles du RESEF et nous avons déterminé leur accroissement annuel courant (AAC) entre les années 1970 et 1990. Les résultats démontrent, tant chez les peuplements feuillus que résineux (figure 4), que les peuplements se situant au-delà de leur charge critique ont un accroissement annuel courant (AAC) d'environ $1,5 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1} \text{ an}^{-1}$ inférieur à ceux dont la charge critique n'est pas dépassée.

Ces résultats suggèrent que les pluies acides peuvent affecter la croissance d'une partie des forêts du Québec, ce qui pourrait éventuellement entraîner une diminution de la productivité ligneuse de ces écosystèmes.

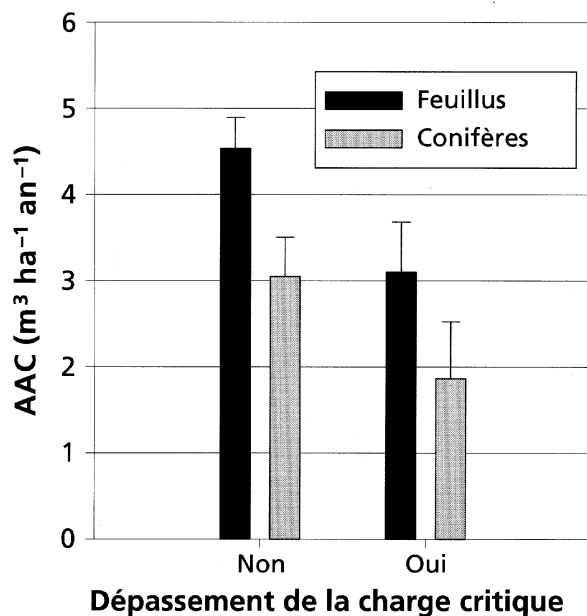


Figure 4. Comparaison de l'accroissement annuel courant (AAC) entre 1972 et 1990 de placettes permanentes d'inventaire forestier localisées à proximité des stations du RESEF, séparées selon le dépassement de la charge critique ou non.

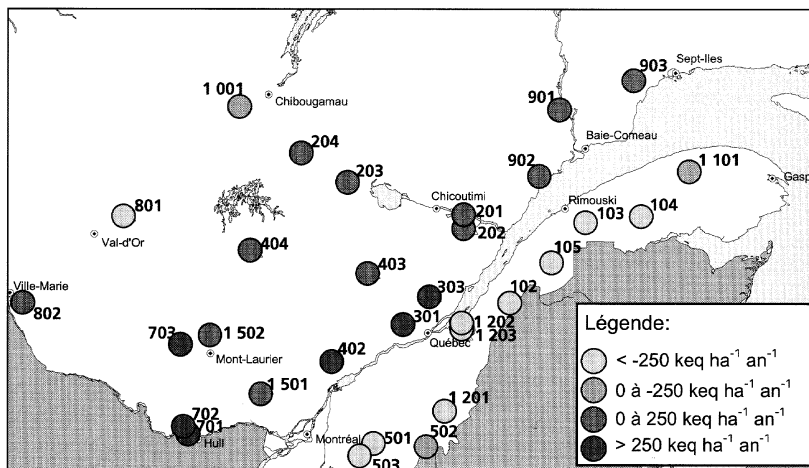


Figure 3. Excédents de charges critiques calculés pour les stations du RESEF. Les valeurs supérieures à 0 kilo équivalent (keq) indiquent que la charge critique est dépassée. Une valeur négative de 100 keq, par exemple, indique que le sol peut recevoir 100 keq d'acidité de plus avant que la charge critique ne soit atteinte.

Conclusion

Les résultats de recherche suggèrent que des grands secteurs de la forêt boréale peuvent encore être affectés par les précipitations acides. Malgré l'amélioration de la qualité des dépôts atmosphériques, la récupération des écosystèmes boréaux risque d'être longue. La poursuite des recherches permettra de mieux comprendre la réaction de ces écosystèmes. Dans le cadre du développement forestier durable, une attention particulière doit être portée pour tenir compte de la possibilité de baisse de fertilité des sols à long terme. Seule une meilleure connaissance de la forêt boréale et de sa fertilité permettra de mieux répondre aux enjeux auxquels l'aménagiste est confronté dans l'aménagement durable de la forêt boréale. ◀

Références

- Anonyme, 1996. Accord Canada - États-Unis sur la qualité de l'air. Rapport d'étape 1996. Commission mixte internationale, Ottawa. Rapport no. En40-388/1996F, 88 p.
- Houle, D., R. Paquin, C. Camiré, R. Ouimet, and L. Duchesne, 1997. Response of the Lake Clair Watershed (Duchesnay, Quebec) to changes in precipitation chemistry (1988-1994). *Can. J. For. Res.*, 27: 1813-1821.
- Ouimet, R., L. Duchesne, D. Houle and P.A. Arp, 2001. Critical loads of atmospheric S and N deposition and current exceedances for Northern temperate and boreal forests in Quebec. *Water Air Soil Pollut. Focus*, 1(1/2): 119-134.
- Likens, G.E., C.T. Driscoll, and D.C. Buso, 1996. Long-term effects of acid rain: response and recovery of a forest ecosystem. *Science* (Washington, D.C.), 272: 244-246.
- Stoddard, J.L., D.S. Jeffries, A. Lukewille, T.A. Clair, P.J. Dillon, C.T. Driscoll, M. Forsius, M. Johannessen, J.S. Kahl, J.H. Kellog, A. Kemp, J. Mannio, D. Monteith, P.S. Murdoch, S. Patrick, A. Rebsdorf, B.L. Skjelkvale, M.P. Stainton, T. Traaen, H. van Dam, K.E. Webster, J. Wieting, and A. Wilander, 1999. Regional trends in aquatic recovery from acidification in North America and Europe. *Nature* (Lond.), 401:575-578.