Document généré le 18 juil. 2025 17:24

Géographie physique et Quaternaire

Bilans élémentaires holocènes et altération des minéraux dans trois sols forestiers du Québec méridional

Elemental budgets for the Holocene and mineral weathering in three forest soils from Southern Québec

Balance de elementos del holoceno y alteración de la composición mineral en tres suelos forestales del Québec meridional

François Courchesne, Jean-Pierre Hallé et Marie-Claude Turmel

Volume 56, numéro 1, 2002

URI : https://id.erudit.org/iderudit/008601ar
DOI : https://doi.org/10.7202/008601ar

Aller au sommaire du numéro

Éditeur(s)

Les Presses de l'Université de Montréal

ISSN

0705-7199 (imprimé)
1492-143X (numérique)

Découvrir la revue

Citer cet article

Courchesne, F., Hallé, J.-P. & Turmel, M.-C. (2002). Bilans élémentaires holocènes et altération des minéraux dans trois sols forestiers du Québec méridional. *Géographie physique et Quaternaire*, *56*(1), 5–17. https://doi.org/10.7202/008601ar

Résumé de l'article

Nous avons calculé les flux élémentaires holocènes et le taux d'altération historique dans trois sols forestiers par la méthode du bilan de masse de Brimhall *et al.* (1991 a, b). Les sols (Hermine : HER ; Rouyn-1 : RN1 ; Rouyn-4 : RN4) se distinguent par leur matériel d'origine et leur niveau d'exposition aux dépôts atmosphériques de métaux traces. L'indice de changement volumétrique (ICV) calculé avec Zr est positif (expansion) dans RN1 et dans les horizons B de HER et est positivement corrélé à la concentration en C organique et en oxydes de Al et Fe. L'analyse des profils permet de dégager trois groupes d'éléments. Un premier groupe (Ca, K, Mg, Mn, Na, Si) montre des concentrations qui diminuent de l'horizon C vers la surface du profil en réponse à l'intensification de l'altération des minéraux. Le second groupe (Al, Fe, P, Ti, Cr, Ni) présente des zones d'enrichissement dans les horizons B et des pertes dans le Ae. Ce patron mixte reflète l'effet combiné de la formation d'oxydes (Al, Fe, Ti) et de la rétention des éléments par ces oxydes (P, Cr, Ni). Le troisième groupe (Cd, Cu, Pb, Zn) affiche des flux fortement positifs dans les horizons de surface en réponse à la contamination atmosphérique des sols et à la bioconcentration des métaux traces. Les taux d'altération holocènes moyens des éléments majeurs correspondent très bien aux taux publiés pour une variété de sols forestiers de milieux comparables. Le classement des éléments en ordre de mobilité relative décroissante est : Mn > Mg > Ca > Na > K > P > Si > Al > Fe > Ti.

Tous droits réservés © Les Presses de l'Université de Montréal, 2002

Ce document est protégé par la loi sur le droit d'auteur. L'utilisation des services d'Érudit (y compris la reproduction) est assujettie à sa politique d'utilisation que vous pouvez consulter en ligne.

https://apropos.erudit.org/fr/usagers/politique-dutilisation/

Cet article est diffusé et préservé par Érudit.

Érudit est un consortium interuniversitaire sans but lucratif composé de l'Université de Montréal, l'Université Laval et l'Université du Québec à Montréal. Il a pour mission la promotion et la valorisation de la recherche.

https://www.erudit.org/fr/

G*éographie physique et Quaternaire*, 2002, vol. 56, nº 1, p. 5-17, 5 fig., 6 tabl.

BILANS ÉLÉMENTAIRES HOLOCÈNES ET ALTÉRATION DES MINÉRAUX DANS TROIS SOLS FORESTIERS DU QUÉBEC MÉRIDIONAL

François COURCHESNE, Jean-Pierre HALLÉ et Marie-Claude TURMEL, Département de géographie, Université de Montréal, C.P. 6128, Succursale Centre-ville, Montréal, Québec H3C 3J7.

RÉSUMÉ Nous avons calculé les flux élémentaires holocènes et le taux d'altération historique dans trois sols forestiers par la méthode du bilan de masse de Brimhall *et al.* (1991 a, b). Les sols (Hermine : HER ; Rouyn-1 : RN1 ; Rouyn-4 : RN4) se distinguent par leur matériel d'origine et leur niveau d'exposition aux dépôts atmosphériques de métaux traces. L'indice de changement volumétrique (ICV) calculé avec Zr est positif (expansion) dans RN1 et dans les horizons B de HER et est positivement corrélé à la concentration en C organique et en oxydes de Al et Fe. L'analyse des profils permet de dégager trois groupes d'éléments. Un premier groupe (Ca, K, Mg, Mn, Na, Si) montre des concentrations qui diminuent de l'horizon C vers la surface du profil en réponse à l'intensification de l'altération des minéraux. Le second groupe (Al, Fe, P, Ti, Cr, Ni) présente des zones d'enrichissement dans les horizons B et des pertes dans le Ae. Ce patron mixte reflète l'effet combiné de la formation d'oxydes (Al, Fe, Ti) et de la rétention des éléments par ces oxydes (P, Cr, Ni). Le troisième groupe (Cd, Cu, Pb, Zn) affiche des flux fortement positifs dans les horizons de surface en réponse à la contamination atmosphérique des sols et à la bioconcentration des métaux traces. Les taux d'altération holocènes moyens des éléments majeurs correspondent très bien aux taux publiés pour une variété de sols forestiers de milieux comparables. Le classement des éléments en ordre de mobilité relative décroissante est : Mn > Mg > Ca > Na > K > P > Si > Al > Fe > Ti.

ABSTRACT *Elemental budgets for the Holocene and mineral weathering in three forest soils from Southern Québec*. We calculated elemental fluxes for the Holocene and historical weathering rates in three forested watersheds using the method proposed by Brimhall *et al.* (1991 a, b). The soils (Hermine : HER; Rouyn-1 : RN1; Rouyn-4 : RN4) were selected because they formed in contrasting parent materials and were exposed to different levels of trace metal deposition from the atmosphere. The strain value (ICV) calculated using Zr is positive (dilation) in RN1 and in the B horizons of HER. The strain is positively correlated to the organic C concentration and to Al and Fe oxide contents. The analysis of soil profiles further allows the identification of three element groups. A first group (Ca, K, Mg, Mn, Na, Si) shows concentrations decreasing from the C horizon to the surface of the profile because of increasing mineral weathering. The second group (Al, Fe, P, Ti, Cr, Ni) is enriched in the B horizons while being depleted in the Ae. This mixed pattern reflects the combined effect of oxide formation (Al, Fe, Ti) and of elemental retention on these oxides (P, Cr, Ni). The third group (Cd, Cu, Pb, Zn) refers to elements presenting highly positive fluxes in the surface horizons in response to the atmospheric deposition and bioconcentration of trace metals. The mean weathering rates estimated for major elements are in agreement with rates published for a range of forested soils from similar environments. Classifying the elements in order of decreasing relative mobility gives: Mn > Mg > Ca > Na > K > P > Si > Al > Fe > Ti.

RESUMEN *Balance de elementos del holoceno y alteración de la composición mineral en tres suelos forestales del Québec meridional*. Se calcularon los flujos de elementos del holoceno y el grado de alteración histórica en tres suelos forestales utilizando el método de balance de la masa de Brimhall y col. (1991 a, b). Los suelos (Hermine: HER; Rouyn-1: RN1; Rouyn-4: RH4) se distinguen por su material de origen y su nivel de exposición a depósitos atmosféricos de oligoelementos. El índice de cambio volumétrico (ICV) calculado usando Zr es positivo (en expansión) en RN1 y el los horizontes B de HER y esta positivamente relacionado con la concentración de C orgánico y de óxidos de Al y Fe. El análisis de los perfiles permite poner en evidencia tres grupos de elementos. El primer grupo (Ca, K, Mg, Mn, Na, Si) muestra concentraciones que disminuyen en el horizonte C hacia la superficie del perfil en respuesta a la intensificación de la alteración de los minerales. El segundo grupo (Al, Fe, K, Ti, Cr, Ni) presenta zonas de enriquecimiento en los horizontes B y de empobrecimiento en los Ae. Este patrón mixto refleja el efecto combinado de la oxidación (Al, Fe, Ti) y de la retención de elementos por dichos óxidos (P, Cr, Ni). El tercer grupo (Cd, Cu, Pb, Zn) presenta un flujo fuertemente positivo en los horizontes superficiales como consecuencia de la contaminación atmosférica de los suelos y de la bioconcentración de oligoelementos. La tasa holocena media de los elementos mayores corresponde bien a la tasa reportada para una gran variedad de suelos forestales en sitios comparables. La clasificación de los elementos en orden de movilidad relativa decreciente es: Mn> Mg> Ca> Na> K> P> Si> Al> Fe>Ti.

Manuscrit reçu le 10 janvier 2002 ; manuscrit révisé accepté le 17 février 2003
Adresse électronique : francois.courchesne@umontreal.ca

INTRODUCTION

L'altération des minéraux est un mécanisme biogéochimique qui joue un rôle crucial dans l'évolution, la diversification et la durabilité des écosystèmes terrestres et aquatiques. En effet, ce mécanisme assure, au moins partiellement, la restauration de la réserve en nutriments disponibles dans les sols (Chadwick *et al*., 1999), participe à la neutralisation des composés acides déposés par voie atmosphérique (Johnson *et al*., 1981), contribue à régulariser la composition chimique des eaux souterraines et de surface (Markewitz *et al*., 2001), tamponne, à l'échelle géologique, les fluctuations du contenu atmosphérique en CO_2 et, de là, les variations des conditions climatiques (White et Blum, 1995) et concourt au façonnement des paysages et au développement des sols (Chesworth, 1980 ; Paton *et al*. 1995).

L'altération des minéraux est un processus lent et sa mesure constitue donc une tâche difficile qui pose plusieurs problèmes techniques et scientifiques. La diversité des approches méthodologiques, directes ou indirectes, utilisées afin d'estimer l'altération reflète d'ailleurs cette difficulté. Ainsi, des taux d'altération ont été évalués par le biais de méthodes indirectes dont les plus connues sont les expériences de dissolution en laboratoire (Chou et Wollast, 1984), le suivi de la transformation *in situ* de minéraux de références insérés dans des sacs microporeux et ensuite placés dans le sol (Ranger *et al*., 1991), la modélisation géochimique (Sverdrup et Warfvinge, 1992) ainsi que la mesure du ratio isotopique de Sr ($^{87}Sr/^{86}Sr$) pour diverses sources de cations (Bailey *et al*., 1996). Deux approches plus directes ont aussi été abondamment utilisées, soit la méthode du budget annuel intrant-extrant (Velbel, 1985) et celle du bilan élémentaire (ou bilan de masse) en profil (Brimhall *et al*., 1991b). Plusieurs auteurs ont toutefois fait état d'écarts majeurs entre les taux d'altération obtenus sur le terrain et ceux provenant d'études en laboratoire, les seconds étant parfois supérieurs aux premiers par plusieurs ordres de grandeur (Velbel, 1990 ; Malmström *et al*., 2000). Par ailleurs, selon la méthode employée, l'information acquise sur les taux d'altération portera sur des échelles spatiales et temporelles tout à fait différentes. Par exemple, la méthode du budget annuel intrant-extrant donne un taux d'altération contemporain à l'échelle annuelle et pour l'ensemble de la superficie d'un bassin versant dans la mesure où les réservoirs (sols, végétation) sont en équilibre stationnaire (Pačes, 1986 ; Taylor et Velbel, 1991 ; Likens et Bormann, 1995). La technique du bilan élémentaire livre quant à elle un taux d'altération historique pour un profil de sol donné et pour une période dont l'étendue peut varier de la centaine au million d'années selon le type de chronoséquence étudiée (Bain *et al*., 1993 ; White *et al*., 1996 ; Lichter, 1998 ; Egli *et al*., 2001). Enfin, outre l'approche proposée par Brimhall et ses collaborateurs (Chadwick *et al*., 1990 ; Brimhall *et al*.,1991a, 1991b ; Jersak *et al*., 1995), aucune autre méthode n'intègre l'effet des changements volumétriques survenant pendant la pédogenèse sur l'estimation des flux élémentaires et des taux d'altération.

Notre connaissance des taux d'altération dans les sols forestiers du Bouclier canadien et de l'est canadien est extrêmement fragmentaire. Plusieurs travaux ont porté sur l'âge et les caractéristiques des profils d'altération du Québec méridional (Bouchard et Pavich, 1989 ; Bédard et David, 1991). Toutefois, très peu d'études sont disponibles sur les taux actuels ou historiques d'altération ou sur la mesure des flux élémentaires dans ces sols. Dans le bassin de Plastic Lake, en Ontario, Kirkwood et Nesbitt (1991) ont utilisé la méthode du bilan élémentaire afin d'estimer des taux d'altération pour les cations majeurs (Al, Ca, Fe, K, Mg, Na, Si) dans un substrat gneissique. Ils ont noté que les taux historiques d'altération étaient supérieurs aux taux actuels et ont proposé que la réaction de solutions de sols acides avec des minéraux tels que la biotite et les feldspaths en était responsable. Des budgets annuels intrants–extrants (Ca, K, Mg, Na) sont disponibles pour les bassins versants de Nashwaak (Jewett *et al*., 1995) et du ruisseau Catamaran , au Nouveau-Brunswick (Bouchard et Jolicoeur, 2000) et pour celui de Turkey Lakes, en Ontario (Foster *et al*., 1992). Cependant, les taux d'altération n'ont pas été calculés en raison de l'incertitude quant à la magnitude des autres flux, notamment le taux d'emmagasinage des nutriments par la végétation et les changements nets sur le complexe d'échange des sols. Enfin, Houle *et al*. (1997) ont évalué les flux en Ca, Mg et K résultants de l'altération des minéraux pour le bassin du Lac Clair (Québec). Ces valeurs ont été obtenues à l'aide du modèle géochimique PROFILE et n'ont pas été comparées à des mesures de terrain.

Dans ce contexte, l'objectif de cette étude est d'estimer le taux d'altération historique (Holocène) de sols forestiers du Québec méridional en se basant sur la mesure des flux élémentaires. À cette fin, nous avons choisi la méthode du bilan élémentaire proposée par Brimhall *et al*. (1991a, b) afin d'intégrer l'effet des changements volumétriques des sols dans le calcul des taux d'altération. L'approche méthodologique retenue vise à calculer les taux d'altération de trois sols qui se distinguent par la nature de leur matériel d'origine (texture et minéralogie) et leur niveau d'exposition aux dépôts atmosphériques de métaux traces. Ce recours à une diversité d'environnements pédologiques permettra de proposer des hypothèses visant à expliquer les différences de taux d'altération entre les sols ainsi que la polarité et la magnitude des flux élémentaires observés.

MÉTHODES

LES SITES À L'ÉTUDE

Les échantillons ont été prélevés dans trois profils de sols du Québec méridional (tabl. I). Le premier profil est situé dans le bassin versant expérimental de l'Hermine (HER) localisé sur le Bouclier canadien, à 80 km au nord de Montréal. La végétation arborescente de l'Hermine est dominée par l'érable à sucre (*Acer saccharum* Marsh) et l'érable rouge (*Acer rubrum*) ; les espèces accompagnatrices sont le hêtre à grandes feuilles (*Fagus grandifolia* Ehrh.) et le bouleau jaune (*Betula alleghaniensis* Britton). Cette forêt a été entièrement coupée ou brûlée au début du XX^{e} siècle. La pédogenèse a mené à la formation de Podzols appartenant aux grands groupes humo-ferrique et ferro-humique (Soil Classification Working Group, 1998) et dont le développement date du retrait des glaces wisconsiniennes, il y a environ 11 000 ans (Dyke et Priest, 1987). Ces sols se forment dans un till anorthositique sableux.

TABLEAU I

Caractéristiques des sites à l'étude

Site	Coordonnées	Sol*	Végétation	Matériel d'origine	Minéralogie¶	Sable %	Argile %	T§ °C	H_2O^{ψ} mm
Hermine (HER)	74° W 46° N	Podzol	*Acer saccharum*	till sableux	Qz, Pl, Kf, Am	48	12	4	1 100
Rouyn-1 (RN1)	78° W 48° N	Luvisol	*Populus tremuloïdes*	argile lacustre	Qz, Ve, Pl, Ch, Am, Mi	2	60	1	890
Rouyn-4 (RN4)	78° W 48° N	Brunisol	*Pinus resinosa*	sable fluvioglaciaire	Qz, Ch, Pl, Am	82	4	1	890

* Classification selon Soil Classification Working Group (1998)

¶ Minéraux de la fraction argileuse (< 2 μm) de l'horizon C en ordre d'abondance relative où Qz = quartz, Pl = plagioclase, Kf = feldspath potassique, Am = amphibole, Ve = vermiculite, Ch = chlorite, Mi = micas

§ Température annuelle moyenne de l'air

ψ Précipitation annuelle moyenne

Les deux autres sites sont localisés dans la région de Rouyn-Noranda, à 500 km au nord de Montréal. Le profil RN1 a été prélevé sous un couvert de peuplier faux-trembles (*Populus tremuloïdes*) à 0,5 km au sud-est de la fonderie Horne, directement dans l'axe des vents dominants. Cette usine exploitée depuis 1922 sert à la transformation du minerai de cuivre. Le peuplement forestier a ici moins de 30 ans et succède à une coupe. Les sédiments argileux du paléolac Ojibway-Barlow constituent le matériel originel de sols appartenant à l'ordre des Luvisols (Soil Classification Working Group, 1998). Le troisième profil (RN4) provient d'un dépôt fluvioglaciaire sableux localisé à 10 km au sud-est de l'usine Horne et colonisé exclusivement par un peuplement de pin rouge (*Pinus resinosa*) dont l'âge avoisine 100 ans. Ces sols de texture grossière sont classés dans l'ordre des Brunisols. Dans l'ensemble de la région de Rouyn-Noranda, la formation des sols se poursuit depuis environ 8 000 ans par suite de la vidange du Lac Ojibway-Barlow (Dyke et Priest, 1987). Le choix de ces trois profils permet de couvrir une gamme de types de matériaux originels (texture et minéralogie) et de niveaux d'exposition aux dépôts atmosphériques de métaux traces.

À chacun des trois sites, un profil de sol a été creusé et tous les horizons génétiques, incluant l'horizon C, ont été échantillonnés. Afin de tenir compte de la variabilité spatiale des sols, une série de quatre prélèvements de volume équivalent (500 à 3 500 cm^3, selon le type d'horizon) ont été réalisés pour chaque horizon sur l'une des faces du profil de sol. Pour chaque horizon, les quatre prélèvements ont ensuite été mélangés à l'aide d'ustensiles de plastique avant d'en extraire un sous-échantillon composite d'environ 500 g. Les sols ont été entreposés dans des sacs stériles puis transportés au laboratoire où ils ont été séchés à l'air et tamisés à 2 mm avant les analyses chimiques.

LES ANALYSES DE LABORATOIRE

Le pH dans H_2O (pH_{H2O}) a été mesuré en utilisant un rapport sol : solution de 1 : 2 (Hendershot *et al.*, 1993) alors que la concentration en C organique a été obtenue par combustion à l'aide d'un analyseur de C total LECO. La concentration élémentaire totale en Al, Ca, Fe, K, Mg, Mn, Na, P, Si, Ti et Zr de chaque horizon de sol a été mesurée par fluorescence des rayons X (XRF) après homogénéisation de l'échantillon par broyage dans un mortier en agate et fusion avec $LiBO_2$ à 1 000 °C (Jones, 1982). Des extractions au pyrophosphate de Na, à l'oxalate d'ammonium acide et au dithionite-citrate-bicarbonate (DCB) ont aussi été effectuées pour Al et Fe (Ross et Wang, 1993). Le pyrophosphate extrait les complexes organométalliques, alors que les formes métalliques inorganiques amorphes et cristallines sont estimées, respectivement, par les extractions à l'oxalate et au DCB. Dans le cas des éléments traces Cd, Cr, Cu, Ni, Pb et Zn, la concentration extractible dans l'acide (mélange 2 : 1 de HNO_3 50 % et de HCl 50 %) a été dosée à l'aide d'une torche au plasma (ICP-AES) selon la méthode du U.S. EPA (1992). Toutes les analyses chimiques ont été faites en triplicata.

La granulométrie des horizons minéraux a été établie par hydrométrie en présence de 5 g L^{-1} de métaphosphate de Na et après la destruction des enrobements (Gee et Bauder, 1986). La densité des matériaux de sol a été évaluée par gravimétrie après séchage à 40 °C pendant trois jours d'un échantillon de volume connu (150 cm^3) prélevé en triplicata à l'aide d'un contenant de métal (Culley, 1993). Pour cette méthode, la mesure de la densité se limite aux horizons ayant une épaisseur de plus de 5 cm. La composition minéralogique de la fraction argileuse (< 2 μm) des principaux horizons a été déterminée par diffraction des rayons X (XRD), après dissolution des enrobements avec une solution de dithionite citrate bicarbonate (DCB) selon la méthode de Whittig et Allardice (1986). Les échantillons ont ensuite été saturés avec Mg, Mg-éthylène glycol ou K à 25 °C (K-25) et ont été montés sur une lame de verre par sédimentation des 40 mg de sol contenus dans une suspension aqueuse de 0,5 mL. Les lames saturées au K ont été analysées à l'état sec et après chauffage à 300 et 550 °C (K-550). Pour la fraction de taille inférieure à 20 μm (limons fins et argiles), des lames orientées et non saturées ont aussi été préparées. Tous les diffractogrammes ont été obtenus à l'aide d'un diffractomètre Rigaku Miniflex (radiation Cu-Kα actionné à une vitesse de 2° (2θ) min^{-1}. L'intensité des pics de chacun des minéraux (Ix) a été normalisée en fonction de l'intensité du pic 100 (d = 0,426 nm) du quartz (Iqz) afin d'obtenir une abondance relative pour

chaque phase minérale. Cette normalisation (où I = Ix / Iqz) repose sur le postulat selon lequel l'altération du quartz dans ces sols est très limitée, voire nulle, et donc que l'abondance absolue du quartz dans les assemblages minéralogiques d'un horizon donné est constante, compte tenu de l'erreur analytique (Amonette et Zelazny, 1994).

LE CALCUL DES BILANS ÉLÉMENTAIRES

Le calcul des flux et des bilans élémentaires à long terme dans les sols a été réalisé selon le méthode de Brimhall *et al.* (1991b). Cette approche est fondée sur un abondant corpus d'observations démontrant le rôle crucial de certains processus pédogénétiques tels que l'éluviation, la bioturbation, l'incorporation de matière organique et l'altération des minéraux sur les changements volumétriques survenant en cours de pédogenèse (Johnson et Watson-Stegner, 1987). Ces processus peuvent entraîner l'expansion ou la dilatation des horizons (gain volumétrique net dans au moins une des trois dimensions) ou, au contraire, le tassement des matériaux du sol. Le résultat global de l'ensemble des processus est donc la déformation progressive des profils pendant leur développement. Ainsi, le modèle proposé par Brimhall *et al.* (1991b) a-t-il été développé afin d'intégrer explicitement l'impact des processus pédogénétiques sur les changements volumétriques et, par voie de conséquence, sur le calcul des flux et des bilans élémentaires.

L'utilisation de la méthode du bilan élémentaire repose sur le respect de trois postulats, soit : 1) le matériel d'origine d'un profil de sol donné est uniforme au plan textural et minéralogique au moment de sa mise en place, 2) les propriétés de l'horizon C actuel sont identiques à celles du matériel d'origine et 3) le profil contient un élément immobile, tel Zr, ayant un comportement connu et que l'on peut utiliser comme traceur.

Le bilan élémentaire absolu (δ) ou relatif (τ) est calculé à l'échelle d'un profil pour un élément *j* (Al, C, Ca, Cd, Cr, Cu, Fe, K, Mg, Mn, Na, Ni, P, Pb, Si, Ti et Zn). Il représente le gain ou la perte de matière par rapport à son contenu initial dans un matériel originel homogène et non altéré d'épaisseur connue. Ainsi, le bilan élémentaire absolu pour un horizon donné est défini selon :

$$\delta_{j,x} = [(\rho_x C_{j,x}) (\varepsilon_{zr,x} + 1) - (\rho_c C_{j,c})] \quad (1)$$

où le bilan absolu δ (g m^{-3} de matériel originel) de l'élément *j* est lié à la densité ρ (kg m^{-3}) des matériaux, à la concentration totale *C* de l'élément *j* (g kg^{-1}) et à l'indice de changement volumétrique (ICV) sans dimension ε. Les indices x et c représentent, respectivement, un horizon donné du profil ou le matériel d'origine.

De même, le bilan élémentaire relatif τ (unité fractionnaire relative au contenu initial dans le matériel d'origine) de l'élément *j* est obtenu pour un horizon donné selon :

$$\tau_{j,x} = [(\rho_x C_{j,x}) / (\rho_c C_{j,c})] (\varepsilon_{zr,x} + 1) - 1 \quad (2)$$

Une valeur positive de τ suggère qu'il y a eu ajout de l'élément *j*. Une valeur négative signifie une perte nette. La valeur de l'ICV ε est calculée à l'aide de la concentration totale C_{Zr} de Zr (mg kg^{-1}) dans le matériel d'origine (c) et dans un horizon de sol (x) selon :

$$\varepsilon_{zr,x} = [(\rho_c C_{zr,c}) / (\rho_x C_{zr,x})] - 1 \quad (3)$$

L'expansion de l'horizon est soulignée par une valeur positive de ε ; ce ratio est négatif s'il y a tassement. Une valeur nulle reflète l'absence de changement net de volume.

La sommation des flux absolus de tous les horizons d'un profil de sol, pondérés en fonction de la profondeur des horizons et de leur densité, permet d'obtenir le bilan élémentaire total par unité de surface (kg ha^{-1} ou g ha^{-1}) et ce, pour l'ensemble de la période s'étant écoulée depuis le début de la formation du sol. Les bilans élémentaires annuels (kg ha^{-1} an^{-1} ou g ha^{-1} an^{-1}) sont ensuite calculés en divisant le bilan total par la durée de la pédogenèse holocène. Un bilan négatif indique l'appauvrissement élémentaire du profil de sol actuel par rapport au contenu du matériel d'origine alors qu'une valeur positive souligne l'enrichissement. Les bilans négatifs sont généralement interprétés comme équivalents au taux d'altération pour l'élément concerné.

RÉSULTATS ET DISCUSSION

La taille des particules diffère considérablement d'un sol à l'autre. Les pourcentages de particules argileuses et sableuses illustrent bien ce contraste textural entre les profils (tabl. I). La minéralogie de la fraction argileuse des trois sols est dominée par le quartz et les feldspaths, notamment les plagioclases (tabl. I). La vermiculite et la chlorite abondent toutefois dans les sols de la région de Rouyn. Les amphiboles constituent des minéraux accessoires dans les trois profils. Par ailleurs, les profils d'horizons minéraux étudiés présentent tous un enrichissement en C organique. Cet enrichissement est maximal dans HER et se manifeste dans tous les profils par un pic dans le premier horizon B suivi d'une baisse marquée en C organique avec la profondeur (tabl. II). Le pH_{H2O} des horizons minéraux de ces sols acides suit un patron inverse à celui de la concentration en C organique : il est à son plus bas dans la partie supérieure du profil et augmente vers un maximum dans le matériel d'origine (tabl. III).

LES CONCENTRATIONS TOTALES EN ÉLÉMENTS

Les concentrations totales en éléments majeurs et en éléments traces sont compilés pour les horizons minéraux des trois profils (tabl. II et III). Dans les horizons situés à la base des profils, les concentrations en éléments majeurs reflètent la minéralogie de ces sols, qui est largement dominée par les aluminosilicates (tabl. II). Dans les horizons minéraux de surface, l'effet de la pédogenèse sur la redistribution des éléments majeurs dans le profil se superpose à ce contrôle minéralogique, entre autres pour Al, Ca, Fe, et Si. Par ailleurs, les concentrations des éléments traces Cr, Ni, et Zn (tabl. III) correspondent aux niveaux généralement observés dans les sols non contaminés (Kabata-Pendias et Pendias, 1992). Toutefois, des concentrations élevées en Cd, Cu et Pb sont mesurées dans les horizons de surface du profil RN1 et, à un niveau moindre, dans le HER pour Cd et Pb. L'analyse des variations

TABLEAU II

Concentration totale en éléments majeurs des horizons minéraux des trois sols

Horizon	Prof	Al	C*	Ca	Fe	K	Mg	Mn	Na	P	Si	Ti
	cm						g kg^{-1}					
						HERMINE						
Ae	0-6	43,4	12,7	6,5	13,7	18,9	2,2	0,4	13,4	0,1	371	7,8
Bhf1	6-10	55,1	101,4	9,6	32,3	16,5	4,7	0,4	12,1	0,6	256	5,9
Bhf2	10-16	79,8	88,7	10,9	26,0	15,7	6,0	0,4	12,9	0,8	228	4,4
Bf	16-29	80,0	38,2	13,4	24,8	19,3	7,5	0,5	15,9	0,7	268	5,0
Bfj	29-53	77,2	19,8	16,0	22,0	21,5	7,8	0,5	18,8	0,6	300	4,9
C	53-72	72,4	5,4	16,2	22,1	23,0	7,9	0,6	18,7	0,6	318	5,1
						ROUYN-1						
Ae	0-5	56,1	18,4	15,8	10,4	15,0	5,1	0,3	19,9	0,4	350	4,1
Bf1	5-10	72,4	34,0	16,5	21,7	13,9	9,9	0,4	19,9	0,6	287	3,2
Bf2	10-19	75,1	26,1	17,0	20,3	14,5	10,9	0,4	21,1	0,5	296	3,2
Bt	19-32	76,0	16,7	17,4	20,6	15,1	11,5	0,4	22,2	0,4	303	3,3
C	32-38	74,3	0,8	20,3	19,5	15,4	11,8	0,6	25,8	0,5	320	3,4
						ROUYN-4						
Ae	0-10	45,9	5,6	11,8	5,2	9,9	2,3	0,2	19,4	0,1	386	1,9
Bm1	10-17	65,1	6,4	16,2	15,5	9,9	5,4	0,3	21,7	0,5	336	2,7
Bm2	17-24	66,2	5,8	18,6	15,0	10,2	6,8	0,4	24,3	0,4	340	2,6
Bm3	24-39	64,2	3,5	18,5	13,0	10,5	6,9	0,3	25,7	0,2	348	2,4
BC1	39-52	63,5	0,7	18,4	12,6	10,6	7,4	0,3	26,6	0,2	352	2,3
BC2	52-65	62,7	0,8	18,4	12,5	10,6	7,4	0,3	26,3	0,2	353	2,3
C	65-97	62,7	0,6	18,8	12,1	10,6	7,4	0,4	26,1	0,3	352	2,2

* Carbone organique

des concentrations élémentaires totales dans un même profil de sol permet de dégager trois patrons généraux. Ces tendances sont établies en comparant la concentration en éléments dans les horizons individuels d'un profil à celui mesuré dans l'horizon C du même profil.

Un premier patron englobe les éléments dont les concentrations diminuent de l'horizon C vers la surface. Cette baisse continue s'observe dans tous les sols pour Ca, Mg et Mn (tabl. II). Les éléments K, Na et Si suivent la même tendance, sauf dans l'horizon Ae où l'on note une hausse des concentrations (tabl. II). Ces augmentations en Si sont visibles dans tous les profils, alors que celles de K et Na se limitent à HER. La baisse générale des concentrations en Ca, K, Mg, Mn, Na et Si est liée à l'altération des minéraux dans le sol et au lessivage subséquent de ces éléments dissous hors du profil. Dans le cas particulier de K et Na, et surtout de Si, les concentrations élevées dans l'horizon Ae reflètent l'accumulation relative des minéraux résistants à l'altération comme le quartz. À ce titre, la composition minéralogique des limons fins et des argiles (< 20 µm) montre que l'abondance relative de tous les minéraux, en comparaison de celle du quartz, est plus faible dans l'horizon Ae que dans le C et ce, pour les trois profils (tabl. IV).

Le second patron regroupe les éléments (Al, Fe, P, Cr et Ni) dont les variations en profil présentent à la fois une augmentation dans les horizons B et une baisse prononcée dans le Ae (tabl. II et III). L'altération des minéraux primaires dans l'horizon Ae libère les éléments qui migrent en solution. Une fraction du Al et Fe ainsi dissous s'accumule ensuite dans les horizons B. Cette translocation se fait avec ou sans le concours de la matière organique dissoute. De telles séquences éluviation-illuviation s'observent dans les sols podzolisés et résultent en une accumulation de phases solides secondaires riches en Al et Fe (Courchesne et Hendershot, 1997). Cette zone d'accumulation est dominée par les complexes organiques de Al et Fe dans l'horizon B supérieur des trois sols et par les formes inorganiques amorphes ou cristallines dans le B inférieur (tabl. V). La distribution en profil de la concentration en P total constitue un calque presque parfait du patron de Al et Fe. L'adsorption de P-PO_4, dont l'affinité pour les oxydes et hydroxydes de Al et Fe est bien connue (Barrow, 1987), est largement responsable de l'adéquation entre les profils de concentration de Al, Fe et P (tabl. II). Enfin, les métaux traces Cr et Ni présentent, et ce seulement dans le sol HER, un profil de concentration dont la parenté avec celui de Al et Fe est remarquable. L'association de Cr et Ni aux oxydes pédogénétiques de Fe a aussi été observée par Jersak *et al.* (1997). Dans les sols de la région de Rouyn, les concentrations en Cr et Ni demeurent toutefois constantes dans l'ensemble du profil puis baissent dans le Ae (tabl. III).

TABLEAU III

Concentration totale en éléments traces des horizons minéraux des trois sols

Horizon	Densité	pH_{H2O}	ICV*	Cd	Cr	Cu	Ni	Pb	Zn	Zr
	kg m^{-3}	1 : 2				mg kg^{-1}				
					HERMINE					
Ae	1 190	4,03	-0,382	0,3	4,3	0,5	1,3	2,8	5,8	679
Bhf1	610	4,38	1,206	2,5	12,2	1,2	3,8	6,2	45,2	371
Bhf2	790	4,82	1,260	2,4	18,1	2,1	7,3	4,4	72,5	280
Bf	890	5,06	0,749	0,3	16,3	3,5	10,0	2,5	78,1	321
Bfj	1 110	5,28	0,445	0,3	11,1	5,6	7,9	1,2	42,4	311
C	1 420	5,26	0,000	0,3	12,6	8,3	6,9	1,3	23,3	352
					ROUYN-1					
Ae	950	5,05	0,123	2,0	16,6	222,3	3,8	12,6	52,4	289
Bf1	770	4,96	1,228	1,6	48,2	23,1	27,1	2,9	76,1	180
Bf2	990	4,96	0,732	1,9	47,5	12,0	22,7	1,9	45,7	180
Bt	940	4,97	0,800	0,5	54,9	13,7	25,3	2,0	47,8	182
C	1 650	5,61	0,000	1,4	52,4	15,6	22,1	2,2	29,5	187
					ROUYN-4					
Ae	1 160	4,43	-0,209	0,2	4,0	3,7	1,2	1,2	3,2	153
Bm1	1 200	5,00	-0,070	0,2	20,0	2,2	7,0	1,2	25,0	126
Bm2	1 230	5,79	-0,102	0,2	20,8	7,0	11,0	1,2	22,9	127
Bm3	1 290	5,81	-0,138	0,5	19,8	3,1	11,8	1,2	15,5	127
BC1	1 350	5,84	0,034	0,2	19,4	3,5	12,2	1,2	13,6	101
BC2	1 420	5,89	0,027	0,2	18,6	4,1	12,6	1,2	13,9	97
C	1 520	6,00	0,000	0,3	17,8	4,9	11,8	1,3	13,3	93

* Indice de changement volumétrique

TABLEAU IV

Abondance minéralogique relative (I) dans la fraction des limons fins et des argiles (< 20 μm) pour les horizons Ae et C des trois sols

Horizon	Plagioclase	Feldspath-K	Amphibole	Phyllo*	Quartz
		I = Ix / Iqz ¶			
		HERMINE			
Ae	0,08	0,15	—§	0,48	1,00
C	1,92	0,95	0,18	—	1,00
		ROUYN-1			
Ae	0,46	0,15	0,06	0,21	1,00
C	2,08	0,62	1,04	0,46	1,00
		ROUYN-4			
Ae	1,62	—	0,16	3,87	1,00
C	1,91	—	0,45	3,73	1,00

* Phyllosilicates, pic 001 à *d* = 1,4 nm

¶ I = Ix / Iqz, où Ix est l'intensité du pic du minéral x et Iqz, l'intensité du pic 100 (d = 0,426 nm) du quartz

§ Non détecté

Le troisième patron concerne les éléments traces Cd, Cu, Pb et Zn pour lesquels des hausses très prononcées de concentrations sont observées dans les horizons minéraux de surface, notamment dans la portion supérieure de l'horizon B des trois sols et dans le Ae de RN1 (tabl. III). Les concentrations de ces quatre métaux traces augmentent près de la surface du profil minéral de RN1, là où les niveaux en Cu de l'horizon Ae excèdent largement les niveaux totaux moyens des sols (Kabata-Pendias et Pendias, 1992). La baisse continue de Cu dans le profil HER fait exception à cette tendance, alors que dans le profil RN4 les hausses de concentrations dans le B sont observées uniquement pour Cu et Zn.

LES CHANGEMENTS VOLUMÉTRIQUES

Au cours de la pédogenèse, l'enrichissement en minéraux résistants à l'altération comme le zircon, en particulier dans le Ae, entraîne une augmentation prononcée de la concentration en Zr (tabl. III). Cette hausse relative de la concentration en Zr est proportionnelle à la baisse des éléments perdus par altération et sert à calculer l'étendue des changements volumétriques liés à la pédogenèse. On présume ici que le Zr a un comportement prévisible à l'échelle du profil, c'est-à-dire que la masse absolue de Zr est constante depuis la mise en place du matériel d'origine. Le Ti est aussi parfois considéré comme

TABLEAU V

Concentration totale en Al et Fe extractibles des horizons minéraux des trois sols

Horizon	Al pyro*	Al oxalate	Fe pyro	Fe oxalate	Fe DCB
			g kg^{-1}		
			HERMINE		
Ae	0,09	0,16	0,40	0,42	2,82
Bhf1	5,26	6,30	18,77	20,31	27,80
Bhf2	10,10	14,47	5,13	13,97	18,83
Bf	6,70	10,47	2,33	6,43	13,15
Bfj	1,17	5,63	1,03	2,37	5,65
C	1,08	2,48	0,66	1,53	4,93
			ROUYN-1		
Ae	0,60	0,67	1,36	2,04	3,63
Bf1	6,83	10,04	5,83	9,72	9,97
Bf2	4,90	8,59	3,50	5,08	5,17
Bt	0,76	6,40	3,17	4,31	5,28
C	0,49	0,51	0,63	1,87	4,17
			ROUYN-4		
Ae	0,39	0,49	0,27	0,29	0,58
Bm1	1,28	7,59	0,40	5,15	8,20
Bm2	1,44	3,59	0,13	2,27	4,22
Bm3	0,90	1,85	0,11	1,71	2,12
BC1	0,43	0,72	0,09	0,65	1,22
BC2	0,45	1,32	0,09	0,40	1,32
C	0,26	0,82	0,08	0,28	1,07

* Al et Fe extractibles au pyrophosphate de Na (pyro), à l'oxalate d'ammonium acide (oxalate) et au dithionite-citrate-bicarbonate (DCB)

un élément au comportement prévisible (tabl. III). Ainsi, le rapport Ti/Zr est-il utilisé à titre d'indicateur de l'uniformité du matériel d'origine. Sauf pour l'horizon Ae où l'altération est maximale, le rapport Ti/Zr varie peu à l'intérieur d'un sol donné (HER = 14,5 – 15,9 ; RN1 = 17,6 – 18,3 ; RN4 = 18,8 – 23,5) et confirme la relative uniformité du matériel d'origine des trois profils. Le Zr est retenu ici de préférence à Ti pour le calcul de ICV en raison de l'existence d'observations soulignant la mobilité de Ti dans des matériaux fortement altérés, comme c'est le cas pour les horizons Ae (Olsson et Melkerud, 2000).

Les valeurs d'ICV calculées avec Zr sont négatives dans l'horizon Ae du profil HER ainsi que dans les horizons Ae et Bm du RN4 (tabl. III). En outre, le volume du matériel composant le Ae actuel de l'Hermine a été réduit d'environ 38 % par rapport à l'horizon C (pour lequel on assume une absence de changement volumétrique) et ce, depuis la mise en place du till qui constitue le matériel d'origine. L'altération des minéraux dans le Ae, et l'affaissement progressif de la microstructure du sol qui s'ensuit, est le principal mécanisme invoqué pour expliquer cette réduction volumétrique (Brimhall *et al.*, 1991a). Les valeurs d'ICV du profil RN4 sont faibles et ne diffèrent pas significativement de zéro, sauf pour les horizons Ae et Bm où il y a un léger tassement. Par contre, l'ICV est fortement positif dans tout le solum de RN1 et dans les horizons B de HER où l'expansion volumétrique atteint 126 % (tabl. III). Les valeurs d'ICV mesurées dans les trois sols étudiés correspondent très bien à celles proposées pour des Podzols du nord-est des États-Unis (Jersak *et al.*, 1995), du Michigan (Lichter, 1998) et des régions montagneuses de la Suisse (Egli *et al.*, 2001).

Les principaux processus contribuant à l'expansion des horizons minéraux sont la croissance des racines, la dissolution des minéraux solubles, l'ajout et la formation de solides de faible densité comme les matériaux organiques et les sesquioxydes de Al et Fe, et la création de biopores par les animaux fouisseurs (Brimhall *et al.*, 1991a). L'expansion volumétrique des horizons des sols HER et RN1 est associée à l'accumulation de matériaux organiques et à la néoformation de phases solides pendant la pédogenèse (tabl. V). À titre d'exemple, on observe que la concentration en C organique des horizons d'un profil donné est positivement corrélée (α = 0,05) à la valeur d'ICV (fig. 1). On notera aussi que la qualité de cette relation augmente lorsque l'on exclut les horizons Ae de l'analyse. Dans le profil HER, l'Al extractible au pyrophosphate est aussi positivement corrélé aux valeurs d'ICV (r^2 = 0,75 ; α = 0,05). Cet indice est significativement corrélé (r^2 = 0,77 à 0,97 ; α = 0,05) aux solides pédogénétiques riches en Fe et Si extractibles dans le profil RN1. En ce qui concerne RN4, aucune des propriétés préalablement mentionnées n'est liée à l'ICV (fig. 1).

LES FLUX ÉLÉMENTAIRES

Les valeurs de flux élémentaires relatifs (équation 2) sont illustrées pour six éléments représentatifs des trois groupes déjà définis sur la base des données de concentration totale (fig. 2, 3 et 4). Le premier de ces groupes intègre les éléments (Ca, K, Mg, Mn, Na, Si) pour lesquels les flux sont négatifs dans tous les horizons des trois profils (fig. 2). La seule exception à cette tendance s'observe dans les horizons B inférieurs de HER et reflète probablement une légère hétérogénéité du matériel d'origine à un niveau du profil où l'altération a eu peu d'emprise. Essentiellement, ces profils de flux reflètent l'effet de l'altération sur des éléments majeurs dont la principale réserve à long terme se loge dans des minéraux solubles. Dans tous les cas, les pertes les plus prononcées sont enregistrées dans le profil RN4 et dans les horizons Ae où elles atteignent de 37 à 85 % du contenu élémentaire initial du matériel d'origine. À l'intérieur de ce groupe, le K est l'élément dont les pertes sont les moins abondantes, alors que Mg présente les flux négatifs les plus élevés.

Le groupe suivant (Al, Fe, P, Ti, Cr, Ni) est caractérisé par le phénomène de translocation où des pertes très élevées dans l'horizon éluvial Ae (plus de 80 % pour Cr et Ni) sont accompagnées de flux positifs dans les horizons illuviaux B. Les sesquioxydes de Al, Fe et Ti qui précipitent lors de la formation des sols (tabl. V) servent de substrat pour la rétention subséquente de P, Cr et Ni (fig. 3). Ainsi, l'adéquation entre les flux des éléments Al, Fe, Cr et Ni montre, et ce, mieux que ne le permettaient les valeurs de concentrations, que l'adsorption, ou la co-précipitation, exerce une influence majeure

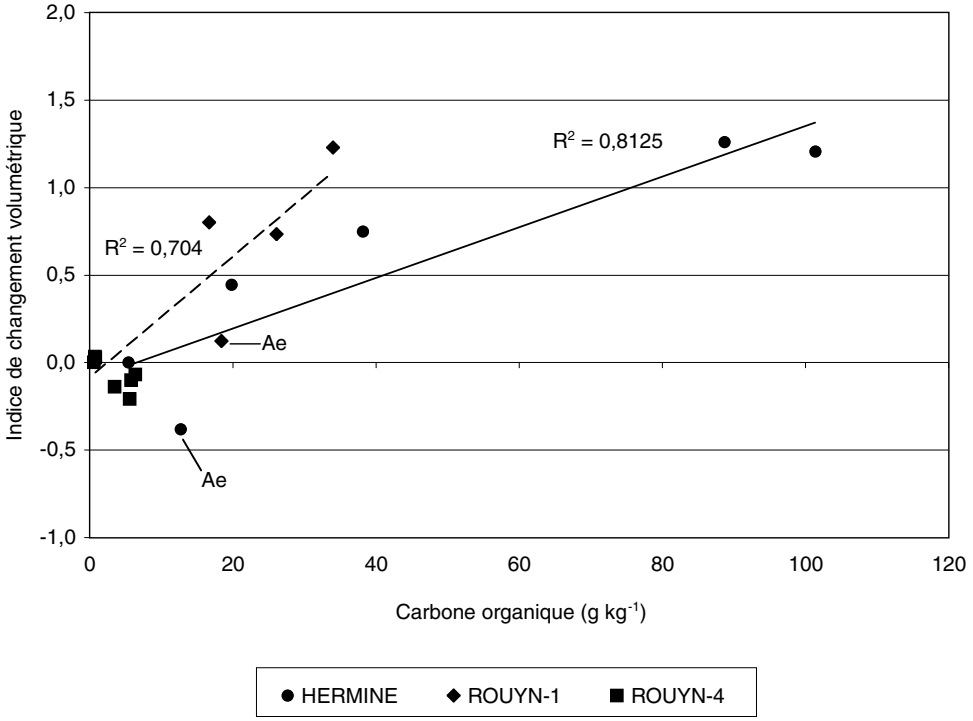

FIGURE 1. Relation entre l'indice de changement volumétrique et la concentration en matière organique des horizons minéraux des trois profils. La droite de régression ainsi que le coefficient de détermination sont indiqués lorsqu'ils sont significatifs (α = 0,05).

Relationship between strain values and the amount of organic carbon in the mineral horizons of the three profiles. Regression lines and determination coefficients are shown when significant (α = 0,05).

sur la distribution en profil des éléments traces Cr et Ni dans les horizons minéraux de sols où les apports exogènes sont faibles. Si le phénomène de translocation élémentaire est manifeste dans les sols HER et RN1, il est à peine observable dans le RN4 où les flux sont toujours négatifs. Dans ce profil, les produits d'altération ne sont pas retenus dans le solum en raison de la texture grossière ainsi que du faible contenu en matière organique et en minéraux argileux (tabl. I et II).

Le dernier groupe se distingue par d'importantes accumulations ponctuelles en Cd, Cu, Pb et Zn dans les horizons de surface (fig. 4). En outre, les flux en Cu, Pb et Zn sont fortement positifs dans le Ae et le Bf1 du profil RN1. La contamination en Cu du Ae (plus de 800 % du contenu initial) témoigne de l'ampleur des apports atmosphériques en métaux traces à ce site situé à 500 m en aval de la fonderie Horne. Le sol de l'Hermine révèle également des flux positifs significatifs, cette fois pour Cd (plus de 1 000 % dans le B supérieur), Pb et Zn. Deux gammes de processus peuvent être invoquées afin d'expliquer cet enrichissement dans un sol éloigné de sources ponctuelles de métaux traces : a) la contamination relative au transport atmosphérique sur de longues distances ou b) la bioconcentration à la surface du profil des métaux libérés par l'altération des minéraux. Si le premier mécanisme joue très certainement un rôle, la contribution du recyclage des éléments par les plantes sur la redistribution des métaux traces dans un profil de sol peut aussi être cruciale (Lichter, 1998 ; Egli *et al.*, 2001). Enfin, bien qu'il soit exposé à des dépôts atmosphériques de métaux traces, le sol RN4 ne présente que des flux négatifs. Ceux-ci signalent à nouveau le très faible potentiel de rétention de sa phase solide.

LES BILANS ÉLÉMENTAIRES HOLOCÈNES ET LES TAUX D'ALTÉRATION

Le tableau VI regroupe les bilans élémentaires annuels pour l'Holocène des 17 éléments analysés dans la présente étude, de même que les bilans annuels publiés pour des sols forestiers provenant d'environnements comparables à celui du Québec méridional. Toutes ces valeurs ont été acquises selon la méthode du bilan élémentaire. Toutefois, parmi les sept sources recensées, seules les études de Jersak *et al.* (1995 et 1997) et Lichter (1998) intègrent, comme la présente, la valeur d'ICV dans le calcul du bilan élémentaire. Le bilan holocène relatif de chaque profil a aussi été calculé pour les 17 éléments (fig. 5). Le coefficient de variation moyen associé au calcul de ces bilans se chiffre à 15 % pour les éléments majeurs et à 25 % pour les métaux traces Cd, Cr, Cu, Ni et Zn. Il atteint 40 % pour Pb. Les bilans des éléments majeurs pour lesquels une base de comparaison suffisamment large est disponible (Al, Ca, Fe, K, Mg, Mn, Na et Si) montrent que les valeurs des trois sols étudiés correspondent très bien à celles proposées pour une variété de sols forestiers (tabl. VI). Seuls les bilans de Na et Si du sol RN4 excèdent la gamme des valeurs. La recension des taux d'altération mesurés à l'échelle du bassin versant selon la méthode du budget intrant-extrant révèle aussi des taux semblables à ceux consignés au tableau VI (White et Blum, 1995 ; Bouchard et Jolicoeur, 2000). Toutefois, les taux moyens calculés par la méthode du budget annuel sont souvent légèrement supérieurs à ceux obtenus par la méthode du bilan élémentaire. Cet écart est d'autant plus prononcé lorsque le stockage des éléments dans la végétation n'est pas intégré dans le calcul du budget annuel. On sous-estime alors l'altération.

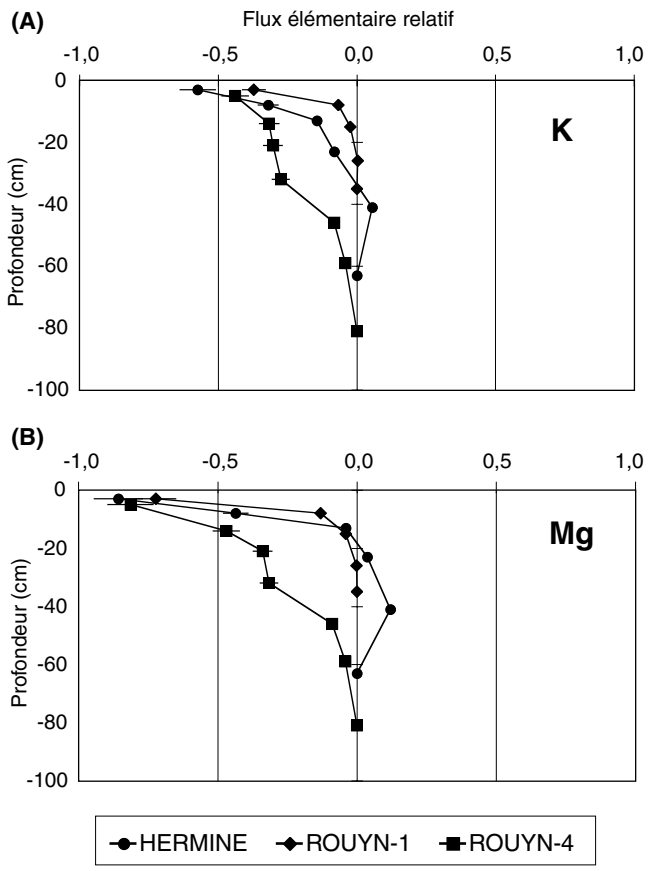

FIGURE 2. Flux élémentaires relatifs de (A) K et (B) Mg dans les horizons minéraux des trois profils. Les barres horizontales représentent le coefficient de variation de triplicatas d'analyse.

Relative elemental fluxes for (A) K and (B) Mg in the mineral horizons of the three profiles. Horizontal bars are coefficient of variation for triplicate analyses.

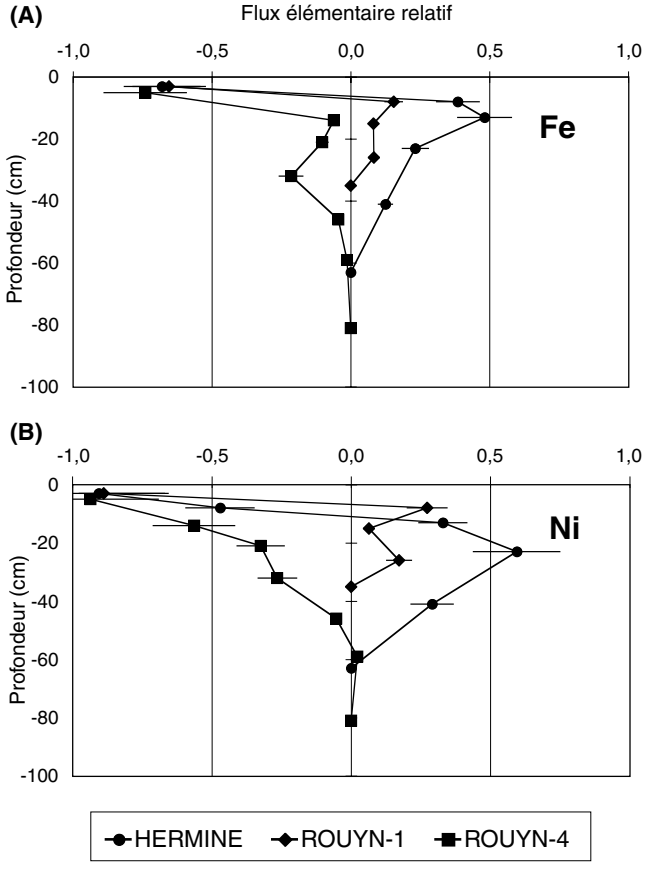

FIGURE 3. Flux élémentaires relatifs de (A) Fe et (B) Ni dans les horizons minéraux des trois profils. Les barres horizontales représentent le coefficient de variation de triplicatas d'analyse

Relative elemental fluxes for (A) Fe and (B) Ni in the mineral horizons of the three profiles. Horizontal bars are coefficient of variation for triplicate analyses.

Des bilans positifs sont enregistrés pour Al, Fe et Ti dans le profil HER (tabl. VI). Ces valeurs positives représentent une très faible proportion du contenu du matériel d'origine (fig. 5) et ne sont probablement pas significatives compte tenu de l'erreur liée au calcul des bilans. L'existence de ces bilans positifs signale néanmoins l'intensité du mécanisme d'éluviation – illuviation de Al, Fe et Ti dans le profil HER, mécanisme qui assure la conservation partielle de ces éléments dans le sol par suite de leur mobilisation initiale par altération. Dès lors, les bilans annuels des éléments touchés par le processus de translocation, notamment Al, Fe, Ti et, à un niveau moindre, P, Cr et Ni (fig. 3), doivent être vus comme des évaluations conservatrices de leur taux réel d'altération (Karltun *et al.*, 2000). En ce qui concerne les éléments Ca, K, Mg, Mn, Na et Si (fig. 2), il n'existe aucune zone démontrant leur rétention à long terme dans le profil minéral. Ainsi, l'adéquation entre le bilan élémentaire et le taux d'altération est-elle plus prononcée pour Ca, K, Mg, Mn, Na et Si que pour Al, Fe et Ti. Le classement décroissant des éléments majeurs selon l'intensité du taux absolu d'altération (tabl. VI) dans les trois sols du Québec méridional se lit comme suit (données converties en moles ha^{-1} an^{-1}) : Si >> P > Al > Na > Ca > Mg > K > Fe > Ti > Mn. Par contre, si l'on utilise les bilans relatifs (fig. 5), l'ordination décroissante des éléments majeurs devient alors : Mn > Mg > Ca > Na > K > P > Si > Al > Fe > Ti. Cette ordination livre une image réaliste de la solubilité des minéraux et de la mobilité relative des éléments dans des sols forestiers jeunes et acides. Elle correspond aussi très bien à celles publiées par Bain *et al.* (1993), Lichter (1998) et Olsson et Melkerud (2000) pour des sols comparables.

Les bilans pour les métaux traces des trois profils sont tantôt négatifs, tantôt positifs (tabl. VI et fig. 5). L'importance des bilans de Cr, Cu, Ni, Pb et Zn se compare d'ailleurs bien avec celle des valeurs proposées par Jersak *et al.* (1997) pour des sols podzoliques du nord-est des États-Unis. Si les bilans négatifs signalent essentiellement l'appauvrissement des profils par suite de l'altération des minéraux, les valeurs positives reflètent plutôt l'ajout d'éléments traces et leur rétention au sein du profil minéral. Des gains comparables en Cd, Cu, Pb et Zn ont été mesurés dans une variété de sols (Miller et McFee, 1983 ; Jersak *et al.*, 1997 ; Johnson et Petras, 1998 ; Lichter, 1998 ; Nowack *et al.*, 2001) et sont associés à des

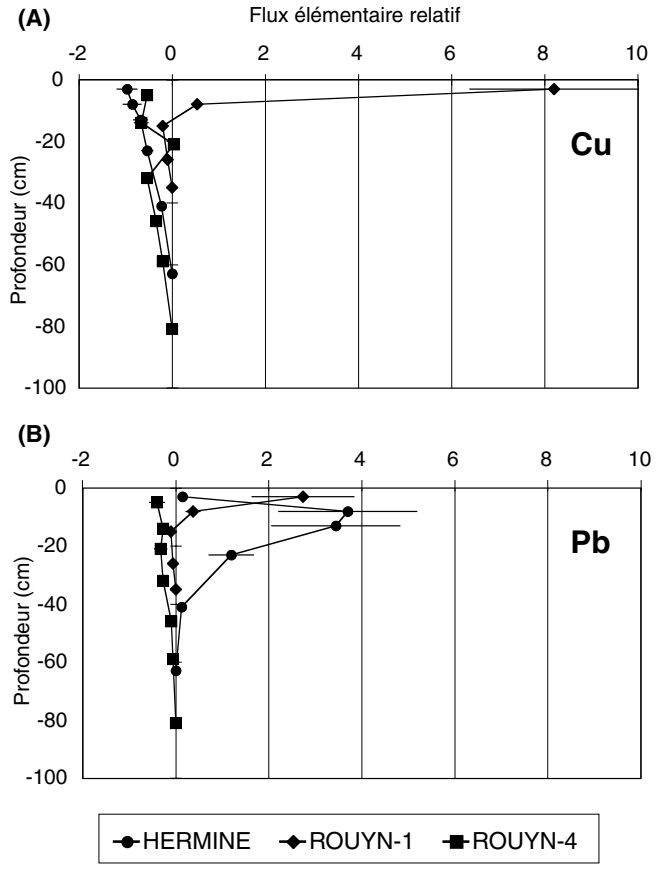

FIGURE 4. Flux élémentaires relatifs de (A) Cu et (B) Pb dans les horizons minéraux des trois profils. Les barres horizontales représentent le coefficient de variation de triplicatas d'analyse.

Relative elemental fluxes for (A) Cu and (B) Pb in the mineral horizons of the three profiles. Horizontal bars are coefficient of variation for triplicate analyses.

contaminations d'origine humaine. De même, les contaminations en Cd, Cu, Pb et Zn signalées pour HER et RN1 illustrent la contribution des dépôts atmosphériques anthropiques au cycle des éléments traces dans ces sols. Dans certains cas, notamment ceux de Cu et Pb, le recyclage des métaux traces par la végétation peut contribuer à leur redistribution dans le profil et à leur accumulation préférentielle dans les horizons de surface (fig. 4). Enfin, la croissance végétale et le recyclage élémentaire entre les plantes et le sol (pluviolessivat, litière) expliquent les bilans en profil positifs notés pour le C organique (tabl. VI).

Deux observations propres à la variabilité temporelle et spatiale des taux d'altération méritent notre attention lorsqu'on souhaite évaluer et apprécier les taux proposés dans cette étude. Dans un premier temps, la mesure de l'altération des minéraux à l'aide de chronoséquences de sols a montré que les taux varient dans le temps et qu'ils tendent à diminuer avec l'âge du sol (Bain *et al.*, 1993 ; Egli *et al.*, 2001). Il semble que la mise en solution des éléments majeurs par altération se produise initialement à une vitesse élevée pour ensuite ralentir et atteindre des valeurs beaucoup plus faibles après environ 4 000 ans de pédogenèse. Ainsi, et en l'absence d'une comparaison entre les taux d'altération historiques et les taux actuels pour les sols étudiés, il faut éviter d'interpréter les valeurs du tableau VI comme des taux reflétant la dynamique actuelle de l'altération.

En second lieu, on note l'étendue de l'écart entre les taux d'altération des trois sols (tabl. VI). Ces écarts sont le fruit tant des différences géochimiques entre les profils que du niveau de respect des postulats de la méthode du bilan élémentaire. Ainsi, la présence de minéraux plus solubles à RN4 (chlorite) de même que sa faible capacité de rétention des solutés (bas niveaux de matière organique et d'argiles) contribuent au fait que ce sol présente les bilans élémentaires les plus négatifs. Par contre, le respect des postulats de la méthode du bilan élémentaire est souvent imparfait, surtout en ce qui concerne le postulat d'homogénéité du matériel d'origine. À ce chapitre, les profils élémentaires du sol RN4 présentent, entre 30 et 50 cm de profondeur, des ruptures occasionnelles de tendances, ruptures qui suggèrent un certain niveau d'hétérogénéité (fig. 2). Cette apparente hétérogénéité peut résulter en une surévaluation du taux d'altération des éléments tels que K, Mg et Si.

CONCLUSION

L'étude des concentrations et des flux élémentaires de trois sols forestiers du Québec méridional a permis d'estimer leur taux d'altération historique (Holocène) en se basant sur une méthode de bilan élémentaire intégrant l'effet des changements volumétriques des sols dans le calcul des taux d'altération. Les résultats principaux sont les suivants :

L'indice de changement volumétrique (ICV) calculé avec Zr est fortement positif dans les horizons B de HER et dans tout le solum de RN1. Cette expansion volumétrique des horizons des sols atteint 126 % et est positivement corrélée à la concentration en C organique et en sesquioxydes de Al et Fe. Par contre, l'ICV est négatif dans les horizons Ae des profils HER et RN4 où des réductions de volume de l'ordre de 21 à 38 % reflètent l'effet de l'altération. Sauf dans l'horizon Ae, les changements volumétriques dans le RN4 sont négligeables.

Les valeurs de concentrations et de flux élémentaires permettent d'identifier trois groupes d'éléments présentant des comportements biogéochimiques contrastés, et ce, quel que soit le profil de sol. En effet, les pertes en Ca, K, Mg, Mn, Na et Si sont principalement influencées par l'altération des minéraux alors que les flux en Al, Fe, P, Ti, Cr et Ni, bien qu'ils soient eux aussi affectés par l'altération, traduisent en plus les effets de l'éluviation et de l'illuviation. Dans ce contexte, l'adéquation entre les valeurs du bilan élémentaire et celles des taux réels d'altération risque d'être plus grande pour Ca, K, Mg, Mn, Na et Si que pour Al, Fe et Ti. Le troisième groupe (Cd, Cu, Pb et Zn) est caractérisé par la présence de forts flux positifs dans les horizons de surface reflétant surtout la contamination des sols par des activités humaines.

Les taux d'altération holocènes des éléments majeurs (Al, Ca, Fe, K, Mg, Mn, Na, Si et Ti) des trois sols étudiés s'inscrivent bien à l'intérieur de la gamme des valeurs calculées pour des sols forestiers comparables selon la méthode du

TABLEAU VI

Bilans élémentaires annuels des trois profils de sols étudiés et de sols forestiers provenant d'environnements comparables

Site	Al	C	Ca	Fe	K	Mg	Mn	Na	P	Si	Ti	Cd	Cr	Cu	Ni	Pb	Zn
	kg ha^{-1} an^{-1}											g ha^{-1} an^{-1}					
Présente étude – Canada (1)																	
Hermine	+0,17	+13,15	-1,32	+0,17	-1,42	-0,56	-0,04	-0,96	-3,11	-10,70	+0,13	+0,1	-0,3	-2,0	+0,2	+0,5	+11,9
Rouyn-1	-2,50	+7,88	-1,71	-0,62	-0,60	-0,91	-0,07	-2,30	-8,40	-12,27	-0,08	-0,1	-3,7	+11,6	-0,8	+0,5	+7,5
Rouyn-4	-19,53	+2,54	-7,05	-3,47	-3,35	-3,33	-0,17	-9,14	-19,46	-102,00	-0,48	-0,1	-5,6	-2,6	-5,3	-0,4	-2,3
Olsson et Melkerud, 2000 – Suède (2)																	
Nyänget	-2,79		-1,50	-0,31	-1,64	-0,59	-0,02	-1,76	-0,01	-13,87							
Heden	-5,03		-1,56	-3,01	-2,38	-1,61	-0,01	-2,68	-0,02	-7,71							
Hyytiälä	-2,94		-1,38	-0,77	-2,30	-0,65	-0,02	-2,59	-0,06	-23,78							
Lichter, 1998 – États-Unis (3)																	
L. Michigan	-0,23		-5,21	-0,41	-0,05	-2,07	-0,01	0,00	-0,01		0,00						-1,68
Kolka *et al.*, 1996 – États-Unis (4)																	
Cloquet			-5,00		-1,17	-1,22											
Omega			-3,61		-0,20	-0,73											
Ontonagon			-2,81		-0,78	-0,61											
Solon			-0,60		-0,20	-0,24											
Warba			-6,21		-0,20	-0,85											
Jersak *et al.*, 1995 et Jersak *et al.*, 1997 – États-Unis (5)																	
Adams	-3,50	+29,20	-4,83	-1,00	-5,83	-1,42	-0,16	-5,75		-70,83			-2,7	-2,0	-2,1	-2,0	-21,7
Beckett	-1,25	+10,80	-1,42	+0,41	-1,67	-0,44	-0,04	-2,50		-24,17			-0,5	-0,6	-2,1	-1,6	-2,7
Houghtonville	-35,83	+22,50	-1,42	-13,33	-24,17	-5,00	-0,07	-0,83		-14,17			-29,7	+3,2	-1,9	-26,0	-42,3
Wessenlink *et al.*, 1994 – Allemagne (6)																	
Solling	-14,30		-1,66		-7,82	-3,65		-1,77		-10,25							
Bain *et al.*, 1993 – Écosse (7)																	
Glen Feshie			-1,12		-5,43	-1,12		-6,02									
Kirkwood et Nesbitt, 1991 – Canada (8)																	
Plastic Lake	-8,74		-2,66	-1,81	-2,81	-0,96		-3,21		-33,40							

(1) Taux sur une période de 8000 (Rouyn-1 et Rouyn-4) ou 11 000 ans (Hermine) pour la fraction < 2 mm du profil minéral.

(2) Taux sur une période de 9447 ans pour la fraction < 2 mm du profil minéral.

(3) Taux sur une période de 4150 ans pour la fraction < 2 mm des 15 premiers cm du profil minéral.

(4) Taux sur une période de 11 600 ans pour la fraction des limons (2 à 53 μm) du profil minéral et selon un modèle exponentiel.

(5) Taux sur une période de 12 000 ans pour la fraction < 2 mm du profil minéral.

(6) Taux sur une période de 10 000 ans pour la fraction < 2 mm des 60 premiers cm du profil minéral.

(7) Taux sur une période de 13 000 ans pour la fraction < 2 mm du profil minéral.

(8) Taux sur une période de 12 000 ans pour la fraction < 2 mm du profil minéral.

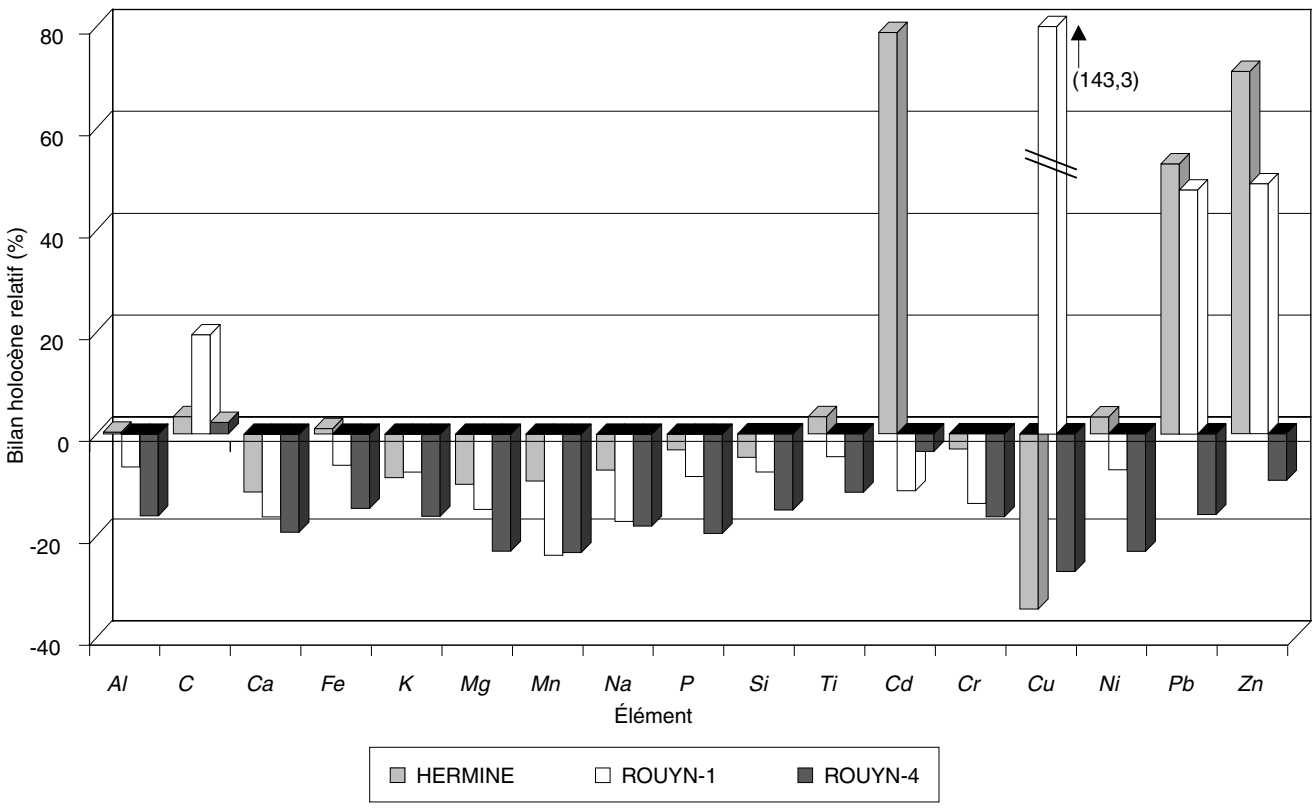

FIGURE 5. Bilans élémentaires holocènes (% du contenu initial dans le matériel d'origine) pour les trois profils de sols. Les valeurs de C sont divisées par 100.

Holocene mass balances (% of the initial content in the parent material) for the three soil profiles. Data for C are divided by 100.

bilan élémentaire. Pour les trois sols, le classement des éléments majeurs en ordre de mobilité relative décroissante est : Mn > Mg > Ca > Na > K > P > Si > Al > Fe > Ti.

Pour ce qui est du cycle biogéochimique des éléments, les calculs de bilans élémentaires montrent que des pertes très importantes en nutriments (Ca, K, Mg, Mn, P) sont survenues au cours de l'Holocène dans les trois sols forestiers étudiés. Ces pertes sont concentrées dans les horizons de surface, notamment le Ae et les horizons B supérieurs, où elles excèdent parfois 50 % du contenu initial du matériel d'origine. L'altération des minéraux et le lessivage des sols sont les principaux mécanismes responsables de ces pertes. Dans certains cas, les déficits en nutriments s'accompagnent de gains en métaux traces d'origine anthropique, tels que Cd, Cu et Pb dans les horizons superficiels. Toutefois, les bilans calculés dans cette étude montrent aussi qu'il existe encore une très abondante réserve en nutriments contenue dans les minéraux altérables de l'ensemble des horizons inorganiques des sols. Cette réserve est présente dans la zone d'enracinement des plantes de ces écosystèmes et elle est disponible, après solubilisation, pour leur croissance. Sous une profondeur de 40 à 50 cm, la réserve en nutriments est pratiquement intacte. En raison, entre autres, de cette réserve en éléments et minéraux, les sols forestiers étudiés peuvent soutenir la croissance à long terme des plantes et participer à la neutralisation des apports atmosphériques acides.

REMERCIEMENTS

Les auteurs remercient Alain Dufresne et Véronique Séguin pour leur collaboration sur le terrain et en laboratoire. Ce programme de recherche a été subventionné par le Conseil national de recherches en sciences naturelles et en Génie du Canada (CRSNG) et le Fonds FCAR. Les auteurs remercient également les lecteurs pour leurs commentaires pertinents.

RÉFÉRENCES

Amonette J.E et Zelazny, L.W. (édit.), 1994. Quantitative Methods in Soil Mineralogy. Soil Science Society of America, Madison, 462 p.

Bailey, S.W., Hornbeck, J.W., Driscoll, C.T. et Gaudette, H.E., 1996. Calcium inputs and transport in a base-poor forest ecosystem as interpreted by Sr isotopes. Water Resources Research, 32 : 707-719.

Bain, D.C., Mellor, A., Robertson-Rintoul, M.S.E. et Buckland, S.T., 1993. Variations in weathering processes and rates with time in a chronosequence of soils from Glen Feshie, Scotland. Geoderma, 57 : 275-293.

Barrow, N.J., 1987. Reactions with Variable-Charge Soils. Martinus Nijhoff Publishers, Dordrecht, 191 p.

Bédard, P. et David, P.P., 1991. La météorisation sur les hauts plateaux de la Gaspésie (Québec) : quelques aspects. Géographie physique et Quaternaire, 45 : 195-211.

Bouchard, M. et Jolicoeur, S., 2000. Chemical weathering studies in relation to geomorphological research in southeastern Canada. Geomorphology, 32 : 213-238.

Bouchard, M. et Pavich, M.J., 1989. Characteristics and significance of pre-Wisconsinan saprolites in the northern Appalachians. Zeitschrift für Geomorphologie N.F., Suppl.-Bd. 72 : 125-137.

Brimhall, G.H., Chadwick, O.A., Lewis, C.J., Compston, W., Williams, I.S., Danti, K.J., Dietrich, W.E., Power, M.E., Hendricks, D. et Bratt, J., 1991a. Deformational mass transport and invasive processes in soil evolution. Science, 255 : 695-702.

Brimhall, G.H., Lewis, C.J., Ford, C., Bratt, J., Taylor, G. et Warin, O., 1991b. Quantitative geochemical approach to pedogenesis: Importance of parent material reduction. Volumetric expansion, and eolian influx in lateritization. Geoderma, 51 : 51-91.

Chadwick, O.A., Brimhall, G.H. et Hendricks, D.M., 1990. From a black to a gray box – a mass balance interpretation of pedogenesis. Geomorphology, 3 : 369-390.

Chadwick, O.A., Derry, L.A., Vitousek, P.M., Huebert, B.J. et Hedin, L.O., 1999. Changing sources of nutrients during four million years of ecosystem development. Nature, 397 : 491-497.

Chesworth, W., 1980. The haplosoil system. American Journal of Science, 280 : 969-985.

Chou, L. et Wollast, R., 1984. Study of the weathering of albite at room temperature and pressure with a fluidized bed reactor. Geochimica et Cosmochimica Acta, 48 : 2205-2218.

Courchesne, F. et Hendershot, W.H., 1997. La genèse des Podzols. Géographie physique et Quaternaire, 51 : 235-249.

Culley, J.L.B., 1993. Density and compressibility, p. 529-539. *In* M.R. Carter, édit., Soil Sampling and Methods of Analysis. Lewis Publishers, Ann Arbor, 823 p.

Dyke, A.S. et Priest, V.K., 1987. Late Wisconsinan and Holocene history of the Laurentide Ice Sheet. Géographie physique et Quaternaire, 41 : 237-263.

Egli, M., Fitze, P. et Mirabella, A., 2001. Weathering and evolution of soils formed on granitic, glacial deposits: Results from chronosequences of Swiss alpine environments. Catena, 45 : 19-47.

Foster, N.W., Mitchell, M.J., Morrison, I.K. et Shepard, J.P., 1992. Cycling of acid and base cations in deciduous stands of Huntington Forest, New York, and Turkey Lakes, Ontario. Canadian Journal of Forest Research, 22 : 167-174.

Gee, G.W. et Bauder, J.W., 1986. Particle-size analysis, p. 383-411. *In* A. Klute, édit., Methods of Soil Analysis, Part 1. Physical and Mineralogical Methods. 2e éd, Agronomy Monography 9, American Society of Agronomy, Madison, 1 188 p.

Hendershot, W.H., Lalande, H. et Duquette, M., 1993. Soil reaction and exchangeable acidity, p. 141-145. *In* M.R. Carter, édit., Soil Sampling and Methods of Analysis. Lewis Publishers, Ann Arbor, 823 p.

Houle, D., Paquin, R., Camiré, C., Ouimet, R. et Duchesne, L., 1997. Response of the Lake Clair watershed (Duchesnay, Quebec) to changes in precipitation chemistry (1988-1994). Canadian Journal of Forest Research, 27 : 1813-1821.

Jersak, J., Amundson, R. et Brimhall, Jr., G., 1995. A mass balance analysis of podzolization: Examples from the northeastern United States. Geoderma, 66 : 15-42.

____ 1997. Trace metal geochemistry in Spodosols of the Northeastern United States. Journal of Environmental Quality, 26 : 511-521.

Jewett, K., Daugharty, D., Krause, H.H. et Arp, P.A., 1995. Watershed responses to clear-cutting: Effects on soil solutions and stream water discharge in central New Brunswick. Canadian Journal of Soil Science, 75 : 475-490.

Johnson, C.E. et Petras, R.J., 1998. Distribution of zinc and lead fractions within a forest spodosol. Soil Science Society of America Journal, 62 : 782-789.

Johnson, D.L. et Watson-Stegner, D., 1987. Evolution model of pedogenesis. Soil Science, 143 : 349-366.

Johnson, N.M., Driscoll, C.T., Eaton, J.S., Likens, G.E. et McDowell, W.H., 1981. 'Acid rain', dissolved aluminum and chemical weathering at the Hubbard Brook Experimental Forest, New Hampshire. Geochimica et Cosmochimica Acta, 45 : 1421-1437.

Jones, A.A., 1982. X-ray fluorescence spectrometry, p. 85–121. *In* A.L. Page, édit., Methods of Soil Analysis, Part 2. Chemical and Microbiological Properties. 2e éd., Agronomy Monography 9, American Society of Agronomy, Madison, 1 159 p.

Kabata-Pendias, A. et Pendias H., 1992. Trace elements in soils and plants. 2e éd., CRC Press, Boca Raton, 365 p.

Karltun, E., Bain, D.C., Gustafsson, J.P., Mannerkoski, H., Murad, E., Wagner, U., Fraser, A.R., McHardy, W.J. et Starr, M., 2000. Surface reactivity of poorly ordered minerals in podzol B horizons. Geoderma, 94 : 263-286.

Kirkwood, D.E. et Nesbitt, H.W., 1991. Formation and evolution of soils from an acidified watershed: Plastic Lake, Ontario, Canada. Geochimica et Cosmochimica Acta, 55 : 1 295-1 308.

Kolka, R.K., Grigal, D.F. et Nater, E.A., 1996. Forest soil mineral weathering rates: Use of multiple approaches. Geoderma, 73 : 1-21.

Lichter, J., 1998. Rates of weathering and chemical depletion in soils across a chronosequence of Lake Michigan sand dunes. Geoderma, 85 : 255-282.

Likens, G.E. et Bormann, F.H., 1995. Biogeochemistry of a Forested Ecosystem. Springer-Verlag, New York, 159 p.

Malmström, M.E., Destouni, G., Banwart, S.A. et Strömberg, B.H.E., 2000. Resolving the scale-dependence of mineral weathering rates. Environmental Science & Technology, 34 : 1 375-1 378.

Markewitz, D., Davidson, E.A., de O. Figueiredo, R., Victoria, R.L. et Krusche, A.V., 2001. Control of cation concentrations in stream waters by surface soil processes in an Amazonian watershed. Nature, 410 : 802-805.

Miller, W.P. et McFee, W.W., 1983. The distribution of Cd, Zn, Cu and Pb in soils of industrial northwestern Indiana. Journal of Environmental Quality, 12 : 29-33.

Nowack, B., Obrecht, J.-M., Schluep, M., Schulin, R., Hansmann, W. et Köppel, V., 2001. Elevated lead and zinc contents in remote alpine soils of the Swiss National Park. Journal of Environmental Quality, 30 : 919-926.

Olsson, M. et Melkerud, P.-A., 2000. Weathering in three podzolized pedons on glacial deposits in northern Sweden and central Finland. Geoderma, 94 : 149-161.

Pačes, T., 1986. Weathering rates of gneiss and depletion of exchangeable cations in soils under environmental acidification. Journal of the Geological Society, London, 143 : 673-677.

Paton, T.R., Humphreys, G.S. et Mitchell, P.B., 1995. Soils: A New Global View. Yale University Press, New Haven, 213 p.

Ranger, J., Dambrine, E., Robert, M., Righi, D. et Felix, C., 1991. Study of current soil-forming processes using bags of vermiculite and resins placed within soil horizons. Geoderma, 48 : 335-350.

Ross, G.J. et Wang, C., 1993. Extractable Al, Fe, Mn and Si, p. 239-246. *In* M.R. Carter, édit., Soil Sampling and Methods of Analysis. Lewis Publishers, Ann Arbor, 823 p.

Soil Classification Working Group, 1998. The Canadian System of Soil Classification. 3e éd., Agriculture and Agri-Food of Canada Publication 1646 (revised), NRC Research Press, Ottawa, 178 p.

Sverdrup, H. et Warfvinge, P., 1992. Calculating field weathering rates using a mechanistic geochemical model – PROFILE. Applied Geochemistry, 27 : 283.

Taylor, A.B. et Velbel, M.A., 1991. Geochemical mass balances and weathering rates in forested watersheds of the Southern Blue Ridge. II. Effects of botanical uptake terms. Geoderma, 51 : 29-50.

U.S. Environmental Protection Agency, 1992. Methods for the Determination of Metals in Environmental Samples, CRC Press, Boca Raton, p. 33.

Velbel, M.A., 1985. Geochemical mass balances and weathering rates in forested watersheds of the Southern Blue Ridge. American Journal of Science, 285 : 904-930.

____ 1990. Influence of temperature and mineral surface characteristics on feldspar weathering rates in natural and artificial systems: A first approximation. Water Resources Research, 26 : 3049-3053.

Wessenlink, L.G., Grosskurth, G. et van Grinsven, J.J.M., 1994. Measuring and modeling mineral weathering in an acid forest soil, Solling, Germany, p. 91-110. *In* R.B. Bryant et R.W. Arnold, édit., Quantitative Modeling of Soil Forming Processes. Soil Science Society of America Special Publication 39, Madison, 185 p.

White, A.F. et Blum, A.E., 1995. Effects of climate on chemical weathering in watersheds. Geochimica et Cosmochimica Acta, 59 : 1729-1747.

White, A.F., Blum, A.E., Schulz, M.S., Bullen, T.D., Harden, J.W. et Peterson, M.L., 1996. Chemical weathering rates of a soils chronosequence on granitic alluvium: I. Quantification of mineralogical and surface area changes and calculation of primary silicate reaction rates. Geochimica et Cosmochimica Acta, 60 : 2533-2550.

Whittig, L.D. et Allardice, W.R., 1986. X-ray diffraction techniques, p. 331-362. *In* A. Klute, édit., Methods of Soil Analysis. Part 1. Physical and Mineralogical Methods. 2e éd., Agronomy Monography 9, American Society of Agronomy, Madison, 1 188 p.