0021869IS
(7008298E M)

SYSTÈME DE CLASSIFICATION DES SENSIBILITÉS ÉCOLOGIQUES POUR L'ÉVALUATION DES EFFETS DES PRÉCIPITATIONS ACIDES

Document d'information et résultats d'une réunion du groupe de travail Canada-États-Unis sur l'évaluation des effets concernant les indices de sensibilité au TADPA, Détroit (Michigan), le 2 décembre 1980

D.W. Cowell, A.E. Lucas et C.D.A. Rubec

Direction générale des terres
Environnement Canada

Document de travail n° 10

Available in English under the title:

The Development Of An Ecological Sensitivity Rating For Acid Precipitation Impact Assessment

58160

DAT

HD
107
W6714
NO.10

ENVIRONMENT CANADA
BIBLIOTHÈQUE
RÉGION DE QUÉBEC

REMERCIEMENTS

Les auteurs désirent remercier Mme M. Stapleton de Burlington et Mme H. Villeneuve de Hull qui ont dactylographié les premières versions de ce rapport. La couverture de la série de documents de travail de la Direction générale des terres a été conçue par M. J. Lenning

Mars 1981
N° de cat. EN 73-4/10E
ISBN 0-662-114[illegible]1-5

TIC

TABLE DES MATIÈRES

Remerciements....ii

Liste des tableaux....iv

Résumé....v

Introduction....1

Indices de sensibilité terrestre....2

Cartographie de la sensibilité terrestre....5

Sensibilités critiques....8

Méthode d'évaluation de la sensibilité de l'écosystème terrestre....13

Cartographie préliminaire de la sensibilité terrestre....19

Conclusions....22

Annexe I: Participants à la réunion du 2 décembre 1980 sur les sensibilités aux précipitations acides, Détroit (Michigan)....23

Annexe II: Questions étudiées à la réunion du 2 décembre 1980 sur la sensibilité aux TPAD....24

Annexe III: Étude d'évaluation des systèmes de classification de la sensibilité aux pluies acides, élaborés au Canada et aux États-Unis pour les évaluations d'impacts terrestres....24

Références....37

Série des documents de travail....44

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1: Étude des projets de cartographie de la sensibilité terrestre 3

Tableau 2: Catégories générales pour les descriptions et les légendes des écodistricts utilisées par Environnement Canada 7

Tableau 3: Limites représentatives de tolérance aux effets du SO_2 10

Tableau 4: Limites représentatives de tolérance à des précipitations acides simulées (H_2SO_4) 10

Tableau 5: Sensibilité de la productivité forestière 15

Tableau 6: Sensibilité de l'apport aquatique 16

Tableau 7: Paramètres terrestres pour l'évaluation de la productivité forestière et les apports aquatiques à l'aide de données Écodistrict de l'Ontario 19

Tableau 8: Définitions des classes de sensibilité géochimique (Kramer, 1976) 26

Tableau 9: Définitions des classes de sensibilité de la qualité de l'eau (Kramer, 1977; 1978; 1979a; 1979b) 26

Tableau 10: Définitions des classes de sensibilité de l'assise rocheuse (Shilts et al, 1980..... 29

Tableau 11: Définitions des classes de sensibilité du sol (Klopatek, Harris et Olson, 1980) 31

Tableau 12: Définitions des classes de sensibilité des sols (McFee, 1980) 31

Tableau 13: Définitions des classes de sensibilité des sols (Wang et Coote, 1980) 33

Tableau 14: Définitions des classes de la végétation (Klopatek, Harris et Olson, 1980) 34

Tableau 15: Définitions des classes de sensibilité du terrain (Robitaille, 1979) 36

RÉSUMÉ

Cet article traite de la mise sur pied d'un système d'évaluation écologique pour mesurer l'effet des pluies acides sur l'environnement terrestre de l'est de l'Amérique du Nord. Des systèmes développés par des scientifiques canadiens et américains sont examinés et comparés dans le but de trouver une méthode intégrée et pratique pour l'identification des terres sensibles aux pluies acides, à la fois pour les zones agricoles, pour les zones forestières, et pour les zones urbanisées. Cet article est basé sur un document de travail utilisé par le groupe de travail Canada-États-Unis sur l'évaluation des effets. Il présente les connaissances de base au sujet des indices de sensibilité et des valeurs critiques. De plus, il présente un système de cartographie préliminaire de sensibilité en utilisant la base de données des Écodistricts développée par la Direction générale des terres d'Environnement Canada.

ABSTRACT

The development of an ecological rating system to eveluate the effects of acid rain on the terrestrial environment of eastern North America is outlined in this paper. Systems developed by scientists in Canada and the United States are examined and compared with reference to the design of an integrated, practical method for the identification of sensitive lands in each nation's agricultural, forested, and settled zones. This documents stems from a working paper discussed by the joint Canada-United States Impact Assessment Working Group. It presents state-of-the-art knowledge of terrestrial sensitivity indices and threshold values, and identifies a preliminary sensitivity mapping system using the Ecodistrict data base developed by the Lands Directorate, Environment Canada.

INTRODUCTION

Le besoin d'une méthode d'évaluation par écosystème de la sensibilité des terres aux précipitations acides a été exprimé dans de nombreux ouvrages (BRCG, 1980; Glass et al, 1980a; Lee et Weber, 1980). Jusqu'à présent, l'accent était placé sur une évaluation de la sensibilité basée sur un seul facteur, et les éléments des écosystèmes (par exemple la géologie, les matériaux de surface, les sols et la végétation) étaient évalués individuellement. Afin d'identifier les écosystèmes terrestres sensibles de l'est de l'Amérique du Nord, il faut combiner certains de ces facteurs, sinon tous, de façon à ce que certaines des principales interrelations de l'écosystème soient incorporées dans l'évaluation. Kramer (1979a) et Shilts et al (1980) ont montré, par exemple, que l'identification des régions sensibles en fonction du type d'assise rocheuse seulement est trompeuse, surtout en terrain glaciaire où les matériaux de surface ne reflètent souvent pas la lithologie de l'assise rocheuse sous-jacente. Le degré de combinaison de ces facteurs en un système d'évaluation de la sensibilité terrestre scientifiquement valable est limité par la nature complexe de l'écosystème et le degré de compréhension de cet écosystème. Une représentation dans l'espace est encore plus difficile à faire car la quantité, le degré de compatibilité et le genre de données disponibles sous forme de cartes varient considérablement, surtout à l'échelle continentale ou sous-continentale. Ainsi, afin de mettre au point un ou des indices de sensibilité et de représenter géographiquement ces régions, il faut prendre soin d'indiquer les hypothèses et les limites de l'interprétation. Avant d'attribuer un indice de sensibilité, il faut définir les polluants en cause; définir l'écosystème ou le genre d'interactions de l'écosystème qui sont modélisés et, ensuite, choisir attentivement les facteurs et leurs paramètres connexes (c.-à-d. les limites des classes de sensibilité) qui sont raisonnablement bien compris en termes de leurs contributions relatives à la dynamique de l'écosystème. Il est évidemment impossible à l'heure actuelle de prendre en considération toutes les interactions, y compris les mécanismes équilibrés et de rétroaction positive ou négative.

Enfin, il faut tenir compte des réalités de la cartographie. On doit donc choisir une échelle pratique mais utile et identifier les facteurs et paramètres auxiliaires afin d'extrapoler les bases de données dans les régions pour lesquelles il existe très peu d'information. De plus, il faut mentionner le volume actuel et éventuel des polluants influant sur l'écosystème défini. Les valeurs critiques peuvent être utilisées pour identifier la tolérance à l'acide des divers éléments de l'écosystème.

Un document de travail portant sur un système de classification de sensibilité terrestre basé sur un seul facteur, sur les données disponibles, sur la compilation des cartes de sensibilité et sur les relations dose-effet a été présenté au cours d'une réunion à laquelle assistaient des scientifiques qui ont étudié les problèmes de sensibilité terrestre. Cette réunion a eu lieu le 2 décembre 1980 à Détroit (la liste des personnes présentes figure à l'annexe 1). Le but de cette réunion était d'explorer les possibilités d'évaluation de la sensibilité terrestre à l'aide des combinaisons de

possibilités d'évaluation de la sensibilité terrestre à l'aide des combinaisons de facteurs incluant l'identification des facteurs et des paramètres appropriés, les aspects cartographiques et la possibilité d'incorporer les relations dose-effet. Les objectifs de cette réunion figurent à l'annexe 2 sous forme de questionnaire. Le présent rapport est une mise à jour du document de travail présenté à cette réunion et comprend un résumé des résultats de la réunion. Ces résultats comprennent également un essai de définition de la sensibilité terrestre en ce qui a trait à la productivité forestière et l'apport aquatique.

INDICES DE SENSIBILITÉ TERRESTRE

Des scientifiques canadiens et américains ont proposé des indices de sensibilité pour l'environnement terrestre. Chacun de ces indices est propre à une discipline particulière et est limité par la disponibilité et l'échelle des données présentées. Ces systèmes ont été proposés par:

(1) Hendrey et al (1980): sensibilité géologique et hydrochimique dans l'est des États-Unis.

(2) Kramer (1976, 1977, 1978, 1979): sensibilité des bassins versants dans l'est du Canada.

(3) Shilts et al (1980): sensibilité de l'assise rocheuse et des dépôts superficiels dans l'est du Canada.

(4) Klopatek, Harris et Olson (1980): sensibilité du sol à l'acidification dans l'est des États-Unis.

(5) McFee (1980): sensibilité du sol dans l'est des États-Unis.

(6) Wang et Coote (1980): sensibilité des terres agricoles dans l'est du Canada.

(7) Klopatek, Harris et Olson (1980): sensibilité du soja et du pin au SO_2

(8) Robitaille (1979, 1980): sensibilité de la végétation et du sol dans l'est du Canada.

Ces approches ont été étudiées dans d'autres ouvrages (Glass et al, 1980; BRCG, 1980). Le tableau 1 résume chacune des méthodes relativement aux critères, aux paramètres choisis et aux substituts de données. Une étude approfondie de chaque méthode est présentée à l'annexe III.

Une brève évaluation de chaque approche servira à identifier la compatibilité entre des sensibilités semblables en fonction d'un seul facteur et leur rôle éventuel dans une méthode d'évaluation combinée des écosystèmes terrestres.

Assise rocheuse: Des indices de sensibilité de l'assise rocheuse utilisés par Hendrey et al (1980) et Shilts et al (1980) sont comparables bien que l'échelle des cartes soit différente. Hendrey et al (1980) ont illustré la validité des classes d'assise rocheuse pour identifier les eaux acides actuelles et éventuelles (par exemple, les lacs et les rivières); cependant, cela s'applique seulement aux régions dont la couche de couverture est peu profonde. Kramer (1976, 1977, 1978, 1979a) se sert de la chimie de l'eau pour évaluer l'influence combinée du sol et de la roche sur les

Tableau 1: Étude des projets de cartographie de la sensibilité terrestre

Facteurs et sources cartographiques	Critères de sensibilité	Paramètres idéaux	Paramètres substituts	Base de données	Évaluation de la sensibilité
Assise rocheuse et hydrochimie					
Hendrey et al, (1980) Commission géologique des États-Unis	Capacité tampon potentielle	Composition chimique	———	Cartes géologiques des États-Unis	Type I: capacité tampon faible ou nulle Type II: faible à moyenne Type III: moyenne à élevée Type IV: infinie
Kramer (1976, 1977, 1978, 1979) Université McMaster	régions sujettes à des variations du caractère organique et biologique, supérieures aux limites naturelles pour une période donnée	1) données sur les eaux lacustres: pH, conductivité spécifique, température, profondeur de Secchi, alcalinité, chlorophylle, phytoplancton 2) données sur les sols: couleur, épaisseur totale, épaisseur des horizons, texture, capacité d'échange d'ions H^+	Indice de saturation en calcite (ISC)	Données sur le le terrain	Non sensible, probablement sensible, sensible aux pH réduits
Shilts et al, (1980) Commission géologique des États-Unis	Réaction tampon prévisible aux apports acides	Composition chimique	Essentiellement: type et quantité de phases minérales instables	Cartes géologiques	sensibilité élevée, intermédiaire à élevée, intermédiaire à faible, faible sensibilité
Matériaux superficiels					
Shilts et al, (1980) Commission géologique des États-Unis	Réaction tampon prévisible aux apports acides	Origine des dépôts superficiels, présence ou absence de carbonates, présence de carbonates dans l'assise rocheuse	———	Cartes lithologiques Études glaciologiques Programme national de reconnaissance géochimique	Faible sensibilité Sensibilité intermédiaire ou indéterminée Sensibilité élevée
Sols					
Klopatek, Harris et Olson (1980) Laboratoire national de Oak Ridge	Sensibilité à l'acidification accélérée du sol	1) pH du sol 2) Teneur en matières alcalines totales 3) Matières organiques 4) Teneur en argile 5) H^+ eq/m^2	2) Saturation alcaline CEC 5) pH et précipitation moyenne annuelle (cm)	Base de données (Geoecology, USGS) National Atlas (1970), Données pédologiques USDA-SCS (1960, 1975), Cogbil et Likens (1974), Buol et al (1975) Hoyle et al (1973),	Type I, Type II: plus sensible Type III, Type IV: moins sensible
McFee (1980) Agence de protection de l'environnement des États-Unis	Fraction des cations échangeables lessivés des 25 cm de la couche supérieure du sol en 25 ans de précipitations, avec un pH moyen de 3.7 à raison de 100 cm par année (100 kg $CaCO_3$ eq/ha)	1) Capacité tampon totale ou CEC 2) Saturation alcaline 3) Système de gestion 4) Présence ou absence de carbonates	1) Teneur en argile et en matières organiques 2) pH	Levé des sols, données de laboratoire et descriptions (USDA)	Non sensible, Légèrement sensible, Sensible
Wang et Coote (1980) Agriculture Canada	Fraction des éléments alcalins échangeables lessivés de la couche labourée (15 cm) en 25 ans avec apports de 60 kg de $CaCO_3$ eq/ha	1) CEC 2) Saturation alcaline 3) Échange	1) Teneur en argile 2) pH 3) Teneur en argile, pH (en fonction d'une teneur uniforme en matières organiques	CanSis, rapports pédologiques publiés, laboratoires provinciaux d'essais pédologiques	Sensible, Modérément sensible, Non sensible
Végétation					
Klopatek, Harris et Olson (1980) Laboratoire national de Oak Ridge	Impact du SO_2 sur les espèces sensibles (soja et conifères)	Rendement du soja Productivité des conifères Concentration régionale prévue de SO_2 pour 1985	———	Base de données (Geoecology), Recensement de l'agriculture (1969), Davis (1978)	Aucun impact, Faible impact, Impact moyen, Impact élevé
Robitaille (1980) Service canadien des forêts	Effets nuisibles des apports acides (SO_2) Effet sur la végétation	Sensibilité relative du terrain (SRT)	1) Espèces forestières dominantes 2) Sensibilité relative des espèces au SO_2	Rowe (1972) Palisier (1972) Jeffree(1979)	Sensibilité élevée, Intermédiaire, Faible sensible
Terrestre					
Robitaille (1979) et Robitaille et Rennie (1980) Service canadien des forêts	Combinaison des sensibilités individuelles de la végétation et du sol	1) Sensibilité des espèces 2) Ordre des sols 2) pH 3) CEC 4) Teneur en matières organiques 5) Texture		Rowe (1972) Palisier (1972) Jeffree (1979) Carte pédologique du Canada (1979)	Très sensible, Sensible, Tolérant

précipitations acides à l'intérieur d'un bassin versant. Les différentes interactions entre les précipitations et les sols ou l'assise rocheuse ont été identifiées et mises en corrélation approximativement à un indice de saturation de calcium (ISC) et à des classes d'alcalinité. Des projets de cartographie régionale pourraient ainsi être entrepris avec les données appropriées.

Dépôts superficiels: Shilts et al (1980) donnent une évaluation de la sensibilité des dépôts meubles des régions non agricoles de l'est du Canada. Kramer (1976) identifie les matériaux superficiels comme un facteur important pour l'évaluation de la sensibilité des régions glaciaires où les matériaux ne proviennent pas de la région immédiate. Cela s'applique à la majeure partie du nord-est de l'Amérique du Nord.

Sols: Les méthodes utilisées par McFee (1980) et Wang et Coote (1980) sont semblables. Les deux méthodes considèrent les critères chimiques du sol comme déterminés par les paramètres substituts dans leur définition de la sensibilité afin de prévoir les changements causés par certaines charges d'acide: respectivement les équivalents de 100 kg $CaCO_3$/ha et 60 kg $CaCO_3$/ha.

Wang et Coote (1980) choisissent les éléments basiques échangeables comme principal critère plutôt que la capacité d'échange cationique. Cette méthode constitue probablement une représentation plus précise de la capacité tampon des sols. La méthode de McFee (1980) comprend tous les types de sols dans l'est des États-Unis, tandis que Wang et Coote (1980) limitent leur étude aux régions agricoles de l'est du Canada en raison du manque de données. Cette méthode peut probablement s'appliquer aux régions non agricoles à condition d'avoir les données requises.

Klopatek, Harris et Olson (1980) comparent les sols sensibles à l'acidification dans l'est des États-Unis en fonction de la concentration d'ions H^+.

Végétation: Robitaille (1980) a mis au point un indice de sensibilité pour la végétation. En évaluant la sensibilité au SO_2 d'espèces individuelles et en faisant une estimation de l'abondance des espèces pour chacune des régions forestières de l'est du Canada (Rowe, 1972), il est possible d'établir une classification relative de la sensibilité des terrains. Ce procédé ne tient pas compte de l'influence de la chimie des précipitations non interceptées, variable importante pour l'évaluation de la sensibilité des sols forestiers.

Klopatek, Harris et Olson (1980) comparent la sensibilité du soja et des conifères aux concentrations régionales de SO_2 prévues pour l'est des États-Unis.

Précédemment, un essai avait été fait afin de combiner ces sensibilités de la végétation avec une estimation de la sensibilité des sols (Robitaille, 1979). La compatibilité de ces deux sensibilités reste à être illustrée.

Résumé

(1) Jusqu'à présent, la plupart des analyses sont limitées par la petite échelle des cartes (1:15,000,000 à 1:1,000,000) et le manque de données constantes pour les régions géographiques entières.

Tableau 1: Étude des projets de cartographie de la sensibilité terrestre

Facteurs et sources cartographiques	Critères de sensibilité	Paramètres idéaux	Paramètres substituts	Base de données	Évaluation de la sensibilité
Assise rocheuse et hydrochimie					
Hendrey et al, (1980) Commission géologique des États-Unis	Capacité tampon potentielle	Composition chimique	----------	Cartes géologiques des États-Unis	Type I: capacité tampon faible ou nulle Type II: faible à moyenne Type III: moyenne à élevée Type IV: infinie
Kramer (1976, 1977, 1978, 1979) Université McMaster	régions sujettes à des variations du caractère organique et biologique, supérieures aux limites naturelles pour une période donnée	1) données sur les eaux lacustres: pH, conductivité spécifique, température, profondeur de Secchi, alcalinité, chlorophylle, phytoplancton 2) données sur les sols: *couleur*, épaisseur totale, épaisseur des horizons, texture, capacité d'échange d'ions H^+	Indice de saturation en calcite (ISC)	Données sur le le terrain	Non sensible, probablement sensible, sensible aux pH réduits
Shilts et al, (1980) Commission géologique des États-Unis	Réaction tampon prévisible aux apports acides	Composition chimique	Essentiellement: type et quantité de phases minérales instables	Cartes géologiques	sensibilité élevée, intermédiaire à élevée, intermédiaire à faible, faible sensibilité
Matériaux superficiels					
Shilts et al, (1980) Commission géologique des États-Unis	Réaction tampon prévisible aux apports acides	Origine des dépôts superficiels, présence ou absence de carbonates, présence de carbonates dans l'assise rocheuse	----------	Cartes lithologiques Études glaciologiques Programme national de reconnaissance géochimique	Faible sensibilité Sensibilité intermédiaire ou indéterminée Sensibilité élevée
Sols					
Ktopatek, Harris et Olson (1980) Laboratoire national de Oak Ridge	Sensibilité à l'*acidification* accélérée du sol	1) pH du sol 2) *Teneur en matières* alcalines totales 3) Matières organiques 4) Teneur en argile 5) H^+ eq/m^2	2) Saturation alcaline CEC 5) pH et précipitation moyenne annuelle (cm)	Base de données (Geoecology, USGS) National Atlas (1970), Données pédologiques USDA-SCS (1960, 1975), Cogbil et Likens (1974), Buol et al (1975), Hoyle et al (1973),	Type I) plus sensible Type II) Type III) moins sensible Type IV)
McFee (1980) Agence de protection de l'environnement des États-Unis	Fraction des cations échangeables lessivés des 25 cm de la couche supérieure du sol en 25 ans de précipitations, avec un pH moyen de 3.7 à raison de 100 cm par année (100 kg $CaCO_3$ eq/ha)	1) Capacité tampon totale ou CEC 2) Saturation alcaline 3) Système de gestion 4) Présence ou absence de carbonates	1) Teneur en argile et en matières organiques 2) pH	Levé des sols, données de laboratoire et *descriptions* (USDA)	Non sensible, Légèrement sensible, *Sensible*
Wang et Coote (1980) Agriculture Canada	Fraction des éléments alcalins échangeables lessivés de la *couche labourée* (15 cm) en 25 ans avec apports de 60 kg de $CaCO_3$ eq/ha	1) CEC 2) Saturation alcaline 3) Échange	1) Teneur en argile 2) pH 3) Teneur en argile, pH (en fonction *d'une teneur uniforme* en matières organiques	CanSis, rapports pédologiques publiés, laboratoires *provinciaux* d'essais pédologiques	Sensible, Modérément sensible, Non sensible
Végétation					
Ktopatek, Harris et Olson (1980) Laboratoire national de Oak Ridge	Impact du SO_2 sur les espèces sensibles (soja et conifères)	Rendement du soja Productivité des conifères Concentration régionale prévue de SO_2 pour 1985	----------	Base de données (Geoecology), Recensement de l'agriculture (1969), *Davis (1978)*	Aucun impact, Faible impact, Impact moyen, Impact élevé
Robitaille (1980) Service canadien des forêts	Effets nuisibles des apports acides (SO_2) Effet sur la végétation	Sensibilité relative du terrain (SRT)	1) Espèces forestières dominantes 2) Sensibilité relative des espèces au SO_2	Rowe (1972) Palisier (1972) Jeffree(1979)	Sensibilité élevée, Intermédiaire, Faible sensible
Terrestre					
Robitaille (1979) et Robitaille et Rennie (1980) Service canadien des forêts	Combinaison des sensibilités individuelles de la végétation et du sol	1) Sensibilité des espèces 2) pH 3) CEC 4) Teneur en matières organiques 5) Texture	2) Ordre des sols	Rowe (1972) Palisier (1972) Jeffree (1979) Carte pédologique du Canada (1979)	Très sensible, Sensible, Tolérant

précipitations acides à l'intérieur d'un bassin versant. Les différentes interactions entre les précipitations et les sols ou l'assise rocheuse ont été identifiées et mises en corrélation approximativement à un indice de saturation de calcium (ISC) et à des classes d'alcalinité. Des projets de cartographie régionale pourraient ainsi être entrepris avec les données appropriées.

Dépôts superficiels: Shilts et al (1980) donnent une évaluation de la sensibilité des dépôts meubles des régions non agricoles de l'est du Canada. Kramer (1976) identifie les matériaux superficiels comme un facteur important pour l'évaluation de la sensibilité des régions glaciaires où les matériaux ne proviennent pas de la région immédiate. Cela s'applique à la majeure partie du nord-est de l'Amérique du Nord.

Sols: Les méthodes utilisées par McFee (1980) et Wang et Coote (1980) sont semblables. Les deux méthodes considèrent les critères chimiques du sol comme déterminés par les paramètres substituts dans leur définition de la sensibilité afin de prévoir les changements causés par certaines charges d'acide: respectivement les équivalents de 100 kg $CaCO_3$/ha et 60 kg $CaCO_3$/ha.

Wang et Coote (1980) choisissent les éléments basiques échangeables comme principal critère plutôt que la capacité d'échange cationique. Cette méthode constitue probablement une représentation plus précise de la capacité tampon des sols. La méthode de McFee (1980) comprend tous les types de sols dans l'est des États-Unis, tandis que Wang et Coote (1980) limitent leur étude aux régions agricoles de l'est du Canada en raison du manque de données. Cette méthode peut probablement s'appliquer aux régions non agricoles à condition d'avoir les données requises.

Klopatek, Harris et Olson (1980) comparent les sols sensibles à l'acidification dans l'est des États-Unis en fonction de la concentration d'ions H^+.

Végétation: Robitaille (1980) a mis au point un indice de sensibilité pour la végétation. En évaluant la sensibilité au SO_2 d'espèces individuelles et en faisant une estimation de l'abondance des espèces pour chacune des régions forestières de l'est du Canada (Rowe, 1972), il est possible d'établir une classification relative de la sensibilité des terrains. Ce procédé ne tient pas compte de l'influence de la chimie des précipitations non interceptées, variable importante pour l'évaluation de la sensibilité des sols forestiers.

Klopatek, Harris et Olson (1980) comparent la sensibilité du soja et des conifères aux concentrations régionales de SO_2 prévues pour l'est des États-Unis.

Précédemment, un essai avait été fait afin de combiner ces sensibilités de la végétation avec une estimation de la sensibilité des sols (Robitaille, 1979). La compatibilité de ces deux sensibilités reste à être illustrée.

Résumé

(1) Jusqu'à présent, la plupart des analyses sont limitées par la petite échelle des cartes (1:15,000,000 à 1:1,000,000) et le manque de données constantes pour les régions géographiques entières.

(2) L'évaluation de la sensibilité en fonction d'un facteur unique ne tient pas toujours compte de tous les aspects du facteur, la tendance étant de centrer l'analyse sur une variable.

(3) On a très peu essayé d'intégrer les éléments de plusieurs disciplines.

(4) Il faut coordonner les indices de chaque discipline de part et d'autre des frontières internationales.

(5) Il n'existe pas encore de schéma écologique général de la "sensibilité terrestre" pour l'évaluation des impacts des pluies acides.

CARTOGRAPHIE DE LA SENSIBILITÉ TERRESTRE

La mise au point d'un indice de sensibilité terrestre est un problème double. Les divers éléments d'un écosystème peuvent être évalués en fonction de leur sensibilité à condition d'avoir des données parfaites qui serviront ensuite à calculer un indice de sensibilité terrestre idéal. Mais faute de telles données, on peut trouver des substituts pour certaines variables. L'identification de ces substituts est importante pour le second volet du problème, c'est-à-dire la cartographie des régions à sensibilité uniforme (ou semblable). Lorsqu'il s'agit d'une vaste région géographique, le contenu et l'exactitude des données varient considérablement. Dans les régions non urbanisées du Nord, il y a très peu de données sur la plupart des variables. Au Canada, cette situation correspond aux régions considérées comme les plus sensibles aux précipitations acides. Les cartes ainsi produites sont donc loin d'être parfaites puisqu'elles sont un compromis entre des données idéales et les données disponibles utilisables à une échelle appropriée.

Au Canada, les bases de données varient entre les différentes provinces et à l'intérieur même des provinces. Voici un court résumé indiquant les renseignements disponibles.

Assise rocheuse: La géologie de l'assise rocheuse faite par la Commission géologique du Canada et les organismes provinciaux constitue la base de données la plus uniforme de l'est du Canada. Les données de la Commission géologique de l'Ontario sont fournies à trois échelles: 1:50,000, 1:250,000 et 1:1,000,000 pour la majeure partie de la province mais ce n'est pas le cas au Québec où de vastes régions de la province ne sont pas encore cartographiées de façon aussi détaillée. Les levés géologiques de l'assise rocheuse ont été faits pour la majeure partie des Maritimes, sauf au Labrador.

Dépôts superficiels: il y a une importante documentation sur la composition physique et l'origine des dépôts superficiels. Dans la plupart des cas, l'origine des matériaux transportés par les glaciers peut être déduite à partir des cartes glaciaires et superficielles. Il y a très peu d'information sur leur composition chimique, surtout dans les régions du Bouclier. La majeure partie de l'est du Canada, surtout au Québec, n'a pas été cartographiée en détail.

Sols: Des cartes du sol à petite échelle (par exemple 1:5,000,000) existent pour tout le Canada, identifiant les ordres et les groupes dominants de sols avec les classes générales de texture. De plus, l'inventaire

des terres de l'Ontario fournit des renseignements détaillés sur la texture, l'épaisseur, le macrorelief, la profondeur en fonction du $CaCO_3$ et le drainage. A l'origine, tout cela était cartographié de façon polygonale à l'échelle 1:250,000. La partie septentrionale de l'Ontario (les basses terres de la baie d'Hudson) n'était pas comprise dans cette base de données. Les cartes détaillées du sol existent pour toutes les provinces maritimes et le Québec a d'excellentes cartes du sol de la majeure partie de ses régions agricoles. De vastes régions du Québec ont été cartographiées par levés cartographiques écologiques à l'échelle 1:250,000.

Végétation: La base de données la plus incomplète est celle de la végétation. Rowe (1972) a cartographié les régions forestières du Canada à l'échelle 1:15,000,000 en fonction des espèces et des associations dominantes d'arbres. En Ontario, le Forest Resources Inventory (OMNR) donne des données sur les espèces forestières à différentes échelles, jusqu'à 1:15,000, pour les régions situées au sud des basses terres de la baie d'Hudson. Dans ces basses terres, le terrain qui est surtout organique a été cartographié à l'échelle 1:600,000 en fonction des variétés de sols tourbeux (Bates et Simkin, 1969). Il y a des cartes forestières pour la majeure partie des Maritimes, sauf pour le Labrador et certaines régions de Terre-Neuve. Des Commissions écologiques ont cartographié la végétation d'environ 40% de la superficie du Québec à l'échelle 1:250,000. Certaines vastes régions du Québec sont actuellement cartographiées à l'échelle 1:100,000 à l'aide des données digitales LANDSAT.

Compilation des données

A cause de la variété des informations cartographiées, des échelles et des formats ainsi que de leur accessibilité, une certaine prudence est nécessaire pour les analyses. La Direction générale des terres d'Environnement Canada a tenté de compiler toutes ces données. Le système de données sur les terres du Canada est un système d'information informatisé pour l'emmagasinage, la manipulation, l'extraction et l'analyse des données cartographiques. Son application à l'évaluation des sensibilités au TADPA devrait s'avérer très efficace.

Le premier essai de rassemblement de toutes ces données éparpillées est en cours pour l'est du Canada. La méthode adoptée utilise la structure conceptuelle des Écodistricts comme base de l'analyse des données. La Direction générale des terres compile actuellement une série de cartes d'écodistricts pour tout le Canada à l'aide d'une base de données écologiques intégrée.

Les écodistricts ont été définis par le Comité canadien de la classification des terres écologiques comme "une unité de terre caractérisée par un relief, une géomorphologie, une végétation, des sols, de l'eau et des terres distincts". Les limites de ces écodistricts sont généralement interprétées "d'en haut" à l'aide des images couleurs du LANDSAT, mais elles peuvent également être analysées "d'en bas" à l'aide des données écologiques plus détaillées du relevé géographique des terres. L'écodistrict constitue un niveau dans la hiérarchie de classification écologique des terres proposée pour tout le pays. L'échelle

TABLEAU 2: Catégories générales pour les descriptions et les légendes des écodistricts utilisées par Environnement Canada

1. Enregistrement

   A. Bureau chargé du projet
   B. Année de classification

2. Lieux géographiques

   A. Province, territoire ou territoires
   B. Ecorégion du projet, identification du polygone écodistrict
   C. Identification du polygone normalisé au niveau national
   D. Superficie unitaire

3. Terrain

   A1. Terrain: rapport hydrographique
   B1. Relief régional
   B2. Description du relief local
   B3. Direction de la pente régionale
   B4. Pente locale
   C1. Description des formes régionales du terrain
   C2. Mode d'origine des matériaux consolidés et des matériaux meubles
   C3. Couverture du terrain
   C4. Expression de surface
   C5. Processus de modification
   C6. Taille des particules
   C7. Texture des matériaux
   C8. Épaisseur des matériaux de surface
   D1. Ordre, grand groupe, et sous-groupe des sols
   D2. pH du sol (horizon C)
   D3. Réaction du sol de surface (m.e.q./100g de sol dans les 25 cm supérieurs)
   D4. pH du sol de surface

4. Végétation

   A1. Espèces générales
   A2. Espèces dominantes dans les associations

5. Eau

   A1. Taille des lacs
   A2. Forme des lacs
   A3. Qualité des lacs
   A4. Profondeur des lacs
   B1. Densité des rivières
   B2. Configuration des rivières
   B3. Configuration des canaux
   C1. Configuration du littoral
   C2. Association riveraine ou côtière

de 1:1,000,000 est idéale pour ce niveau de présentation des données écologiques et c'est l'échelle adoptée par Environnement Canada pour ce programme de cartographie.

Les provinces de l'est du Canada (l'Ontario, le Québec, la Nouvelle-Écosse, le Nouveau-Brunswick, l'Ile-du-Prince-Édouard et Terre-Neuve) font actuellement l'objet d'un programme de cartographie des écodistricts entrepris par la Direction générale. La délimitation et la description de chaque écodistrict sont maintenant terminées pour l'Ontario. La cartographie est en cours dans les autres régions. Une légende normalisée a été établie et sera introduite dans le système de données sur les terres du Canada.

L'introduction de ces données et l'analyse préliminaire de la sensibilité seront possibles pour l'Ontario dès février 1981 et, pour la majeure partie du sud du Québec et les Maritimes, dès mai 1981. La légende des écodistricts utilisée comprend les informations fournies au tableau 2. Il est important de souligner que des données additionnelles sur de nouveaux éléments peuvent être ajoutées au programme ultérieurement.

De plus, on établit actuellement une base de données dans le cadre du SDTC à l'échelle de 1:1,000,000 pour le centre de l'Ontario. Ces données comprennent des informations détaillées sur la texture et l'épaisseur du sol, l'épaisseur en fonction des carbonatés, la géologie de l'assise rocheuse, les dépôts superficiels, les essences forestières [illegible] et les limites des bassins versants. Une fois introduite dans le SDTC, ces données pourront être utilisées pour faire des cartes de sensibilités terrestres (1:1,000,000). Ces cartes peuvent être comparées aux déterminations de la sensibilité des écodistricts afin de connaître les données qui correspondent le mieux aux classes choisies de sensibilité. Les sensibilités terrestres peuvent ensuite être définies en fonction des écosystèmes pour le reste de l'est du Canada.

A une date ultérieure, les données sur la chimie aquatique pourront être incorporées au système par bassin versant afin d'évaluer les rapports et les effets entre le milieu aquatique et le milieu terrestre. De plus, une fois les écodistricts sensibles identifiés, on pourra entreprendre l'analyse détaillée des données à l'échelle 1:250,000. Les cartes de sensibilité à facteur unique comme celles de Shilts et al (1980) seront introduites dans le SDTC et utilisées comme transparent additionnel pour ces analyses.

SENSIBILITÉS CRITIQUES

La définition quantitative des valeurs critiques des apports d'acide permettrait de rendre plus cohérentes et plus uniformes les évaluations de la sensibilité.
Afin d'identifier les charges tolérables d'acide, les rapports dose-effet doivent être bien compris pour les divers éléments de l'écosystème. C'est pourquoi la recherche a porté sur la division de l'écosystème terrestre en différents éléments étudiés par simulation ou méthodes empiriques.
Cependant, on doute de plus en plus que de telles techniques artificielles et contrôlées à court terme soient représentatives des conditions réelles (Malmer, 1976).
Néanmoins, elles constituent la meilleure approximation disponible, bien que tous les

résultats doivent être clairement identifiés en fonction de la méthode et des hypothèses utilisés.

Dans l'étude de l'écosystème, il faut faire une distinction entre les émissions humides et les émissions sèches. L'influence relative de chacun de ces types d'émissions varie avec la distance de la source de pollution. Près de la source d'émission, la contribution des métaux lourds constitue un facteur de complication; la nature du sol et les effets phytotoxiques augmentent et surpassent les effets produits par l'acidité (Hutchinson et Whitby, 1977). Les éléments chimiques varient entre les différentes formes et sources d'émissions ainsi qu'à l'intérieur de celles-ci. Dans la comparaison de la recherche dose-effet des diverses sources, il faut reconnaître la composition chimique et la forme des précipitations et des polluants.

Effets sur la végétation

Les sensibilités ou les valeurs critiques déterminées pour l'écosystème terrestre et surtout l'écosystème forestier, doivent tenir compte des effets directs des polluants sur la végétation et du filtrage, des précipitations incidentes et du lessivage par le couvert forestier et la litière en fonction d'un apport fixe dans le sol.

Effets directs

Les précipitations acides et le SO_2 ont des effets néfastes directs sur la végétation bien que les précipitations soient plus importantes à l'échelle régionale (Abrahamsen et al, 1976). Tout indique que chaque espèce de végétation a une sensibilité unique à ces deux sources de polluants; cependant, il est souvent difficile d'établir ou de reproduire ces valeurs critiques, même dans le cadre d'une même expérience (Posthumus, 1980). Cela est dû à la variabilité de l'environnement et des conditions de croissance dans une même étude et entre les études. Haase et al (1980) identifient l'humidité, la vitesse du vent, l'humidité relative et le stade de croissance comme des facteurs influençant la tolérance des cultures au SO_2. L'intensité ainsi que la fréquence des pluies, la teneur en sel, la saison, le climat local et l'âge des plantes sont également considérés comme des facteurs influençant la tolérance des plantes aux précipitations dont le pH est peu élevé (Abrahamsen et al, 1976; Havas et Huttunen, 1980; Posthumus, 1979; Tukey, 1980).

L'effet des dépôts se manifeste souvent par des lésions foliaires et une diminution du rendement, bien que certaines espèces aient un rendement accru aux pH intermédiaires (Lee, Neely et Perrigan, 1980). Cependant, les aspects bénéfiques de fortes charges d'acide n'ont pas encore été observés de façon concluante (Cogbill, 1977; Heggestad, 1980; Johnson, 1977). Les lésions foliaires dues au SO_2 peuvent ne pas être visibles jusqu'à ce que le dommage soit grave et que le rendement diminue (Tingey et Reinert, 1975). Cependant, le dommage n'entraîne pas toujours une diminution de la productivité de la plante (Haase et al, 1980). L'éclaircissement éventuel du couvert forestier augmente les précipitations non interceptées en raison de la réduction de l'interaction du couvert végétal (acidification et tampon) entraînant ainsi une augmentation de l'érosion mécanique et chimique des sols sous-jacents (Hutchinson et Whitby, 1977; Materna, 1979). Dans les

TABLEAU 3: Limites représentatives de tolérance aux effets du SO_2

Espèces	Concentration	Condition	
lichens	.03 mg SO_2/m^3	concentration hivernale moyenne	Hawksworth et Rose 1970; Hawksworth et al, 1973
épinette	.05 mg SO_2/m^3	maximum annuel	IUFRO, 1978
	.10 mg SO_2/m^3	maximum quotidien	
	.15 mg SO_2/m^3	maximum d'une demi-heure	
	les limites de tolérance sont de 50% inférieure dans le cas de populations moins vigoureuses.		
pin	.05 à .10 mg SO_2/m^3	maximum mensuel à annuel	Knabe, 1971
pin	.01 à 1.0 mg SO_2/m^3	maximum de quelques heures	Tamm et Aronsson, 1972

TABLEAU 4: Limites représentatives de tolérance à des précipitations acides simulées (H_2SO_4)*

Espèces	Concentration polluants	Effets	Source
bouleau épilobe pin sylvestre mousses	pH 2.0-2.5	- lésions foliaires	Abrahamsen et al; 1976
	pH 3.0	- lésitons foliaires	
radis	pH 3.5	- dommage foliaire	Lee et al, 1980
betterave	pH 4.0		
carotte	pH 4.0	- baisse du rendement	
feuilles de moutarde épinard bettes	pH 3.5	- dommage foliaire et qualité commerciale réduite	
tabac laitue	pH 3.5	- dommage foliaire	
brocoli/ chou-fleur	pH 3.5	- dommage foliaire	
chou	pH 3.0		
brocoli	pH 3.0	- baisse du rendement	
pommes de terre	pH 3.0	- dommage foliaire baisse du rendement	
	pH 3.5-4.0	- augmentation du rendement	
luzerne	pH 3.5	- dommage foliaire	
	pH 3.5-4.0	- augmentation du rendement	
haricots, chêne	pH 3.2	- inhibition des organismes parasitaires	
plants de conifères	< pH 2.0	- dommage foliaire	Strifler et Kuehn, 1976
mousses	pH 2.0-3.0	- dessication, mort	Teigen et al, 1976
chrysanthèmes	pH 3.0	- dommage foliaire et absorption accrue et phosphates	Tukey, 1980
genèvrier	> pH 4.0		

* Le pH moyen des précipitations dans l'est de l'Amérique du Nord est actuellement supérieur ou égal à 4.0

régions septentrionales, l'endommagement maximal de la végétation se produit en hiver alors que les espèces subissent le maximum de stress biochimique (Huttunen, 1980; Havas et Huttunen, 1980). Dans les endroits où le climat est moins rigoureux, l'été constitue la période la plus sensible, coïncidant avec l'activité biologique maximale et les plus importants dépôts de bioxyde de soufre (Hornbeck, Likens et Eaton, 1977). Les tableaux 3 et 4 donnent la liste des tolérances des plantes au SO_2 et aux précipitations. L'acide sulfurique a été utilisé pour produire les coefficients pH indiqués au tableau 4.

Effets du filtrage et du lessivage

Des études des effets du filtrage des précipitations et du lessivage ont été publiés dans d'autres ouvrages (Abrahamsen et al, 1976; Blass et al, 1980a). Bien que les valeurs critiques n'aient pas encore été déterminées, la nature chimique de ces effets a été considérée dans une étude récente.

Il se produit des modifications chimiques dans l'eau de précipitation au contact des feuilles, à la fois à la surface de ces feuilles et à l'intérieur des tissus. La nature des eaux de lessivage dépend de l'espèce, de l'âge et de la densité des arbres et des conditions naturelles du milieu, et elle est contrôlée par la composition chimique initiale. Des analyses ont été décrites par divers auteurs (Anderson et al, 1980; Lakhani et Miller, 1980; Mayer et Ulrich, 1980; Posthumus, 1979; Tukey, 1980; Ulrich, 1980). Il est difficile de faire des comparaisons entre ces diverses analyses à cause du manque d'uniformité des conditions environnementales (sols, eau, climat).

On a constaté qu'un couvert d'épinettes filtrait mieux les dépôts secs de polluants atmosphériques qu'un couvert de feuillus (Mayer et Ulrich, 1980; Ulrich, 1980). On attribue ce fait, en partie, à la présence d'aiguilles pendant tout l'hiver; en effet, pendant cette saison, le SO_2 se dissout dans la pellicule d'eau qui adhère à la surface des aiguilles. L'extraction ultérieure de ces dépôts explique la composition chimique de l'eau de lessivage.

Tous les composés ne sont pas lessivés également d'une plante et les jeunes feuilles sont moins sensibles au lessivage que les feuilles adultes (Tukey, 1980). Il suffit que les feuilles soient mouillées pour déclencher le lessivage; l'intensité des précipitations n'a que peu d'effet de ce point de vue. Le déplacement des cations augmente avec le temps; les plantes ne peuvent donc résister aux effets des pluies brèves et rares qu'en disposant d'un approvisionnement suffisant en éléments nutritifs.

D'après certaines études préliminaires faites sous un couvert d'épinettes, le lessivage de Ca^+ et Mg^+ semble dépendre d'un pH variant de 7 à 3 (Abrahamsen et al, 1976).

La plupart des chercheurs ont constaté que l'eau de lessivage d'une forêt de feuillus présente un pH plus élevé et des concentrations plus fortes de Ca^+ et de Mg^+ que l'eau de précipitation incidente (Fairfax et Lepp, 1975; 1976; Wood et Bormann, 1975; Eaton et al, 1973; Tukey, 1980). L'eau d'écoulement sur des troncs de bouleaux présente l'effet inverse d'une acidité accrue par rapport à la précipitation incidente (Abrahamsen, Horntvedt et Tveite, 1977).

Sous un couvert de conifères, le pH de l'eau de lessivage diminue généralement par rapport à celui de la précipitation incidente dans les zones ouvertes alors que la concentration de Ca^+ et de Mg^+ (et celle de nombreux autres ions dissous) peut augmenter (Horntvedt et Joranger, 1976). Cet enrichissement en ions tient au lavage des dépôts secs et au lessivage du couvert. On a signalé que 90% des ions H^+ des précipitations restaient dans le couvert d'une forêt de feuillus, laissant ainsi les sels nutritifs lessivés sous forme soluble facilement assimilables (Horntvedt, Likens et Eaton, 1977).

Lee et Weber (1980) signalent qu'il y a très peu de différence dans la chimie des eaux de lessivage des forêts modelisées d'érables à sucre et d'aulnes de l'Orégon. Cependant, les eaux de lessivage de la litière ont toujours des concentrations supérieures de Ca^+ et de Mg^+ ainsi qu'un pH plus élevé que les précipitations acides.

Effets sur le sol

L'effet des précipitations acides sur les sols varie selon les propriétés du sol et l'importance de l'apport. Les principaux effets comprennent une mobilité accrue de la plupart des éléments, un accroissement de la perte des minéraux argileux, des changements dans la capacité d'échange cationique, une élimination accrue de tous les cations et une augmentation du flux des sels nutritifs dans les écosystèmes contigus (Norton, 1977; Tyler, 1978). On supposait que l'augmentation de l'apport en sulfates par les précipitations acides correspondait à une production similaire de sulfates (Johnson et Cole, 1976), mais on a depuis modifié cette hypothèse. Des expériences récentes ont montré que les sulfates sont retenus dans le profil du sol (Johnson et Cole, 1977). Cela est important en ce qui a trait à la disponibilité et à la productivité des sels nutritifs. La mobilisation des ions Al^+ se fait lorsque le pH est entre 3.5 et 5.5, alors que ce coefficient agit comme mécanisme tampon dominant (Bache, 1980; Ulrich, 1980). Les pertes de cations basiques dépendent du pH des eaux de précipitation, important facteur puisque la majeure partie des eaux de lessivage des feuilles tendent à être alcalines avec le $HCO_3 2^-$ comme anion dominant (Tukey, 1980). D'après les calculs, les pertes moyennes de chaux dans les sols agricoles passent de 900 à 100 kg de $CaCO_3$/ha dans une progression géométrique alors que le pH baisse de 8 à 5 (Gasser, 1974). Le lessivage des cations des sols déjà acides (par exemple des sols podzoliques à pH entre 5 et 5.5) dépend grandement de leur faible saturation en matières basiques (2 à 20%), mais il restera peu important en termes absolus en raison de la faible efficacité de l'échange des ions H^+ dans ces sols (Cole et Johnson, 1977; Johnson et Cole, 1976; Nilsson, 1975; Wiklander, 1973; 1974; 1975). Cela est corroboré par un rapport de lessivage des cations comparativement plus élevé dans des sols "de terre brune" moins acides (Bergseth, 1975).

Dans l'écosystème terrestre, les effets des pluies acides s'étendent à la faune et à la décomposition des litières des animaux (Abrahamsen, Hovland et Hagvar, 1980; Alexander, 1980; Bääth et al, 1980; Freedman et Hutchinson, 1980). Bien que la plupart des espèces animales puissent s'adapter à des variations lentes de la chimie du sol, on a découvert que la vitesse de décomposition des

matières organiques diminue sensiblement lorsque le pH du sol est inférieur à 3.5 (Abrahamsen et al, 1977).

Il est généralement difficile d'identifier les effets des précipitations acides sur les sols qui ne sont ni matures ni stables (Malmer, 1976). Les changements naturels peuvent modifier sensiblement les sols en moins de 50 ans et bien masquer les effets dus aux acides, du moins d'après nos mesures actuelles (Frink et Voigt, 1977; Rennie, 1979). Petersen (1980) suggère que les charges acides entraînent une diminution de la période requise pour la podzolisation, bien que cela dépende également de la période de temps et de la force de l'acide.

A cause de la composition complexe des sols, il est impossible de définir des valeurs de charge "critiques"; cependant, des précipitations dont le pH est de 4 à 5.5 semblent être des valeurs critiques pour les sols podzoliques canadiens (Glass et al, 1980).

MÉTHODE D'ÉVALUATION DE LA SENSIBILITÉ DE L'ÉCOSYSTÈME TERRESTRE

Les sensibilités terrestres ont été définies indépendamment des données sur les apports calculés ou mesurés d'acide. Ces critères de sensibilité ont plutôt été établis à partir d'une base considérable de connaissances sur les processus naturels des sols. En ce qui a trait aux impacts terrestres, la difficulté réside dans la différenciation entre la formation naturelle d'acide et les processus de lessivage dans le sol et les apports anthropogénétiques. On n'a pas encore déterminé clairement si ces apports additionnels avaient un effet strictement additif ou synergique. Les effets bénéfiques des apports de SO_x et NO_x en tant que source de sels nutritifs pour les terres agricoles et forestières n'ont pas non plus été étudiés. L'azote est surtout favorable à la croissance végétale bien que l'augmentation de la croissance causée par une teneur plus élevée en azote anthropogénétique puisse être limitée par la perte d'autres sels nutritifs (Ca^+, Mg^+, K^+, etc.) provenant de l'acidification, surtout dans les sols à faible capacité tampon.

Cette complexité des interactions entre les apports acides et la végétation, le sol, la géologie, etc. nécessite l'adoption d'une méthode d'évaluation de la sensibilité par écosystème. Les méthodes à facteur unique utilisées jusqu'à présent devront être combinées et évaluées afin d'obtenir des évaluations précises de la sensibilité. Au cours d'une réunion récente, les personnes directement concernées par la cartographie des sensibilités terrestres aux précipitations acides (annexe 1) étaient d'avis que la détermination des combinaisons de facteurs serait différente pour les impacts sur les écosystèmes forestiers, surtout en ce qui a trait à la productivité forestière, et pour les impacts sur le milieu aquatique par la modification des eaux de ruissellement et des eaux souterraines. La première méthode d'évaluation est dite "sensibilité de la productivité forestière" et porte sur les interactions de la chimie du sol dans les 25 cm de la couche supérieure du profil de sol. La deuxième méthode est dite "sensibilité de l'apport aquatique" et porte également sur le complexe couvert forestier/matériaux superficiels/assise rocheuse.

Les tableaux 5 et 6 mettent respectivement en relief les principaux facteurs terrestres de la sensibilité de la productivité forestière et de la sensibilité de l'apport aquatique. Ce ne sont pas les seuls facteurs servant à déterminer la sensibilité des écosystèmes, mais ils représentent certaines des caractéristiques de base des écosystèmes que l'on peut mesurer et auxquelles on peut attribuer des critères de sensibilité. On n'a pas tenu compte de l'incohérence ou de l'absence de données en ce qui a trait à la cartographie. Ces données sont considérées comme des variables essentielles pour l'évaluation de la sensibilité et, dans bien des cas, ces données ne sont pas disponibles à l'échelle continentale. Il faudra donc obtenir ce genre de données pour tout l'est de l'Amérique du Nord avant de procéder à une cartographie précise. D'ici là, on devra utiliser les données disponibles, y compris des substituts, et mettre de côté un ou deux facteurs.

Le tableau 5 donne la liste des facteurs et de leurs limites connexes pour trois niveaux de sensibilité de la productivité forestière. Les facteurs principaux sont la chimie du sol, en particulier les éléments basiques échangeables et la capacité d'adsorption de SO_4^{2-} et l'épaisseur du sol. Lorsque l'épaisseur du sol est inférieure à 25 cm, on tient compte de la présence ou de l'absence de carbonates dans les matériaux originels sous-jacents ou l'assise rocheuse. L'épaisseur du sol correspond à la partie altérée du solum. Une épaisseur de 25 cm est importante parce qu'elle correspond à la zone de concentration maximale des éléments nutrififs et d'absorption par les racines. Elle correspond aussi et surtout aux horizons organiques et éluviaux du profil. De plus, on considère que la perte d'éléments basiques échangeables constitue une meilleure mesure de la sensibilité que la capacité d'échange cationique. La capacité d'adsorption de SO_4^{2-} est jugée très importante pour déterminer la sensibilité mais, jusqu'à présent, on ne dispose que de peu de données empiriques permettant d'en fixer les limites. Les principaux facteurs de contrôle de l'adsorption de SO_4^{2-} sont la teneur en matières organiques et la présence d'oxydes d'aluminium et de fer (tableau 5). En ce qui a trait à la productivité forestière, on suppose que les sols à pH très faible (moins de 4.5) sont sensibles à l'acidification, même quand la forêt a atteint un équilibre dans les conditions de faibles pH et échange d'éléments basiques. Dans un tel cas, on considère que toute perte supplémentaire de cations est importante, aussi faible soit-elle. On ne tient pas compte du stress ou des effets bénéfiques additionnels causés à la végétation par une influence directe et la présence de sels nutritifs (SO_x et NO_x, NH_4). Les avis sont partagés quant à l'impact de tels effets sur les espèces individuelles; de plus, différentes espèces d'une même association forestière peuvent réagir différemment.

Le tableau 6 énumère les facteurs terrestres que l'on considère comme importants dans l'évaluation de la sensibilité des systèmes aquatiques. La principale différence entre cette sensibilité et celle de la productivité forestière est le rôle plus proéminent que joue l'ensemble du solum et de l'assise rocheuse en termes d'écoulement des eaux de ruissellement et des eaux souterraines dans le régime aquatique. Cela implique des conditions d'écoulement relativement simples

TABLEAU 5: Sensibilité de la productivité forestière

FACTEURS TERRESTRES	SENSIBILITÉ FAIBLE	MOYENNE	ÉLEVÉE
Chimie du sol			
i) Eléments basiques échangeables	>15 meq/100 g	6 à 15 meq/100 g	< 6 meq/100 g
Substituts: Combinaisons du pH dans l'eau (ou % de saturation alcaline)	argileux, pH> 5.0	argileux, pH 4.5 à 5.0	argileux, pH<4.5
ET granulométrie par famille	loameux, pH> 5.5	loameux, pH 5.0 à 5.5	loameux, pH< 5.0
	tous les sols calcaires	sableux, >pH 5.5	sableux, pH< 5.5
OU texture	argile, argile limoneuse argile sableuse (>35% d'argile)	loam argilo-limoneux loam argileux, loam argilo-sableux, loam limoneux, loam (10 à 35% d'argile)	limon, loam sableux sable loameux sable loameux sable (<10% d'argile)
OU Capacité d'échange de cations	>25 meq/100 g	10 à 25 meq/100 g	<10 meq/100 g
ii) Capacité d'absorption de SO_4^{2-} déterminée par:	faible teneur en matière organique ET faible teneur en Al_2O_3 et/ou $Fe_2O_3 + Fe_3O_4$		faible teneur en matière organique ET faible teneur en Al_2O_3 et/ou $Fe_2O_3 + Fe_3O_4$
Épaisseur du sol*	>25 cm	>25 cm	<25 cm*
Matériau sous-jacent			
i) Matériau originel	carbonaté	non-carbonaté	non-carbonaté
ii) Assise rocheuse	calcaire, dolomite et équivalents métamorphiques, roches calcaires clastiques, roches à carbonate intercalées avec des roches sans carbonate	roches volcaniques, schistes, gragwacke, grès, roches ultrabasiques, gabbros, pélites, équivalents métamorphiques	granite, gneiss granitique, orthoquartzite, syénite

* Si le sol est <25 cm, inclure le matériau sous-jacent

TABLEAU 6: Sensibilité de l'apport aquatique

FACTEURS TERRESTRES	SENSIBILITÉ FAIBLE	MOYENNE	ÉLEVÉE
Chimie du sol			
i) Eléments basiques échangeables	>15 meq/100 g	6 à 15 meq/100 g	<6 meq/100 g
Substituts: Combinaisons du pH dans l'eau (ou % de saturation alcaline)	argileux, pH > 5.0	argileux, pH 4.5 à 5.0	argileux, pH < 4.5
ET granulométrie par famille	loameux, pH > 5.5	loameux, pH 5.0 à 5.5	loameux, pH < 5.0
	tous les sols calcaires	sableux, >pH 5.5	sableux, pH < 5.5
OU texture	argile, argile limoneuse argile sableuse (>35% d'argile)	loam argilo-limoneux loam argileux, loam argilo-sableux, loam limoneux, loam (10 à 35% d'argile)	limon, loam sableux sable loameux sable loameux sable (<10% d'argile)
OU Capacité d'échange de cations	>25 meq/100 g	10 à 25 meq/100 g	<10 meq/100 g
ii) Capacité d'absorption de SO_4^{2-} déterminée par:	faible teneur en matière organique ET faible teneur en Al_2O_3 et/ou $Fe_2O_3 + Fe_3O_4$	———	faible teneur en matière organique ET faible teneur en Al_2O_3 et/ou $Fe_2O_3 + Fe_3O_4$
Épaisseur du sol	>1 m	25 cm à 1 m	<25 cm
Géologie de la roche sous-jacente	voir tableau 5	———	———
Drainage du sol	mauvais	imparfait à bon	rapide
Modelé	plat	ondulé	accidenté
Végétation	feuillus	mixte	conifères
Couverture végétale	continue >60%	discontinue à clairsemée, 20 à 60%	très clairsemée à nulle, <20%

dans lesquelles la majeure partie de l'apport aquatique (drainage du sol) réagit avec le sol et la surface de l'assise rocheuse. Selon l'échelle de la carte, il faudra tenir compte de la position des eaux, amont par rapport à aval, dans un même bassin versant. Dans le cas des cartes à petite échelle (ex. 1:1,000,000), les bassins versants ne seront probablement pas tous indiqués. Cependant, dans le cas des cartes à grande échelle, ce facteur sera important pour l'évaluation de la sensibilité (Kramer, 1979a), tout comme la proportion de la superficie des lacs par rapport à la superficie totale du bassin. Ainsi, des régions indiquées comme sensibles sur une carte à l'échelle de 1:1,000,000 comprendront des systèmes terrestres et aquatiques non sensibles qui ne seront identifiés avec précision qu'une fois établie la base de données à plus grande échelle.

La chimie, l'épaisseur et la texture du sol ainsi que le type d'assise rocheuse sont des facteurs communs dans ces deux évaluations de sensibilité. Le drainage du sol, le type de végétation, le couvert végétal et le relief sont des facteurs spécifiques à l'apport aquatique. Tels que définis, ces facteurs s'appliquent davantage à des évaluations régionales qu'à des évaluations localisées, propres à un site particulier. Des limites et des définitions plus strictes s'appliquent à mesure que l'échelle d'évaluation croît. Il est difficile d'attribuer actuellement aux espèces forestières individuelles un niveau de sensibilité, surtout en ce qui a trait aux effets sur la chimie des eaux de lessivage. On admet cependant de plus en plus que les espèces de feuilles latifoliés, en particulier leur litière, assurent un meilleur tamponnement des précipitations que les conifères (Abrahamsen et al, 1976; Lee et Weber, 1980). C'est là-dessus qu'est basée l'évaluation de la végétation du tableau 6; cette notion ne tient toutefois pas compte de l'apport dû aux chutes de neige et jusqu'à un certain point, aux dépôts secs. Le drainage du sol concerne la vitesse d'évacuation des eaux de l'ensemble sol/roche, qui est elle-même fonction de la porosité et de la perméabilité du sol. Un mauvais drainage n'indique pas nécessairement un sol imperméable, mais plutôt une conductivité hydraulique faible due à une perméabilité basse ou à une forte saturation du sol (sols humides, gleysols, etc.). Une surface imperméable (sol ou roche) se traduit par un ruissellement rapide en surface avec peu de possibilités d'équilibrage chimique et donc une grande sensibilité. Si les sols rapidement drainés sont considérés comme très vulnérables, il faut toutefois remarquer que, dans ces conditions, les eaux de drainage ont aussi moins de possibilités d'entraîner d'importantes quantités d'Al_3^+ dans le système aquatique.

Les tableaux 5 et 6 présentent ce que l'on considère comme les facteurs les plus importants pour assigner des sensibilités approximatives mais ils ne proposent pas de moyens de combiner ces facteurs pour la cartographie, combinaison qui est pourtant jugée nécessaire. Pour l'instant, la façon dont les divers facteurs seront combinés dépend du niveau d'information disponible pour la cartographie. La sensibilité de la productivité forestière ne comporte que quatre principaux facteurs et les données sur la capacité d'adsorption de SO_4^{2-} ne sont pas disponibles actuellement. De plus, l'épaisseur du sol a une valeur limite telle que seulement deux facteurs seront considérés

si le sol a plus de 25 cm. Si l'épaisseur du sol est égale ou inférieure à cette valeur, trois facteurs seront utilisés. Il sera plus difficile de combiner les variables pour la sensibilité de l'apport aquatique puisqu'il y a huit facteurs en cause, tous de même importance. A moins qu'il n'y ait des régions relativement vastes ou encore un grand nombre de petites régions ayant toutes les caractéristiques indiquées pour une sensibilité élevée et faible, la majeure partie sinon tout l'écosystème terrestre sera classée dans la catégorie "moyenne". Selon les données disponibles, il sera probablement necessaire d'essayer différentes combinaisons de ces facteurs, en mettant l'accent sur la chimie du sol, sur les matériaux sous-jacents et peut-être sur la texture du sol, et de produire plus d'une carte.

Dans tous les cas, on ne doit considérer les méthodes proposées pour évaluer les sensibilités qu'à titre de première approximation visant à identifier les zones sensibles. De nombreuses hypothèses ont été faites lors du choix de ces facteurs et de leurs limites en ce qui a trait aux interactions de l'écosystème. Nous pourrons faire d'autres approximations lorsque nous aurons recueilli de plus amples données empiriques et que nous connaîtrons davantage la dynamique et les interactions de l'écosystème. Il faudra donc faire preuve de souplesse jusqu'à ce que nous ayons mené à bien des études scientifiques et cartographiques supplémentaires.

Les bases de données, Ecodistrict pour le [illegible] et Geoecology pour les Etats-Unis, permettront d'évaluer différentes combinaisons de ces facteurs. Elles permettront aussi la cartographie des capacités, où chaque élément cartographié (polygone ou comté) reçoit diverses valeurs de sensibilité en fonction de différentes combinaisons des facteurs présentées sous forme de cartes. Cette méthode peut également être très pratique pour normaliser le format des cartes du Canada et des Etats-Unis. La base de données actuelle ne suffit pas pour cartographier l'est de l'Amérique du Nord à une échelle uniforme. Selon le niveau d'information disponible, elle sera cependant utile pour la cartographie à l'échelle la plus grande possible en utilisant les substituts pour évaluer les facteurs présentés dans les tableaux 5 et 6. Une carte préliminaire de la sensibilité de l'Ecodistrict a été produite pour l'Ontario par la Direction générale des terres, Environnement Canada, comme le stipule la section suivante. A l'heure actuelle, la meilleure échelle pour décrire les sensibilités dans la totalité de l'est de l'Amérique du Nord est probablement 1:1,000,000.

Il est encore trop tôt pour incorporer des relations d'apports-seuils (quantités/réactions) dans l'indice de sensibilité. Pour la majeure partie, les connaissances actuelles s'appuient sur la simulation en laboratoire ou sur des résultats peu concluants sur le terrain; il faut attendre des essais plus rigoureux. Les facteurs d'apport sont déjà incorporés dans les intervalles d'échange des éléments basiques parce que les limites choisies se rapportent aux travaux de Wang et Coote (1980). Ils supposent une perte de 25% d'éléments basiques échangeables en 25 ans sous l'effet des apports acides, correspondant à 60 kg/ha d'équivalent $CaCO_3$. En outre, il faudra comparer

TABLEAU 7: Paramètres terrestres pour l'évaluation de la productivité forestière et des apports aquatiques à l'aide de la base de données Ecodistrict de l'Ontario

PARAMÈTRE TERRESTRE	ÉVALUATION DE LA SENSIBILITÉ		
	FAIBLE	MOYENNE	ELÉVÉE
CHIMIE DU SOL (Pétrographie; Hills, 1959)	argiles fortement calcaires, très fortement calcaires, terrains ornagiques	limon, loam faiblement calcaire, modérément calcaire	sable faiblement basique, sable très faiblement basique
TEXTURE DU SOL (Calcul du % du couvert pour chaque classe, OLI)			
DRAINAGE (Hills, 1959; 1975)	détrempé (mauvais à très mauvais)	frais (imparfait à modérément bon)	sec (rapide à bon)
EPAISSEUR Calcul du % du couvert pour chaque classe, OLI)	épais (> 1.0m)	mince (0.3 - 1.0m)	superficiel (< 0.3 m)
GÉOLOGIE (Calcul du % du couvert et du % d'affleurements pour chaque classe, OGS)	calcaire, dolomite, clastiques calcaires	schiste, grauwacke, grès, matières volcaniques, ultramafiques	granite, gneiss, orthoquartizite, siénite fortement
MACRORELIEF (Calcul du % du couvert pour chaque classe, OLI)	uni, faiblement accidenté	modérément accidenté	accidenté

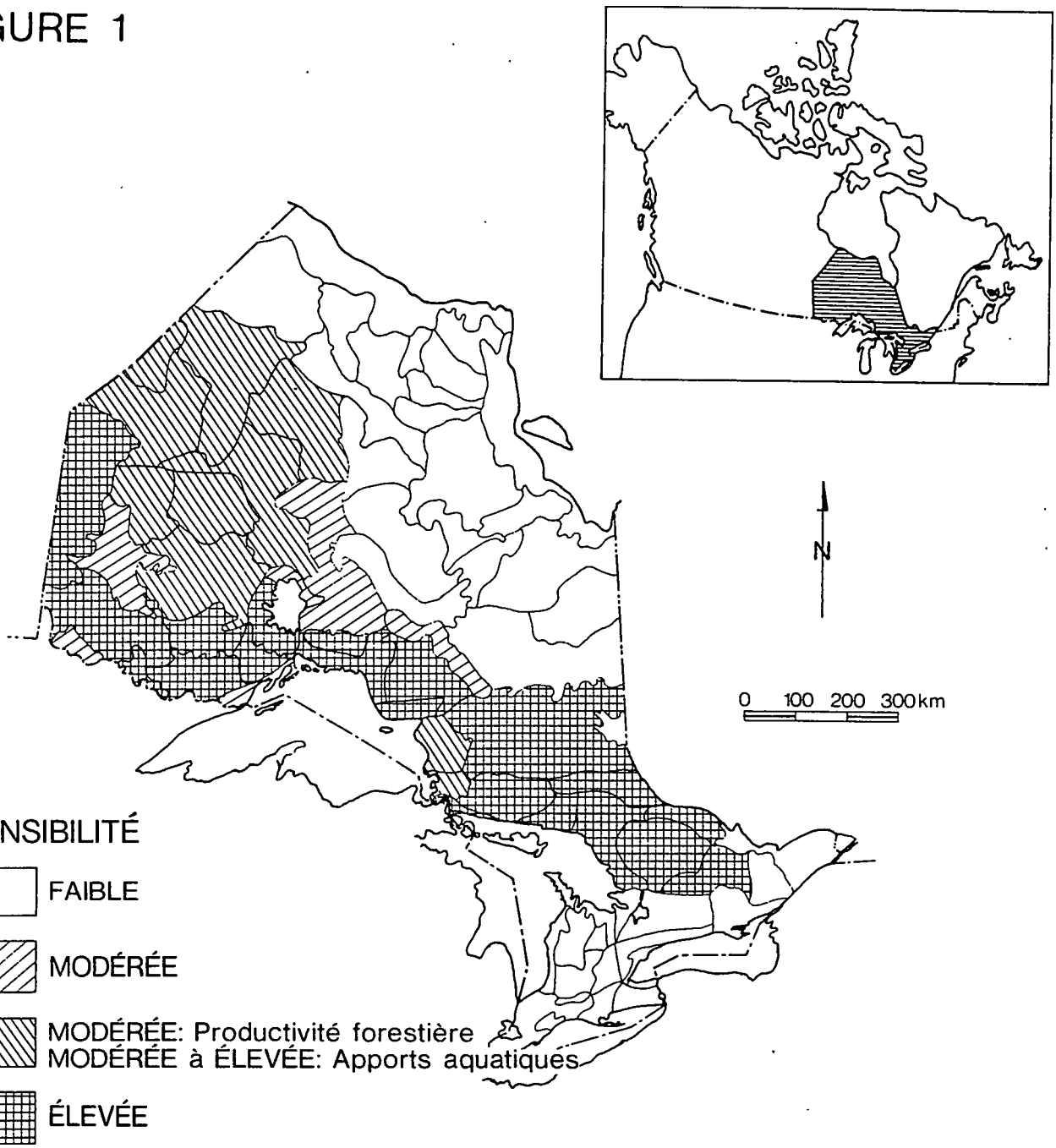
entre elles des zones reconnues sensibles aux apports acides actuels mesurables. Dans ce but, on calculera des quantités précipitées au cours d'une période spécifiée, pondérées en fonction du pH de la pluie et de la neige.

CARTOGRAPHIE PRÉLIMINAIRE DE LA SENSIBILITÉ TERRESTRE

Une carte préliminaire de sensibilité terrestre a été faite pour l'Ontario (figure 1). Cette carte est établie d'après les données Écodistrict à l'échelle de 1:1,000,000 pour lesquelles des interprétations ont été faites pour les sensibilités de la productivité forestière et de l'apport aquatique.

Les critères énumérés aux tableaux 5 et 6 ont été utilisés autant que possible bien que la base de données Écodistrict soit plus générale et qu'il ait fallu faire appel à d'autres substituts. On a également trouvé que certains des critères de ces tableaux étaient répétitifs relativement aux données Écodistrict et qu'ils n'apportaient rien à l'évaluation de la sensibilité. La végétation n'a pas été utilisée en raison

FIGURE 1



SENSIBILITÉ DES ECODISTRICTS À L'ACIDIFICATION RELATIVEMENT À LA PRODUCTIVITÉ FORESTIÈRE ET AUX APPORTS AQUATIQUES POUR LA PROVINCE DE L'ONTARIO

d'un manque de données. Le tableau 7 donne la liste des paramètres de la base de données Écodistrict pour l'Ontario correspondant aux paramètres indiqués aux tableaux 5 et 6 pour l'évaluation de la sensibilité terrestre. Le macrorelief, le drainage et la texture du sol n'ont pas été incorporés dans cette interprétation parce qu'ils variaient trop à l'échelle régionale. De plus, ils n'influent pas sur les évaluations finales de la sensibilité déduites à partir de la pétrographie, de l'épaisseur du sol et de l'assise rocheuse. Comme le définit Hills (1959), la pétrographie est basée sur les classes générales de la texture du sol et sur la présence connue de carbonate.

Pour calculer la sensibilité des écodistricts, l'épaisseur du sol, la pétrographie et la géologie de l'assise rocheuse sont combinées dans une formule de critères de sensibilité de l'écodistrict (FCSE) qui donne l'évaluation finale de la sensibilité de l'écodistrict. La FCSE met en rapport les classes de l'épaisseur du sol en pourcentage et la sensibilité du sol (d'après la pétrographie) avec la sensibilité de l'assise rocheuse (voir le tableau 7), de la façon suivante:

$$\text{FCSE} = \frac{\text{\% sols, \% sols minces (classe de sensibilité du sol d'après la pétrographie - F, M ou E)}}{\text{\% terrain nu (classe de sensibilité de l'assise rocheuse selon le type d'assise rocheuse - F, M ou E)}}$$

Des interprétations sont ensuite faites pour grouper les sensibilités de la productivité forestière et de l'apport aquatique en utilisant des combinaisons des formules CSE en quatre niveaux:

(1) FAIBLE SENSIBILITÉ: Productivité forestière et apports aquatiques.

$$\text{CSE} = \frac{\text{épais (F ou M)}}{\text{(F, M ou E)}}$$

Ce niveau comprend généralement les argiles épaisses et bien tamponnées, certains types de sable et des dépôts glaciaires calcaires sur du calcaire. Le terrain organique est classé comme ayant une faible sensibilité aux apports acides bien que sa réaction exacte ne soit pas encore très bien comprise.

(2) SENSIBILITÉ MODÉRÉE: Productivité forestière et apports aquatiques.

$$\text{CSE} = \frac{\text{épais} > \text{minces (M)}}{\text{(M ou E)}}$$

Les argiles épaisses et minces avec un peu de sable sur une assise rocheuse non carbonatée sont présentes, avec des affleurements mineurs identifiés (F, M ou E).

(3) SENSIBILITÉ MODÉRÉE: Productivité forestière
MOYENNE A ÉLEVÉE: Apports aquatiques

$$\text{CSE} = \frac{\text{épais} \leq \text{minces (F ou M)}}{\text{(E ou M)}}$$

Zones du Bouclier canadien couvertes d'argiles limoneuses minces et de dépôts glaciaires, calcaires et sableux avec des poches de sables et d'argiles épais dans moins de 50% de la superficie du district.

Affleurements mineurs seulement, bien qu'il s'agisse probablement d'une base d'information incomplète et variable. Cependant, cette catégorie est interprétée à l'aide des renseignements donnés.

Productivité forestière: On attribue une sensibilité moyenne à cette classe étant donné que l'on considère que des épaisseurs de moins de 0.3 m ont peu d'influence sur la sensibilité.

Apports aquatiques: La présence de dépôts calcaires constitue un certain potentiel tampon à l'eau traversant le système.

(4) SENSIBILITÉ ÉLEVÉE: Productivité forestière et apports aquatiques

$$CSE = \frac{\text{épais} \ll \text{minces (E)}}{(E)}$$

Matériaux de transport minces et discontinus sur des zones du Bouclier.

CONCLUSIONS

Un certain nombre de propositions définissant la sensibilité aux précipitations acides ont été faites relativement à certains facteurs terrestres. Ces propositions portent principalement sur les éléments uniques de l'écosystème et il existe un besoin urgent d'identifier la sensibilité de l'écosystème terrestre en examinant les effets combinés de certains facteurs dominants. Les questions qui suivent ont été étudiées à une réunion de scientifiques qui analysent ce problème:

- Qu'est-ce qui constitue la sensibilité terrestre?
- Quels facteurs peuvent être combinés et de quelle façon peuvent-ils l'être afin de définir la sensibilité terrestre?
- Quelle base de cartographie doit être utilisée pour la meilleure représentation des résultats? et
- Comment les charges critiques (en ce qui a trait aux relations dose/effet) peuvent-elles être incorporées aux indices?

Il était cependant très clair à cette réunion que nous devons admettre qu'il n'y a simplement pas assez de données empiriques pour tirer des conclusions, bien que nous puissions faire certaines hypothèses de base en ce qui a trait aux facteurs et à leurs limites relativement à la sensibilité terrestre. Il est très important d'énoncer les diverses hypothèses en cause et de maintenir la souplesse du système.

Cela dit, deux méthodes d'évaluation de la sensibilité terrestre ont été décrites. Elles ont trait à la sensibilité de la productivité forestière et à la sensibilité des apports aquatiques. La première s'applique également à la productivité agricole si l'on ne tient pas compte de la gestion (c.-à-d. le chaulage, etc.) ni des influences naturelles directes. L'utilité de ces sensibilités est limitée par les données empiriques disponibles pour la cartographie. Il manque des données pour de vastes régions de l'est de l'Amérique du Nord, particulièrement dans les terres non agricoles de l'est du Canada et dans les régions montagneuses. Nous avons un urgent besoin de relevés physiques et chimiques du sol dans les régions non agricoles. Les facteurs énumérés dans les tableaux 5 et 6 sont considérés comme les exigences minimales d'un tel relevé devant servir à l'évaluation des impacts des polluants transportés à grande distance, particulièrement à ce qui a trait aux précipitations acides.

APPENDIX I

PARTICIPANTS A LA RÉUNION DU 2 DÉCEMBRE 1980 SUR LES SENSIBILITÉS AUX PRÉCIPITATIONS ACIDES
DÉTROIT, MICHIGAN

CANADA

Garth Bangay
Direction générale des terres
Environnement Canada
Case postale 5050
Burlington, Ontario, L7R 4A6

Dick Coote
Institut de recherche sur les terres
Agriculture Canada
Ottawa, Ontario, K1A 0C6

Daryl Cowell
Direction générale des terres
Environnement Canada
Case postale 5050
Burlington, Ontario, L7R 4A6

Ron Dilabio
Commission géologique du Canada
601, rue Booth
Ottawa, Ontario, K1A 0E8

Neil Foster
Great Lakes Forest Research Centre
1219 Queen Street
Sault Ste-Marie, Ontario

Marg Griffith
Ministère de l'Environnement de l'Ontario
880 Bay Street
Toronto, Ontario

Jim Kramer
Département de géologie
Université McMaster
Hamilton, Ontario, L8S 4K1

Magda Havas
Département de botanique
Université de Toronto
Toronto, Ontario

Sam Linzon
Ministère de l'Environnement de l'Ontario
880 Bay Street
Toronto, Ontario

Anne Lucas
Direction générale des terres
Environnement Canada
Case postale 5050
Burlington, Ontario, L7R 4A6

Clay Rubec
Direction générale des terres
Environnement Canada
Hull, Québec, K1A 0E7

ÉTATS-UNIS

Dale Johnson
Oakridge Research Laboratory
Oakridge, Tenessee, 37830

Mike Kelly
Oakridge Research Laboratory
Building 1505, Suite 338
Oakridge, Tenessee, 37830

William McFee
Department of Agronomy
Purdue University
Lafayette, Indiana, 47907

ANNEXE II

QUESTIONS ÉTUDIÉES A LA RÉUNION DU 2 DÉCEMBRE 1980 SUR LA SENSIBILITÉ AUX TPAD

(1) Comment pouvons-nous identifier les environnements terrestres sensibles? Quelles sont les meilleures façons de procéder?

(2) Devons-nous utiliser un facteur unique pour évaluer la sensibilité ou une combinaison de facteurs?

(3) comment devons-nous déterminer les valeurs critiques des apports atmosphériques?

(4) Les données actuelles sont-elles pertinentes pour l'évaluation de la sensibilité terrestre dans l'est de l'Amérique du Nord? Dans les cas où il manque des données, existe-t-il des substituts pouvant donner des résultats comparables?

(5) La cartographie doit-elle être faite
(a) avec un indice commun de sensibilité en utilisant le plus petit commun dénominateur des données disponibles? ou
(b) avec une variété d'indices de sensibilité correspondant à l'échelle, à la précision et à la disponibilité des données?

(6) Quelle est la meilleure échelle pour les données disponibles?

(7) Comment les facteurs de charge peuvent-ils être incorporés dans les indices de sensibilité? Où devons-nous les incorporer?

ANNEXE III

ÉTUDE D'ÉVALUATION DES SYSTÈMES DE CLASSIFICATION DE LA SENSIBILITÉ AUX PLUIES ACIDES, ÉLABORÉS AU CANADA ET AUX ÉTATS-UNIS POUR LES ÉVALUATIONS D'IMPACTS TERRESTRES

A: SENSIBILITÉ GÉOLOGIQUE ET HYDROCHIMIQUE

Hendrey et al (1980), Commission géologique des États-Unis

Objectifs

Identifier les sensibilités de l'assise rocheuse relativement au drainage afin de prévoir les sensibilités des eaux de surface.

Critères

Les formations rocheuses sont classées en fonction de leur capacité tampon potentielle d'après leur composition chimique.

Définition des classes de sensibilité

Classes des roches:

Type I - Capacité tampon faible à nulle: Granite/syénite ou équivalent métamorphique; gneiss granitique; et grès quartzeux ou équivalent métamorphique.

Type II - Capacité tampon moyenne à faible: grès, schistes, conglomérats ou équivalents métamorphiques (avec phases sans carbonates libres);

roches de type métamorphique felsique et roches ignées intermédiaires;
et gneiss à calco-silicates avec phases sans carbonates libres.

Type III - Capacité tampon moyenne à élevée, roches légèrement calcaires; roches volcaniques grossières de type intermédiaire à mafique; roches ultramafiques; et roches volcaniques vitreuses.

Type IV - Capacité tampon "infinie": sédiments très fossilifères ou équivalents métamorphiques; et calcaires ou calcaires dolomitiques.

Cartes

Des cartes de sensibilité à l'échelle de 1:250,000 ou 1:500,000 ont été produites à partir des cartes géologiques des États à l'échelle de 1:24,000 ou 1:62,500 pour tout l'est des États-Unis.

Interprétation

Type I - Impact probablement étendu des précipitations acides.

Type II - Impact des précipitations acides limité aux cours d'eau de premier et second ordres et aux petits lacs. Perte complète de l'alcalinité improbable pour les grands Lacs.

Type III - Impact des précipitations acides improbable sauf en ce qui a trait aux effets des eaux de ruissellement dans les régions de pergélisol.

Type IV - Aucun impact sur les écosystèmes aquatiques.

Les roches du type I et II peuvent être identifiées avec des eaux de surface d'une alcalinité inférieure à 200 ueq/l.

Évaluation

Elle ne s'applique que lorsque le mort-terrain est mince. L'épaisseur des sols, la topographie et les précipitations orographiques sont reconnues comme des facteurs importants mais l'analyse n'en tient pas compte. Bien que la chimie de l'eau reflète le type de roches le plus réactif du bassin versant, rien n'indique l'influence de chacun des types d'assise rocheuse sur la capacité tampon globale. On propose une classification des abondances relatives.

"Les sédiments très fossilifères et leurs équivalents métamorphiques" peuvent être considérés de type IV seulement s'ils contiennent des carbonates.

B: SENSIBILITÉ GÉOCHIMIQUE ET LITHOLOGIQUE

Kramer (1976), Université McMaster.

Objectif

Identifier les interactions des sols et des roches avec les précipitations acides et les métaux connexes afin de prévoir la qualité de l'eau.

Critères (Tableau 8)

(1) Minéralogie des dépôts superficiels, hydrologie de surface et en profondeur de l'assise rocheuse, et épaisseur du sol.

Tableau 8: Définitions des classes de sensibilité géochimique (Kramer, 1976)

Matériaux superficiels	Alcalinité	pH	Capacité tampon aux pluies acides
Roches et sols calcaires	≥ 2 meq/l	8	très grande
Sols et sédiments non calcaires à texture fine	0.2 à 1 meq/l	6-7	peut être altérée
Affleurement rocheux non calcaire	≤ 0.1 meq/l	4-7	altérée par les pluies acides

Tableau 9: Définitions de classes de sensibilité de la qualité de l'eau (Kramer, 1977; 1978; 1979a; 1979b)

Indice de saturation en calcium (ISC)	Sensibilité du terrain	Interprétation
< 0	nulle	Saturé en $CaCO_3$
0	nulle	Saturé en $CaCO_3$
> 0	nulle	Sous-saturé en $CaCO_3$
< 1	nulle	Le terrain comporte un élément calcaire
< 3	non-susceptible	Bien tamponné
3-4	probablement sensible	Faiblement tamponné
>4	pH réduit	Aucune capacité tampon

(2) CEC, pH et saturation en matières basiques.

(3) Provenance des dépôts.

Interprétation

Une région calcaire a un effet tampon, même en cas d'apports acides élevés, à un pH d'environ 8. Les sédiments meubles d'une région à alumino-silicates ont un effet sur les apports acides, à un pH de 6.5, tandis que les affleurements d'alumino-silicates sont généralement acidifiés.

Évaluation

La minéralogie de la couverture post-glaciaire meuble constitue le paramètre le plus important de l'assimilation des ions H^+ en terrain non calcaire. Les données sur l'hydrologie superficielle et souterraine sont nécessaires, surtout lorsque les horizons inférieurs du sol sont calcaires.

C: SENSIBILITÉ GÉOCHIMIQUE ET LITHOLOGIQUE

Kramer (1977, 1978, 1979a, 1979b).

Objectif

Utiliser la qualité de l'eau en tant que mesure de la sensibilité du terrain. Une région est dite sensible lorsque ses caractéristiques inorganiques et biologiques risquent d'être altérées à un degré supérieur aux limites fixées par les processus naturels dans une période donnée.

Critères (Tableau 9)

(1) Chimie de l'eau: alcalinité, pH, conductivité spécifique, température, chlorophylle, phytoplancton et profondeur de Secchi.

(2) Propriétés chimiques et physiques du sol: couleur, épaisseur totale, épaisseur des horizons, granulométrie, capacité d'échange des ions hydrogène.

(3) Indice de saturation en calcium (ISC): indicateur du rapport pH/alcalinité. C'est également le logarithme du degré de saturation d'une masse d'eau en $CaCO_3$.

Interprétation

L'ISC fournit une mesure intégrée de l'effet des pluies acides sur le système sol-assise rocheuse car la chimie de l'eau résulte en grande partie des interactions sol-roche. La délimitation des régions dont l'ISC est supérieur à 3 indique des terrains sensibles.

Évaluation

Il s'agit d'une méthode semi-quantitative intégrant des éléments de l'assise rocheuse et des élémets de surface évalués par la chimie de l'eau. L'influence des paramètres individuels (épaisseur, texture, drainage) n'est pas très bien définie; cependant, il est possible de tirer certaines conclusions. La capacité tampon des matériaux meubles peut être plus grande que celle de l'assise rocheuse sous-jacente; il faut donc en tenir compte dans l'évaluation de la sensibilité terrestre.

L'ISC semble être en corrélation assez étroite avec les facteurs du terrain; cependant, des mesures précises de

l'alcalinité du pH faites sur place sont requises mais elles sont difficiles à obtenir de façon constante. Cette méthode est limitée par un manque de données fiables sur l'alcalinité qui permettraient de faire des évaluations générales (ex. cartographie) ou d'indiquer les rapports entre les différentes parties d'un bassin versant.

D: SENSIBILITÉ DE L'ASSISE ROCHEUSE

Shilts et al (1980), Commission géologique du Canada.

Objectif

Identifier les régions supportées par des lithologies susceptibles de produire par érosion glaciaire, processus de formation de sol ou actions des eaux souterraines, des débris ou des solutions pouvant réagir de façon plus ou moins prévisible aux apports acides.

Critères (Tableau 10)

Formations rocheuses classées en fonction de leur composition chimique, surtout le type et le nombre de phases minérales les plus labiles se trouvant dans diverses lithologies. En termes de réaction et de volume, les phases labiles les plus importantes sont les suivantes:

(1) Tous les carbonates
(2) Tous les sulfures
(3) Tous les sulfates
(4) Les chlorites riches en magnésium
(5) La biotite
(6) La serpentine-olivine

Définition des classes de sensibilité

Sensibilité élevée: granite, gneiss granitique, orthoquartzite, et syénite.

Sensibilité moyenne à élevée: roches volcaniques, shistes, grauwacke, grès, roches ultramafiques, gabbros, pélites, et équivalents métamorphiques.

Sensibilité moyenne à faible: roches calcaires clastiques, et roches à carbonates intercalées avec des roches sédimentaires non calcaires, ignées et métamorphiques.

Sensibilité faible: calcaire, dolomite et équivalents métamorphiques.

Cartes

Des cartes à petite échelle (1:1,000,000 et généralisées à 1:15,000,000) ont été produites pour l'est du Canada, l'est du Manitoba et toute la partie de l'Amérique du Nord au sud du 52^{e} parallèle. Ces cartes ont été faites à partir de cartes de base dont l'échelle varie de 1:25,000 à 1:250,000.

Évaluation

Les mécanismes et les produits spécifiques (débris ou solutions) formés en réaction aux précipitations acides ne sont pas décrits dans le détail. Le système pourrait s'étendre aux classes de sensibilité du sol et d'épaisseur du sol. Utilisé conjointement avec la sensibilité des sédiments superficiels, ce système fournit une très bonne base pour l'analyse de la sensibilité terrestre. Il serait peut-être possible d'obtenir une classe de sensibilité composite

à partir de ces deux facteurs uniques. Les classes de sensibilité ressemblent beaucoup à celles de Hendrey et al (1980). On pourrait s'attendre à des classes semblables pour l'alcalinité des eaux de surface, mais il n'y a aucune indication en ce sens. Les définitions de sensibilité sont actuellement réévaluées (R. Bilabio, communication personnelle).

E: MATÉRIAUX SUPERFICIELS

Shilts et al (1980), Commission géologique du Canada.

Objectif

Identifier les régions de composition semblable dans lesquelles on peut prévoir la réaction aux précipitations acides.

Tableau 10: Définitions des classes de sensibilité de l'assise rocheuse (Shilts et al, 1980)

Sensibilité	Description de l'assise rocheuse
faible	(a) zones reposant sur une roche carbonatée; tous les dépôts superficiels sont vraisemblablement calcaires.
indéterminée ou intermédiaire	(b) zones anciennement submergées dans les mers post-glaciaires; il est fort probable qu'il y ait des sédiments marins calcaires à grain fins.
	(c) zones anciennement submergées dans les lacs post-glaciaires; il est fort probable qu'il y ait des sédiments lacustres calcaires à grains fins.
	(d) zones de calcaires de transport glaciaire, provenant d'importants affleurements de carbonates.
élevée	(e) zones où les dépôts superficiels sont vraisemblablement non calcaires.

Critères

(1) Origine des dépôts superficiels
(2) Présence ou absence de matériaux calcaires
(3) Matériaux de l'assise rocheuse (carbonates)

Cartes

Une carte à petite échelle (1:15,000,000) produite pour l'est du Canada; l'est du Manitoba et au sud du 52^{e} parallèle.

Évaluation

Cette carte n'était pas destinée à servir de base de données (R. Dilabio, communication personnelle); ce n'est donc pas juste d'évaluer cette carte sans de plus amples descriptions.

F: SENSIBILITÉ DU SOL

Klopatek, Harris et Olsen (1980), Oak Ridge National Laboratory

Objectifs

Identifier des zones
(1) sensibles à l'acidification accélérée du sol,
(2) insensibles à l'acidification avec une capacité tampon amoindrie, et
(3) avec réactions intermédiaires.

Critères (Tableau 11)

(1) pH du sol
(2) Teneurs en éléments basiques totaux (CEC x saturation en éléments basiques)
(3) Matières organiques
(4) Teneur en argile

On a fait la moyenne de tous les paramètres pour les horizons A (0-25 cm) des sols types, par comté. La concentration des ion H^+ par mètre carré est calculée en fonction du pH moyen des eaux de pluie (Cogbill et Likens, 1974) pour chaque comté et multipliée par les précipitations annuelles moyennes (cm).

Cartes

Des cartes tracées par ordinateur définissent chaque type de sol (I à IV) pour tous les comtés de l'est des États-Unis. Les concentrations d'ions H^+ (cinq intervalles) y sont superposées de $<$ 0.02 à $>$0.06 équivalent/m^2 d'ions H^+.

Interprétation

Type I — Acidification accélérée causée par un apport accru (au-dessus de la normale) d'ions H^+. Cela pourrait nécessiter des interventions (chaulage) si cet apport d'ions H^+ continue ou augmente.

Type II — Ces sols sont déjà suffisamment tamponnés contre un faible apport en ions H^+ (actuels). Il n'y a pas de lessivage de grandes quantités de cations échangeables.

Type III — Insensibles à toute autre réduction du pH. Il n'y a aucun effet de tamponnement contre les eaux de percolation et il se produit des déversements acides

Tableau 11: Définitions des classes de sensibilité du sol (Klopatek, Harris et Olson, 1980)

Classe	Capacité d'échange cationique	Saturation basique	pH	Carbonates	Texture du sol
Type I	Faible (<12 meq/100g)	moyenne à élevée (30-50%)	>5	Non calcaires	Sols sableux
Type II	moyenne à élevée (>12 meq/100g)	moyenne (30-50%)	> 5	Non calcaires	Sols argileux ou cultivés
Type III	moyenne à élevée (>12 meq/100g)	faible (<30%)	<5	Acides	---
Type IV	élevée (<20 meq/100g)	élevée (>50%)	> 6	Calcaires	---

Tableau 12: Définitions des classes de sensibilité des sols (McFee, 1980)

Sols	CEC(meq/100g)	Autres conditions
Non sensibles	Valeur quelconque	Présence de carbonates libres ou inondations fréquentes
Non sensibles	Supérieure à 15.4	Aucune
Légèrement sensibles	6.2 à 15.4	Absence de carbonates libres; inondations rares
Sensibles	Inférieure à 6.2	Absence de carbonates libres; inondations rares

chroniques ou sporadiques dans les cours d'eau et les lacs. Ce type de sol se trouve souvent avec des lithologies d'assises rocheuses faiblement basiques, ce qui entraîne d'importants apports acides dans les régimes aquatiques.

Type IV Il est très peu probable que ces sols s'acidifient en raison de leur capacité tampon élevée.

Évaluation

Bien que les cartes à petite échelle soient suffisantes du point de vue de la région, elles ne permettent pas d'analyser les zones localement très sensibles ou insensibles.

Les régions critiques sont repérées en comparant les sols éventuellement sensibles aux apports d'ions H^+. C'est la seule carte de sensibilité publiée à cette fin. Lorsque des apports spécifiques d'ions$^+$ peuvent être associés à des effets particuliers, ce procédé doit s'avérer efficace au cours de l'analyse finale.

G: SENSIBILITÉ DES SOLS

McFee (1980), United States Environmental Protection Agency.

Objectif

Identifier les sols sensibles aux précipitations acides lorsque la sensibilité est définie par la fraction des cations échangeables lessivés des 25 centimètres supérieurs d'un sol en 25 ans de précipitations d'un pH moyen de 3.7, au taux de 100 centimètres par année. Ce coefficient pH peut également être exprimé en perte de 100 kg/ha d'équivalent $CaCO_3$.

Critères (Tableau 12)

(1) Capacité tampon totale ou CEC assurée par l'argile et des matières organiques.

(2) Saturation en éléments basiques estimée à partir du pH.

(3) Système d'intervention (culture, chaulage, inondation).

(4) Présence ou absence de carbonates dans le profil.

Cartes

Données originales variables réduites à des cartes de 1:250,000 pour chaque État à l'est du Mississipi.

Évaluation

La CEC seule n'est pas associée de façon adéquate à la capacité tampon d'un sol pour permettre ce genre d'évaluation. La capacité tampon est liée aux éléments basiques échangeables et aux éléments basiques en solution dans le sol ainsi qu'aux éléments basiques potentiels qui peuvent être libérés de la phase solide du sol. La capacité tampon peut être évaluée à partir des éléments basiques échangeables car soit les deux derniers éléments sont relativement petits soit ils sont libérés lentement (Wang et Coote, 1980). Le pH du sol et la saturation en éléments basiques sont décrits comme des variables de sensibilité mais ils ne sont pas définis avec les classes.

H: SENSIBILITÉ DES TERRES AGRICOLES

Wang et Coote (1980), Agriculture Canada.

Objectif

Prévoir les effets à long terme des précipitations acides sur les sols agricoles, en supposant un apport annuel moyen de 60 kg/ha d'équivalent $CaCO_3$.

Critères (Tableau 13)

La teneur du sol en argile et le pH du sol peuvet être utilisés pour évaluer respectivement la CEC et la saturation en éléments basiques. Ces deux valeurs fournissent une mesure des éléments basiques échangeables d'un sol en supposant une teneur moyenne en matières organiques.

Cartes

Carte de sensibilité des sols des régions agricoles de l'est du Canada à l'échelle de 1:5,000,000.

Interprétation

Pour des sols agricoles, une perte de 10 à 25% des éléments basiques échangeables dans la couche labourée est considérable. Voici un guide pratique pour déterminer la sensibilité des sols:

Classe de sensibilité	Caractéristiques des sols*
Non sensible	Tous les sols calcaires Argileux, pH** supérieur à 5 Loameux, pH supérieur à 5.5
Modérément sensible	Sableux, pH supérieur à 5.5 Argileux, pH 4.5 - 5 Loameux, pH 5 - 5.5
Sensible	Argileux, pH inférieur à 4 Loameux, pH inférieur à 5 Sableux, pH inférieur à 5.5

* Couche labourée (environ 15 cm). Suppose également que le chaulage n'est pas une pratique régulière de traitement de sol.

** pH du sol dans l'eau

Tableau 13: Définitions des classes de sensibilité des sols (Wang et Coote, 1980)

Sols	Conditions des sols
Sensible	Éléments basiques échangeables du sol inférieurs à 6 meq/100 g de sol (ou plus de 25% des éléments basiques échangeables pourraient être éliminés en 25 ans).
Modérément Sensibles	Éléments basiques échangeables du sol jusqu'à 15 meq/100 g de sol (ou 10 à 25% des éléments basiques échangeables pourraient être éliminés en 25 ans).
Non sensibles	Éléments basiques échangeables du sol supérieurs à 15 meq/100 g de sol (ou moins de 10% des éléments basiques échangeables pourraient être éliminés en 25 ans).

Évaluation

On tient compte de la texture et de la teneur en matières organiques dans l'estimation de de la CEC et de la saturation en éléments basiques. On ne tient cependant pas compte des effets des pratiques agricoles.

I: SENSIBILITÉ DE LA VÉGÉTATION

Klopatek, Harris et Olson (1980), Oak Ridge National Laboratory

Objectif

Évaluer les impacts régionaux éventuels d'une augmentation de SO_2 sur les espèces reconnues comme très sensibles (soja et pin).

Critères (Tableau 14)

(1) Rendement du soja d'après le recensement agricole de 1969 exprimé en rendement total divisé par le nombre d'acres par comté (boisseaux à l'acre).

(2) La productivité des conifères (pin) calculée par pieds cubes de bois divisés par le nombre d'acres par comté.

(3) Concentration régionale prévue de SO_2 pour 1985 à partir des centrales thermo-électriques utilisant du charbon.

Cartes

Une carte faite par ordinateur pour la majeure partie continentale des États-Unis. L'entrée et l'évaluation des données ont été faites par comté.

Évaluation

Les effets spécifiques du SO_2 à ces niveaux n'ont pas encore été estimés bien que, combinés à d'autres sources de polluant à d'autres polluants atmosphériques, il puisse y avoir des dommages chroniques.

L'impact du SO_2 a été évalué subjectivement. La diminution du rendement et l'importance de l'impact n'ont pas été mises en corrélation.

J: SENSIBILITÉ DE LA VÉGÉTATION

Robitaille (1980), Service canadien des forêts.

Tableau 14: Définitions des classes de sensibilité de la végétation (Klopatek, Harris et Olson, 1980)

Effet	Teneur en SO_2	Productivité du soja et des conifères
Aucun	faible	faible
Faible	moyenne	moyenne
Moyen	moyenne - élevée	moyenne - élevée
Élevé	élevée	élevée

Objectif

Identifier la sensibilité relative du terrain en extrapolant les sensibilités des espèces spécifiques aux polluants atmosphériques qui peuvent être utilisées pour prévoir les effets des pluies acides sur la végétation.

Critères

(1) L'abondance relative (AR) des principales essences forestières est calculée dans l'ouvrage de Rowe (1972): Régions forestières du Canada. Chaque région est classée de la façon suivante:

abondant - 3
commun - 2
fréquent - 1

(2) Une sensibilité relative (SR) est attribuée à chaque espèce de la région en fonction de sa tolérance au SO_2:

espèces très sensibles - 4
espèces sensibles - 3
espèces intermédiaires - 2
espèces tolérantes - 1

Définition des classes de sensibilité

Sensibilité relative du terrain (SRT)=

$$\frac{1}{N} \times \sum_{i}^{n} AR \times SR$$

où "N" = le nombre d'espèces dans chaque région forestière.

Sensibilité	SRT
Sensibilité élevée	Plus de 4
Sensibilité intermédiaire	3 à 4
Sensibilité faible	Moins de 3

Cartes

Carte à petite échelle (1:15,000,000) de l'est du Canada (Ontario, Québec, N.-E., N.-B.,I.-P.-E, Terre-Neuve) délimitant les classes de SRT dans les régions forestières de Rowe (1972).

Interprétation

Les valeurs de SRT varient de 2.1 à 7.5 dans cette étude. Les régions très sensibles correspondent aux sols faiblement podzolisés et aux moraines acides à couverture de feuilles. Une faible augmentation de l'acidité peut faire diminuer le taux de croissance et accroître le pourcentage des espèces de conifères.

Les sensibilités intermédiaires correspondent à des sols acides fortement podzolisés (granit/gneiss) dont le pH est souvent inférieur à celui des pluies acides. Les plantes se sont déjà adaptées aux conditions acides mais le lessivage continuel des quelques minéraux altérables qui restent, réduit la productivité à long terme. Les régions faiblement sensibles sont celles où domine l'épinette noire (une espèce très tolérante).

Évaluation

Ce système d'évaluation des sensibilités n'évalue pas l'influence de la végétation sur la sensibilité terrestre. Il n'y a pas encore de rapport officiel établi entre le sol, la végétation et la sensibilité, bien que l'on sache qu'il y a interférence.

K: SENSIBILITÉ DU TERRAIN

Robitaille (1979), Service canadien des forêts.

Objectif

Identifier les classes de sensibilité relative du terrain en combinant les sensibilités du sol et de la végétation.

Critères (Tableau 15)

(1) Carte de facteurs du sol
- pH
- matières organiques
- CEC
- texture

(2) Carte de végétation
- sensibilité des espèces au SO_2 d'après la documentation

Les cartes de sol et de végétation sont combinées pour produire une carte de sensibilité du terrain avec trois classes de sensibilité relativement peu définies: très sensible, sensible et tolérant.

Cartes

Des cartes à petite échelle (1:15,000,000) à facteur unique (sol et végétation) et des cartes de sensibilité combinées ont été compilées pour tout l'est du Canada (Ontario, Québec, Labrador, N.-B., N.-E., I.-P.-E., Terre-Neuve).

Évaluation

Cette étude est une évaluation subjective des sensibilités du sol qui ne sont pas formellement définies ni décrites. Les deux sensibilités à facteur unique sont-elles compatibles?

Tableau 15: Définition des classes de sensibilité du terrain (Robitaille, 1979)

Terrain	Carte de facteurs du sol	Carte de végétation
Très sensible	Mince, sableux, acide	Épinette noire, lichen
Sensible	Sableux, non calcaire, pH 5 - 6	———
Tolérant	Calcaire, pH supérieur à 6.5	Épinette noire

RÉFÉRENCES

Abrahamsen, G., R. Horntvedt et B. Tveite. 1977. Effects of acid precipitation on coninerous forest ecosystems, Water, Air and Soil Pollution 8 (1977): 57-73.

Abrahamsen, G., J. Hovland et S. Hagvar. 1980. Effects of articicial acid rain and liming on soil organisms and the decomposition of organic matter. Dans: Hutchinson, T.C. et M. Hvas (editors). Effects of Acid Precipitation on Terrestrial Ecosystems. Plenum Press, New York (N.Y.) pp. 341-362.

Abrahamsen, G., et al. 1976. Effects of acid precipitation on coniferous forest, Dans: Brakke, F.H. (éditeur). Impact of Acid Precipitation on Forest and Freshwater Ecosystems in Norway, SNSF Project FR 6/76 Oslo (Norvège) pp. 36-63.

Alexander, M. 1980. Effects of acidity on microorganisms and microbial processes in soil. Dans: Hutchinson, T.C. et M. Havas (éditeurs). Effects of Acid Precipitation on Terrestrial Ecosystems, Plenum Press, New York (N.Y.) pp. 363-374.

Anderson, F. et al. 1980. Forest ecosystem responses to acid deposition - hydrogen ion budget and nitrogen/tree growth model approaches. Dans: Hutchinson, T.C. et M. Havas (éditeurs). Effects of Acid Precipitation on Terrestrial Ecosystems, Plenum Press, New York (N.Y.) pp. 319-334.

Bääth, E. et al. 1980. Soil organisms and litter decomposition in a Scots pine forest - effects of experimental acidification. Dans: Hutchinson, T.C. et M. Havas (éditeurs). Effects of Acid Precipitation on terrestrial Ecosystems. Plenum Press, New York (N.Y.) pp. 375-380.

Bache, B.W. 1980a. The sensitivity of soils to acidification. Dans: Hutchinson, T.C. et M. Havas (éditeurs). Effects of Acid Precipitation on Terrestrial Ecosystems. Plenum Press, New Yor, (N.Y.) pp. 569-572.

Bache, B.W. 1980b. The acidification of soils. Dans Hutchinson, T.C. and M. Havas (éditeurs). Effects of Acid Precipitation on terrestrial Ecosystems, Plenum Press, New York (N.Y.) pp. 183-202.

Bates, D.N. and D. Simkin, 1969. Vegetation Patterns of Hudson Bay Lowland. Ontario Ministry Natural Resources Research Branch. Map No. 3629. Toronto (Ontario).

Bergseth, H. 1975. Verdrangung von Magnesium und Calcium in Waldböden durch Hydrogenionon. Acta Agric. Scand. 25: 225-230 (Dans Abrahamsen et al, 1976).

Bilateral Research Consultation Group. 1980. Second Report on the Long-Range Transport of Air Pollutants, Altshuller, A.P. et G.A. McBean (co-chairmen). 40 p.

Breakke, F.H. (éditeur). 1976. Impact of Acid Precipitation on Forest and Freswater Ecosystems in Norway, Introduction par L.N. Overrein, SNSF-project FR6/65, Oslo (Norvège) pp. 1-9.

Buol, S.W. F.D. Hole et R.J. McCracken. 1973. Soil Genesis and Classification. Iowa State University Press, Ames (Iowa), 360 p.

Cogbill, C.V. 1977. The effect of acid precipitation on tree growth in eastern North America. Water, Air and Soil Pollution 8: 89-93.

Cogbill, C.V. et G.E. Likens. 1974. Acid Precipitation in the north-eastern United States, Water Resour. Res. 10: 1133-1137.

Cole, D.W. et D.W. Johnsen. 1977. Atmospheric sulfate additions and cation leaching in a Douglas fir ecosystem, Water Resour. Re. 13: 313-317.

Davis, R.M. (Coordinateur du projet). 1978. A preliminary assessment of coal utilization in the South, ORNL/TM-6122. Oak Ridge National Laboratory, Oak Ridge (Tennessee).

Eaton, J.S. et al. 1973. Throughfall and stemflow chemistry in a northern hardwood forest, J. Ecol. 61: 495-508.

Fairfax, J.A.W. et N.W. Lepp. 1975. Effect of simulated 'acid rain' on action loss from leaves, Nature 255:324-325.

Fairfax, J.A.W. et N.W. Lepp. 1976. The effect of simulated acid precipitation on cation losses from a range of tree litters. Dans Karenlampi, L. (éditeur). Proc. of the Kuopio Meeting on Plant Damages Caused by Air Pollution. Kuopio (Finlande), pp. 123-125.

Freedman, B. et T.C. Hutchinson. 1980. Smelter pollution near Sudbury, Ontario. Canada and effects on forest litter decomposition. Dans: Hutchinson, T.C. et M. Havas (éditeurs). Effects of Acid Precipitation on Terrestrial Ecosystems. Plenum Press, New York (N.Y.), pp. 395-434.

Frink, C.R. et G.K. Voigt. 1977. Potential effects of acid precipitation on soils in the humid temperate zone. Water, Air and Soil Pollution 7: 377-399.

Gasser, J.K.R. 1974. An assessment of the importance of some factors causing losses of time from agricultural soils. Experimental Husbandry 25: 86-;95.

Glass, N.R. et al. 1980a. A brief survey of the sensitivity of the environment to acid precipitation, (Préliminaire) U.S. Environmental Protection Agency. Washington (D.C.).

Glass, N.R. et al. 1980b. Environmental effects of acid precipitation, Communication présentée à 4th National Conf. Interagency Energy/Environmental Research and Development Program. 1979.

Haase, E.F. et al. 1980. Field surveys of sulphur dioxide injury to crops and assessment of economic damage. Communication 80-26.2 présentée à 73rd Annual Meeting, Air Pollution Control Association, Montréal (Québec), 22 p.

Havas, P. et S. Huttenun. 1980. Some special features of the ecophysiological effects of air pollution on coniferous forests during the winter. Dans: Hutchinson, T.C. et M. Havas (éditeurs) Effects of Acid Precipitation on Terrestrial Ecosystems. Plenum Press, New York (N.Y.) pp. 123-132.

Hawksworth, D.L. et al. 1973. Changes in lichen flora of England and Wales attributable to pollution of the air by sulphur dioxide, Dans Ferry, B.W. et al. (éditeurs). Air Pollution and Lichens. the Athlone Press, London, pp. 330-367.

Hawksworth, D.L. et F. Rose. 1970. Qualitative sacle for estimating sulphur dioxide air pollution in England and Wales using epiphytic lichens. Nature, Lond. 227:145-148.

Heggestad, H.E. 1980. Field assessment of air pollution impacts on growth and productivity of crop species. Communi cation 80-26 présentée à 73rd Annual Meeting, Air Pollution Control Association, Montréal (Québec), 14 p.

Hendrey, G.R. et al. 1980. Geological and hydrochemical sensitivity of the eastern United States to acid precipitation, USEPA-600-/3-80-024. Corvallis Environmental Research Lagoratory, Corvallis. (Oregon), 100 p.

Hills, G.A. 1959. A ready reference ot the description of the land of Ontario and its productivity, (Préliminaire), Research Branch, Ontario Dept. Lands and Forests, Naple (Ontario), 142.

Hills, G.A. 1975. Mapping the site regions and landscape districts of Ontario 1944-1975: Introducing the 1975 Version, Ontario Ministry of Natural Resources, Toronto Ontario (Préliminaire), 73 p.

Hole, F.D. 1975. Soils of Wisconsin, University of Wisconsin Press, Madison (Wisconsin).

Hornbeck, J.W., G.E. Likens et J.S. Eaton. 1976. Seasonal patterns in acidity of precipitation and their implications for forest stream ecosystems. Proc. 1st Intern. Symp. Acid Precipitation and Forest Ecosystem. Columbus (Ohio), pp. 397-610.

Horntvedt, R. et E. Joranger. 1976. Chemical content of precipitation under trees and other vegetation: June-October. 1974, SNSF-project TN20/76, 21 p. (en Norvège). (Dans Abrahamsen et al, 1976).

Hoyle, M.C. 1973. Nature and properties of some forest soils in the White Mountains of New Hampshire, USDA Forest Service Research Paper NE-260. Upper Darby (Pennsylvania).

Hutchinson, T.C. et L.M. Whitby. 1977. The effects of acid rainfall and heavy metal particulates on a boreal forest ecosystem near the Sudbury smelting region of Canada. Water, Air and Soil Pollution 7 (1977). 421-438.

Huttunen, S. 1980. Air pollutants as additional stress factors of conifers under northern conditions. Résumé Proc. Intern. Conf. Ecological Impact of Acid Precipitation. Sandefjord (Norvège).

IUFRO. 1978. The integrative effects of airborne pollutants on the performance of boreal forest ecosystems. Proc. Symp. Effects of Airborne Pollution on Vegetation UN-ECE, Varsovie (Pologne), 20 p. (Dans Huttunen, 1980).

Jeffree, C.E. 1979. Plant damage caused by SO_2. Paper prepared for the Symposium on the Effects of Airborne Pollution on Vegetation, Varsovie (Pologne), 20-24 août 1979. 25 p.

Johnson, D.W. 1980. Site susceptibility to leaching by H_2SO_4, in acid rainfall, Dans Hutchison, T.C. et M. Havas (éditeurs). Effects of Acid Precipitation on Terrestrial Ecosystems. Plenum Press, New York (N.Y.), pp. 525-536.

Johnson, D.W. et D.W. Cole. 1976. Sulfate mobility in an outwash soil in western Washington. Proc. 1st. Intern. Symp. Acid Precipitation and Forest Ecosystem. Columbus (Ohio), pp. 827-836.

Johnson, D.W. et D.W. Cole. 1977. Anion mobility in soils: relevance to nutrient transport from terrestrial to aquatic ecosystems, USEPA-600/3-77-068. Corvallis Environmental research Laboratory, Corvallis (Oregon), 27 p.

Johnson, B. 1977. Soil acidification by atmospheric pollution and forest growth. Water, Air and Soil Pollution 7:497-501.

Klopatek, J.M., W.F. Harris et R.J. Olson. 1980. A regional ecological assessment approach to atmospheric deposition: effects on soil systems. Dans Shriner, D.S. et al. (éditeurs). Atmospheric Sulphur Deposition: Environment Impact an Health Effects, Ann Arbor Science Publishers, Inc., Ann Arbor (Michigan), pp. 539-553.

Knabe, W. 1971. Air quality criteria and their importance for forests. Mitt. Forstl. BundVersAnst, Wein 92: 129-150.

Kramer, J.R. 1976. Geochemical and Lithological factors in acid precipitation. Proc. 1st Intern. Sym. Acid Precipitation and the Forest Ecosystem, Columbus (Ohio), pp. 611-618.

Kramer, J.R. 1977. Geochemical factors and terrain response to environmental contaminants. Unpub. Manuscript. Dept. Geology, McMaster Univ., Hamilton (Ontario).

Kramer, J.R. 1978. Geochemical factors and terrain response to environmental contaminants, Unpubl. Manuscript, Dept. Geology, McMaster Univ., Hamilton (Ontario), 107 p.

Kramer, J.R. 1979a. Susceptible lands in Canada and the United States. Communication présentée à Action Seminar on Acid Precipitation November, 1979. Toronto (Ontario), 7 p.

Kramer, J.R. 1979b. Geochemical factors and terrain response to environmental contaminants, Unpubl. report, McMaster Univ. Dept. Geology, Hamilton (Ontario), 78 p.

Lakhani, K.H. et H.G. Miller. 1980. Assessing the contribution of crown leaching to the element content of rainwater beneath trees. Dans Hutchinson, T.C. et M. Havas (éditeurs). Effects of Acid Precipitation on Terrestrial Ecosystems. Plenum Press, New York (N.Y.), pp. 161-172.

Lee, J.J., G.E. Neely et S.C. Perrigan. 1980. Sulfuric acid rain effects on crop yield and foliar injury. USEPA/600/3-80-016, Corvallis, Environmental Research Laboratory, Corvallis (Oregon), 21 p. Corvallis (Oregon), 21 p.

Lee, J.J. et D.E. Weber. 1980. Effects of sulfuric acid rain on two model hardwood forests, USEPA-600/3-80-014. Corvallis Environmental Research Laboratory, Corvallis (Oregon), 39 p.

Malmer, N. 1976. Chemical changes in the soil. Ambio 5: 231-234.

Materna, J. 1979. Effects of pollution on the capability of vegetation to perform such functions as water retention, soil protection, wildlife habitat, etc. Proc. Symp. Effects of Airborne Pollutions on Vegetation, UN-ECE, Varsovie (Pologne), août 1979. 8 p.

Mayer, R. et B. Ulrich. 1980. Input to soil, especially the influence of vegetation in intercepting and modifying inputs - a review. Dans: Hutchinson, T.C. et M. Havas (éditeurs). Effects of Acid Precipitation on Terrestrial Ecosystems. Plenum Press, New York (N.Y.), pp. 173-182.

McFee, W.W. 1980. Sensitivity of soil to acid precipitation, USEPA-600/3-80-013. Corvallis Environmental Research Laboratory. Corvallis (Oregon), 186 p.

Nilsson, S.I. 1980. Ion adsorption isotherms in predicting leaching losses from soils due to increased inputs of "hydrogen" ions - a case study. Dans Hutchinson, T.C. et M. Havas (éditeurs). Effects of Acid Precipitation on Terrestrial Ecosystems. Plenum Presss, New York (N.Y.), pp. 537-552.

Norton, S.A. 1976. Changes in chemical processes in soils caused by acid precipitation. Proc. 1st Intern. Symp. Acid Precipitation and Forest Ecosystem. Columbus (Ohio), 7 p.

Pallissier, M. 1972. La pollution atmosphérique et ses effets sur la végétation, Publication collective de l'Université du Québec à Trois-Rivières et le Service de la Protection d'Environnement, Environnement Canada), (Québec), 40 p.

Petersen, L. 1980. Podzolization: mechanism and possible effects of acid precipitation. Dans: Hutchinson, T.C. et M. Havas (éditeurs). Effects of Acid Precipitation on terrestrial Ecosystems. Plenum Press, New York (N.Y.), pp. 223-237.

Posthumus, A.C. 1979. Monitoring levels and effects of airborne pollutants on vegetation, use of biological indicators and other methods, national and international programmes. Proc. Symp. Effects of Airborne Pollution on Vegetation, UN-ECE, Varsovie (Pologne), août 1979. 13 p.

Rennie, P.J. 1979. Dangers to soils and vegetation. Proc. Action Seminar on Acid Precipitation. Toronto (Ontario), 9 p.

Robitaille, G. 1979. Rapport d'étage: Sensibilité des écosystèmes suite aux retombées des pollutants atmosphériques dans la région du Québec, Direction des eaux intérieures, Région du Québec, Environnement Canada, Octobre, 1979. 10 p.

Robitaille, G. 1980. Acid precipitation and vegetation. Communication présentée au 73e Congrès annuel de l'Association pour le Contrôle de la Pollution de l'air, Juin 22-27, 1980. Montréal (Québec), 71 p.

Robitaille, G. et P.J. Rennie. 1980. Sensitivity of eastern Canadian soil and vegetation regions to acid rain, (à la presse).

Rowe, J.S. 1972. Arbres indigènes du Canada. Serv. Can. des Forêts, Environnement Canada. Publ. n° 1300.

Scheider, W.A., W.R. Snyder et B. Clark. 1979. Deposition of nutrients and major ions by precipitation in South Central Ontario, Water, Air and Soil Pollution 12(2): 171-186.

Shilts, W. et al. 1980. Calcareous glacial drift map of eastern Canada and bedrock lithologies map of eastern Canada. Comm. Géol. Can. Ottawa (Ontario), Brouillon de manuscrit inédit.

Shriner, D.S. 1976. Effects of simulated rain acidified with sulfuric acid on host-parasite interactions. Proc. 1st. Intern. Symp. Acid Precipitation and Forest Ecosystem. Columbus (Ohio), pp. 919-926.

Strifler, W.D. et M.H. Kuehn. 1976. Acid rainfall and conifer seedlings. Proc. 1st Intern. Symp. Acid Precipitation and Forest Ecosystem. Columbus (Ohio).

Tamm, C.O. et A. Aronsson. 1972. Plant growth as affected by sulphur compounds in polluted atmosphere: a literature survey. Rapp. Uppsatser Inst. Växtekologi et marklära, Skogshogskolan, Nr. 12, 53 p.

Teïgen, O. et al. 1976. Acidification experiments in conifer forest. II. Lysimeter studies. SNSF-projects. (en Norvégien) (Dans: Abrahamsen et al, 1976).

Tingey, D.T. et R.A. Reinert. 1975. The effect of ozone and sulphur dioxide, singly and in combination, on plant growth. Environmental Pollution 9:117.

Tukey, H.B. 1980. Some effects of rain and mist on plants, with implication for acid precipitation. Dans: Hutchinson, T.C. et M. Havas (éditeurs). Effects of Acid Precipitation on Terrestrial Ecosystems. Plenum Press, New York (N.Y.), pp. 141-150.

Tyler, G. 1978. Leaching rates of heavy ions in forest soil. Water, Air and Soil Pollution 9 (1978): 137-148.

Ulrich, B. 1980. Deposition, production and consumption of hydrogen ions in a beech and spruce ecosystem in the Solling District. Résumé Proc. Intern. Conf. Ecological Impact Acid Precipitation. Sandefjord (Norvège).

U.S. Soil Conservation Service (USDA-SCS). 1960. Soil Classification - a Comprehensive System: 7th approximation. U.S. Dept. Agriculture, Washington (D.C.)

U.S. Soil Conservation Service (USDA-SCS). 1975. Soil taxonomy - a basis system for making and interpreting soil surveys, U.S. Dept. Agriculture, Agriculture Handbook No. 436. Washington (D.C.).

U.S. Geological Survey (USGS). 1970 Distribution of principal kinds of soils: orders, suborders and great groups. Dans: National Atlas of the United States of America. U.S. Geological Survey, Washington (D.C.), pp. 85-88.

Wang, C. et D.R. Coote. 1980. Sensitivity classification of agricultural land to long term acid precipitation in eastern Canada, Unpublished manuscript and map. 16 p.

Wiklander, L. 1973. The acidification of soil by acid precipitation, Grunnförbättring 26(4): 155-164.

Wiklander, L. 1975. The role of neutral salts in the ion exchange between acid precipitation and soil. Geoderma 14: 93-105.

Wood, T. et F.H. Bormann. 1974. The effects of an artificial acid mist upon the growth of Betula alleghaniensis. Britt. Envir. Poll. 7: 259-268.

Wood, T. et F.H. Borman. 1975. Increases in foliar leaching caused by acidification of an artificial mist. Ambio 4: 169-171.

Wood, T. et F.H. Bormann. 1976. Short-term effects of a simulated acid rain upon the growth and nutrient relations of Pinus strobus L. Proc. 1st Inern. Symp. Acid Precipitation and Forest Ecosystem. Columbus (Ohio), pp. 815-826.

SÉRIE DE DOCUMENTS DE TRAVAIL

No. 1: "L'écologie et la récupération des terres perturbées par l'activité minière: Bibliographie sélective de la littérature I.B. Marshall. En 73-4/1. ISBN 0-662-50724-X.

No. 2: "Analyse des expériences américaines dans la modification de l'utilisation des terres pour la conservation de l'énergie". W.R.D. Sewell et H.D. Foster. En 73-4/2F. ISBN 0-662-90808-2.

No. 3: "Les effets de l'établissement d'ex-citadins en milieu rural: une rétrospective de la littérature canadienne". J.D. McRae. En 73-4/3F. ISBN 0-662-90809-0.

No. 4: "Incidences des programmes fédéraux sur les terres dans le district régional de la vallée de la Cowichan en Colombie-Britannique". L.R. Barr. En 73-4/4F. ISBN 0-662-90810-4.

No. 5: "L'effet sur l'utilisation des terres agricoles des politiques et programmes du gouvernement fédéral dans le comté de Kings en Nouvelle-Écosse". S.G. Ryle et P. Gervason. En 73-4/5F. ISBN 0-662-90811-2.

No. 6: "Conservation de l'énergie par la planification de l'utilisation des terres. Synthèse du symposium de Montréal, 26-28 mars 1980". W.R.D. Sewell et H.D. Foster. En 73-4/6F. ISBN 0-662-11088-9.

No. 7: "Procédés d'évaluation au Canada et leur utilisation dans la préservation des terres agricoles". J.D. McCuaig et H.J. Vincent. En 73-4/7F. ISBN 0-662-90813-9.

No. 8: "Les effets des programmes fédéraux sur l'utilisation des terres dans la vallée de Windermere". J.D. McCuaig et E.W. Manning. En 73-4/8F. ISBN 0-662-91109-1.

No. 9: "Problématique de l'utilisation du sol au Canada". E.W. Manning. En 73-4/9. ISBN 0-662-51142-5.