

1082
3634
18/3
02

GEOS

Vol. 18 No. 3 Summer/Vol. 18, n° 3 Été 1989

LIBRARY / BIBLIOTHÈQUE

MAY 8 1990
MAI

GEOLOGICAL SURVEY
COMMISSION GEOLOGIQUE

This document was produced
by scanning the original publication.
Ce document est le produit d'une
numérisation par balayage
de la publication originale.

A quarterly about the earth's resources / Publication trimestrielle sur les ressources de la Terre



GEOS

A quarterly about the earth's resources

Publication trimestrielle sur les ressources de la Terre

Vol. 18 No 3 Summer 1989
Vol. 18, n° 3 Été 1989

GEOS is published quarterly by Energy, Mines and Resources Canada Minister, the Hon. Jake Epp Deputy Minister, Bruce Howe

GEOS est une publication trimestrielle d'Énergie, Mines et Ressources Canada. L'Hon. Jake Epp, ministre M. Bruce Howe, sous-ministre

Opinions expressed by contributors from outside the department are their own and not necessarily those of EMR.

Le Ministère ne partage pas nécessairement les opinions des collaborateurs de GEOS qui ne font pas partie d'EMR.

Editor
Rédactrice en chef
Primrose Ketchum

Assistant Editors
Rédacteurs adjoints
Val Donnelly
Pascal St-Gelais

Graphics
Présentation graphique
Carisse Graphic Design Ltd.

GEOS is distributed without charge on request.

Distribution, GEOS, Energy, Mines and Resources Canada, 580 Booth Street, Ottawa, Ontario K1A 0E4.

Indexed in the Canadian Periodical Index.

Indexed in the Canadian Magazine Index and available on-line in the Canadian Business & Current Affairs Database.

GEOS est distribué gratuitement sur demande.

Centre de diffusion, GEOS, Énergie, Mines et Ressources Canada, 580, rue Booth, OTTAWA (Ontario) K1A 0E4

Cité dans l'Index des périodiques canadiens

Répertorié dans le Canadian Magazine Index et disponible en direct dans la banque de données Canadian Business and Current Affairs.

ISSN 0374-3268



Energy, Mines and
Resources Canada

Énergie, Mines et
Ressources Canada

- 1 Global Change and the Record of the Past/
Les changements à l'échelle du globe et le témoignage du passé
by/par B.H. Luckman, GSC/CGC and/et University of Western
Ontario/Université Western Ontario.
- 9 Vegetation Indicates Potentially Unstable Arctic Terrain/
La végétation dénote l'éventualité d'un terrain arctique instable
by/par Sylvia A. Edlund, GSC/CGC
- 14 Late Tertiary Environments: A Vision of the Future?/
Les milieux arctiques de la fin du tertiaire : une vision de notre avenir?
by/par J.V. Matthews Jr., GSC/CGC
- 19 Peatlands: A Leaky Sink in the Global Carbon Cycle/
Les tourbières : un réservoir de carbone qui fuit
by/par Lynn Ovenden, GSC/CGC
- 25 Geology and Acid Rain in Eastern Canada/
La géologie et les pluies acides dans l'Est du Canada
by/par W.W. Shilts and/et I.M. Kettles
- 33 Scientists Monitor Climate and Pollution from Ice Caps and Glaciers/
Les glaciers et les calottes glaciaires renseignent les scientifiques sur la
pollution et l'évolution du climat
by/par Roy Koerner, Ram Dubey and/et Murti Parnandi, GSC/CGC
- 39 Vegetation changes over 12 000 years/
Changements de végétation au cours de 12 000 ans
by/par T.W. Anderson, GSC/CGC
- 48 Permafrost, Ground Ice and Global Change
in the Beaufort Sea Coastlands/
Pergélisol, glace de sol et changements globaux dans les terres
en bordure de la mer de Beaufort
by/par D.G. Harry and/et S.R. Dallimore, GSC/CGC

Cover: A graphic demonstration of the effect of climate warming in the present century is the recession of alpine glaciers. Alberta's Athabasca Glacier has receded more than a kilometer since 1917. Both photos are taken from the same viewpoint.

Couverture : Les photos illustrent les effets du réchauffement du climat au cours du présent siècle qui est caractérisé par le recul des glaciers de montagne. Le glacier d'Athabasca, en Alberta, a reculé de plus d'un kilomètre depuis 1917. Les deux photos ont été prises du même point d'observation.

Global Change and the Record of the Past

by B.H. Luckman

“Humanity is conducting an unintended, uncontrolled, globally pervasive experiment whose ultimate consequences could be second only to a global nuclear war These changes represent a major threat to international security and are already having harmful consequences over many parts of the globe.”

Conference statement of the Global Atmosphere Conference in Toronto, June 1988.

This experiment is global change.

Collective human activities are now of sufficient magnitude to be detected at a global scale and can affect the environment of the whole world.

The dimensions of the problem are huge. Modern industrialized people use more than 20 tonnes of new mineral material per head each year; and the volume of

material moved annually by people considerably exceeds that moved by all geomorphic and geological processes worldwide. For centuries we have disposed of our wastes into the atmosphere, lithosphere and hydrosphere. As populations have increased, the effects have spread from local (e.g. Los Angeles smog) to global extent (e.g. Arctic haze, Chernobyl) and could modify the way global environmental systems operate.

The Problem

Since 1950, we have tripled the release of CO₂ into the global atmosphere. Atmospheric CO₂ values have risen 25 per cent in the last century, 10 per cent in the last 30 years. Increases in CO₂ and other greenhouse gases like methane and chlorofluorocarbons reinforce the various climatic models which predict global warming. Acid rain and holes in the ozone layer are conclusively linked to specific anthropogenically introduced pollutants in the atmosphere. We have also changed the chemistry of our streams, groundwater and, increasingly, oceans by discarding human, animal and chemical wastes, some highly toxic, into them.

Population pressures are assaulting the remaining natural environments. Tropical forests, the most diverse, productive environments on earth, containing more than half the world's living species, are being rapidly destroyed with serious consequences for biological diversity and the planetary gene pool. Estimated extinction rates are 1000 times higher than historical norms and many potentially useful evolutionary lessons and products are being lost. This destruction adds significantly to global CO₂ levels: in 1987, CO₂ released from burning Brazilian forests exceeded that from fossil

Les changements à l'échelle du globe et le témoignage du passé

« L'humanité se livre sans frein à une expérience inconsciente qui touche l'ensemble du globe et dont les conséquences ultimes seraient à peine moins désastreuses qu'une guerre nucléaire mondiale. Ces changements représentent une grande menace pour la sécurité internationale et ont déjà des conséquences néfastes dans de nombreuses parties du globe. »

Déclaration de la Conférence sur l'atmosphère en évolution, tenue à Toronto, en juin 1988.

Cette expérience, ce sont les changements à l'échelle du globe. Les activités humaines collectives sont maintenant suffisantes pour être décelées à l'échelle du globe et peuvent influencer sur l'environnement du monde entier. Voici quelques exemples qui soulignent l'importance énorme du problème. Chaque habitant des pays industrialisés modernes utilise plus de 20 tonnes de nouvelles matières minérales par année; le volume de matières déplacé annuellement par l'homme excède considérablement celui qui est déplacé par tous les processus géomorphologiques et géologiques du globe. Pendant des siècles, nous avons rejeté nos déchets dans l'atmosphère, la lithosphère et

l'hydrosphère. À mesure que les populations ont augmenté, les effets se sont étendus de l'échelle locale (ex. : le smog de Los Angeles) à l'échelle du globe (ex. : la brume arctique, Tchernobyl) et pourraient modifier la façon dont les systèmes environnementaux du monde entier fonctionnent.

Le problème

Depuis 1950, les émissions de CO₂ dans l'atmosphère terrestre ont triplé. La teneur atmosphérique du CO₂ a augmenté de 25 % au cours du siècle dernier, dont 10 % au cours des 30 dernières années. La hausse des concentrations de CO₂ et d'autres gaz à effet de serre comme le

méthane et les chlorofluoroalcanes appuie les divers modèles climatiques qui prédisent un réchauffement à l'échelle du globe. Les pluies acides et les trous dans la couche d'ozone ont été liés de façon concluante à des polluants particuliers introduits dans l'atmosphère par l'homme. Nous avons également modifié la chimie de nos cours d'eau, de l'eau souterraine et, de plus en plus, des océans, en y déversant des déchets humains, animaux et chimiques, dont certains sont extrêmement toxiques.

À l'heure actuelle, les pressions démographiques minent les environnements naturels qui restent. Les forêts tropicales, milieux les plus diversifiés et productifs sur terre, qui comprennent plus de la moitié des espèces vivantes, sont en train d'être rapidement détruites, ce qui a de graves conséquences pour la diversité biologique et l'ensemble génique de la planète. On estime que les taux d'extinction sont 1000 fois plus élevés que par le passé, et de nombreux produits et leçons potentiellement utiles du point de vue de l'évolution se perdent. Ces activités accroissent de façon significative la teneur du CO₂ dans l'atmosphère terrestre. En effet, en 1987, la quantité de CO₂ dégagée par le brûlage des forêts brésiliennes était supérieure à celle qui provenait de l'utilisation des combustibles

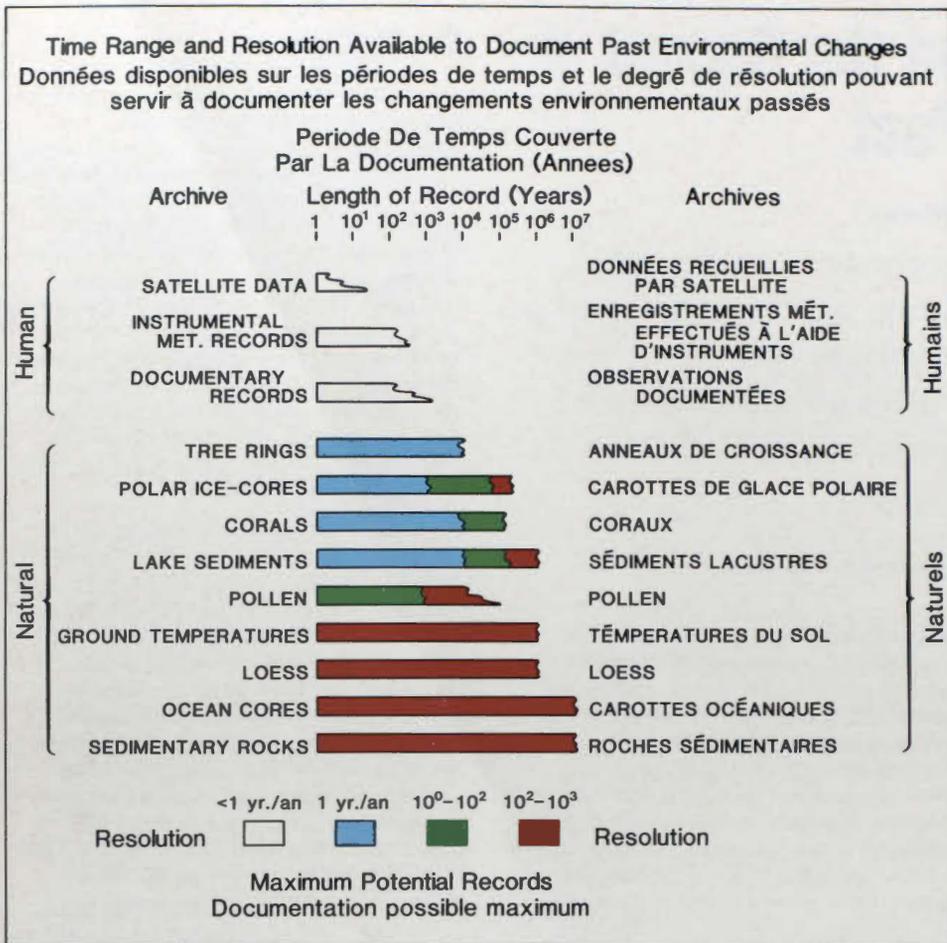


Figure 1 Time range and resolution of various data sources to reconstruct or document past environmental changes.

Figure 1 Période couverte par les diverses sources de données en vue de reconstituer ou de documenter les changements environnementaux passés et de permettre la résolution de ces données.

fossiles dans l'ensemble des Amériques et de l'Océanie. Bien que les forêts tropicales viennent tout juste de susciter une attention particulière, le déboisement n'est pas un phénomène nouveau. L'Europe et le sud de l'Ontario ont déjà été déboisés au cours de l'histoire, et des forêts canadiennes arrivées à maturité continuent de disparaître à une allure alarmante.

Les scientifiques se rendent compte maintenant que la composition de l'atmosphère résulte de l'activité de la biosphère au cours de l'évolution géologique et que la biosphère continue de jouer un rôle critique dans le maintien des équilibres chimiques de l'atmosphère. Si, comme on l'a déjà affirmé, les forêts constituent les poumons de la planète, il semble imprudent de la part des organismes qui respirent de l'oxygène de détruire les formes de vie qui en sont de bons producteurs.

Les activités humaines endommagent et détruisent des écosystèmes particuliers, mais l'effet global sur les écosystèmes de la planète vient tout juste de se manifester. Des processus synergiques et interactifs peuvent également amplifier ces effets. Nous devons considérer le



fuel use in all of the Americas and Oceania. Although tropical forests are attracting particular attention just now, deforestation is not a new phenomenon. Both Europe and southern Ontario were deforested in historic times and mature forest in Canada continues to disappear at an alarming rate.

Scientists now realize that the atmosphere's composition results from biospheric activity over geological time and that the biosphere continues to play a critical role in maintaining chemical balances in the atmosphere. If, as has been argued, forests are the lungs of the planet, it seems foolhardy for oxygen-breathing organisms to destroy life forms that are significant oxygen producers.

Figure 2 Natural archives with annual resolution include layered sediments, especially varves (Don Valley, Toronto), glacier ice (Premier Range, B.C.), and tree rings (Northern Quebec, courtesy of Louise Filion). The exceptionally light tree rings indicated by arrows are years following major volcanic eruptions (Laki, Iceland, 1783; Tambora, Indonesia, 1815) with very cool, wet summers associated with volcanic dust in the atmosphere.

Figure 2 Les archives naturelles ayant une résolution annuelle comprennent les couches de sédiments, en particulier les varves (Don Valley, Toronto), la glace des glaciers (Premier Range, C.-B.) et les anneaux des arbres (Nouveau-Québec, courtoisie de Louise Filion). Les anneaux annuels très clairs indiqués par des flèches représentent les années qui ont suivi des éruptions volcaniques importantes (Laki, Islande, 1783; Tambora, Indonésie, 1815) associés avec de la poussière volcanique dans l'atmosphère, les étés ont été très frais et humides.



Human activities damage and destroy individual ecosystems, but the total effect on global ecosystems is just becoming evident. Synergistic, interactive processes may amplify these changes. We must look at the total picture and not just its component parts: climate change is only one dimension of the problem.

Scientific Response

The world scientific community has been drawing attention to global changes with increasing vigor for years. With the exponential increase in scientific data and techniques, the development of global monitoring capacity by satellites and the ability of new computers to handle the huge data volumes, we have been able to see how severe the problem is and how much basic information we still need. As J.G. Roederer put it in 1986, "To preserve or expand life-support systems during the 21st century, governments of all nations would have to design long-term plans . . . (for) their own specific national goals . . . based on scientific knowledge of the global terrestrial environment. The required detailed and quantitative scientific knowledge simply does not yet exist."

The International Geosphere-Biosphere Program (IGBP), or Global Change Program, is responding to this problem.

tableau entier et non pas seulement ses composantes : le changement climatique ne représente qu'une dimension du problème.

Réaction des scientifiques

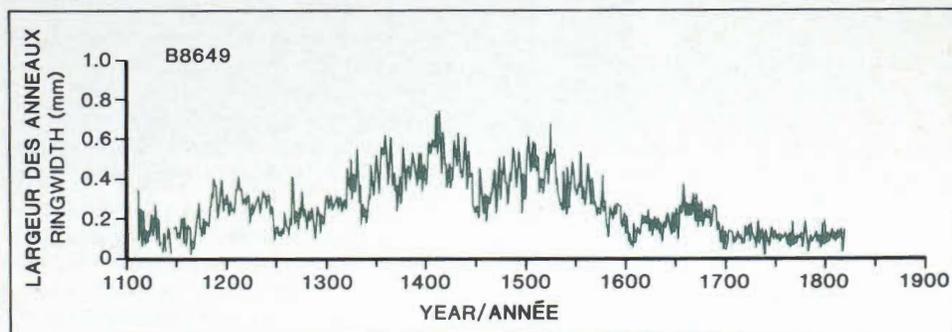
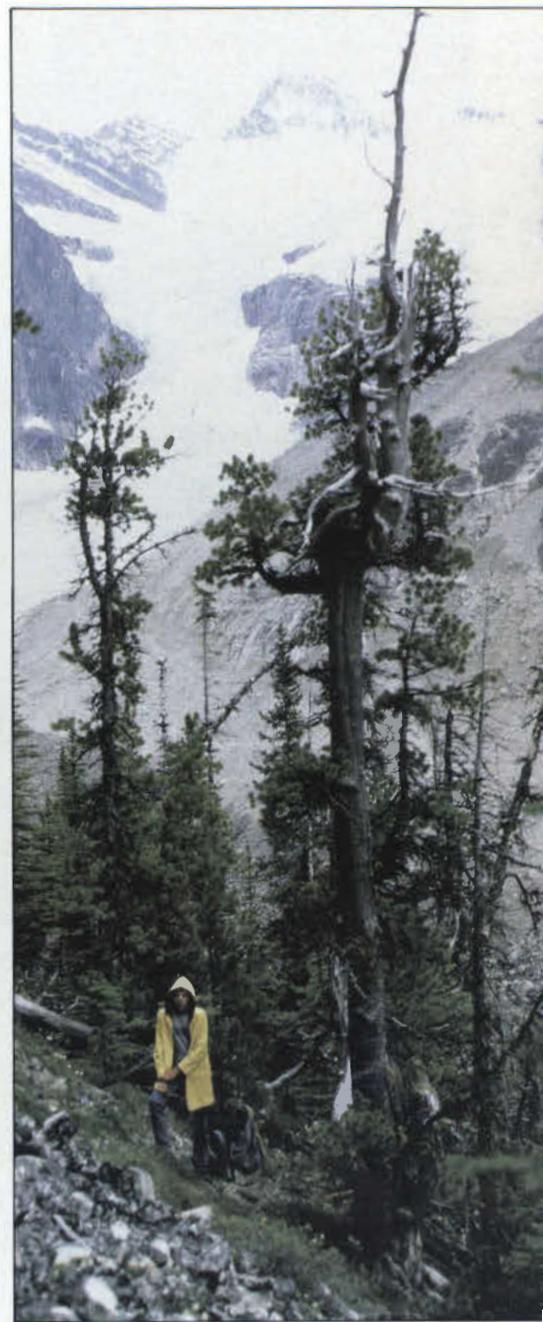
Depuis des années, la collectivité scientifique mondiale attire l'attention avec de plus en plus de vigueur sur les changements à l'échelle du globe. Grâce à l'augmentation exponentielle des données et des techniques scientifiques, à la mise au point d'une capacité de surveillance du globe à l'aide de satellites et aux nouveaux ordinateurs qui traitent une quantité imposante de données, nous avons été capables de déterminer le degré d'importance du problème ainsi que la quantité de données de base qu'il nous manque. Comme l'a mentionné J.G. Roederer en 1986, pour préserver ou améliorer les milieux de support vital au cours du 21^e siècle, les gouvernements de toutes les nations devront concevoir des plans à long terme (pour leurs propres objectifs nationaux) fondés sur une connaissance scientifique de l'environnement terrestre à l'échelle du globe. Les connaissances scientifiques détaillées et quantitatives requises n'existent tout simplement pas.

Le Programme international géosphère-biosphère (PIGB) ou Programme d'étude des changements globaux répond à ce

The program was launched by the International Council for Scientific Unions at its 1986 conference in Berne, following a plan initiated at a 1984 Ottawa symposium. The formal goal is 'to study the interactive physical, chemical, and biological processes that regulate the total Earth system, the unique environment that it provides for life, the changes that are occurring in this system, and the manner in which they are influenced by human actions'. Over the next 15 to 20 years, the program will attempt to understand interactive processes on a global scale so that we can model, predict and mitigate the effect of human beings on the global life-support system. It is the most ambitious and wide-ranging global scientific project yet undertaken and it involves all major international scientific associations and national committees in more than 25 countries. In Canada the Royal Society heads the project and is working out priorities for Canada's component of the program.

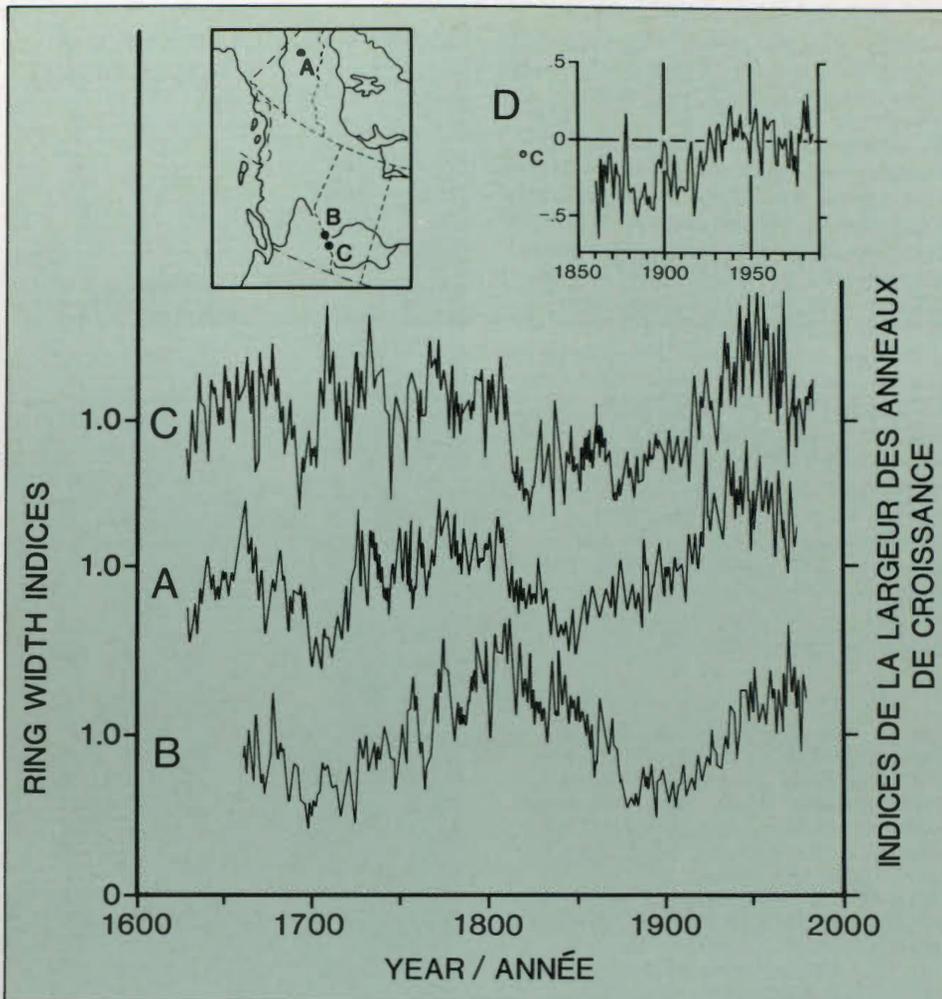
Figure 3 The oldest living Whitebark Pine so far located in Canada is this >873 year old specimen growing near Bennington Glacier, British Columbia. Before 1700 AD the record contains a strong environmental signal: the suppression after 1700 may reflect damage to the tree (after 1820 the rings average about 0.05 mm). A tree-ring chronology for this site would integrate records from 20 to 30 such cores.

Figure 3 Le plus vieux pin albicaule vivant à être localisé au Canada. Âgé de plus de 873 ans, ce vieux spécimen pousse près du glacier Bennington, en Colombie-Britannique. Avant l'année 1700 de notre ère, les anneaux montrent une réaction environnementale prononcée; la disparition de réaction après 1700 peut indiquer des dommages causés à l'arbre (après 1820, les anneaux mesurent en moyenne 0,05 mm). Une chronologie fondée sur les anneaux annuels des arbres établie pour cet emplacement, comprendrait des données obtenues à partir de 20 à 30 carottes de ce genre.



problème. Il a été lancé par le Conseil international des unions scientifiques au cours de la conférence qu'il a tenue à Berne en 1986, suite à un plan établi lors d'un colloque qui a eu lieu à Ottawa en 1984. Son objectif officiel est d'étudier les processus physiques, chimiques et biologiques qui régissent le système

terrestre global, l'environnement unique qu'il fournit aux espèces vivantes, les changements qui surviennent dans ce système et la façon dont ces derniers sont touchés par les activités humaines. Au cours des 15 à 20 prochaines années, on tentera dans le cadre du programme de comprendre les processus interactifs à



Canada's vast territory, critical high-latitude position and dominant role in global climatic history (e.g. the effects of the Laurentide Ice Sheet in the last 20 000 years) ensure that Canada will receive a great deal of attention in IGBP. Indications are that the North, particularly the Arctic, will show the earliest signs and greatest effects of climatic warming.

The Geological Survey of Canada (GSC) has been central in developing Canada's geological data base. Together with other government agencies and research institutions the GSC must now put in place a major integrated scientific program to address global change.

Figure 4 Tree-ring chronologies for White or Engelmann Spruce at treeline in the Selwyn Mountains (A), at Athabasca Glacier (B) and Larch Valley (C). The main environmental variable reflected here is summer temperature. The strong similarity in chronologies A and C, although 1800 km apart, suggests a common control, most probably summer temperatures. This is supported by the similar pattern of the instrumental record of northern hemisphere mean annual temperatures (graph D). If these tree-ring records are true proxies for temperature, they emphasize the fact that the oft-cited instrumental record begins at one of the cooler periods in the last few centuries. The offset in the Athabasca record is thought to reflect local microclimatic effects from the adjacent glacier.

l'échelle du globe en vue de modéliser, prévoir et atténuer l'effet de l'activité humaine sur le milieu de support vital du globe. C'est le projet scientifique global le plus ambitieux et le plus vaste jamais entrepris et il fait appel à toutes les principales associations scientifiques internationales ainsi qu'à des comités nationaux dans plus de 25 pays. Au Canada, la Société royale du Canada dirige le projet et établit les priorités liées à la participation du Canada au programme.

Le vaste territoire canadien, sa position critique, à haute latitude, et son rôle dominant dans l'histoire du climat du globe (ex. : les effets de l'inlandsis Laurentidien au cours des 20 000 dernières années) garantissent que le Canada fera l'objet d'une grande attention dans le cadre du PIGB. Des données indiquent que les premiers signes et les plus grands effets du réchauffement climatique se manifesteront d'abord dans le Nord, en particulier dans l'Arctique.

La Commission géologique du Canada (CGC) a joué un rôle central dans la mise sur pied de la base de données géologiques du Canada. En collaboration avec d'autres organismes du gouvernement et des institutions de recherche, la CGC doit maintenant mettre en place un vaste

programme scientifique intégré en vue d'étudier les changements à l'échelle du globe.

Rôle des sciences de la Terre

Au cours d'un colloque tenu en 1986 pour le 25^e anniversaire de l'Union internationale des sciences géologiques, M. R.W. Price a déclaré que les processus géologiques sont fondamentaux pour la compréhension des changements à l'échelle du globe et que les données géologiques accumulées fournissent une base à partir de laquelle on peut évaluer la nature et l'importance des changements actuels.

Le Programme d'étude des changements globaux se penche sur les systèmes interactifs et sur les changements survenus dans le temps. De conception multidisciplinaire, il exigera d'importantes contributions de la part, notamment, de la télédétection, de la chimie de l'atmosphère, de la climatologie, de l'océanographie, de l'écologie et de la géographie. Les spécialistes des sciences de la Terre, à titre d'historiens de la surface de la planète, peuvent considérer les changements récents dans un contexte

Figure 4 Chronologies fondées sur les anneaux annuels d'épinettes blanches et d'épinettes d'Engelmann situées à la limite forestière de la chaîne Selwyn (A), au glacier Athabasca (B) et dans la vallée de Larch (C). La principale variable environnementale qui se reflète ici est la température estivale. La forte ressemblance entre les chronologies A et C, bien que distantes de 1 800 km, laisse supposer un contrôle commun, probablement les températures estivales. Le modèle similaire présenté par les enregistrements des températures annuelles moyennes de l'hémisphère nord (graphique D) vient appuyer cette hypothèse. Si ces anneaux annuels sont de véritables indicateurs de la température, ils mettent en évidence le fait que les données souvent citées commencent au cours de l'une des périodes les plus froides des siècles derniers. On croit que la compensation observée dans les données provenant de l'Athabasca reflète les effets d'un microclimat local causé par le glacier adjacent.

plus vaste. Les données détaillées obtenues à l'aide d'instruments ou de satellites ne couvrent pas une période assez longue pour permettre de faire la distinction entre les changements naturels et ceux qui sont provoqués par l'homme sans avoir d'abord compris l'histoire plus ancienne préservée dans diverses archives naturelles. Nous pouvons étudier les périodes plus chaudes survenues dans le passé et peut-être trouver des similitudes pour des réchauffements à venir. Nous pouvons également examiner les périodes

Role of the Earth Sciences

"Geological processes are fundamental to understanding global change and the geological record provides a baseline against which to assess the nature and significance of contemporary global change," said R.W. Price at the International Union of Geological Sciences' 25th Anniversary Seminar in 1986.

The Global Change Program studies interactive systems and change over time. Interdisciplinary by design, it will require significant contributions from, for example, remote sensing, atmospheric chemistry, climatology, oceanography, ecology and geography. Earth scientists,

Figure 5 Long-term variations in CO₂ and deuterium from the Vostok ice core, Antarctica, over a complete glacial-interglacial cycle. The deuterium record provides a temperature record, and the close relationship between CO₂ and global temperatures during this period is very striking. Data such as these indicate that major fluctuations in global CO₂ in the past have been associated with temperature changes; however, we do not know the exact cause of this covariation. The asterisk (right) indicates the present, anthropogenically enhanced CO₂ level.

Figure 5 Variations à long terme (au cours d'un cycle de glaciation complet) des teneurs en CO₂ et en deutérium d'une carotte de glace prélevée à Vostok, dans l'Antarctique. Les données sur le deutérium fournissent un enregistrement de la température et le lien étroit entre le CO₂ et les températures du globe au cours de cette période est très frappant. Des données de ce genre indiquent que les fluctuations importantes de la teneur du globe en CO₂ ont été associées dans le passé à des changements de températures; cependant, nous ne connaissons pas la cause exacte de cette covariation. L'astérisque (à droite) indique la teneur actuelle du CO₂ augmentée artificiellement par l'activité humaine.

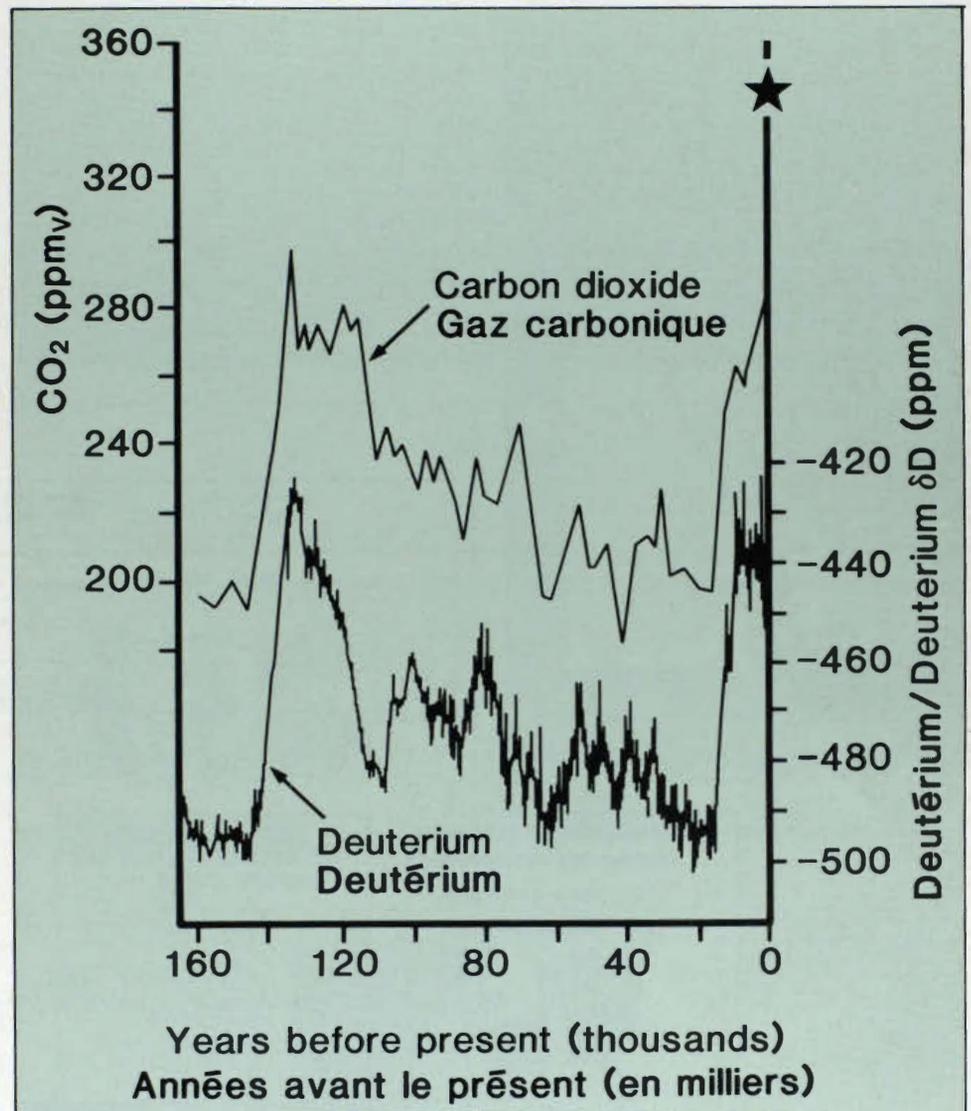
de changement rapide et apprendre comment les océans, l'atmosphère et les systèmes terrestres ont interagi en réaction à la rapidité des changements naturels. Nous pouvons en outre utiliser la colonne stratigraphique pour évaluer et vérifier les modèles climatiques du globe qui comportaient des situations frontalières différentes des situations actuelles. Des modèles reproduisant les caractéristiques et l'ampleur des changements, d'après les données sur les fossiles, garantiraient la crédibilité des résultats prévus par les modèles établis pour l'avenir.

La présente édition spéciale de GEOS met en évidence des projets liés aux changements à l'échelle du globe entrepris par la Division des sciences des terrains de la CGC. Les géologues savent que la

as historians of the planet's surface, can see recent changes in a broader context. Available detailed instrumental or satellite records are too short to discriminate between natural and human-induced changes without first understanding the longer history preserved in various natural archives. We can look back to warmer periods in the past and possibly find analogues for future warming. We can look back to periods of rapid change and learn how the oceans, atmosphere and terrestrial systems interacted in response

to rapid natural changes. We may also use the paleorecord to evaluate and verify global climatic models whose boundary conditions were different from the present. Models reproducing the patterns and magnitude of changes inferred from the fossil record would lend credibility to results predicted by models of the future.

This GEOS special edition highlights projects relating to global change undertaken by the GSC's Terrain Sciences Division. Geologists know that reconstruction of past environments must



reconstitution d'environnements disparus doit être fondée sur une compréhension approfondie du présent. L'étude des liens entre les processus dans les environnements contemporains est donc essentielle à tout examen des changements à l'échelle du globe. L'Arctique doit être étudiée et surveillée, en particulier en ce qui concerne la détérioration du pergélisol, les effets thermiques et l'instabilité accrue du terrain qui peut résulter du dégel du pergélisol. Les milieux montagneux peuvent devenir plus dangereux si les glaciers fondent rapidement et causent

l'écoulement catastrophique de lacs de front glaciaire ou lacs proglaciaires.

D'après les rapports de planification du PIGB, lorsqu'on examine les archives du passé, il faudrait accorder la priorité aux interactions principales qui agissent pendant des périodes allant de dizaines à des centaines d'années. Nous devons obtenir des données à haute résolution afin de remonter plus loin dans le temps que ne le permettent les données limitées obtenues à l'aide d'instruments (fig. 1). Au Canada, si l'on exclut l'information documentaire restreinte, comme les



Figure 6 Environmental history for an area may be reconstructed from several sources. The diagram top left summarizes the history of environmental change in the Canadian Rockies over the last 10 000 years using various lines of evidence: dated moraines and till units found in glacier forefields; higher treeline stands (warmer than present) based on ¹⁴C dated logs above the present treeline; and treeline fluctuations inferred from pollen ratios. Note the strong similarity between the trend of the treeline curve and Northern Hemisphere summer radiation. The log dates from ca 5900 years BP, and the site is more than 40 m above present treeline. The diagram lower centre shows oxygen-isotope data from five-year samples of tree rings taken from a living tree and from this log. Data from two modern trees show a strong relationship with mean annual temperatures at the nearest meteorological station. Using this relationship, the mean annual temperature about 5900 years ago was approximately 1.25°C warmer than present.

Figure 6 L'histoire environnementale d'une région peut être reconstituée à partir de plusieurs sources. Le diagramme du coin supérieur gauche résume l'histoire des changements environnementaux survenus dans les Rocheuses canadiennes au cours des 10 000 dernières années déduites à partir de divers types de preuves : des morceaux de moraines et de till trouvés au pied des glaciers, des peuplements situés à une limite forestière plus élevée (donc des températures plus chaudes qu'à présent) d'après des billes datées au ¹⁴C situées au-dessus de la limite forestière actuelle et les fluctuations de la limite forestière déduites à partir des proportions des différents pollens. Notez la forte similarité entre la tendance de la courbe de la limite forestière et la radiation solaire estivale de l'hémisphère nord. Les billes remontent à environ 5 900 ans avant l'actuel (BP) et leur emplacement se situe à plus de 40 mètres au-dessus de la limite forestière actuelle. Le diagramme du coin inférieur gauche montre des données sur les isotopes de l'oxygène provenant d'échantillons d'anneaux annuels d'une durée de cinq ans prélevés sur un arbre vivant et sur cette bille. Les données provenant de deux arbres indiquent une forte corrélation avec les températures annuelles moyennes enregistrées à la station météorologique la plus proche. D'après cette corrélation, la température annuelle moyenne, il y a environ 5 900 ans, était approximativement 1,25 °C plus chaude qu'à présent.

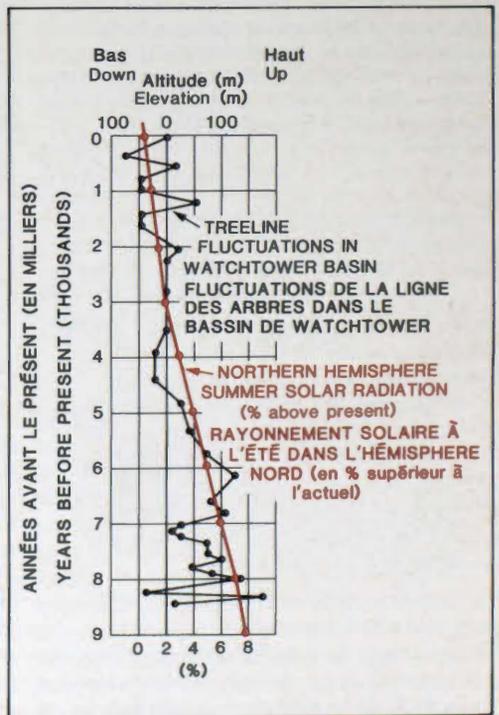
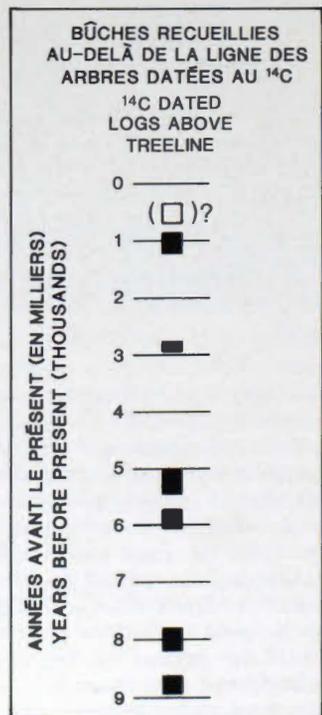
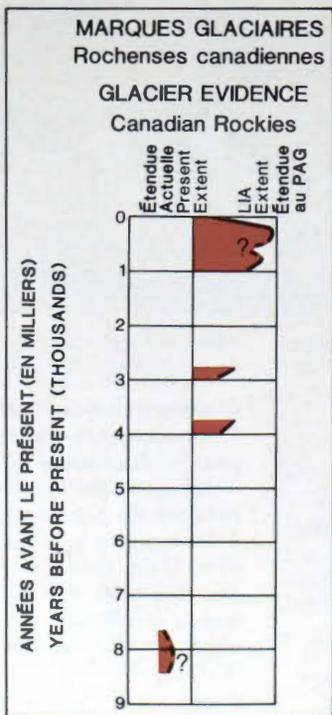
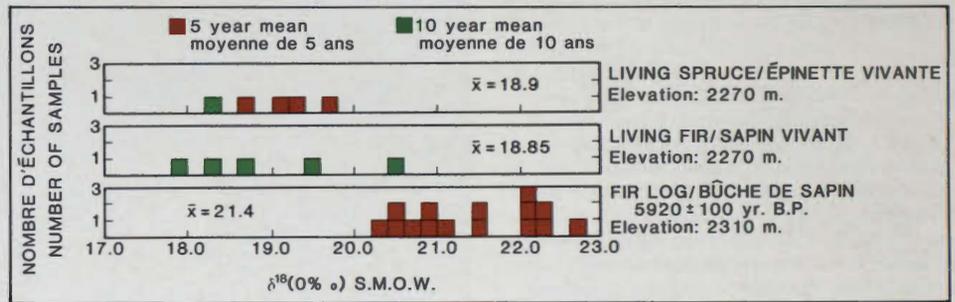
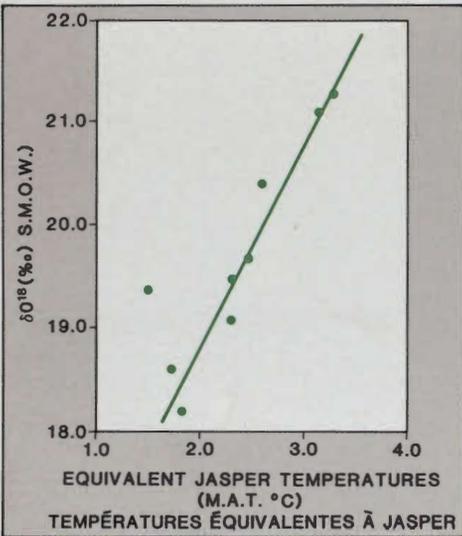
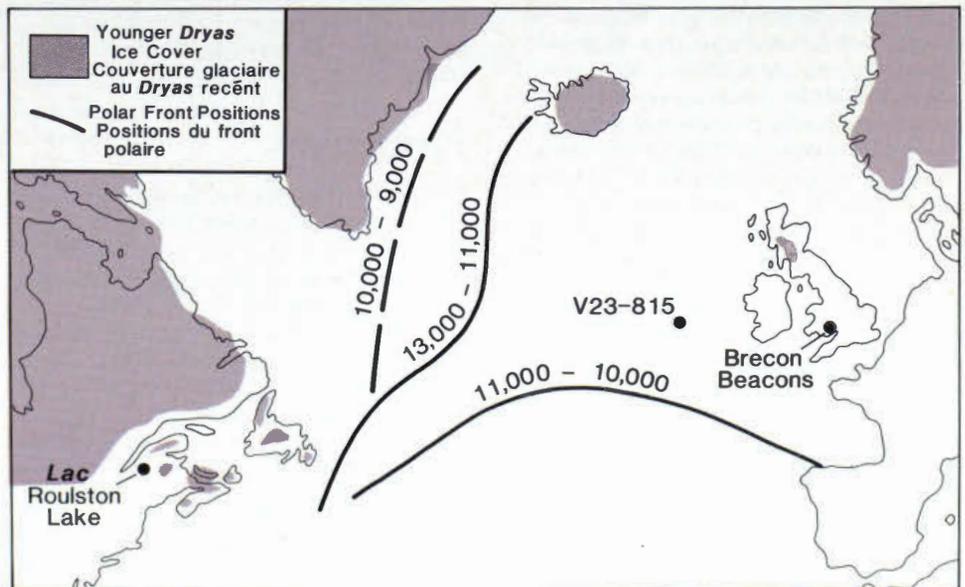
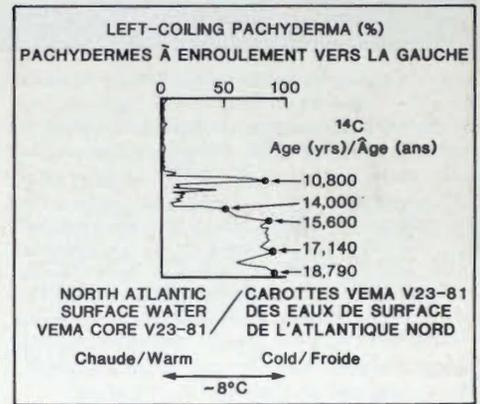
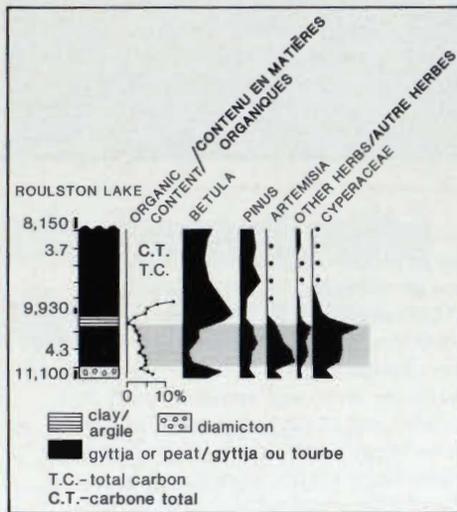




Figure 7 Evidence for the Younger Dryas Event. The classic evidence for cooling in the Younger Dryas Event is from pollen records and moraines in northwest Europe (lateral moraine, Nant Crew, Brecon Beacons), and more recently from pollen data from the Maritimes (a partial pollen diagram from Roulston Lake, left) and from ocean cores from the Atlantic. The map shows large geographic shifts in the position of the Polar Front at various time periods based on ocean core data. Core V81-23 shows the large magnitude and abrupt changes in the population of a polar water foraminifera species in that core. The cause of this rapid climatic shift is still debated but the most plausible scenarios involve meltwater drainage (probably catastrophic) from glacial lakes around the Laurentide ice sheet.

Figure 7 Preuves relatives à l'intervalle dryas récent. Pour prouver qu'il s'est produit un refroidissement au cours de l'intervalle dryas récent, on a procédé de la façon classique en se servant du pollen et des moraines dans le nord-ouest de l'Europe (moraine latérale, Nant Crew, Brecon Beacons), de données plus récentes sur le pollen obtenues dans les Maritimes (diagramme partiel de données sur le pollen provenant du lac Roulston, en haut à gauche) et de carottes prélevées dans l'océan Atlantique (en bas, à gauche). La carte, fondée sur des données provenant des carottes prélevées dans l'océan, montre de grandes variations dans la position géographique du front polaire au cours de diverses périodes. La carotte V81-23 montre les changements soudains de grande amplitude survenus dans la population d'une espèce de foraminifère des eaux polaires. La cause de ce revirement climatique rapide est encore controversée, mais les scénarios les plus plausibles mettent en jeu l'écoulement de l'eau provenant de la fonte (probablement catastrophique) des lacs glaciaires entourant l'inlandsis Laurentidien.



be grounded in a thorough understanding of the present. Therefore, studies of process interrelationships in contemporary environments are essential to any global change investigation. The Arctic must be studied and monitored, particularly in relation to permafrost degradation, thermal effects and increased terrain instability that may result from permafrost melting. Mountain environments may become more hazardous if glaciers melt rapidly causing catastrophic drainage of ice-marginal or proglacial lakes.

IGBP planning reports indicate that, in looking at records of the past, "Priority should fall on . . . key interactions on the time scales of decades to centuries". We must recover high-resolution records to extend our limited instrumental records back in time (Fig. 1). In Canada, apart from limited documentary information, such as Hudson's Bay post records, the major natural archives with this resolution are tree rings, long ice cores from glaciers and annually layered sediments (Fig. 2). Tree ring records have the widest geographical distribution but are limited to perhaps 1500 years in Canada (Figs. 3 and 4). Accumulated snow on the upper levels of ice-caps and glaciers preserves details of temperature, precipitation chemistry, atmospheric constituents and gases. Records from Greenland and Antarctica extend back more than 150 000

years and have produced spectacular insights into past global changes (Fig. 5). More traditional techniques, such as pollen analysis, stratigraphy and geomorphology, although they have lower temporal resolution, clearly define the general outline of Canada's history over the Holocene (Fig. 6) and over the last glacial-interglacial cycle (150 000 years).

The most rapid changes in global temperatures in the last 20 000 years occurred during deglaciation, but there were some surprises, like the Younger Dryas Interval, a sudden cooling 10 000 to 11 000 years ago (Fig. 7). The paleorecord carries a clear message for global change studies: global systems may respond to forced changes very rapidly and non-linearly. Ocean-current or global atmospheric circulation patterns may have more than one stable configuration and we must understand what triggers the rapid switch from one configuration to another.

Outlook

In 1948 the British astronomer and science-fiction writer Fred Hoyle said, "Once a photograph of the earth, taken from the outside, is available . . . a new idea as powerful as any in history will be let loose." We have seen that photograph.

The dawn of the space age has given us the insight to see the earth as a single, self-contained, limited environment that has nourished life for more than three billion years and which we could seriously damage in a few hundred.

We must seek sustainable global development for the future, not continued exploitation. As responsible earth scientists, we must use our understanding of the past to help preserve our grandchildren's future. The root cause of accelerated global change and the ability to control and mitigate it rests with people, energy, global politics and economics. The global life-support system is delicate, under threat and the only one we have. Understanding how the system operates and has operated may provide critical insight into ensuring its future.

Brian Luckman is presently Scientific Coordinator, Global Change Program, in the GSC's Terrain Sciences Division. He is on secondment from the University of Western Ontario's Geography Department. His research focuses mainly on mountain environments, specifically on studies of Holocene glacier fluctuations, tree-rings and paleoenvironmental reconstruction.

GSC Contribution 18389

documents des postes de traite de la compagnie de la Baie d'Hudson, les principales archives naturelles ayant cette résolution sont les anneaux annuels des arbres, les longues carottes de glace tirées des glaciers et les strates annuelles de sédiments (fig. 2). Les anneaux annuels des arbres sont les archives naturelles qui connaissent la plus grande répartition géographique, mais ils sont limités à peut-être 1 500 ans au Canada. (fig. 3 et 4). La neige accumulée sur les couches supérieures des calottes glaciaires et des glaciers préserve des détails sur la température, sur la chimie des précipitations ainsi que sur les constituants et les gaz atmosphériques. Des données provenant du Groenland et de l'Antarctique, qui remontent à plus de 150 000 ans ont fourni un aperçu spectaculaire des changements survenus dans le passé à l'échelle du globe (fig. 5). Bien qu'elles aient une résolution temporelle moindre, les techniques plus classiques, comme l'analyse des grains de pollen, la stratigraphie et la géomorphologie définissent clairement les grandes lignes de l'histoire du Canada au cours de l'holocène (fig. 6) et au cours du dernier cycle de glaciation (150 000 ans).

Au cours des 20 000 dernières années, les changements les plus rapides à survenir dans les températures du globe ont eu lieu durant la déglaciation, mais il y a eu

certaines surprises, comme l'intervalle dryas récent, refroidissement soudain qui est survenu il y a entre 10 000 et 11 000 ans (fig. 7). La colonne stratigraphique porte un message évident pour les études des changements à l'échelle du globe : les systèmes terrestres peuvent réagir très rapidement et de façon non linéaire à des changements imposés. Les courants océaniques ou les modèles de la circulation atmosphérique du globe peuvent avoir plus d'une configuration stable, et nous devons comprendre ce qui déclenche le passage rapide d'une configuration à une autre.

Perspectives

En 1948, l'astronome britannique et auteur de science-fiction Fred Hoyle a mentionné qu'une fois que nous disposerons d'une photographie de la Terre prise de l'extérieur, une nouvelle idée jaillira, aussi puissante que les plus puissantes de l'histoire. Nous avons vu cette photographie. L'avènement de l'ère spatiale nous a permis de voir la Terre comme un environnement unique, complet en soi et limité qui a entretenu la vie pendant plus de trois milliards d'années et que nous pourrions endommager sérieusement en quelques siècles.

Pour l'avenir, nous devons rechercher la mise en valeur soutenue de notre planète et non pas l'exploitation continue. En tant que spécialistes des sciences de la Terre, nous devons nous servir de notre compréhension du passé pour nous aider à préserver le futur de nos petits enfants. La cause profonde des changements accélérés à l'échelle du globe et la capacité de les contrôler et de les réduire dépendent des gens, de l'énergie, de la politique mondiale et de l'économie. Le milieu de support vital terrestre est délicat, menacé et unique. La compréhension de la façon dont le système fonctionne et a fonctionné pourrait nous donner un éclairage critique sur la façon d'assurer son avenir.

Brian Luckman est actuellement le coordonnateur scientifique du Programme d'étude des changements globaux, à la Division de la science des terrains de la CGC. Il a été détaché du Département de géographie de l'Université Western Ontario. Sa recherche porte principalement sur les milieux montagneux, en particulier sur l'étude des fluctuations des glaciers au cours de l'holocène, sur les anneaux des arbres et sur la reconstitution paléoenvironnementale.

Contribution de la CGC 18389

Vegetation Indicates Potentially Unstable Arctic Terrain

According to recent climatic models, warming of the atmosphere due to increased 'greenhouse gases' would probably affect the North most severely. Predicting likely environmental changes in the Arctic is difficult, however, because we lack detailed knowledge of how plant distributions, the climate and substrates interrelate in the Arctic.

Research at Terrain Sciences Division has been documenting aspects of such relationships for some years ('Plants: Living Weather Stations' by S.A. Edlund,

Figure 1 Hot Weather Creek and Eureka, on Fosheim Peninsula, Ellesmere Island, lie in the centre of a recently described anomalously warm, intermontane region of the northeast Queen Elizabeth Islands. Inset: Mean July temperatures in the Queen Elizabeth Islands based on multiyear means from five permanent weather stations, and weighted data from nonstandard weather observations at PCSP camps. Fosheim Peninsula lies within a zone where mean July temperatures are higher than 5°C.

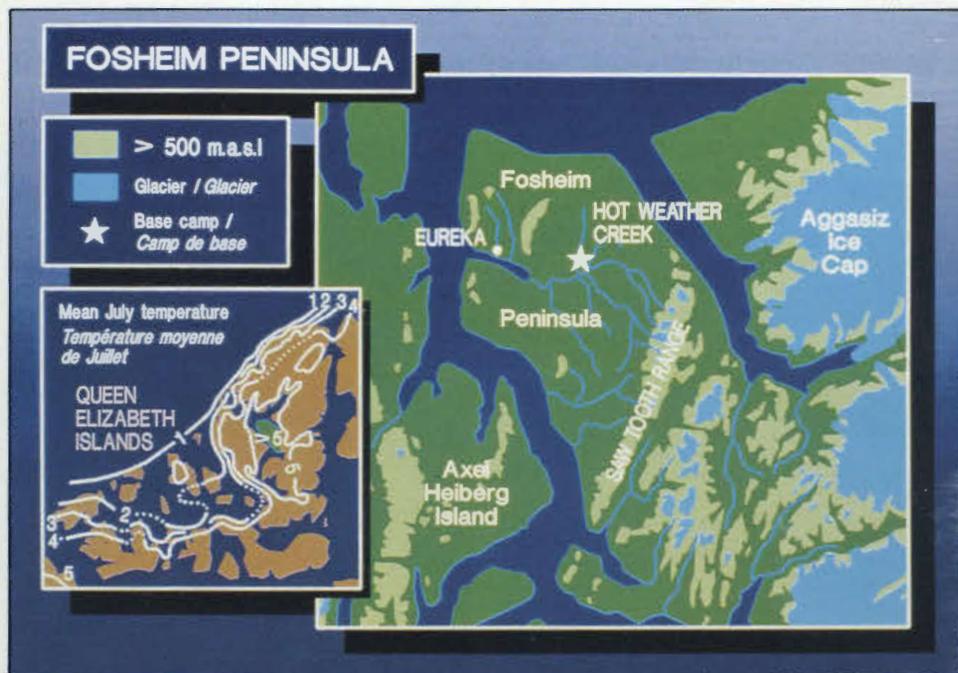


Figure 1 Hot Weather Creek et Eureka se trouvent dans la péninsule de Fosheim, île Ellesmere, au centre d'une région intermontagneuse de la partie nord des îles de la Reine Elizabeth. Encart: Température moyenne en juillet dans les îles de la Reine Elizabeth, d'après les relevés de cinq stations météorologiques permanentes et les données relevées dans les camps du PCSP. La péninsule de Fosheim se trouve dans une région où les températures moyennes en juillet sont supérieures à 5°C.

La végétation dénote l'éventualité d'un terrain arctique instable

par Sylvia A. Edlund

Selon de récents modèles climatiques, les conséquences du réchauffement de l'atmosphère causées par « l'effet de serre » devraient se manifester plus sérieusement dans le nord. Il est cependant difficile de prévoir les modifications que l'environnement arctique pourrait subir, car nous manquons de données sur la corrélation entre la répartition de la végétation, le climat et le substratum de l'arctique.

Depuis quelques années, les recherches effectuées à la Division de la science des terrains ont permis d'étudier ce type de corrélation (« Les plantes : des stations météorologiques vivantes? » par S.A. Edlund, GEOS Vol. 16, No. 2). Récemment, nous nous sommes intéressés au climat et à la végétation de la péninsule de Fosheim de l'île Ellesmere, à 80° de latitude nord.

La majeure partie de l'ouest et du centre de la péninsule de Fosheim est constituée d'une basse-terre entourée de montagnes et recouvertes de glaciers (fig. 1). Cette basse-terre vit des températures estivales

plus chaudes et sa végétation est beaucoup plus riche que ce que l'on trouverait normalement à une telle latitude. La station météorologique d'Eureka, sur les bords du fjord Slidre, enregistre en juillet une température moyenne qui est supérieure de quelques degrés Celsius à celle des îles du nord-ouest et même du sud de l'arctique. L'abondance relative de la végétation naturelle de la région est mise en évidence par la devise officielle de la station météorologique : « Le jardin de l'arctique ».

Des observations météorologiques effectuées à court terme par des scientifiques participant aux travaux du Projet du plateau polaire continental ont démontré que les températures estivales de certaines parties de la péninsule de Fosheim sont plus élevées que celles d'Eureka; la proximité de la station par rapport au fjord modifierait de façon importante son climat estival.

Au cours de l'été 1988, Bea Alt (ma collègue de la CGC) et moi avons lancé un

projet à long terme de contrôle du climat et des terrains à Hot Weather Creek, dans la péninsule de Fosheim, à 25 km à l'est d'Eureka, loin de l'influence des fjords, des montagnes ou des importantes masses d'eau. Nous avons mis en place une station météorologique automatique (fig. 2) et des enregistreurs de température sur les basses-terres, à proximité de Hot Weather Creek, puis nous avons commencé des études détaillées de la végétation sur place, dans les régions voisines de la péninsule de Fosheim et dans la partie est de l'île Axel Heiberg.

L'été 1988 fut plus chaud que d'habitude et il y eu très peu de jours pluvieux. À Eureka, la température moyenne de juillet a été de 1,8° C supérieure à la normale (5,4° C) et la moyenne de la température à Hot Weather Creek a été de 7,3° C plus élevée que la moyenne à Eureka. Cette chaude température s'est maintenue de la mi-juillet à la mi-août (fig. 3).

GEOS Vol. 16, No. 2), and recently we have focused on the climate and vegetation on Fosheim Peninsula, Ellesmere Island, which straddles latitude 80°N.

Much of western and central Fosheim Peninsula consists of a lowland

Figure 2 Automatic weather station provided by the Atmospheric Environment Service continuously monitors soil temperatures at 100, 50, 20 and 10 m and at the surface, as well as air temperature, snow depth, wind speed and direction, and solar radiation.



Figure 2 La station météorologique automatique du Service de l'environnement atmosphérique enregistre en permanence les températures du sol à 100, 50, 20 et 10 m et à la surface, ainsi que la température de l'air, la profondeur de la neige, la vitesse du vent et la direction et le rayonnement solaire.

Les relevés effectués sur la végétation ont confirmé l'importante densité et diversité des roseaux et des buissons de la région. De nombreuses espèces plus typiques au sud de l'arctique poussent sur les basses terres, comme les pyroles à grandes fleurs, les bleuets de l'arctique, la pesse d'eau, la renoncule blanche et l'herbe de l'arctique. La végétation, essentiellement herbeuse et typique à l'ouest des îles de la Reine Elizabeth, se trouve à des altitudes plus élevées, comme à l'est de la chaîne Sawtooth. Ce gradient de végétation contrôlé par l'altitude élevée permettra de mieux comprendre l'influence du climat sur la structure régionale de la végétation.

La péninsule de Fosheim présente des aspects inattendus et très intéressants pour nos études. Les chaleurs prolongées de l'été ont provoqué des dévastations

surrounded by glacier-capped mountains (Fig. 1). This lowland has a much warmer summer climate and richer vegetation than would be expected at its high latitude. The weather station at Eureka, on the shore of Slidre Fiord, has a mean July temperature several degrees Celsius warmer than islands in the western High Arctic even further south. The relative luxuriance of natural vegetation in the area is reflected in the weather station's official motto: Garden Spot of the Arctic.

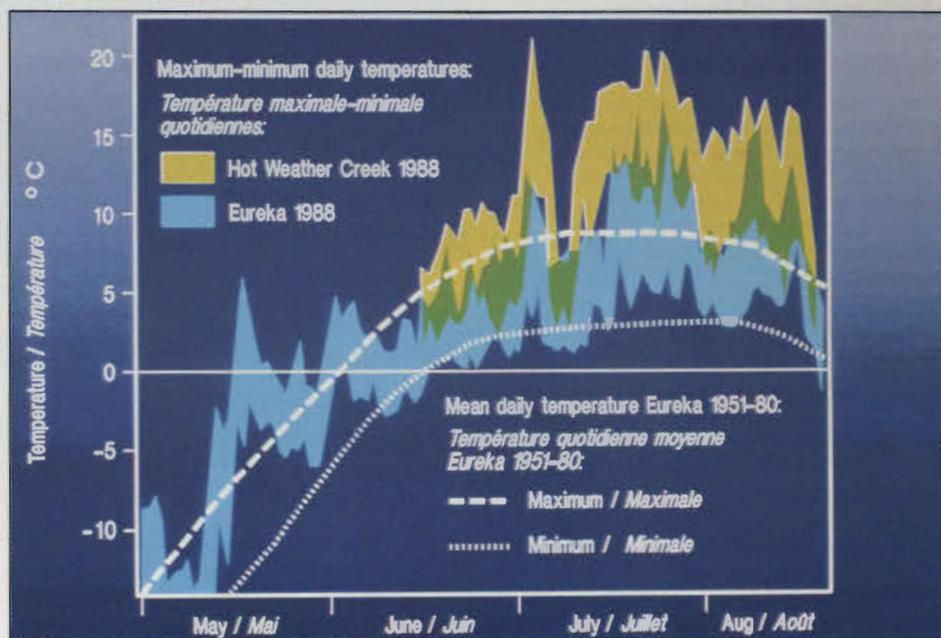
Short-term weather observations made by scientists involved with the Polar Continental Shelf Project's network suggested that summer temperatures on some parts of Fosheim Peninsula are even warmer than those at Eureka; the weather station's proximity to the fiord could significantly modify its summer climate.

In summer 1988, my GSC colleague, Bea Alt, and I initiated a long-term climate and terrain monitoring project at Hot Weather Creek, on Fosheim Peninsula,

25 km east of Eureka, away from the influence of fiords, mountains or large bodies of water. We established an automatic weather station (Fig. 2) and auxiliary temperature recorders on the lowland near Hot Weather Creek, and began detailed vegetation studies both at the site, and in adjacent areas on Fosheim Peninsula and eastern Axel Heiberg Island.

Summer 1988 was warmer than usual and had very little rainfall. Mean July temperature at Eureka was 1.8°C warmer than the norm (5.4°C), and at Hot Weather Creek it was 7.3°C warmer than the Eureka norm. A prolonged warm period persisted from mid-July through mid-August (Fig. 3).

Figure 3 Summer temperatures at Hot Weather Creek and Eureka weather station in 1988 were much higher than the 30-year normal for Eureka. Mean July temperature at Eureka was 7.2°C; at Hot Weather Creek, 12.2-12.7°C.



massives résultant de la fonte des glaces. De la troisième semaine de juillet à la mi-août, de nombreux glissements de terrain (fig. 4) se sont produits sur les pentes de Hot Weather Creek ainsi qu'en d'autres emplacements le long du détroit et de la région d'Eureka. Ce genre d'accident se produit lorsque le sous-sol devient saturé, ce qui réduit à zéro la résistance au cisaillement des matériaux concernés. La présence d'affouillements de 50 cm à 70 cm de profondeur laisse penser que cette saturation s'est produite près de la base de la couche active. De plus, divers glissements de glace à proximité du camp ont entraîné un retrait anormalement rapide du mur de rimage (fig. 5). L'un des murs a reculé de 25 mètres en cinq semaines.

Des phénomènes hydrologiques inattendus se sont aussi produits. Divers ruisseaux et

Figure 3 Les températures d'été aux stations de Hot Weather Creek et Eureka, en 1988, ont été supérieures à la normale des trente dernières années enregistrées par Eureka. La température moyenne en juillet à Eureka était 7,2° C et de 12,2-12,7° C à Hot Weather Creek.

affluents du ruisseau Hot Weather, qui s'étaient tous asséchés au début de juillet, ont recommencé à couler vers la fin de ce même mois. Contrairement à l'eau vaseuse typique de la fonte des neiges du printemps, cette eau tardive présentait un aspect clair. Les mares des hautes terres reliées aux fosses polygonales qui s'étaient asséchées au début de l'été, se remplirent à nouveau au début du mois d'août. Des émissions inhabituelles d'eau se sont produites dans les hautes terres (fig. 6) et les marécages, phénomène qui s'est poursuivi jusqu'à la fin de l'été sur les

Vegetation surveys confirmed the high density and diversity of sedge and shrub plant communities in the region. Numerous species more typical of the Low Arctic thrive on the lowlands, including

large-flowered pyrola, arctic blueberry, common mares-tail, white water crowfoot, and arctic holy grass. Herb-dominated communities more typical of the western Queen Elizabeth Islands are found only at higher elevations, such as those found east of the Sawtooth Range. This steep elevation-controlled vegetation gradient will assist in better understanding climate controls on regional vegetation patterns.

Fosheim Peninsula yielded several unanticipated bonuses for our studies. Prolonged summer warmth triggered a

series of mass-wasting processes resulting from ground ice melt. Many active layer detachment slides (Fig. 4) occurred on the slopes of Hot Weather Creek and at other sites along Eureka Sound and in the Eureka area, starting in the third week of July and continuing through mid-August. Such failures occur when subsurface materials become saturated, reducing the shear strength of the materials to zero. The 50 cm to 70 cm depth of the slide scars suggests that this saturation took place near the base of the active layer. In addition, several ground ice slumps near camp showed an unusually rapid headwall retreat (Fig. 5). One face retreated 25 metres in five weeks.

Unexpected hydrological phenomena occurred as well. Several creeks and tributaries to Hot Weather Creek, all of which had dried up in early July, started to flow in late July. This late-appearing water was clear instead of the typical silty water of spring snowmelt and runoff. Upland ponds in the junctions of polygon troughs, which had dried up in early summer, filled again in early August. Unusual water ejection features occurred on upland knolls (Fig. 6), and damp spots, which continued to expand in late summer, appeared on the upland surfaces and on slopes. None of this water could be attributed to summer rainfall; it must have come from the melting of massive

Figure 4 Active layer detachment slides were numerous along creeks and valleys in regions with abundant silty surficial materials. The greatest number of slides were initiated on July 22, 1988. Slides continued through the third week of August, but not in as great numbers.



Figure 4 De nombreux glissements se sont produits le long des ruisseaux et vallées dans les régions sablonneuses. Le plus grand nombre de glissements s'est produit le 22 juillet 1988. Ils se sont poursuivis jusqu'à la troisième semaine d'août, mais en petits nombres.

terres élevées et les pentes. Cette eau ne provenait pas des pluies, mais plutôt de la fonte d'une grande quantité de glace dans les matériaux du sous-sol (fig. 7).

Des glissements et des éboulements semblables s'étaient déjà produits dans le bassin du ruisseau Hot Weather et dans d'autres parties de la péninsule de Fosheim avant 1988. Cependant, le nombre de glissements, de retraits des murs de rimaye et de manifestations de présence d'eau souterraine a été exceptionnel cet été.

Nous ne connaissons pas la surface des terrains recouverts par les glaces de la péninsule de Fosheim. Cependant, certains aspects de la végétation nous laissent penser que la glace fond régulièrement entre le milieu et la fin de l'été. On trouve des roseaux dans certains emplacements inhabituels comme dans les lits de

certaines ruisseaux asséchés, dans quelques vallées étroites (fig. 8) et aux alentours de petites mares dans des hautes terres asséchées au début de l'été. Ces phénomènes n'auraient pas pu se produire

Figure 5 Headwall retreat of a ground ice slump reached the rate of 25 m in about five weeks.



Figure 5 Retrait du mur de remaye qui a atteint le niveau de 25 m en quelque cinq semaines.

amounts of ground ice trapped in subsurface materials (Fig. 7).

Similar slides and slumps have occurred previously in the Hot Weather Creek

Figure 6 Water ejection features behaved like miniature artesian wells, intermittently spewing thin streams of silty water during the warmest days of summer 1988.



Figure 6 Les sorties d'eau se sont effectuées comme dans le cas de puits artésiens, ce qui a provoqué des cours d'eau vaseux lors des jours les plus chauds de l'été 1988.

sans une certaine abondance d'humidité dans le sous-sol pendant de nombreux étés.

Les hautes terres, les pentes, les lits de cours d'eau et les vallées étroites reposent sur les matériaux les plus communs de la région, matériaux qui ne sont pas représentatifs d'une structure végétale aussi humide. Nous n'y avons constaté aucun glissement, aucun éboulement ni aucune réapparition d'eau dans les ruisseaux et les mares. Ces matériaux ne renferment probablement pas une grande quantité de glace souterraine. La cartographie de ces petites superficies humides donnerait des indices quant à l'étendue des terrains qui renferment une grande quantité de glace souterraine.

La nature et l'étendue des terrains sujets au dégel dans la plus grande partie de l'arctique canadien sont peu connues. Les effets thermiques des activités humaines ont été enregistrés sur les emplacements des camps, les lieux de construction et les aéroports. Des lignes directrices et des codes relatifs à la construction ont été élaborés afin de minimiser leurs influences. Cependant, les menaces

watershed and on other parts of Fosheim Peninsula before 1988. But the number of slides, rate of headwall retreat, and surface manifestations of abundant subsurface water were exceptional that summer.

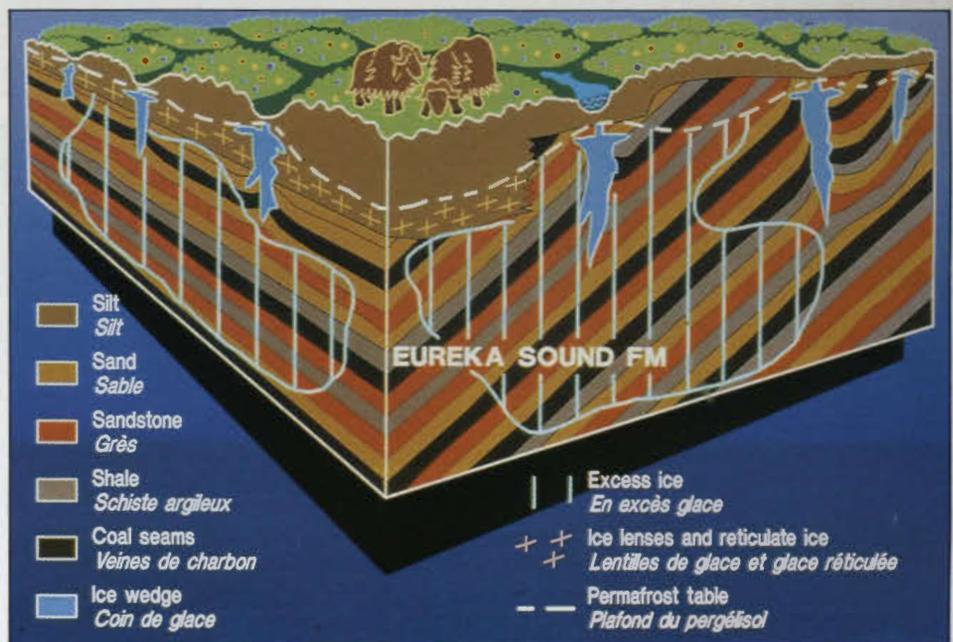
We do not know how much terrain is underlain by large amounts of ground ice in Fosheim Peninsula. Some vegetation

patterns suggest that some ground ice melts regularly in mid- and late summer. Small sedge wet-meadow communities occur in some anomalous locations such as raised berms above dried creek beds, a few deep, narrow valleys with no channelled stream flow (Fig. 8), and around small ponds on upland surfaces that had dried up in early summer. They could not have become established nor persist without abundant subsurface moisture consistently available for many summers.

Uplands, slopes, creek beds and narrow valleys on coarser materials in the region do not show such wetland vegetation patterns. They showed no slides nor slumps, nor recharging creeks or ponds. These materials presumably do not contain massive amounts of subsurface ice. Therefore, mapping these small, patchy wetlands should provide clues to the extent of terrain with large amounts of ground ice.

The nature and extent of thaw-sensitive terrain in most of arctic Canada is poorly documented. Ground settlement or disruption from the thermal effects of human activities has been recorded

Figure 7 Massive amounts of subsurface ground ice may be contained within normally frozen, poorly consolidated bedrock and Quaternary sediments on Fosheim Peninsula.



causées par les phénomènes naturels ont été peu étudiées.

La façon dont les processus naturels de dégel peuvent influencer sur les activités humaines est illustrée par l'immobilisation de l'avion Hercules au milieu de la piste d'Eureka. La surface de la piste, à la suite de la fonte des glaces du début d'août 1988, où on a connu une période persistante de chaleur et de dévastation,

Figure 7 Il y a peut-être d'importantes quantités de glace souterraine dans la roche faiblement consolidée et les sédiments quaternaires de la péninsule de Fosheim.

avait perdu sa résistance à cause de la saturation des eaux souterraines de surface. Les pilotes de Twin Otter connaissent des problèmes semblables lorsqu'ils atterrissent sur la toundra, même

around settlements, construction sites and airstrips. Construction guidelines and codes have been established to minimize their effects. But the threat of similar effects from natural causes has received little attention.

How natural thaw processes can affect human activities is illustrated by the Hercules aircraft that got stuck in the middle of the Eureka airstrip. The surface had lost its bearing strength, because lower active layer surfaces beneath the strip were saturated by water from local ground ice melt during the persistent warmth and active mass-wasting in early August 1988. Twin Otter pilots face similar problems when making off-the-strip landings on the tundra, even where they may have landed safely earlier in the season.

The accelerated activity of these thaw-related processes in 1988 are a preview of what could result if mean summer

temperature increased by several degrees, as predicted by current models of the enhanced 'Greenhouse Effect' for arctic Canada. The implications for ice-rich terrain throughout the Arctic and Subarctic are serious. Little is known about the extent of ice-rich terrain, particularly in the Arctic Islands. Seemingly anomalous wetland vegetation patterns might identify some potentially unstable terrain even in areas where no slope failures or ground ice slumps have recently occurred.

Dr. Sylvia Edlund is a research scientist in the CSC's Terrain Sciences Division.

GSC Contribution 17889



Figure 8 Lush wetland in a valley bottom remains soggy all summer, presumably from subsurface seepage of ground ice meltwater. The water flow has not been sufficient to create drainage channels in the valley bottom, but is enough to support local ponds and diverse sedge meadow vegetation.

Figure 8 Cette très riche terre au fond d'une vallée, demeure détrempée tout l'été probablement à la suite de la fonte des glaces souterraines. L'eau ne se produit pas en quantité suffisante pour créer des chenaux de drainage dans la vallée, mais elle alimente des mares et permet l'existence d'une végétation constituée de divers types de roseaux.

là où ils s'étaient posés sans difficulté plus tôt dans la saison.

L'accélération du processus de dégel connue en 1988 est un avertissement de ce qui pourrait se passer si les températures estivales moyennes augmentent de quelques degrés comme le prévoient les modèles actuels de l'effet de serre établis pour l'Arctique canadien. Les conséquences qui pourraient s'ensuivre pour l'Arctique et le Subarctique sont graves dans le cas des terrains riches en glace. Les caractéristiques des terrains

riches en glace sont peu connues, en particulier dans les îles de l'Arctique. Certains aspects d'une végétation anormalement humide devraient permettre d'identifier des terrains éventuellement instables, même dans des zones où aucun éboulement ni glissement ne s'est produit récemment.

Sylvia Edlund (Phd) est une scientifique de la Division de la science des terrains de la CGC.

Contribution de la CGC 17889

Late Tertiary Arctic Environments: A Vision of the Future?

by J.V. Matthews, Jr.

Glaciation has greatly affected human history. We live now in an interglacial period and glacial ice is at a minimum, but, for most of the last 900 000 years, ice sheets have covered large areas of the Northern Hemisphere.

Repeated advance and retreat of continent-size glaciers have altered landscapes, diverted rivers and radically changed continental floras and faunas. Each successive ice sheet advance was followed by a warm interval with more impoverished flora than the previous interval.

Present world flora, like other aspects of the modern environment, has been, and continues to be, altered drastically by human intervention. People's activities are also modifying the earth's atmosphere in ways that may cause sudden and drastic changes to the future climate and equally

Figure 1 Late Tertiary Arctic sites that have yielded plant and insect fossils. Approximate extent of Beaufort deposits shown

profound changes to plant and animal communities. We must understand how such changes deviate from natural ongoing change, and admit that we cannot predict future climate change without reference to past climatic and environmental records.

How far into the past must we probe to understand the natural periodicities of world climate? I believe we must look back at least to the late Tertiary. Some computer-generated climatic simulations of the next 200 years suggest we may be facing a warmer climate than has existed

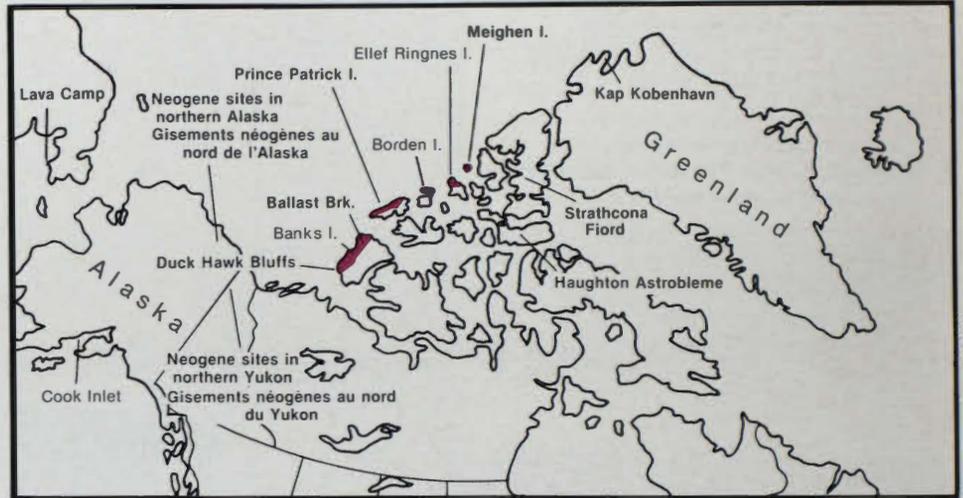


Figure 1 Sites arctiques de la fin du tertiaire où l'on a trouvé des fossiles de végétaux et d'insectes. L'aire approximative des dépôts de Beaufort apparaît.

Les milieux arctiques de la fin du tertiaire : une vision de notre avenir?

par J.V. Matthews, Jr.

Le phénomène des glaciations a influé considérablement sur l'histoire de l'humanité. Nous vivons actuellement dans une période interglaciaire et la glace des glaciers est à son minimum, mais pendant la plus grande partie des 900 000 dernières années, des nappes de glace ont recouvert de vastes étendues de l'hémisphère nord.

L'avance et le recul répétés de glaciers ayant la taille d'un continent ont modifié les paysages, détourné les cours d'eau et transformé radicalement la flore et la faune continentales. Chacune des avancées successives des nappes glaciaires a été suivie par un intervalle de réchauffement donnant lieu à une flore plus appauvrie que l'intervalle précédent.

La flore mondiale actuelle, comme bien d'autres aspects de notre environnement moderne, a été et continue d'être modifiée en profondeur par les

interventions humaines. Les activités anthropiques modifient aussi l'atmosphère terrestre au point de causer des changements soudains et profonds dans le climat à venir, ainsi que des changements majeurs aux communautés végétales et animales. Nous devons comprendre comment de tels changements s'écartent de l'évolution naturelle et admettre que nous ne pouvons prédire les futurs changements climatiques sans tenir compte des antécédents climatiques et environnementaux.

Jusqu'où faut-il remonter dans le passé pour comprendre la périodicité naturelle du climat mondial? J'estime que nous devons remonter au moins jusqu'à la fin du tertiaire, parce que certaines simulations climatiques, produites par ordinateur pour les 200 prochaines années, nous permettent de croire que le réchauffement climatique qui s'annonce

sera plus considérable que tout ce que la Terre a connu au cours des cinq derniers millions d'années (depuis la fin du tertiaire).

Les premières grandes glaciations de l'hémisphère nord ont commencé il y a environ 2,4 millions d'années. Ainsi, pour comprendre ce qu'un climat trop chaud pourrait signifier dans l'avenir, il nous faut remonter avant les époques glaciaires. Le dernier grand intervalle de réchauffement mondial (certains l'ont appelé « âge d'or » climatique) s'est produit il y a environ trois ou quatre millions d'années, pendant le pliocène. Plusieurs programmes d'étude du changement global portent sur cette période en tant que point de comparaison possible pour le climat à venir.

La formation de Beaufort

Pour reconstituer les climats terrestres de la fin du tertiaire, il faut étudier divers types de fossiles végétaux et animaux. Les dépôts renfermant de tels fossiles sont heureusement abondants dans le Nord canadien. La plupart de ces dépôts se trouvent dans la formation de Beaufort et dans les dépôts connexes de la fin du tertiaire que l'on trouve dans l'extrême nord de l'Arctique canadien. La formation

on earth for the past five million years (i.e. since the late Tertiary).

The first major Northern Hemisphere glaciations began only about 2.4 million years ago. Thus, to understand what the exceedingly warm climate of the future might be like, we must look back beyond the ice ages. The last major worldwide warm interval (some have called it a climatic 'golden age') occurred approximately three to four million years ago during the Pliocene. Several global change programs are targeting this period for study as a possible analogue of future climate.

The Beaufort Formation

To reconstruct terrestrial climates of the late Tertiary, we must study various types of plant and animal fossils. Fortunately, in northern Canada, deposits containing such fossils are abundant. Most of these deposits are in the Beaufort Formation and related late Tertiary deposits in the Canadian High Arctic. The Beaufort Formation is a large wedge of sediments, primarily sands and gravels, on the western margin of the Queen Elizabeth Islands (Fig. 1). The wedge thickens to the northwest and most of the sediments were deposited before the majority of

interisland channels existed. Interspersed with the sands are zones of organic detritus, usually containing wood and conifer cones, insect fragments and smaller plant remains such as seeds and fruit (Fig. 2).

What may be the oldest Beaufort deposits occur at Duck Hawk Bluffs on southern Banks Island (Fig. 1). Many of the fossil plants from there, such as the tulip tree (*Liriodendron*) and the Kolomikta vine (*Actinidia*), a relative of the kiwi, are foreign to northern regions today. The tulip tree barely reaches southern Canada; several other plants in the fossil flora have their northern limit well south of Canada; and some are extinct. Many of the Duck Hawk Bluffs plants, like those from other Beaufort sites, occur in late Tertiary deposits in the Soviet Union and northern Europe, but are rare or unknown at North American sites outside of the Arctic. Plant fossils from most Beaufort sites on Banks and Prince Patrick islands appear to represent a rich coniferous forest, somewhat similar in structure to the present coniferous/hardwood forests of the Great Lakes region. However, the

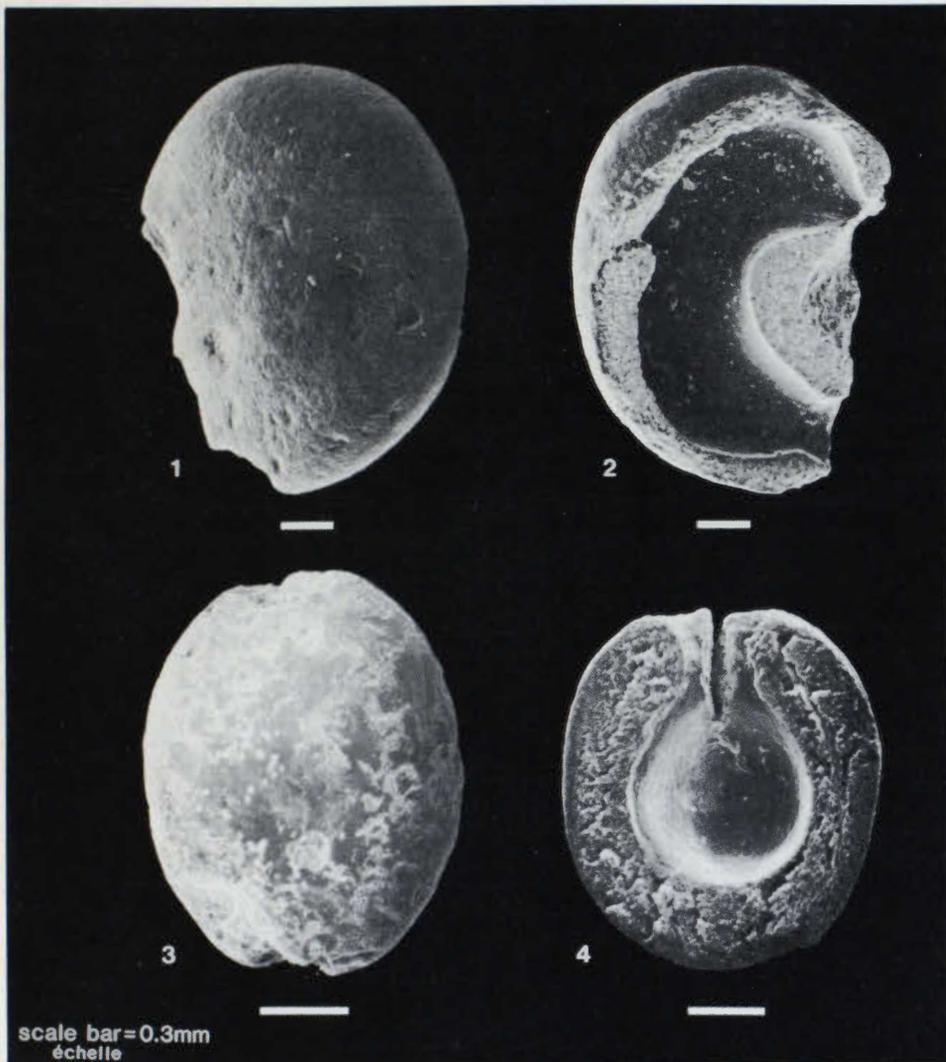


Figure 2 Common plant macrofossils from the Beaufort Formation. 1 and 2 are external and internal views of the 'seed' of the extinct plant *Epipremnum crassum*. 3 and 4 show the 'seed' of *Aracites*.

Figure 2 Macrofossiles de végétaux communs provenant de la formation de Beaufort. Les nos 1 et 2 sont des vues externe et interne de la « graine » de la plante éteinte *Epipremnum crassum*. Les nos 3 et 4 montrent la « graine » d'*Aracites*.

de Beaufort, à la bordure occidentale des îles de la Reine Élisabeth, est une région de sédiments principalement composé de sable et de gravier (fig. 1). Le coin s'épaissit vers le nord-ouest et la plupart des sédiments ont été déposés avant que ne se forment la majorité des chenaux séparant les îles.

Entremêlés aux sable, on trouve des zones de débris organiques qui renferment habituellement du bois, des cônes de conifères, des fragments d'insectes et de plus petits restes de plantes comme les graines et les fruits (fig. 2).

Ce qui pourrait être le plus ancien dépôt de Beaufort se trouve à Duck Hawk Bluffs dans le sud de l'île Banks (fig. 1). Un bon nombre des végétaux qu'on y trouve à l'état de fossiles, comme le bois jaune (*Liriodendron*) et l'*actinidia* Kolomikta (*Actinidia*), une plante parente du kiwi, ont aujourd'hui disparu des régions nordiques. Le bois jaune atteint tout juste le sud du Canada; plusieurs autres plantes de la flore fossile ont leur limite septentrionale bien au sud du Canada et certaines sont même éteintes. Un certain nombre des plantes que l'on trouve aux falaises

Duck Hawk Bluffs, comme celles qui proviennent des autres sites de Beaufort, se retrouvent dans certains dépôts de la fin du tertiaire en Union soviétique et dans le nord de l'Europe, mais ils sont rares ou inconnus dans les sites nord-américains en dehors de l'Arctique. Les fossiles végétaux provenant de la plupart des sites de Beaufort, dans les îles Banks et Prince-Patrick, semblent représenter une riche forêt de conifères, ayant une structure à peu près analogue aux forêts de feuillus actuelles de la région des Grands Lacs. Les forêts de Beaufort renfermaient toutefois certaines espèces qui ne poussent plus dans cette zone aujourd'hui.

Les fossiles de végétaux et d'insectes les plus étudiés et les mieux préservés parmi ceux qui appartiennent à la formation de Beaufort proviennent de l'île Meighen (fig. 3); cette île connaît aujourd'hui l'un des climats arctiques les plus rigoureux de l'hémisphère nord. Parmi les fossiles végétaux, certains sont de rares spécimens d'espèces arctiques comme la saxifrage à feuilles étroites (fig. 4) et l'oxyrie digyne

Beaufort forests contained some species not growing in that zone today.

The most intensively studied and well preserved plant and insect fossils from the Beaufort Formation come from Meighen

Figure 3 Meighen Island today (left) and as it may have appeared in the Pliocene Epoch.



Figure 3 L'île Meighen de nos jours (à gauche) et telle qu'elle a pu se présenter au pliocène.

(fig. 5). Certains insectes semblent aussi étroitement apparentés aux espèces arctiques actuelles. Il semble que certaines parties de l'île Meighen se trouvaient près de la limite forestière lorsque les sédiments de Beaufort ont été déposés. Nous connaissons mieux l'époque du dépôt dans l'île Meighen que celle des autres sites de Beaufort, parce que les dépôts terrestres y sont interstratifiés avec des sédiments marins renfermant divers types de fossiles du pliocène.

Comme il n'existe aucune indication que les dépôts terrestres sus-jacents sont beaucoup plus jeunes, la toundra boisée existait probablement dans l'île Meighen il y a trois millions d'années. Il pourrait s'agir ici de la plus ancienne toundra boisée de basses-terres dans l'hémisphère nord et, bien qu'elle ait probablement été superficiellement analogue à la toundra boisée actuelle, elle était caractérisée par des espèces de conifères (pin à cinq aiguilles, cèdre, sapin) qui n'existent plus près de la limite forestière (fig. 5). L'étage arbustif renfermait aussi certaines plantes, comme le physocarpe (*Physocarpus*) qui ne caractérisent plus maintenant la strate arbustive de la toundra boisée.

Dans l'île Meighen, la flore et la faune de Beaufort sont antérieures à l'époque glaciaire nord-américaine et aux profondes

Island (Fig. 3), which today has one of the most severe arctic climates in the Northern Hemisphere. Among the plant fossils are typical arctic species such as purple saxifrage (Fig. 4) and mountain sorrel (Fig. 5). Some insects also appear closely related to current arctic species. Apparently, parts of Meighen Island were near treeline when the Beaufort

sediments were deposited. We know the time of deposition on Meighen Island better than for other Beaufort sites because the terrestrial deposits are interbedded with marine sediments containing various types of fossils of Pliocene age. Because there is no indication that the overlying terrestrial deposits are much younger, forest-tundra presumably existed on Meighen Island as early as three million years ago. This may have been the earliest lowland forest-tundra in the Northern Hemisphere, and although it was probably superficially similar to present forest tundra, it was characterized by coniferous species (five-needle pine, cedar, fir), that do not occur near treeline today (Fig. 6). The shrub layer also contained plants, such as nine-bark (*Physocarpus*), not now typical of the forest tundra shrub stratum.

Meighen Island Beaufort flora and fauna predate major North American glaciation and the drastic climatic fluctuations of the Quaternary, and may in part represent the Pliocene golden age. Meighen Island about three million years ago probably had a climate similar to many treeline sites today. Since the present treeline corresponds approximately to the boundary between continuous and discontinuous permafrost, this means that the continuous permafrost zone in Canada



fluctuations climatiques du quaternaire, si bien qu'elles peuvent représenter au moins en partie l'âge d'or du pliocène. Il y a environ trois millions d'années, l'île Meighen connaissait probablement un climat analogue à ceux de nombreux sites actuels de la limite forestière. Comme la limite forestière actuelle correspond à peu près à la limite entre le pergélisol continu

et le pergélisol discontinu, cela signifie qu'il y a trois millions d'années la zone de pergélisol continu au Canada était petite ou presque inexistante lorsque les fossiles de l'île Meighen se sont déposés. De nos jours, au contraire, la zone de pergélisol continu recouvre la plus grande partie du Nord canadien.

was small or almost nonexistent three million years ago when Meighen Island fossils were deposited. Today, by contrast, the continuous permafrost zone covers most of northern Canada.

Other late Tertiary sites in the North American High Arctic

Meighen Island is not the only site to yield evidence of a late Tertiary forest-tundra environment. Plants and insect fossils from Kap København in northern Greenland (Fig. 1), which are currently being studied by Danish scientists, show that two million years ago Kap København also had forest-tundra vegetation. Climate was probably as warm as during deposition of the Meighen Island sediments, but by this time at least one major glaciation had occurred in the Northern Hemisphere and the floral and faunal diversity of the northern biota was

somewhat impoverished compared with Meighen biota. Even so, Kap København, like Meighen Island, had a treeline climate much warmer than now.

Sediments that may bridge the time gap between Kap København and Meighen Island occur in high terrace deposits on Ellesmere Island near Strathcona Fiord (Fig. 1). Some of these deposits almost certainly represent the late Tertiary golden age. Like Meighen Island, they contain remains of trees, such as five-needle pines and eastern cedar, that are not found in the far north today. Study of these deposits is now in progress and is proving very exciting because, in addition to plant and insect fossils, some of the sediments have yielded vertebrate fossils. At one of the key sites, the sediments of a former beaver pond contain plant and animal fossils like those found near modern beaver ponds in subarctic Canada.

Climate, therefore, must have been substantially warmer than now.

Summary

The Beaufort Formation and associated deposits in the Canadian and Greenland High Arctic show us what types of plants and animals lived there before the onset of Northern Hemisphere glaciations. Some of the fossils probably represent the last major warm interval of the Cenozoic Era, the last time when trees such as five-needle pines grew at 80° N.

What do these findings mean for study of future climate? Fossil plants from Meighen Island and Kap København show us that, when the sediments at those sites accumulated, treeline was so far north as to leave little room for extensive tracts of lowland tundra. More important, treeline marks the southern limit of continuous permafrost. If the climate warms to late Tertiary levels during the next 200 years, as some models predict, changes to the Canadian Arctic landscape will be profound.



Figure 4 Purple saxifrage (*Saxifraga angustifolium*). Leaves of this common tundra and open-ground plant occur in a few Beaufort Formation samples, notably those from Meighen Island.

Figure 4 Saxifrage à feuilles étroites (*Saxifraga angustifolium*). Les feuilles de cette toundra commune et de certaines plantes poussant en terrain découvert se retrouvent dans quelques échantillons de la formation de Beaufort, notamment ceux qui proviennent de l'île Meighen.

Autres sites de la fin du tertiaire dans l'extrême nord de l'Arctique de l'Amérique du Nord

L'île Meighen n'est pas le seul site où l'on puisse trouver des preuves qu'il existait vraiment un environnement de toundra boisée caractéristique de la fin du tertiaire dans cette région. Les fossiles de plantes et d'insectes en provenance du Kap København dans le nord du Groënland (fig. 1) font actuellement l'objet d'études par les scientifiques Danois. Ces fossiles révèlent qu'il y a deux millions d'années ce cap possédait aussi une végétation de toundra boisée. Le climat était probablement aussi chaud qu'au cours du dépôt des sédiments dans l'île Meighen, mais à cette époque, il s'était déjà produit au moins une grande glaciation dans l'hémisphère nord et la diversité florestique et faunique du biote nordique était quelque peu appauvrie comparativement au biote de Meighen.

Même là, le Kap København, comme l'île Meighen, possédait un climat de limite forestière beaucoup plus chaud qu'aujourd'hui.

Dans les dépôts de terrasses à haute altitude que l'on trouve dans l'île d'Ellesmere près du fjord Strathcona (fig. 1), il existe des sédiments susceptibles d'assurer la continuité temporelle entre le Kap København et l'île Meighen qui sont séparés par une lacune de sédimentation. Certains de ces dépôts représentent presque certainement l'âge d'or de la fin du tertiaire. Comme l'île Meighen, ils renferment des restes d'arbres, notamment de pins à cinq aiguilles et de cèdres de l'est aujourd'hui absents dans le nord. L'étude de ces dépôts se poursuit actuellement et se révèle tout à fait captivante, parce que, en plus de livrer des fossiles de végétaux et d'insectes, certains des sédiments renferment des fossiles de vertébrés. Dans l'un des sites

principaux, les sédiments d'un ancien étang où vivaient des castors renferment des fossiles de végétaux et d'animaux comme ceux que l'on trouve près des étangs à castors contemporains du Canada subarctique. Par conséquent, le climat devait y être beaucoup plus chaud qu'à l'époque actuelle.

Sommaire

La formation de Beaufort et les dépôts connexes que l'on trouve dans les extrêmes de l'Arctiques canadien et groënlandais nous montrent les types de végétaux et d'animaux qui vivaient dans ces endroits avant les glaciations de l'hémisphère nord. Certains des fossiles représentent probablement le dernier grand intervalle de réchauffement de l'ère cénozoïque, soit la dernière fois où des arbres comme les pins à cinq aiguilles ont poussé au voisinage du 80° parallèle nord.

Que signifient donc de telles constatations pour l'étude du climat à venir? Les végétaux fossiles provenant de l'île Meighen et du Kap København nous montrent que, lorsque les sédiments de

This does not mean that vegetation on Meighen Island will revert to its Pliocene state. The rate of future climate change will be too fast. Instead, vegetation change in the future will probably lag behind climate change by hundreds of years. At most, late Tertiary fossils from the Arctic reveal the **potential** result of rapid climate warming.

Will the climate of the next century be so warm that the distribution of permafrost matches that of the early Pliocene? Will the warming be sufficient to allow five-needle pines to reoccupy Arctic sites? Such questions cannot be answered with

certainty, but they might not even have been asked if scientists had not studied fossils from the Beaufort Formation and related late Tertiary deposits in northern Canada.

J. V. Matthews Jr. is a research scientist in the GSC's Terrain Sciences Division.

GSC Contribution 18289

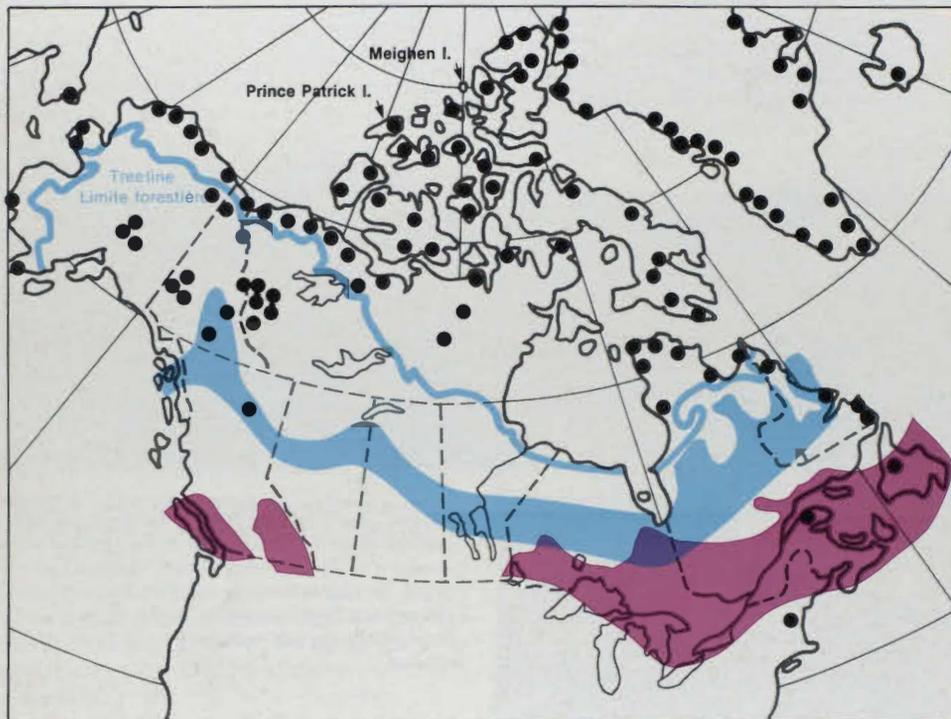


Figure 5 Distribution of mountain sorrel (*Oxyria digyna*) in North America and two Beaufort Formation sites where its fossils have been found. Distribution of fir (blue) and five-needle pines (red) in Canada today.

Figure 5 Répartition de l'oxyrie digyne (*Oxyria digyna*) en Amérique du Nord et dans deux sites de la formation de Beaufort où des fossiles de cette plante ont été trouvés. Répartition contemporaine du sapin (en bleu) et des pins à cinq aiguilles (en rouge) au Canada.

ces sites se sont accumulés, la limite forestière était tellement loin au nord qu'il ne restait à peu près plus d'espace pour une grande zone de toundra de basses-terres. Plus important encore, la limite forestière correspond à la limite méridionale du pergélisol continu. Si le climat, comme le prédisent certains modèles, venait à connaître au cours des 200 prochaines années un réchauffement semblable à celui de la fin du tertiaire, le paysage de l'Arctique canadien en serait très profondément transformé.

Il ne faut pas en déduire toutefois que la végétation de l'île Meighen reprendrait la forme qu'elle a connue sous le pliocène, car la vitesse de l'évolution climatique aura été trop rapide. En effet, l'évolution des plantes accuserait probablement un retard de quelques centaines d'années sur l'évolution du climat. Les fossiles de la fin du tertiaire en provenance de l'Arctique nous révèlent tout au plus le résultat potentiel d'un réchauffement climatique rapide.

Le climat du prochain siècle sera-t-il assez chaud pour que la répartition du pergélisol corresponde à celle du début du pliocène ? Ce réchauffement sera-t-il suffisant pour permettre aux pins à cinq aiguilles de réoccuper les sites de l'Arctique ? Il n'est pas possible de répondre avec certitude à de telles questions. D'ailleurs, ces dernières n'auraient même pas pu être posées si certains scientifiques n'avaient pas étudié les fossiles en provenance de la formation de Beaufort et des dépôts connexes de la fin du tertiaire que l'on trouve dans le Nord canadien.

J.V. Matthews Jr est un chercheur au service de la Division de la science des terrains à la CGC.

Contribution de la CGC 18289

Peatlands: A Leaky Sink in the Global Carbon Cycle

by Lynn Ovenden

Canada has about one third of the world's peatland. Most of the rest lies in other circumpolar lands. These northern peatlands, covering about 12 per cent of Canada's terrain, serve as a small sink, or repository, in the global carbon cycle. How does climate, particularly climatic warming, influence this carbon sink?

Peatlands occur where plant production has exceeded decay and where at least 40 cm of peat has accumulated. A peatland's carbon balance is the difference between the amount of carbon entering the system by photosynthesis and carbon lost through respired CO_2 and CH_4 (methane) and outflowing organic water (Fig. 1).

Over millennia, every peatland has had a slightly positive carbon balance, and has therefore behaved as a very small carbon sink. Because carbon accumulations and losses are of similar magnitude, we call the sink 'leaky'. Climate undoubtedly affects the photosynthetic and respiratory processes that govern rates of carbon

input and loss in a peatland, but its effect on a peatland's carbon balance is hard to gauge.

The relationship between climate and long-term rates of peat accumulation is easier to study, and might help us predict how northern peatlands will respond to climate change.



Climatic gradients and the distribution of peat deposits

Climatic effects are evident in Canada's peat distribution and in geographic trends in long-term rates of peat accumulation (Fig. 2 a to d). Most peatlands occur in the central and northwestern regions of the boreal forest where summers are cool (750-1250 growing degree-days over 5°C) and fine-grained sediments are widespread. Peatland development seems to be limited

On central Victoria Island, a creek winds through a relict peatland. Inset: peat exposure.



Un ruisseau serpente dans un plateau de gisement de tourbe au centre de l'île Victoria. Encart : Tourbe mise à découvert.

Les tourbières : un réservoir de carbone qui fuit

par Lynn Ovenden

Environ un tiers de toutes les tourbières du monde se trouvent au Canada. Le reste est en grande partie dispersé dans d'autres pays circumpolaires. Lorsqu'on considère le cycle du carbone à l'échelle du globe, ces tourbières septentrionales, qui recouvrent environ 12 % du territoire canadien, constituent un petit réservoir ou piège. Reste à savoir comment le climat, particulièrement le réchauffement du climat, influe sur ce piège de carbone.

Les tourbières sont des milieux où la matière végétale est produite plus vite qu'elle ne se décompose et où l'accumulation de tourbe est d'au moins 40 cm. On établit le bilan du carbone au sein d'une tourbière en calculant la différence entre la quantité de carbone ajoutée au système par photosynthèse et la quantité de CO_2 et de CH_4 (méthane) perdue sous forme d'émanation et, sous

forme organique, dans l'eau qui s'écoule de la tourbière (fig. 1).

Pendant des millénaires, le bilan du carbone était légèrement positif au sein des tourbières, qui formaient ainsi de très petits réservoirs de cet élément. Parce que les tourbières accumulent presque autant de carbone qu'elles n'en perdent, nous disons de ce réservoir qu'il « fuit ». Le climat influe sans contredit sur les processus de photosynthèse et de respiration qui déterminent l'importance des apports et des pertes de carbone dans les tourbières; toutefois, son effet sur le bilan du carbone de ces milieux est difficile à évaluer.

Il est plus facile d'étudier les liens entre le climat et le taux d'accumulation de la tourbe sur une longue période : en outre, ce genre d'étude pourrait nous aider à prévoir comment les tourbières du Nord réagiront à une modification du climat.

Les gradients climatiques et la répartition des tourbières

La répartition des tourbières au Canada et la variation géographique du taux d'accumulation de la tourbe sur une longue période reflètent bien l'effet du climat (fig. 2a à 2d). La plupart des tourbières se trouvent dans les parties centrale et nord-ouest de la forêt boréale; dans ces régions, les étés sont frais (de 750 à 1 250 jours de croissance où la température dépasse 5°C) et de fins sédiments recouvrent une grande partie du territoire. La formation de tourbières

by rough terrain, cold arctic summers, and summer moisture deficits all across southern Canada. Surprisingly, the precipitation gradient from Alberta to Labrador has no apparent effect on peatland coverage or mean depth.

Peat deposits are generally thicker and accumulate more rapidly towards the south (Fig. 2d). High rates of accumulation in the Arctic Islands are anomalous, probably due to high inorganic and ice content in the peaty sediments we dated.

The effect of past climatic changes on peat accumulation

Major climatic shifts during the past 10 000 years have also affected Canada's peat accumulation. We can compare a region's peat profiles with independent paleoclimatic records. Many stratigraphic changes in peat deposits are probably due to local developments which have their own timetable (e.g. beaver activity, fire, succession), but changes that occurred simultaneously in many basins in a region probably reflect widespread climatic change.

Figure 1 Carbon input and output from a peatland

Figure 1 Apports et pertes de carbone dans une tourbière

est apparemment limitée par un relief trop accidenté; les étés froids caractéristiques de l'Arctique et le manque d'eau qui se fait sentir en été partout dans le sud du Canada. Chose étonnante, le gradient de précipitation entre l'Alberta et le Labrador n'a aucun effet apparent sur l'étendue des tourbières ou leur profondeur moyenne.

Les tourbières sont généralement plus profondes et s'accumulent plus rapidement vers le sud (fig. 2d). Les taux d'accumulation élevés que nous avons obtenus dans les îles Arctiques sont anormaux, probablement parce que les sédiments tourbeux que nous avons datés renfermaient beaucoup de matière inorganique et de glace.

L'incidence des changements antérieurs du climat sur l'accumulation de la tourbe

Les importants changements climatiques qui sont survenus au cours des 10 000 dernières années ont également eu un effet sur la manière dont la tourbe s'est accumulée au Canada. Nous pouvons comparer les coupes de tourbe d'une région donnée à d'autres indicateurs du paléoclimat. Bon nombre des changements stratigraphiques observés dans les tourbières résultent probablement de faits locaux qui ont leur propre calendrier (l'activité des castors, les

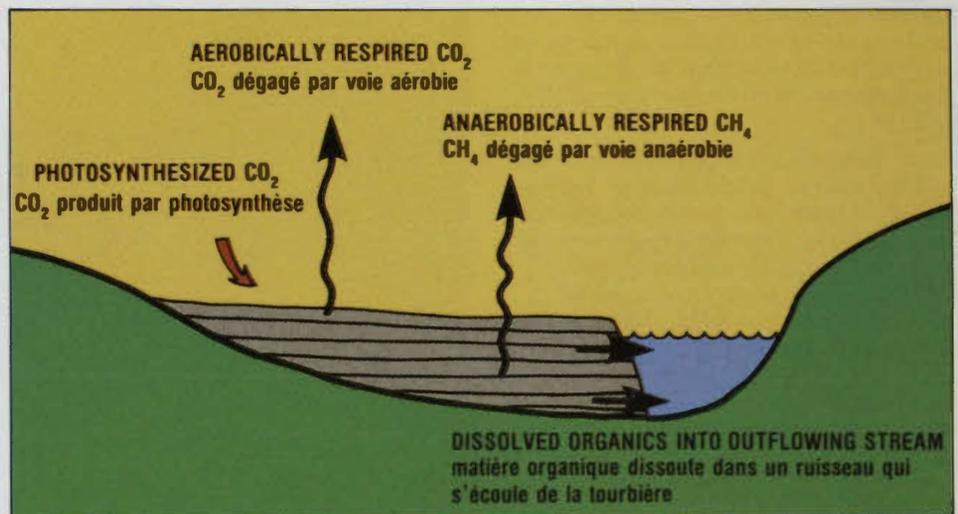
Peatland development on central boreal peatland belt fringes.

In southern Manitoba and northern Minnesota (Fig. 3), summers became 1°C cooler and annual precipitation increased by 20 per cent between 5000 and 2500 BP. During this interval, extensive peatlands, now covering much of southern glacial Lake Agassiz, began to develop and replace the prairie, marshes and woodlands previously occupying the lowland.

In northwestern Canada, along the forest-tundra transition, summers were warmer during the early Holocene and cooled to modern levels between 6000 and 2500 years ago. (A more detailed paleoclimatic reconstruction is not yet available.) Changes in peat growth rate

over the past 3500 years are apparent at 15 sites (Fig. 4) in this vast area. At half the sites, the rate of peat accumulation declined about 3000 BP (Fig. 5), as noted by investigators of Mackenzie River valley peat plateaus and fens and frozen sphagnum bogs on the Canadian Shield. Increased peat production east of the Mackenzie valley, starting about 6000 BP (Fig. 5), may reflect either changing climatic conditions or late deglaciation of these sites.

As paleoclimatic reconstructions become more detailed and consistent, their application to patterns of peat stratigraphy in these and other regions will help us understand how climate affects wetland dynamics and peat accumulation. For now, it appears that the period of greatest accumulation on the northern



incendies, la succession, etc.); cependant, les changements qui se produisent simultanément dans un grand nombre de bassins d'une même région témoignent probablement de changements climatiques touchant un vaste territoire.

La formation de tourbières en bordure de la zone de tourbières boréales, dans le centre du pays

Dans le sud du Manitoba et le nord du Minnesota (fig. 3), les étés se sont rafraîchis de 1 °C et la précipitation a augmenté de 20 % entre 5 000 et 2 500 BP (avant l'Actuel). C'est au cours de cette période que les tourbières étendues, qui recouvrent maintenant une grande partie de ce qui était le secteur sud du lac glaciaire Agassiz, ont commencé à se former et à remplacer les prairies, les marais et les terrains boisés qui occupaient ces basses-terres.

Dans le nord-ouest du Canada, le long de la zone de transition entre la forêt et la toundra, les étés du début de l'holocène étaient plus chaudes qu'aujourd'hui; toutefois, les températures estivales sont redescendues aux valeurs actuelles entre 6 000 et 2 500 BP. (Il nous est

présentement impossible de fournir une reconstruction plus détaillée du paléoclimat.) Les variations dans le taux de croissance de la tourbe au cours des 3 500 dernières années sont évidentes dans quinze sites de cette vaste région (fig. 4). Dans la moitié de ces sites, le taux d'accumulation de la tourbe a baissé il y a environ 3 000 ans (fig. 5), tendance que des chercheurs avaient déjà notée dans le cas des plateaux tourbeux et des tourbières minérotrophes de la vallée du Mackenzie ainsi que des tourbières oligotrophes pergélisolées à sphaigne du bouclier canadien. Il y a environ 6 000 ans, la production de tourbe a commencé à augmenter à l'est de la vallée du Mackenzie (fig. 5), ce qui pourrait témoigner d'un changement dans les conditions climatiques ou d'une déglaciation tardive de ces sites.

Lorsque nous posséderons des reconstructions paléoclimatiques plus détaillées et cohérentes, nous pourrons les corréler avec la stratigraphie de la tourbe dans ces régions et ailleurs, afin de mieux comprendre l'effet du climat sur la dynamique des terres humides et sur l'accumulation de la tourbe. Pour l'instant, il semble que le taux

border of the boreal forest was the early-to-mid Holocene, when summers were warmer than present. On the forest's south-central border, peatland development was delayed until the mid-to-late Holocene when summers became cooler and wetter.

and carbon balance. Climatic warming will melt many frozen peatlands and transform dry, subaerial frost mounds and peat plateaus into wet, unfrozen fens, variously known as collapse scars, thaw pockets and pot-hole bogs (Fig. 6). Peatlands in the discontinuous permafrost zone already show signs of increased thawing in the past 40 years, probably reflecting climatic warming since the Little Ice Age, 100 years ago. Further warming will likely produce more collapse scars

Figure 2a Annual number of growing degree-days (above 5°C) (National Atlas of Canada 1981)
b Annual precipitation (National Atlas of Canada 1974)
c Peatland coverage (Tarnocai 1984)
d Peat depths (Tarnocai 1984)

Thawing in frozen peatlands

Permafrost occurs in about 60 per cent of Canada's peatlands and is a major influence on their vegetation, hydrology

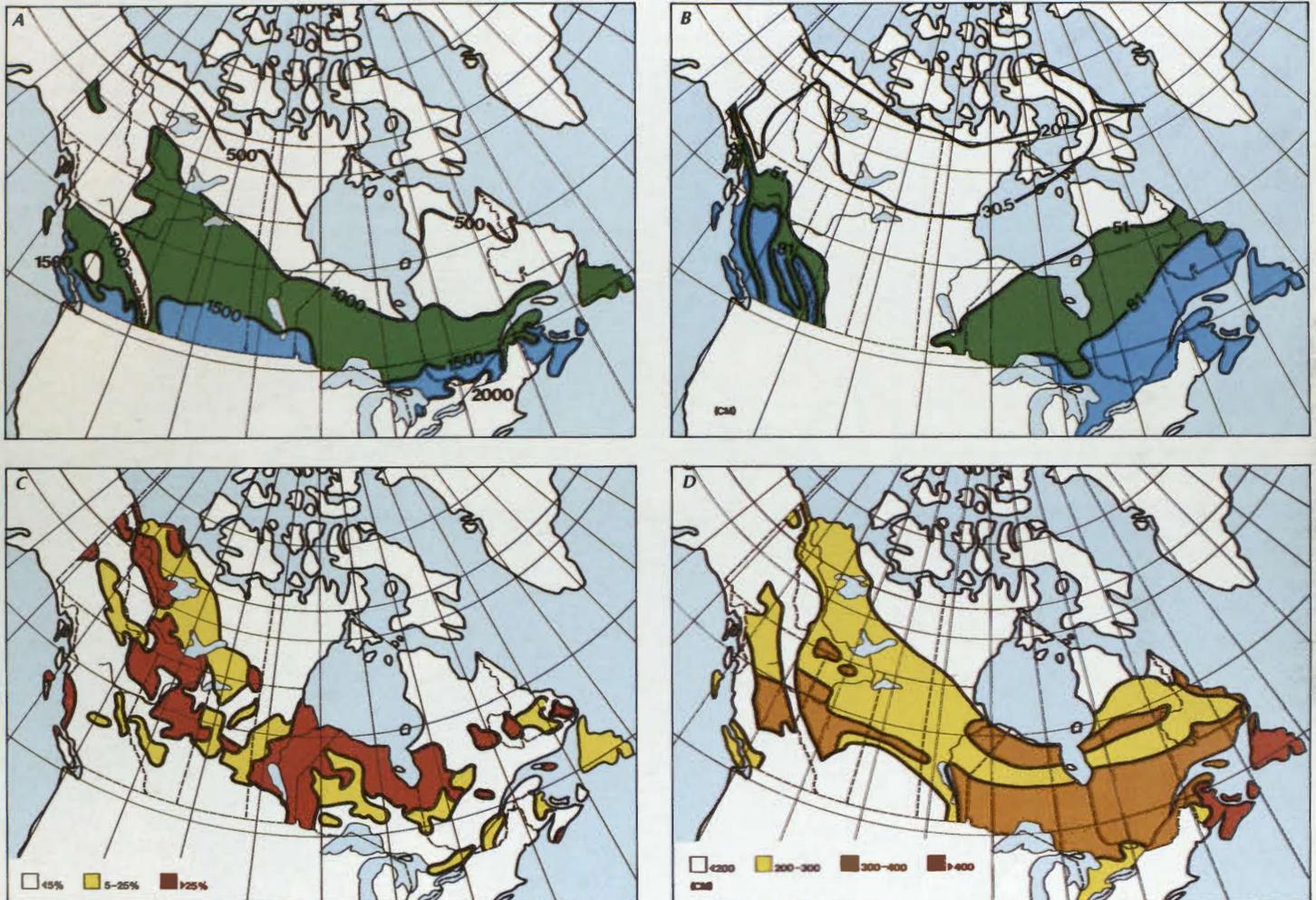


Figure 2a Nombre de journées par année où la température est au-dessus des 5°C (Atlas national du Canada, 1981)
b Précipitation annuelle (Atlas national du Canada, 1974)
c Étendue des tourbières (Tarnocai, 1984)
d Profondeur de la tourbe (Tarnocai, 1984)

d'accumulation était à son maximum à la limite nord de la forêt boréale entre le début et le milieu de l'holocène, à une époque où les étés étaient plus chauds que maintenant. Le long de la limite sud-centrale de la forêt, des tourbières n'ont commencé à se former qu'entre le milieu et la fin de l'holocène, lorsque les étés sont devenus plus frais et pluvieux.

Le dégel des tourbières pergélisolées

Quelque 60 % des tourbières du Canada renferment du pergélisol, ce qui a une incidence majeure sur la végétation, l'hydrologie et le bilan du carbone. Un réchauffement du climat dégèlera un grand nombre de tourbières pergélisolées et, du même coup, des buttes à noyau de glace subaériennes et sèches ainsi que

des plateaux tourbeux qui seront alors transformés en tourbières minérotrophes non gelées et humides que l'on connaît sous divers noms : cicatrices d'affaissement, dépressions thermokarstiques et tourbières en cuvette (fig. 6). Depuis environ 40 ans, les tourbières qui se trouvent dans la zone de pergélisol discontinu montrent déjà les signes d'une augmentation du dégel probablement attribuable au réchauffement du climat qui se fait sentir depuis le petit âge glaciaire, il y a 100 ans. Des températures encore plus chaudes produiront probablement un plus grand nombre de cicatrices d'affaissement et contribueront à la création et à l'expansion de lacs thermokarstiques le long de la côte arctique et des rives de la baie d'Hudson.

Figure 3 Increased precipitation and cooler summers about 4000 BP promoted peat accumulation on the southern fringe of the boreal wetland region. Radiocarbon dates (—) were calculated from the base of peatlands on southern glacial Lake Agassiz (south of 52°N).

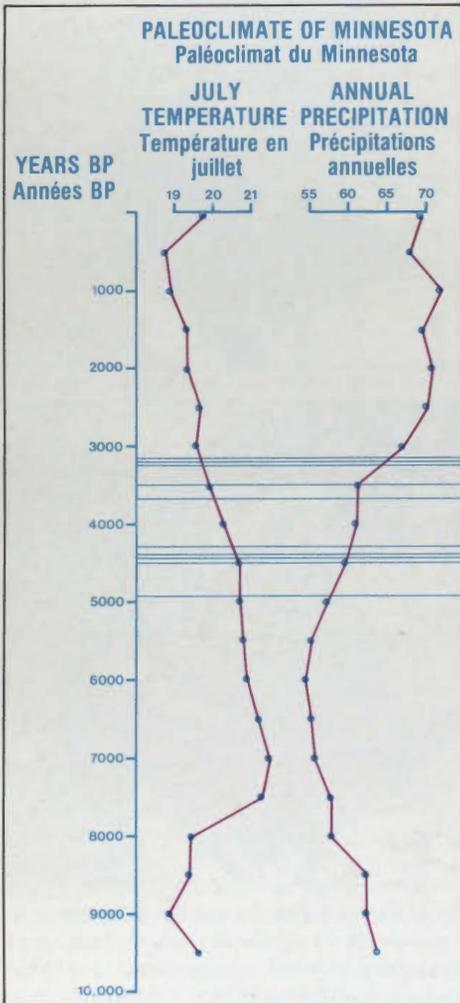


Figure 3 Il y a environ 4 000 ans, Une augmentation des précipitations et une baisse des températures estivales ont favorisé la formation de tourbières le long de la limite sud de la région des terres boréales humides. Les données obtenues par datation au carbone 14 (—) proviennent d'échantillons prélevés à la base de tourbières situées dans la partie sud du lac glaciaire Agassiz (au sud du 52° N).

and contribute to the creation and expansion of thaw lakes along the arctic and Hudson Bay coastlands.

Regional warming may also lead to increased methane emissions because methane release seems to be greater from relatively warm peatlands with high water tables (typical of collapse scars) than from the dry surface of frozen peatlands. However, we have no evidence that northern wetlands are presently emitting more methane than they did during the Little Ice Age. To date, rising atmospheric concentrations of methane seem to derive from global anthropogenic sources, chiefly biomass burning, livestock and rice paddies.

Conclusion

Two aspects of carbon cycling in northern peatlands are vulnerable to climatic

Figure 4 Locations of peat deposits considered in Figs. 3 and 5.

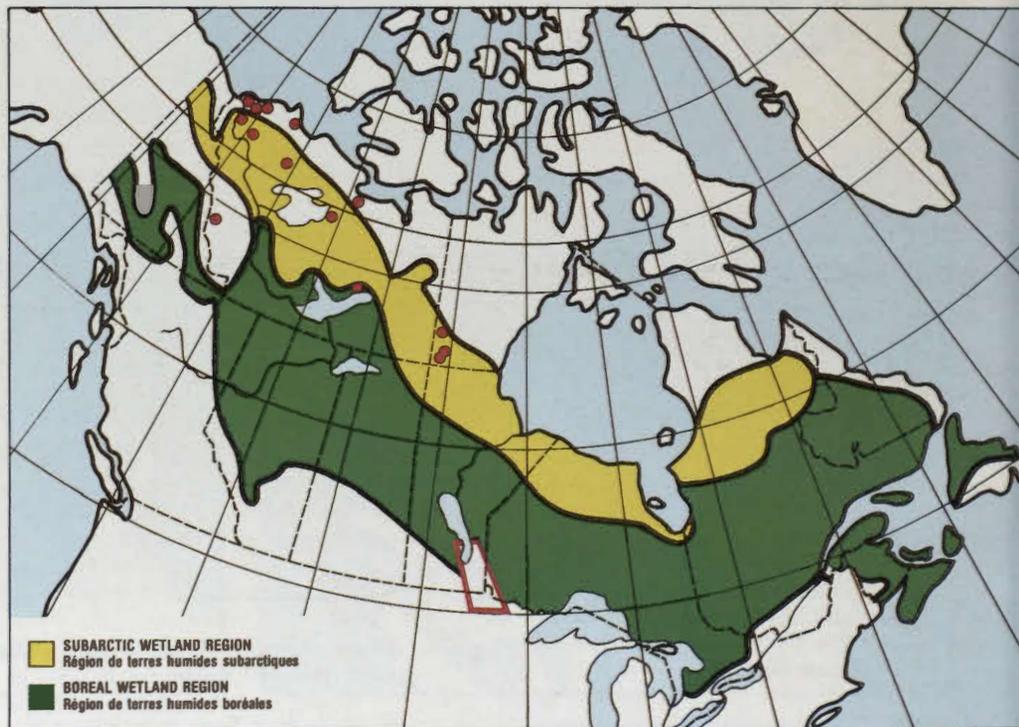


Figure 4 Emplacement des tourbières mentionnées dans les figures n° 3 et 5.

Un réchauffement régional pourrait également amener une augmentation des émissions de méthane, parce que ce gaz semble s'échapper en plus grande quantité des tourbières relativement tièdes où la nappe phréatique est plus élevée (situation caractéristique des cicatrices d'affaissement) que la surface sèche des tourbières pergélisolées. Toutefois, nous n'avons aucune preuve que les terres humides du Nord produisent plus de méthane de nos jours qu'au cours du petit âge glaciaire. Jusqu'à maintenant, l'augmentation de la concentration de

change : carbon balance; and the relative proportions of CO₂, methane and dissolved organics lost from the system.

Geographical and historical trends in peat accumulation indicate that boreal climate is more conducive to peat accumulation than either temperate or arctic climates. Should climatic change entail a simple shift northward of existing climatic regimes, then peat accumulation rates will probably increase across Canada's low arctic and decline in southern boreal regions. The precipitation regime may determine whether or not southern peat deposits become net carbon sources. Peatland drainage for forestry or agriculture may be analogous to a climatically induced decline in soil moisture or water table; drained peatlands do become net carbon sources. Unfortunately, we know little about how peatlands responded to previous periods of climatic warming.

méthane dans l'atmosphère semble provenir de sources anthropiques réparties à l'échelle du globe, particulièrement la combustion de biomasse, le bétail et les rizières.

Conclusion

Deux aspects du cycle du carbone dans les tourbières septentrionales sont vulnérables aux changements climatiques, à savoir le bilan du carbone et les proportions relatives de CO₂, de méthane et de matière organique dissoute que le système perd.

Les variations géographiques et historiques du taux d'accumulation de la tourbe montrent que le climat boréal est

Figure 5 Radiocarbon-dated peat deposits near treeline between the Yukon and Hudson Bay, where peat accumulation rate exceeded 0.2 mm a year during each 250-year interval of the Holocene. This analysis included 15 peat deposits which have two or more dated levels from at least 3500 years BP. Shaded area indicates accumulation at sites east of 126°W.

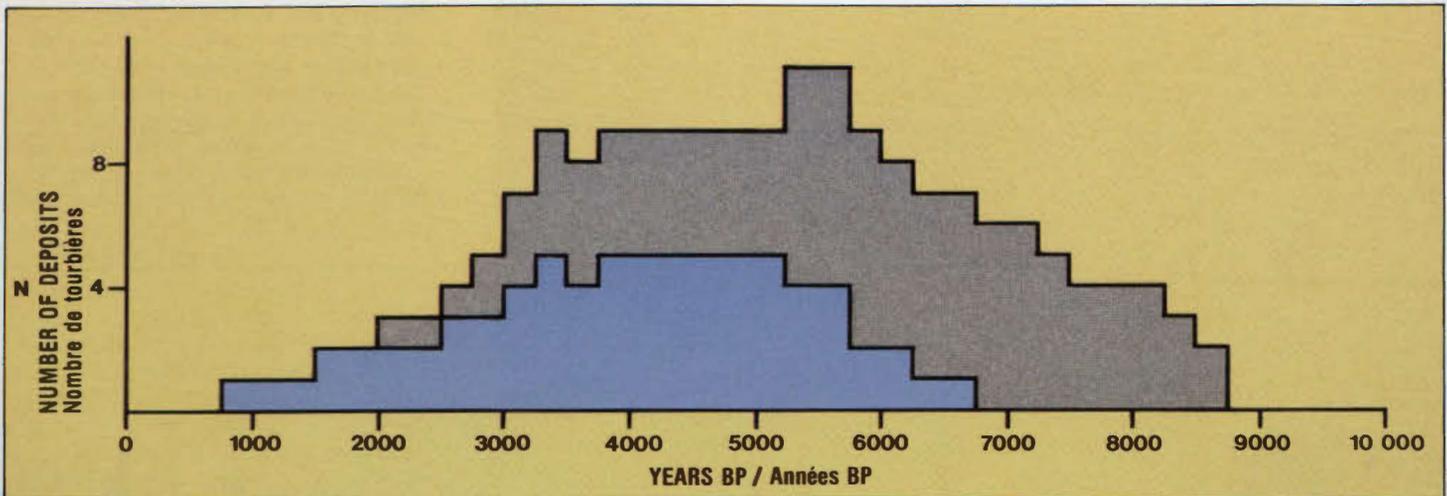


Figure 5 Tourbières datées au carbone 14 situées près de la limite des arbres entre le Yukon et la baie d'Hudson, où le taux d'accumulation de la tourbe a dépassé 0,2 mm pendant chacune des périodes de 250 ans de l'holocène. Cette analyse comprend quinze tourbières dans lesquelles au moins deux niveaux ont été datés à plus de 3 500 BP. La région ombragée montre l'accumulation aux sites situés à l'est du 126° de longitude ouest.

Figure 6 Aerial view of collapse scars in extensive peatland north of Norman Wells, N.W.T.

Figure 6 Vue aérienne de traces d'effondrement dans les gisements de tourbe étendus au nord de Norman Wells, (T.N.-O.).



plus favorable à l'accumulation de tourbe que les climats tempéré et arctique. Si les influences climatiques actuelles se déplacent vers le nord en réponse à un changement du climat, les taux d'accumulation de la tourbe augmenteront dans le sud de l'Arctique canadien et diminueront dans la partie australe des régions boréales. Le régime des précipitations pourrait déterminer si les tourbières méridionales deviendront ou non des sources nettes de carbone. On sait que les tourbières drainées en vue d'exploitations forestières ou agricoles deviennent des sources nettes de carbone : on pourrait ainsi établir un parallèle entre cette situation et ce qui se produirait si le sol devenait moins humide ou si la nappe phréatique était abaissée à cause d'un réchauffement climatique. Malheureusement, nous sommes mal renseignés quant à l'effet des réchauffements climatiques précédents sur les tourbières.

Nous possédons très peu de données sur le cycle du carbone dans les tourbières du nord; les renseignements que nous avons suggèrent toutefois que les émissions de CO₂ sont en très grande partie

Available data on carbon cycling in northern peatlands are extremely limited, but suggest that CO₂ emissions are by far the most important means of carbon loss. Nevertheless, attention has focused on methane, due to its importance as a greenhouse gas. Natural wetlands were probably the greatest source of atmospheric methane until about 200 years ago, when anthropogenic methane sources became much more important.

Scientists are studying methane emissions from peatlands of different types and in different climatic regions to try to model the influence of environmental conditions. If these models can be coupled to estimates of changing coverage of different peatland types in a warming world, we should be able to predict whether northern peatlands will also become a growing source of atmospheric methane.

Peat exposure on a lakeshore in southern Northwest Territories.

Tourbe mise à découvert le long des rives d'un lac dans le Sud des Territoires du Nord-Ouest.

responsables des pertes de carbone. Néanmoins, les chercheurs s'intéressent surtout au méthane, parce qu'il contribue à l'effet de serre. Jusqu'à il y a environ 200 ans, les terres humides des milieux naturels représentaient probablement la principale source de méthane dans l'atmosphère; depuis, les sources anthropiques de ce gaz ont pris beaucoup d'importance.

Des scientifiques étudient les émissions de méthane dans différents types de tourbières et dans plusieurs régions climatiques, afin d'essayer de créer des modèles de l'effet des conditions environnementales. Si nous arrivons à harmoniser ces modèles aux prévisions formulées quant à l'étendue des différents genres de tourbières dans un monde en réchauffement, nous pourrions probablement dire si les tourbières septentrionales deviendront une plus grande source de méthane atmosphérique.

Lynn Ovenden was a post doctoral fellow in the GSC's Terrain Sciences Division.

GSC Contribution 18189



Lynn Ovenden était une boursière de recherches post-doctorales à la Division de la science des terrains, Commission géologique du Canada.

Contribution de la CGC 18189

Geology and Acid Rain in Eastern Canada

by W.W. Shilts, I.M. Kettles

The consequences of mankind's abuse of the environment have followed a predictable spatial and temporal pattern. Air pollution, first noticed in Europe early in the 19th century as a local problem around industrial centres, has expanded widely as the volume of emissions has risen. Raising smokestacks to disperse local pollutants over a wider area has solved local problems but has allowed the major pollutants, oxides of sulphur and nitrogen, to reside in the atmosphere long enough to form weak solutions of sulphuric and nitric acid, which fall to earth as acid rain.

Through the 20th century, local air-pollution problems, while still serious in themselves, have evolved into regional problems familiar to Canadians as the acid rain crisis of the last two decades. Recent research on glaciers in remote areas has shown that the problem has surpassed regional status and has become truly global. Rather than review the well documented evolution of the air pollution problem in North America, we will discuss here how evaluation of acid rain's effects is absolutely dependent on a clear



La géologie et les pluies acides dans l'Est du Canada

par W.W. Shilts et I.M. Kettles

L'exploitation abusive de l'environnement par l'humanité a eu des incidences spatio-temporelles tout à fait prévisibles. La pollution atmosphérique, constatée à l'origine en Europe au début du XIX^e siècle en tant que problème localisé autour des centres industriels, s'est considérablement aggravée à mesure que le volume des émissions a augmenté. L'érection de cheminées géantes afin de disperser les matières polluantes locales au-dessus d'une superficie plus vaste a permis de résoudre certains problèmes locaux, mais elle a cependant permis aux principales matières polluantes (les oxydes de soufre et d'azote) de rester suffisamment longtemps dans l'atmosphère pour y former des acides sulfuriques et nitriques faibles, qui sont ensuite retombés sur terre sous forme de précipitations acides.

Tout au long du XX^e siècle, les problèmes locaux de pollution atmosphérique, déjà assez graves en soi, ont évolué au cours des deux dernières décennies en

problèmes régionaux que les Canadiens ont pris l'habitude d'appeler la crise des pluies acides. Des recherches effectuées récemment sur les glaciers des régions éloignées ont révélé que le problème avait maintenant débordé le cadre régional pour devenir un problème vraiment global. Plutôt que de passer en revue la documentation déjà considérable concernant l'évolution du problème de la pollution atmosphérique en Amérique du Nord, nous expliquerons ici pourquoi l'évaluation des effets des pluies acides repose essentiellement sur la connaissance géologique approfondie des terrains touchés.

Antécédents géologiques

La plus grande partie de l'Est canadien repose sur un socle rocheux plissé et métamorphisé appartenant au bouclier canadien et aux Appalaches. Ni le bouclier canadien ni les Appalaches ne renferment d'assez grandes étendues de calcaire, ce qui se reflète par l'absence généralisée dans leurs sols de minéraux carbonatés donnant à ces sols un

pouvoir tampon qui fait opposition aux précipitations acides. Les zones de roches vertes, fréquentes à la fois dans le bouclier et dans les Appalaches, comprennent des strates sédimentaires et volcaniques qui renferment souvent divers gisements de minéraux exploitables qui sont susceptibles d'être associés à des sols riches en métaux potentiellement nocifs à l'état de trace.

La réaction d'un terrain à une charge acide ne peut toutefois être prédite que sur la seule base de la composition du socle rocheux. Dans l'Est canadien, les glaciations ont produit une couverture sédimentaire molle (drift) qui peut avoir une composition considérablement différente de celle du substrat rocheux. En outre, certains lacs glaciaires et certaines mers post-glaciaires ont inondé des parties du bouclier et des Appalaches laissant sur de vastes étendues des sédiments aux grains fins et relativement imperméables.

La figure 1, extrapolée à partir d'une série de cartes sur le socle rocheux exposé aux pluies acides et publiées par la Commission géologique il y a plusieurs années, intègre des données géologiques sur le socle rocheux et sur la période glaciaire dans l'Est canadien. Cette figure illustre la répartition des matériaux superficiels bien tamponnés ou mal tamponnés et indique clairement comment le transport glaciaire des

understanding of the geology of the terrain on which it falls.

Geological Background

Much of eastern Canada is underlain by folded, metamorphosed bedrock of the Canadian Shield and Appalachian Mountains. Neither the Canadian Shield nor the Appalachians contain significant areas of limestone, a fact reflected in the general lack of acid-buffering carbonate minerals in their soils. Greenstone belts, common in both the Shield and Appalachians, comprise sedimentary and volcanic strata that are commonly hosts for various economic mineral deposits and are likely to be associated with soils rich in potentially noxious trace metals.

A terrain's response to acid loading cannot be predicted solely on the basis of bedrock composition, however. In eastern Canada glaciation has produced a soft sedimentary cover (glacial drift) that may have a chemical composition considerably different from that of underlying bedrock. Also, glacial lakes and postglacial seas flooded parts of the Shield and Appalachians leaving fine-grained, relatively impermeable sediments over large areas.

Figure 1, generalized from a series of "Acid Rain" bedrock maps published by the Geological Survey several years ago,

composantes absorbantes facilement érodées peut complètement dissimuler l'influence chimique du substrat rocheux.

En outre, les dépôts glaciaires possèdent des propriétés constituantes qui diffèrent sensiblement de celles de la couverture des sols formée à partir de l'altération de la roche en place dans les zones non glaciées. Les sédiments glaciaires sont largement le produit de l'abrasion et du broyage glaciaires du socle rocheux; ils ont été produits rapidement, en majeure partie par des processus physiques plutôt que par des compositions chimiques de la roche en place par les acides naturels du sol pendant des millions d'années. Par conséquent, les sédiments glaciaires et autres sédiments assimilables se composent d'une grande variété de grains minéraux et de roches clastiques arrachés à une roche en place relativement peu altérée par le climat dans le sillage des glaciers. Ainsi, sauf en ce qui concerne une mince couche de sol formée sur des sédiments glaciaires par altération au cours des 8 000 à 13 000 années qui se sont écoulées depuis la dernière glaciation, les dépôts glaciaires représentent un bassin de composants minéraux facilement altérés, dont la granulométrie va de l'argile au gravier.

Certains des composants, particulièrement l'argile et les minéraux carbonatés,

integrates bedrock and glacial geological data for eastern Canada. It shows the distribution of poorly and well buffered surficial materials, and indicates clearly how glacial transport of easily eroded buffering components can completely hide the chemical influence of underlying bedrock.

Also, glacial deposits have unique compositional properties that differ significantly from those of the soil cover formed from weathering bedrock in unglaciated areas. Glacial sediments are largely the products of glacial abrasion and crushing of bedrock; they were produced rapidly, predominantly

by physical processes rather than by chemical decomposition of bedrock by natural soil acids over millions of years. Consequently, glacial and related sediments are composed of a large variety of mineral grains and clasts scraped from relatively unweathered bedrock along the glacier's path. Thus, except for the thin soil layer formed on glacial sediments by weathering during the 8 000 to 13 000 years since the last glaciation, glacial deposits represent a pool of easily altered mineral components, from clay to gravel sizes.

Some of the components, clay and carbonate minerals in particular, can have



peuvent produire un effet bénéfique en neutralisant les précipitations acides; d'autres peuvent produire des effets dommageables en relâchant certains éléments pendant le lessivage acide ou certaines réactions d'échange. Des métaux toxiques ou nocifs peuvent être libérés dans les eaux souterraines ou les eaux de surface par divers processus associés à la charge acide. Ce problème ne devrait pas être tellement grave dans les zones situées au-delà de la limite glaciaire, où les processus d'altération chimique naturelle,

agissant sur de longues périodes, ont détruit les métaux primaires, ont enlevé leurs composants nocifs ou les ont fixés solidement dans des minéraux secondaires stables.

Étude de la composition du drift dans l'Est ontarien

Pour tenter de quantifier les variations régionales dans la composition des sédiments glaciaires susceptibles de jouer un rôle important dans l'évaluation des

a beneficial effect by neutralizing acid precipitation; others may produce harmful effects by release of elements through acid leaching or exchange reactions. Toxic or noxious metals may be released into ground or surface waters by various processes associated with acid loading. This problem is not likely to be so severe in areas beyond the glacial limit, where processes of natural chemical weathering

Figure 1 Generalized bedrock and glacial sediment lithologies of Eastern Canada, showing their relative sensitivity to the effects of acid precipitation.

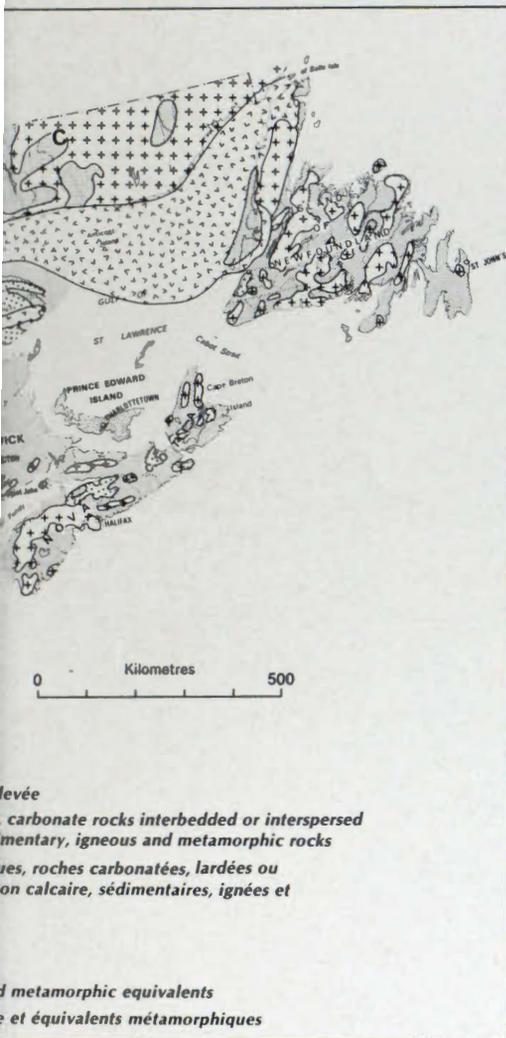


Figure 1 Socle rocheux généralisé et lithologies des sédiments glaciaires de l'Est canadien, montrant leur sensibilité relative aux effets des précipitations acides.

effets des pluies acides, nous avons prélevé des échantillons de sédiments glaciaires, de sédiments lacustres actuels et d'eaux lacustres sur l'ensemble du bouclier canadien entre Ottawa et la baie Georgienne. Dans cette zone, des roches cristallines précambriennes remontent à

acting over long periods have destroyed primary minerals and have removed their noxious components or fixed them firmly in stable secondary minerals.

Eastern Ontario Drift Composition Study

In an attempt to quantify regional variations in composition of glacial sediments that may be important in assessing the effects of acid rain, we collected samples of glacial sediments, modern lake sediments, and lake waters over the Canadian Shield from Ottawa to Georgian Bay. In this area, Precambrian crystalline rocks project through flat-lying, unmetamorphosed lime-rich Paleozoic rocks of the Ottawa - St. Lawrence Valley (Fig. 2). The Precambrian rocks comprise granites and gneissic rocks interspersed with metamorphosed clastic sedimentary rocks, volcanic rocks and limestones (marbles). Limestones are particularly common in the Frontenac Arch, the eastern part of the study region that links the Canadian Shield to Precambrian rocks in the Adirondack Mountains.

We aimed to map and explain two groups of compositional characteristics of glacial deposits: the distribution of acid buffering components (carbonate minerals and clay); and the patterns of concentrations of naturally occurring trace and minor elements that might be harmful if released into the environment by acid leaching

travers des roches paléozoïques reposant à plat, non métamorphosées et riches en calcaire de la vallée de l'Outaouais et du Saint-Laurent (fig. 2). Les roches précambriennes comprennent des granites et des roches gneissiques entremêlées à des roches sédimentaires clastiques métamorphosées à des roches volcaniques et à des calcaires (marbres). Les calcaires sont particulièrement fréquents dans l'arche de Frontenac, la partie orientale de la région observée qui relie le bouclier canadien aux roches précambriennes dans les monts Adirondack.

Les auteurs ont cherché à cartographier et à expliquer deux groupes de caractéristiques constitutives des dépôts glaciaires : la répartition des composants ayant un acido-tamponneur (minéraux carbonatés et argile); ainsi que les modes de concentration des éléments mineurs ou à l'état de trace que l'on retrouve habituellement dans la nature et pouvant être dangereux s'ils sont libérés dans l'environnement par lixiviation acide ou par réactions d'échange.

Les auteurs ont dû trouver les modes de variation naturelle dans la concentration des éléments à l'état de trace pour évaluer les modes de sédimentation des métaux lourds d'origine anthropique pouvant accompagner les précipitations acides.

or exchange reactions. We had to know the patterns of natural variation in concentration of trace elements to evaluate the depositional patterns of anthropogenically produced heavy metals that may accompany acid precipitation.

The eastern part of the Frontenac Arch is covered by drift containing substantial amounts of carbonate minerals (Fig. 3). Although marble outcrops contributed carbonate minerals to the drift locally, most of the carbonates were derived from limestones and associated carbonate rocks of the Ottawa Valley.

In the western part of the study area, drift is locally calcareous over marble bodies, but glacial erosion of marble has produced much less calcareous debris than it has from Paleozoic rocks, and carbonate derived from marble cannot be detected very far down-ice from its source outcrops. Probably the marble outcrops' massive structure and coarsely crystalline texture made them much less susceptible to glacial plucking (the most effective form of glacial erosion) than the highly jointed, horizontally bedded limestone strata of the Ottawa - St. Lawrence Lowlands.

Lakes in this region faithfully reflect the concentrations of carbonate minerals in the glacial sediments around and beneath them (Fig. 4). Lakes with high pH (low

La partie orientale de l'arche de Frontenac est recouverte d'un drift renfermant des quantités substantielles de minéraux carbonatés (fig. 3). Bien que les affleurements de marbre fournissent par endroits des minéraux carbonatés au drift, la plupart des carbonates proviennent des calcaires et des roches carbonatées connexes de la vallée de l'Outaouais.

Dans la partie occidentale de la zone observée, le drift est calcaire par endroit sur les masses de marbre, mais l'érosion glaciaire du marbre a produit beaucoup moins de débris calcaires que cela n'avait été le cas à partir des roches paléozoïques, tandis que le carbonate dérivé du marbre ne peut être décelé très loin en aval des glaces à partir des affleurements d'origine. Il est probable que la structure massive la texture grossièrement cristalline des affleurements de marbre aient rendus ces derniers beaucoup moins susceptibles au délogement (la forme la plus efficace d'érosion glaciaire) que les strates de calcaire litées horizontalement et fortement jointives des basses-terres de l'Outaouais et du Saint-Laurent.

Les lacs de cette région sont un reflet fidèle des concentrations de minéraux carbonatés dans les sédiments glaciaires périphériques et sous-jacents (fig. 4). Les lacs possédant un pH élevé (faible acidité)

Figure 2 Location of integrated lake and drift geochemistry studies in eastern Ontario. Background map is a portion of the GSC's "Acid Rain Maps" of eastern Canada. Sensitivity to acid rain effects: high-red-pink; moderate — yellow-orange; low — blue-green.

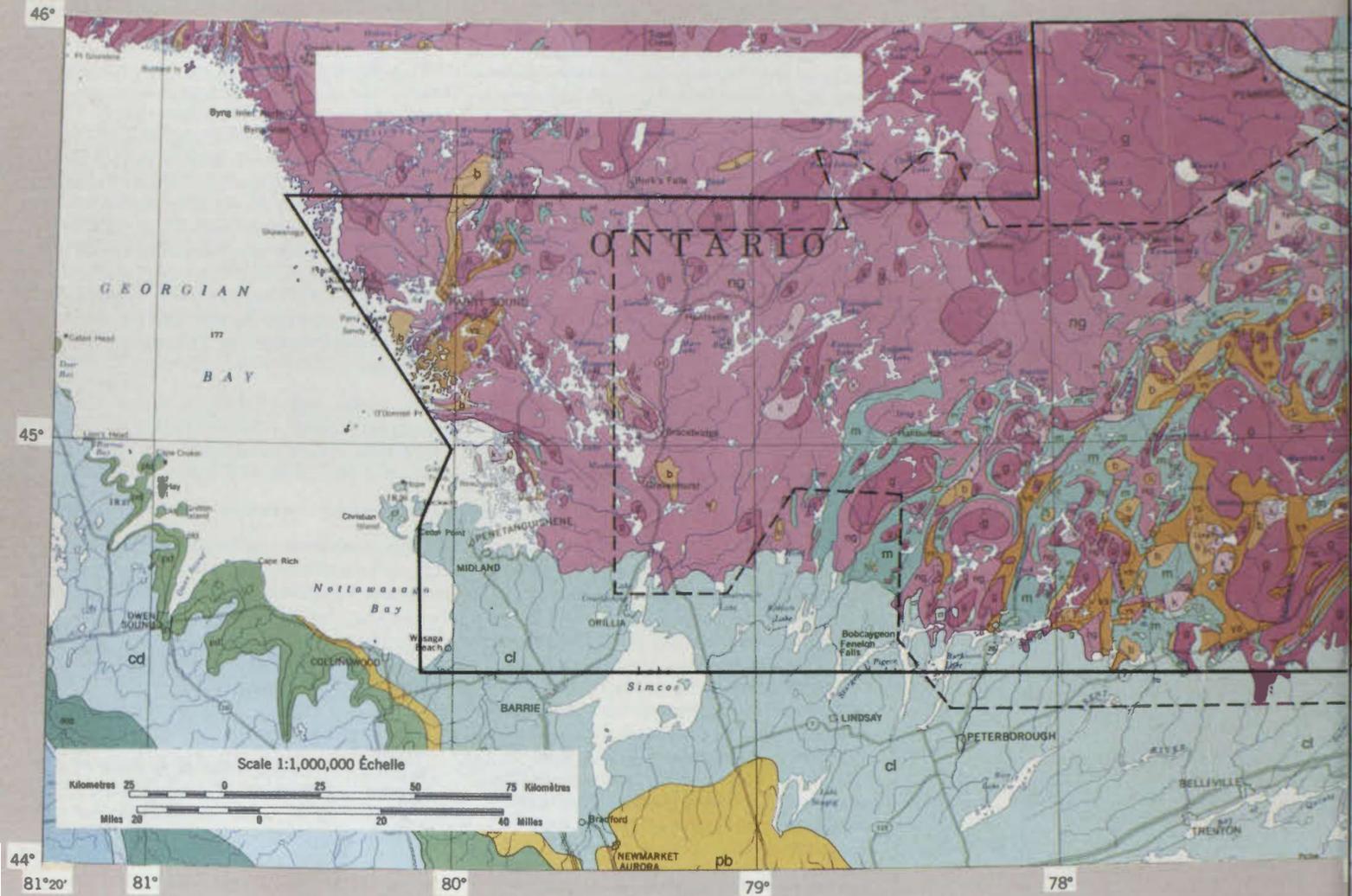
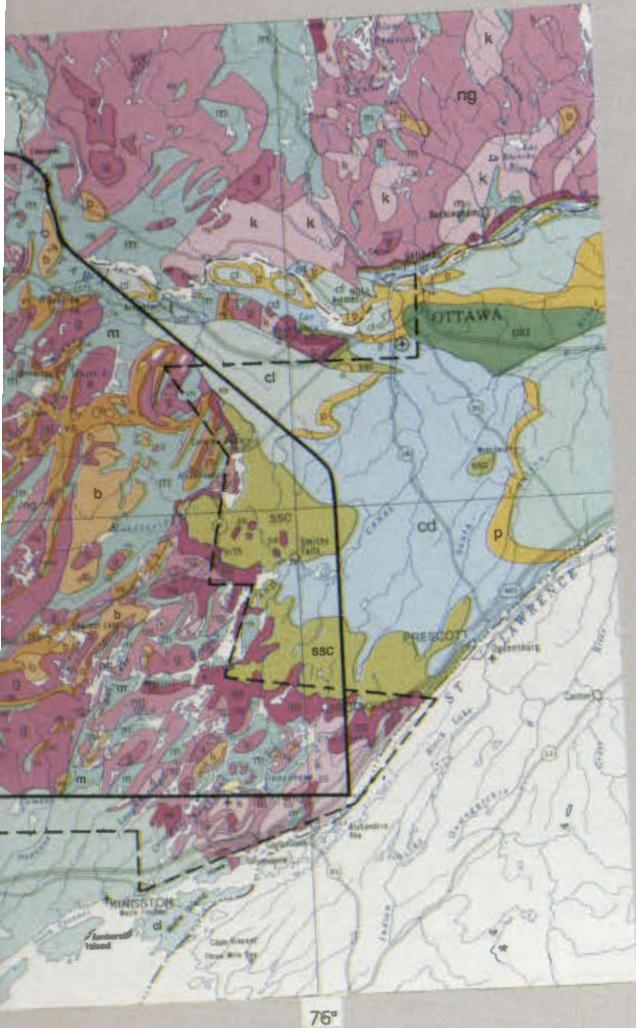


Figure 2 Lieu des études intégrées sur les lacs et la géochimie sur les apports géologiques dans l'Est ontarien. Le fond de la carte est une partie des cartes sur les pluies acides de la CGC pour l'Est canadien. Sensibilité aux effets des pluies acides : élevée — rouge-rose; modérée — jaune-orange; faible — bleu-vert.



SENSITIVITY RATINGS ÉVALUATION DE LA SENSIBILITÉ	BEDROCK ASSEMBLAGES ASSEMBLAGE DE LA ROCHE EN PLACE	BEDROCK LITHOLOGIES OF MAJOR GEOLOGICAL PROVINCES (Includes equivalent metamorphic rocks, where appropriate) LITHOLOGIES DE LA ROCHE EN PLACE DES PRINCIPALES PROVINCES GÉOLOGIQUES (comprend les roches métamorphiques équivalentes, le cas échéant)	
Sensitivity of bedrock and derived soils to acid loading* / Sensibilité de la roche en place et des sols dérivés à la charge acide*	Bedrock assemblages are grouped according to (1) their capacity to produce glacial or residual soils which are perceived to be similar in nature or degree of reaction to acid loading#; (2) similarity of bedrock reaction to increasing acidity of ground-water percolating through fractures or pores (includes equivalent metamorphic rocks, where appropriate) Les assemblages de la roche en place sont groupés selon 1) leur capacité de produire des sols glaciaires et résiduels dans lesquels des réactions ou le degré des réactions à la charge acide sont semblables; 2) la similarité de la réaction de la roche en place à l'augmentation de l'acidité des eaux souterraines filtrant à travers les fractures ou les interstices (comprend les roches métamorphiques équivalentes, le cas échéant)	CANADIAN SHIELD BOUCLIER CANADIEN	ST. LAWRENCE AND HUDSON BAY LOWLANDS BASSES-TERRES DU SAINT-LAURENT ET DE LA BAIE D'HUDSON
Low Sensitivity: High buffering capacity, mainly by carbonate anion / Sensibilité faible: pouvoir tampon élevé, surtout par l'anion carbonaté	<p>Light blue box: Limestone / Calcaire</p> <p>Light green box: Dolomite / Dolomie</p> <p>Blue box: Limestone, dolomites, undifferentiated / Calcaire, dolomie, non différenciés</p> <p>Dark blue box: Marble / Marbre</p>	<p>Light blue box: c</p> <p>Blue box: c</p> <p>Dark blue box: m</p>	<p>Light blue box: cl - limestone / calcaire clp - limestone, some shale / calcaire, un peu de schiste argileux</p> <p>Light green box: cd - dolomite / dolomie</p> <p>Blue box: c - limestone, dolomite, undifferentiated / calcaire, dolomie, non différenciés</p>
Low-Intermediate Sensitivity: Low to high buffering capacity, mainly by carbonate anion and by cation exchange in clay and silt-sized detritus / Sensibilité faible-intermédiaire: pouvoir tampon faible à élevé, surtout par l'anion carbonaté et par échange de cations dans les argiles et les détritiques de la grosseur des silt	<p>Green box: Carbonate-rich siliceous sedimentary rocks / Roches sédimentaires siliceuses riches en carbonate</p> <p>Light green box: Non-calcareous siliceous sedimentary rocks with some carbonate interbeds / Roches sédimentaires siliceuses non calcaires avec quelques lits carbonatés intercalés</p> <p>Yellow box: Quartzose sandstone with carbonate cement or carbonate interbeds / Grès quartzeux avec ciment carbonaté ou lits carbonatés intercalés</p>	<p>Green box: CB</p> <p>Light green box: CBF</p> <p>Yellow box: SBC</p>	<p>Green box: pl - calcareous shale and limestone / schiste argileux calcaire et calcaire</p> <p>Light green box: plb - dolomitic shale, dolomite and evaporites / schiste argileux dolomitique, dolomie et évaporites</p> <p>Yellow box: pkl - shale, siltstone, sandstone, and limestone, interbedded / schiste argileux, siltstone, grès et calcaire, intercalés</p> <p>Light yellow box: pd - shale, siltstone, sandstone, and dolomite, interbedded / schiste argileux, siltstone, grès et dolomie, intercalés</p> <p>Yellow box: SBC - orthoquartzitic sandstone and dolomite, interbedded / grès à fragments d'orthoquartzite et dolomie, intercalés</p>
High-Intermediate Sensitivity: Low or uncertain buffering capacity, mainly by cation exchange in clay and silt-sized detritus / Sensibilité élevée-intermédiaire: pouvoir tampon faible ou incertain, surtout par échange de cations dans les argiles et dans les détritiques de la grosseur des silt	<p>Orange box: Ultramafic rocks, serpentinite / Roches ultramafiques, serpentinite</p> <p>Light orange box: Non-calcareous siliceous sedimentary rocks / Roches sédimentaires siliceuses non calcaires</p> <p>Dark orange box: Gabbro, anorthosite suite, ultramafic and associated mafic intrusive rocks / Gabbro, série d'anorthosite, roches ultramafiques et roches intrusives mafiques associées</p> <p>Red-orange box: Basaltic and associated sedimentary and volcanic rocks / Roches basaltiques et roches sédimentaires et volcaniques associées</p>	<p>Orange box: S</p> <p>Light orange box: pb</p> <p>Dark orange box: b</p> <p>Red-orange box: vb</p>	<p>Orange box: p - shale, siltstone, sandstone / schiste argileux, siltstone, grès</p> <p>Light orange box: pb - black shale / schiste argileux noir</p> <p>Dark orange box: b - mafic, ultramafic, syenitic and alkalic intrusive rocks / roches intrusives mafiques, ultramafiques et anorthositiques</p> <p>Red-orange box: vb - mafic and felsic metavolcanic and associated metasedimentary rocks, undifferentiated / roches métavolcaniques mafiques et felsiques et roches métasédimentaires associées, non différenciés</p>
High Sensitivity: Low to insignificant buffering capacity, if any, mainly by cation exchange within clay and silt-sized detritus / Sensibilité élevée: pouvoir tampon faible à négligeable; là où il existe, surtout par échange de cations dans les argiles et les détritiques de la grosseur des silt	<p>Pink box: Syenitic and associated alkalic rocks / Roches syénitiques et roches alcalines associées</p> <p>Light pink box: Gneiss, granitic gneiss, mafic gneiss, paragneiss / Gneiss, gneiss granitique, gneiss mafique, paragneiss</p> <p>Dark pink box: Granitoid intrusive rocks and volcanic equivalents (e.g. rhyolite) / Roches intrusives granitoïdes et équivalents volcaniques (ex. rhyolite)</p> <p>Red box: Quartzose sandstone / Grès quartzeux</p>	<p>Pink box: k</p> <p>Light pink box: ng</p> <p>Dark pink box: g</p> <p>Red box: ss</p>	<p>Pink box: k - syenitic and alkalic intrusive rocks / roches intrusives syénitiques et alcalines</p> <p>Light pink box: ng - paragneiss, migmatite, and granitic gneiss / paragneiss, migmatite et gneiss granitique</p> <p>Dark pink box: g - granitic and gneissic rocks of plutonic origin / roches granitiques et gneiss d'origine plutonique</p> <p>Red box: ss - orthoquartzitic sandstone / grès à fragments d'orthoquartzite</p>
*In addition to compositional variations, buffering capacity of glacial and residual soils is locally proportional to thickness of deposits; the thinner the unconsolidated deposits, the less the buffering capacity, compositional factors being equal / *Outre les variations de la composition, le pouvoir tampon des sols glaciaires et résiduels est localement proportionné à l'épaisseur des dépôts meubles; les facteurs de composition étant les mêmes, le pouvoir diminue en fonction de l'amincissement de ces dépôts		#Glacial transport can distort this pattern significantly / #Le transport glaciaire peut beaucoup déformer ce modèle	

acidity) are also highly alkaline, with lime content that protects them from the ravages of acid rain.

The GSC study clearly shows the compositional links from bedrock to glacial drift to modern ecosystems, represented by the lakes. It suggests that a knowledge of glacial and bedrock geology alone could have been used to predict the

Figure 3 Acidity of lake waters of the Canadian Shield east of Georgian Bay, based on surface samples from 2200 lakes. Low acidity (high pH) corresponds with high calcium carbonate in drift on Fig. 4.

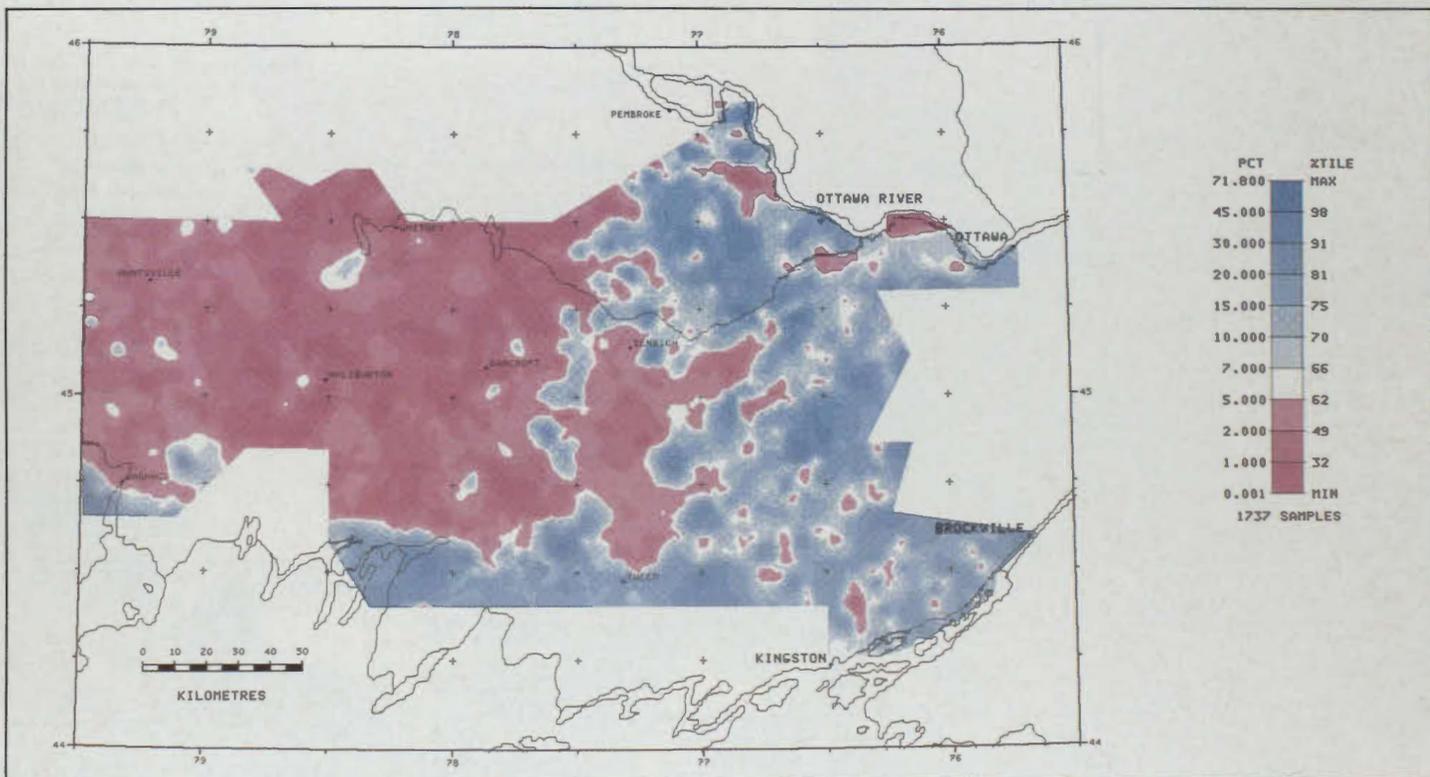


Figure 3 Acidité des eaux lacustres du bouclier canadien à l'est de la baie Georgienne, à partir d'échantillons prélevés à la surface de 2 200 lacs. La faible acidité (pH élevé) correspond à la présence de carbonates riches en calcium dans le drift de la fig. 4.

sont aussi très alcalins et possèdent une teneur en chaux qui les protège des ravages causés par les pluies acides.

La présente étude de la CGC, qui constitue une première, démontre clairement les liens constitutifs qui existent à partir de la roche en place jusqu'au drift en passant par les écosystèmes actuels, le tout représenté par les lacs. Ceci permet de croire qu'une connaissance de la géologie glaciaire et du substrat rocheux pourrait être employée pour prédire les caractéristiques chimiques des lacs et leur sensibilité probable aux pluies acides.

chemical characteristics of lakes and their probable sensitivity to acid rain.

Trace Element Distribution

Glacial sediment samples were analyzed also for a suite of trace and minor elements to map patterns of natural geochemical variation. Because soils, modern stream and lake sediments, and vegetation derive their nutrients and trace elements predominantly from glacial deposits, their chemistry will closely reflect that of the glacial sediments.

Metals may be released at an accelerated rate through leaching or cation exchange

if runoff and groundwater become more acidic. Increased leaching, leading to mobilization of metals, may have adverse effects on vegetation and eventually on the entire ecological system. Therefore, it is important to find out where various trace metals are abnormally enriched so we can monitor areas of greatest potential damage.

It is also important to establish natural patterns of metal enrichment or depletion to provide baseline data against which to measure the effects of airborne trace elements that may accompany acid precipitation. Abnormally high trace metal

Répartition des éléments à l'état de trace

Des échantillons de sédiments glaciaires ont aussi été analysés afin de déterminer une séquence d'éléments traceurs et d'éléments mineurs pour représenter cartographiquement des configurations de variation géochimique naturelle. Puisque les sols, les sédiments fluvio-lacustres actuels, ainsi que la végétation tirent leurs éléments nutritifs et leurs éléments traceurs en majeure partie dans les dépôts glaciaires, leur chimie devrait refléter étroitement celle des sédiments glaciaires.

Certains métaux peuvent être libérés à une cadence accélérée par le biais de la lixiviation ou des échanges cationiques, pourvu que le ruissellement et les eaux souterraines deviennent plus acides. Une lixiviation accrue, conduisant à la mobilisation des métaux, peut entraîner des effets déplorables pour la végétation et éventuellement pour l'ensemble de l'écosystème. Par conséquent, il est important de déterminer l'emplacement

des divers métaux à l'état de trace qui sont anormalement enrichis de manière à pouvoir surveiller les zones les plus exposées.

Il est aussi important d'établir des configurations naturelles d'enrichissement ou de déperdition des métaux pour obtenir des données de base permettant de mesurer les effets des éléments traceurs aéroportés susceptibles d'accompagner les précipitations acides. Des niveaux anormalement élevés de métaux à l'état de trace dans la flore, la faune ou dans les sols peuvent être naturels, particulièrement dans les terrains géologiquement complexes comme ceux du bouclier canadien. L'apport anthropique en métaux traceurs ne peut être évalué correctement sans tenir compte des variations géochimiques locales qui sont entièrement naturelles.

Certaines concentrations d'arsenic (fig. 5) illustrent le degré de variation géochimique naturelle auquel on peut

levels in vegetation, animals or soils may be natural, particularly in geologically complex terrain like the Canadian Shield. The anthropogenic contribution of trace metals cannot be evaluated properly without reference to local, entirely natural geochemical variations.

Arsenic concentrations (Fig. 5) illustrate how much natural geochemical variation may be expected in sediments produced by glaciation of a geologically complex terrain. Glacial sediments in the west half of the eastern Ontario study area contain little arsenic, most concentrations being near or below two parts per million (ppm). A major anomaly in the east-central part of the study area is characterized by sediments with background arsenic concentrations of 20 ppm or more, with local concentrations higher than 400 ppm.

The arsenic anomaly lies over a belt of rocks characterized by minor accumulations of gold. This is the original Ontario gold-mining belt and numerous small gold mines operated in the area covered by the anomaly during the latter part of the last century. In this gold belt, as in many other gold mining regions, the ore is arsenical, and arsenic is often used

as a geochemical 'pathfinder' for gold. The area naturally 'contaminated' by arsenic has probably been enlarged, principally to the south and southwest, by glacial dispersal of arsenic-rich bedrock debris.

We do not know to what extent plants or animals have assimilated these naturally high amounts of arsenic or how vegetation patterns have been affected by the anomalies. We do know that modern organic sediments beneath lakes in the area of arsenic-enriched sediment contain high arsenic concentrations. Using GSC geochemical maps as a guide, Health and Welfare Canada are presently trying to determine if well waters in the arsenic-enriched area have abnormally high arsenic concentrations.

Conclusion

Where glaciers have not transported buffering components, the clay and lime-poor sediment of the Canadian Shield and Appalachian Mountains has little resistance to the effects of acid rain. In many regions covered by calcareous or clay-rich glacial sediments, however, ground and surface waters are much

better buffered against acid than soils formed from decomposition of the underlying bedrock. Therefore, maps depicting the distribution and geochemistry of surficial sediments are as important as bedrock maps in assessing the effect of acid rain.

Natural concentrations of trace and minor elements can vary greatly in glacial deposits and in postglacial soils and sediments derived from them. Through various chemical reactions, these elements may be released by excessively acidic precipitation from their host minerals, many of which are extremely unstable in the weathering environment. Although we do not know the effects of mobilization of heavy metals on ecological systems, we think they would be most severe where the elements are most enriched.

Only armed with information on the natural geological variability of the terrain of eastern Canada can researchers evaluate the effects of acid rain in a credible way and begin to predict just how various levels of acid precipitation may affect specific areas in the future. We must first establish what the natural

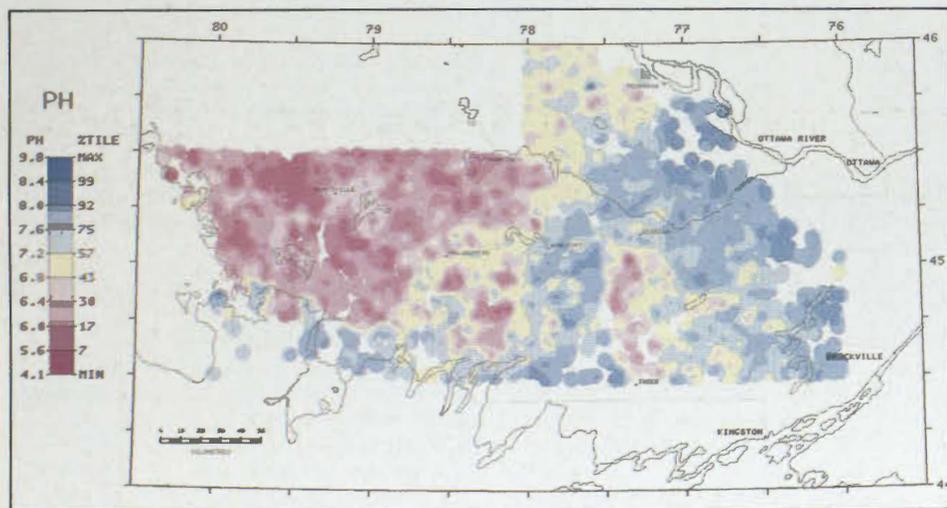


Figure 4 Concentration of calcium carbonate (equivalent) in $< 64 \mu\text{m}</math> fraction of till and associated sediments of Frontenac Arch, Eastern Ontario. Based on analyses of approximately 1500 samples.$

Figure 4 Concentration du carbonate de calcium (équivalent) dans la fraction $< 64 \mu\text{m}</math> du till et dans les sédiments connexes de l'arche de Frontenac (Est ontarien). Basé sur l'analyse d'environ 1 500 prélèvements.$

s'attendre dans les sédiments produits par l'englacement d'un terrain géologiquement complexe. Les sédiments glaciaires rencontrés dans la moitié ouest de la zone observée dans l'Est ontarien renferment peu d'arsenic, la plupart des concentrations se situant à près de deux parties par million (ppm) ou moins. Dans la partie du centre-est, une grosse anomalie de la zone observée est caractérisée par des sédiments possédant des antécédents de concentration en arsenic de 20 ppm ou plus avec concentrations locales supérieures à 400 ppm.

L'anomalie d'arsenic se trouve au-dessus d'une zone de roches caractérisée par de petites accumulations d'or. Il s'agit de la zone aurifère originale de l'Ontario et, au cours de la dernière partie du siècle dernier, de nombreuses petites mines

d'or ont été exploitées dans cette zone recouverte par l'anomalie. Dans cette zone aurifère, comme dans de nombreuses autres régions semblables, le minerai est arsenical et l'arsenic est souvent employé comme indice géochimique révélant la présence d'or. La zone naturellement « contaminée » par l'arsenic a probablement été agrandie, principalement vers le sud et le sud-ouest, par la dispersion glaciaire des débris de substrat riches en arsenic.

Nous ignorons à quel point les plantes ou les animaux ont assimilé ces quantités d'arsenic naturellement élevées ou comment certaines structures floristiques peuvent avoir été affectées par les anomalies. Nous savons que les sédiments organiques actuels sous les lacs de la zone sédimentaire enrichie d'arsenic renferment de fortes concentrations d'arsenic. En se

servant de cartes géochimiques de la CGC comme guide, Santé et Bien-être Canada essaie actuellement de déterminer si les eaux de puits dans la zone enrichie d'arsenic connaît des concentrations d'arsenic anormalement élevées.

Conclusion

Aux endroits où les glaciers n'ont pas transporté de composants possédant un pouvoir tampon, les sédiments argileux et pauvres en chaux du bouclier canadien et des Appalaches offrent peu de résistance aux effets des pluies acides. Dans de nombreuses régions recouvertes de sédiments glaciaires calcaires, argileux ou riches en argile, les eaux souterraines ou de surface sont toutefois beaucoup mieux tamponnées contre les acides que si les sols avaient été formés à partir de la décomposition du substrat rocheux. Par conséquent, les cartes décrivant la répartition et la géochimie des sédiments superficiels sont aussi importantes que les cartes de la roche en place dans l'évaluation des effets des pluies acides.

Les concentrations naturelles d'éléments traceurs et mineures peuvent varier

chemical 'status' of our lakes and forests is or should be before we can determine how much damage has been done and how much will be done if emissions causing acid precipitation are not lowered.

Varying geological conditions in eastern Canada lead to a variety of natural chemical characteristics of our lakes, soils and forests. Acid rain research at the GSC aims to provide geological techniques appropriate for inferring which lakes are becoming more acid and which might be at risk in future. With more than 10 000 000 lakes in Canada, such a goal clearly can not be achieved by sampling individual lakes; we must use geology to predict with some degree of confidence the probable status and response of lakes and forests, soils and other resources to acid loading. Likewise, without a clear

understanding of the relationship of geology to present and future effects of acid rain, we risk proposing 'fixes' that may actually exacerbate the damage. We have already seen this in high smoke stacks built to introduce pollution higher into the atmosphere. They now export formerly local environmental damage to the countryside.

W. W. Shilts and I. M. Kettles are research scientists in the GSC's Terrain Sciences Division.

GSC Contribution 18089

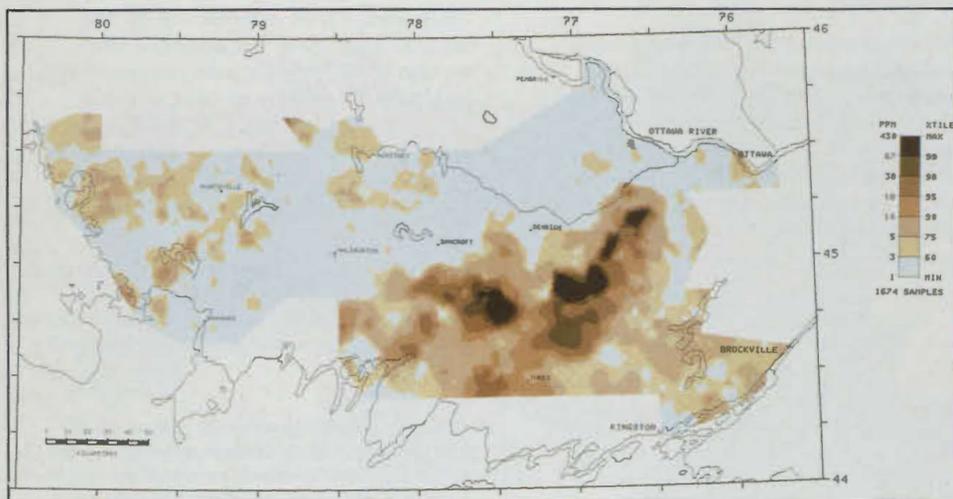


Figure 5 Concentration of arsenic in $< 2 \mu\text{m}$ fraction of 1700 samples of till and associated sediments from Frontenac Arch.

Figure 5 Concentration d'arsenic dans la fraction $< 2 \mu\text{m}$ de 1 700 prélèvements de till et de sédiments assimilables extraits de l'arche de Frontenac.

considérablement dans les dépôts glaciaires ainsi que dans les sols et les sédiments postglaciaires qui en découlent. À la suite de diverses réactions chimiques, les précipitations excessivement acides peuvent contribuer à libérer ces éléments de leurs minéraux encaissants dont un grand nombre sont extrêmement instables dans le milieu d'altération. Bien que nous ne connaissions pas les effets de la mobilisation des métaux lourds sur les écosystèmes, nous pensons que ces effets sont plus graves aux endroits où les éléments sont les plus enrichis.

Armés seulement d'informations sur la variabilité géologique naturelle des terrains de l'Est canadien, les chercheurs sont-ils en mesure d'évaluer les effets des pluies acides de façon assez crédible pour prédire comment les divers niveaux de précipitation acide pourront affecter des zones données dans l'avenir? Avant que nous puissions déterminer à quel point les zones sont et seront atteintes si les émissions à l'origine des précipitations acides ne sont pas réduites, nous devons déterminer l'état actuel et l'état souhaitable de la situation chimique naturelle de nos lacs et de nos forêts.

Diverses conditions géologiques dans l'Est canadien conduisent à une variété de caractéristiques chimiques naturelles de nos lacs, de nos sols et de nos forêts. Les recherches menées à la CGC sur les pluies acides ont pour but de fournir des techniques géologiques appropriées pour déduire quels sont les lacs qui deviennent de plus en plus acides et quels sont ceux qui pourraient être exposés dans l'avenir. Avec plus de 10 millions de lacs au Canada, un tel but ne pourra sûrement pas être atteint par l'échantillonnage de chacun des lacs; nous devons donc nous servir des connaissances géologiques pour prédire avec un certain degré de confiance l'état actuel et la réaction probable des lacs, des forêts, des sols et des autres ressources à charge acide.

De la même façon, sans une bonne connaissance des liens entre la géologie et les effets actuels ou futurs des pluies acides, nous risquons de proposer des « solutions » qui ne feraient en réalité qu'aggraver les dommages. Nous avons déjà vu ceci se produire dans le cas des cheminées géantes qui visaient à rejeter la pollution plus haut dans l'atmosphère, de manière à « exporter » dans les campagnes environnantes des dommages environnementaux auparavant localisés.

W.W. Shilts et I.M. Kettles sont des chercheurs au service de la Division de la science des terrains à la CGC.

Contribution de la CGC 18089

Scientists Monitor Climate and Pollution from Ice Caps and Glaciers

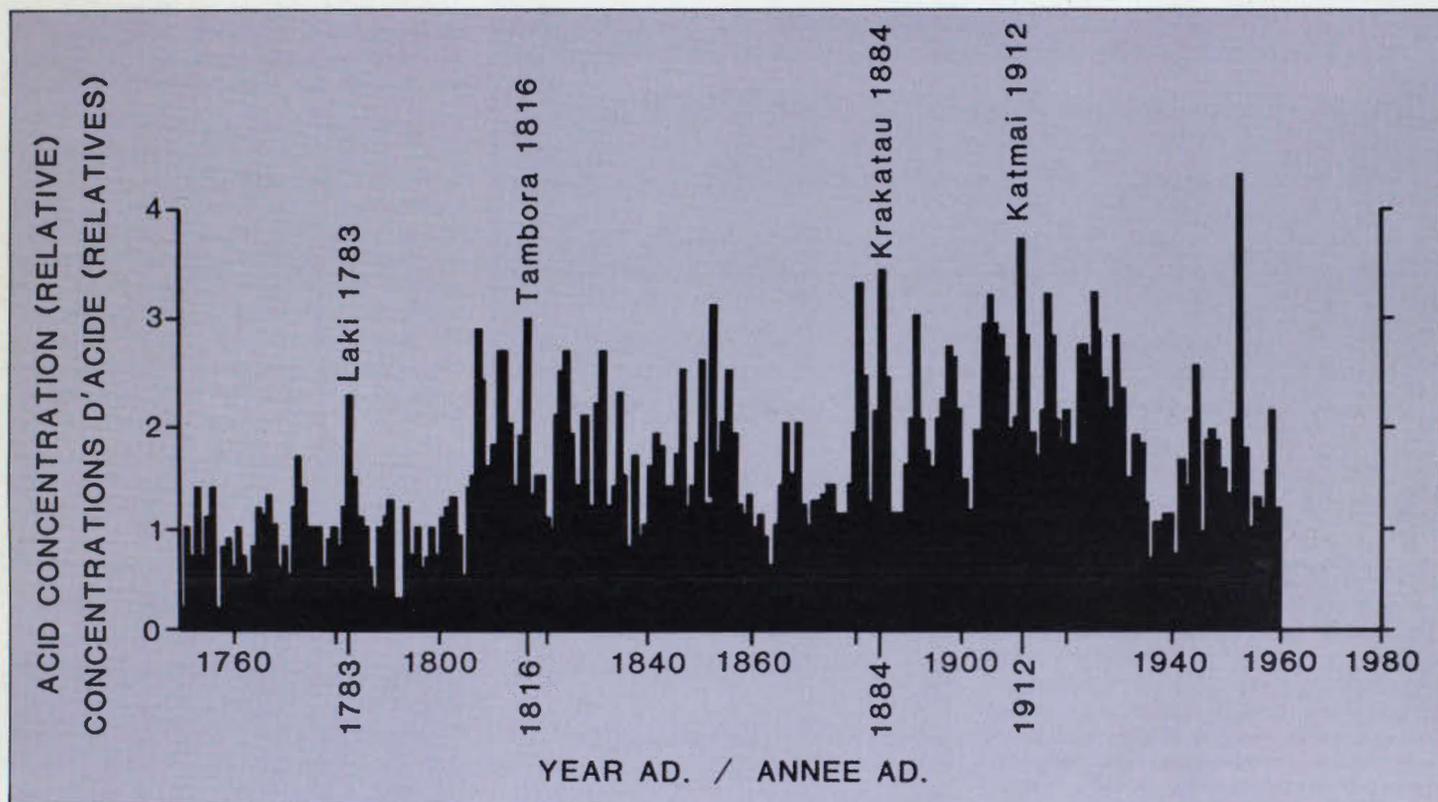
by Roy Koerner, Ram Dubey and Murti Parnandi

Canada contains the largest area of ice caps and glaciers outside Greenland and Antarctica. Yet in Canada, weather permitting, you can be on an ice cap one day and at home the next. The expertise that we have in the GSC's Polar Continental Shelf Project, in the aircraft companies that they charter, and in the

equipment personnel at Technical Field Support Services cut field preparation and travel time to a minimum. In Antarctica, a three-week field season can stretch to three months because of travel time and less than perfect logistics.

We are studying ice caps and glaciers to see how humankind is polluting the atmosphere and how the climate is changing.

Figure 1 Record of solid electrical conductivity from the Agassiz Ice Cap core, Ellesmere Island. Essentially a record of volcanic activity, it shows acid concentrations in the cores. Each bar represents average electrical conductivity for one year. Events named show very high peak values within an annual layer. Katmai is in Alaska, Tambora and Krakatau in Indonesia and Laki in Iceland.



Les glaciers et les calottes glaciaires renseignent les scientifiques sur la pollution et l'évolution du climat

par Roy Koerner, Ram Dubey et Murti Parnandi

C'est au Canada que se trouve la plus vaste superficie de glaciers et de calottes glaciaires à l'extérieur du Groenland et de l'Antarctique. Au Canada, lorsque les conditions météorologiques le permettent, il est possible de se promener sur une calotte glaciaire aujourd'hui... et d'être à la maison le lendemain! Le savoir-faire des employés de l'Étude du plateau continental polaire de la CGC, des compagnies aériennes, dont les appareils

sont affrétés, et du personnel des Services de soutien technique sur le terrain réduisent au minimum le temps consacré aux préparatifs et aux déplacements. Dans l'Antarctique, une campagne de trois semaines peut finir par durer jusqu'à trois mois en raison des longs déplacements et d'une logistique qui laisse parfois à désirer.

Le but de notre étude des glaciers et des calottes glaciaires est de voir comment l'homme pollue l'atmosphère tout en observant l'évolution du climat.

Figure 1 — Diagramme de la conductivité électrique de la matière solide, tracé à partir d'une carotte prélevée de la calotte glaciaire Agassiz, dans l'île d'Ellesmere. Essentially un reflet de l'activité volcanique, le diagramme montre la concentration d'acide dans les carottes. Chaque colonne donne la moyenne annuelle de la conductivité électrique. Les événements nommés en particulier sont associés à de très fortes concentrations dans une couche annuelle. Katmai est en Alaska, Tambora et Krakatau en Indonésie et Laki en Islande.

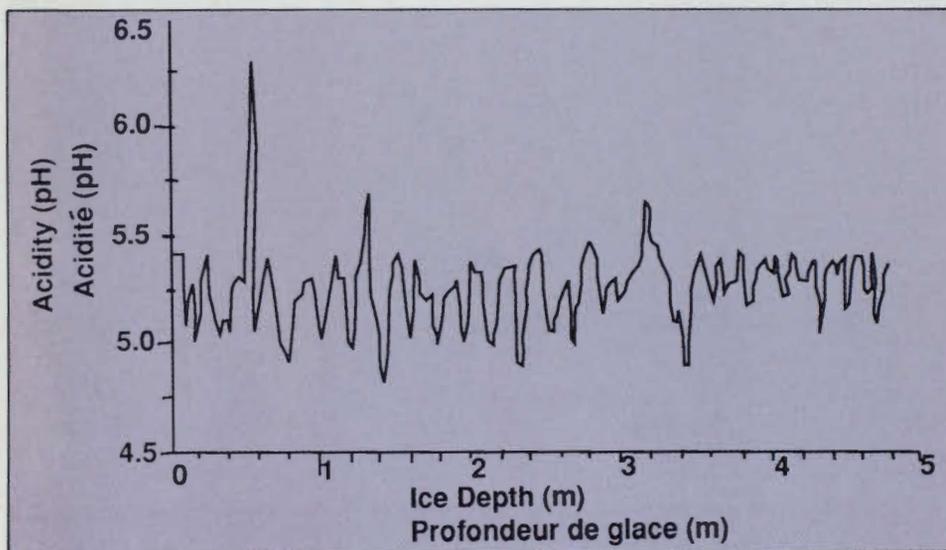
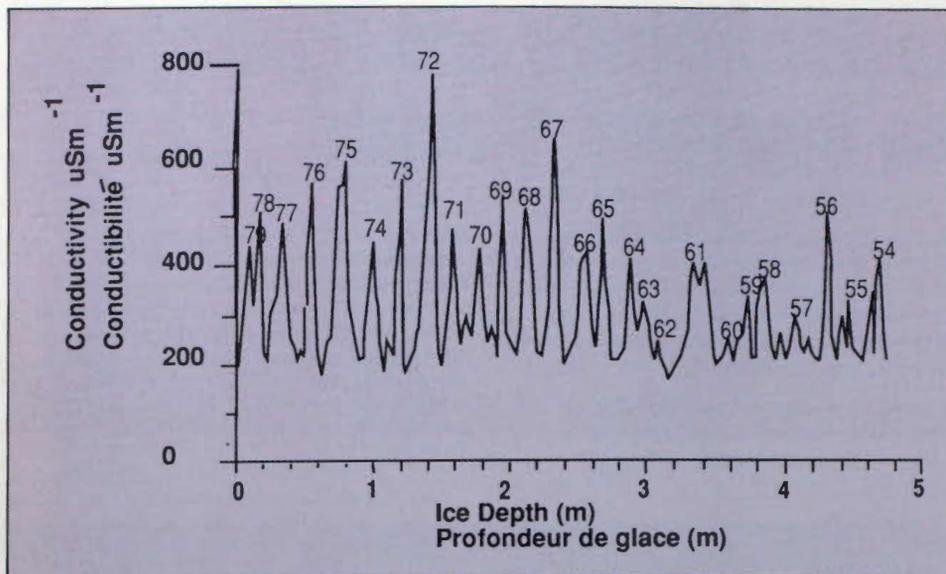


Figure 2 — Variation saisonnière de la concentration totale d'ions et de l'acidité (pH) sur la calotte glaciaire Agassiz. La conductivité électrique des échantillons de neige fondue est un indice de la concentration totale d'ions. Les sommets numérotés correspondent à la couche de neige déposée au printemps.

La composition chimique de la neige et la pollution

Les aérosols sont des particules microscopiques qui restent dans l'air pendant des heures, voire des jours. Ils sont de source naturelle (les volcans et la poussière emportée par le vent) ou anthropogénétique (l'activité industrielle). La neige ou la pluie interceptent les aérosols et les déposent sur la surface de la Terre, parfois à plusieurs centaines de kilomètres de leur point d'origine.

Les précipitations qui tombent sur les calottes glaciaires du Grand Nord sont presque toutes sous forme de neige. Ainsi, la neige accumulée au fil des ans témoigne non seulement de la quantité de neige tombée depuis des millénaires, mais

aussi des aérosols qui se sont déposés avec la neige.

Nous pouvons mesurer les propriétés des aérosols déposés grâce à plusieurs appareils perfectionnés, comme le compteur de Coulter, le chromatographe à résine échangeuse d'ions et le spectrophotomètre d'absorption atomique, qui servent respectivement à déterminer la concentration en microparticules insolubles, en ions négatifs et en ions positifs. Ces quantités se mesurent en parties par milliard : un tel degré de précision s'impose car la concentration totale d'impuretés dans la neige n'est que d'une à deux parties par million. Toutefois, bien qu'on ait noté une augmentation constante de la quantité de polluants dans les précipitations du Grand Nord, la neige reste aussi propre que de l'eau distillée.

Certains des aérosols sont des gouttelettes microscopiques d'acide, habituellement de l'acide sulfurique (H_2SO_4). Avant la révolution industrielle, il y a 200 ans, ce genre d'aérosol était toujours associé aux

Figure 2 Seasonal trends of total ions and acidity (pH) on the Agassiz Ice Cap. Electrolytic conductivity of the melted snow sample measures total ion concentration. Numbered peaks represent spring snow layers.

Snow chemistry and pollution

Aerosols are microscopic particles that remain airborne for hours or even days. They are produced naturally, by volcanoes and wind-blown dust, or anthropogenically, by industrial activity. Snow or rain washes aerosols out of the air and deposits them on the earth's surface, sometimes many hundreds of kilometres from where they originated.

On the ice caps of the High Arctic, almost all precipitation falls as snow. Accumulated annual snowfall forms a record not only of the snow that has fallen for thousands of years, but also of the aerosols that fell with it.

Using sophisticated equipment, such as a Coulter Counter for concentration of insoluble microparticles, an ion chromatograph for negative ions and an atomic absorption spectrophotometer for positive ions, we can measure all these deposited aerosols at the level of parts per billion. Such accuracy is essential because the total impurity content of the snow is only one or two parts per million. Although pollutant concentrations in High Arctic precipitation have been steadily increasing, the snow is still as clean as distilled water.

Some of the aerosols are microscopic acid droplets, usually sulphuric acid

Deep drilling operation on top of the Agassiz Ice Cap, 1700 m above sea level.



Travaux de forage en profondeur au sommet de la calotte glaciaire Agassiz, située à 1700 m au-dessus du niveau de la mer.

(H₂SO₄). Before the industrial revolution two hundred years ago, this kind of aerosol was always associated with volcanic eruptions (Fig. 1). Most large H₂SO₄ concentrations in Arctic ice derive from Icelandic eruptions: major eruptions from farther away are not as obvious. The famous eruptions of Krakatau and Tambora in Indonesia, however, are easily detected by simple measurements and help to date the ice cores.

Ions and microparticles may show variations of concentration in the snow both seasonally and annually (Fig. 2). Sodium (Na) and chlorides (Cl) peak at the end of winter, and are closely followed by sulphates (SO₄) and microparticles. Nitrates (NO₂) peak last, in summer. We are investigating the cause for the different timing. The spring season is the 'dirtiest' and the arctic haze, noticed for years by pilots flying in the North, is at its worst then. The haze is probably mainly due to microscopic droplets of H₂SO₄ and HNO₃, mostly a byproduct of industry. The Na and Cl are usually of marine origin, and the microparticles of continental origin (see sidebar).

A few years ago, a Glaciology Section study showed that acid levels in the snow have been increasing since the 1940s

(Fig. 3). Subsequent studies by others have indicated that both nitrates and sulphates form the bulk of this increase, the beginning of which has been traced back as far as the nineteenth century. If we continue to monitor sulphate and nitrate concentrations in the snow, we should be able to provide a record of hemispheric pollution trends over the next several years.

Ions and microparticles in the snow have shown seasonal variations for thousands of years. By measuring these variations in ice cores at depth, we can develop a time

scale back to about 7000 years ago. Beyond that, our time scale becomes increasingly inaccurate and is based largely on comparisons with marine records and ice cores from Greenland and Antarctica.

Our cores go back to the last interglacial period 100 000 years ago. What is interesting in the present context is that, during parts of the last ice age, the atmosphere was much dirtier than it is

Figure 3 Acid trends on Agassiz Ice Cap and SO₂ emissions in Europe, 1930 to present.

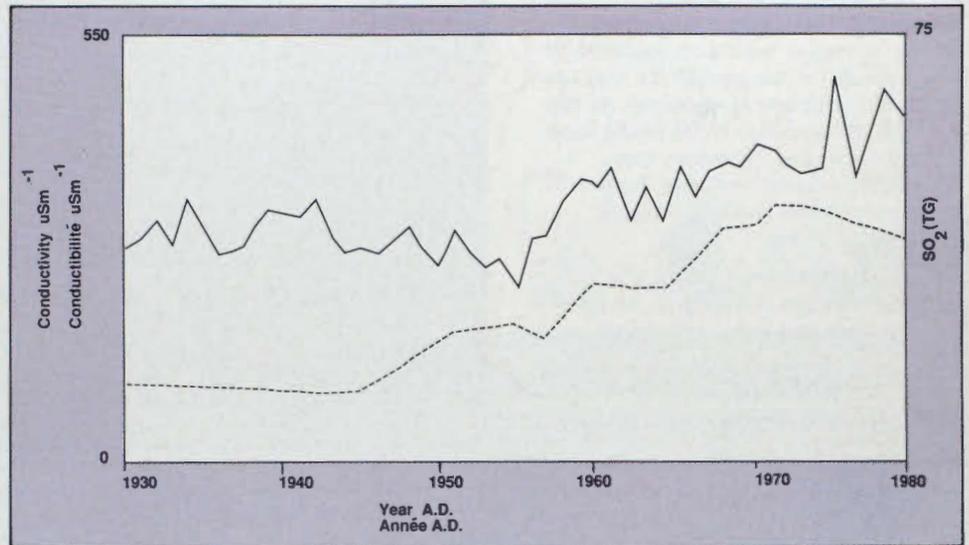


Figure 4 Microparticle concentrations in ice from Devon Ice Cap, 100 000 years ago to present.

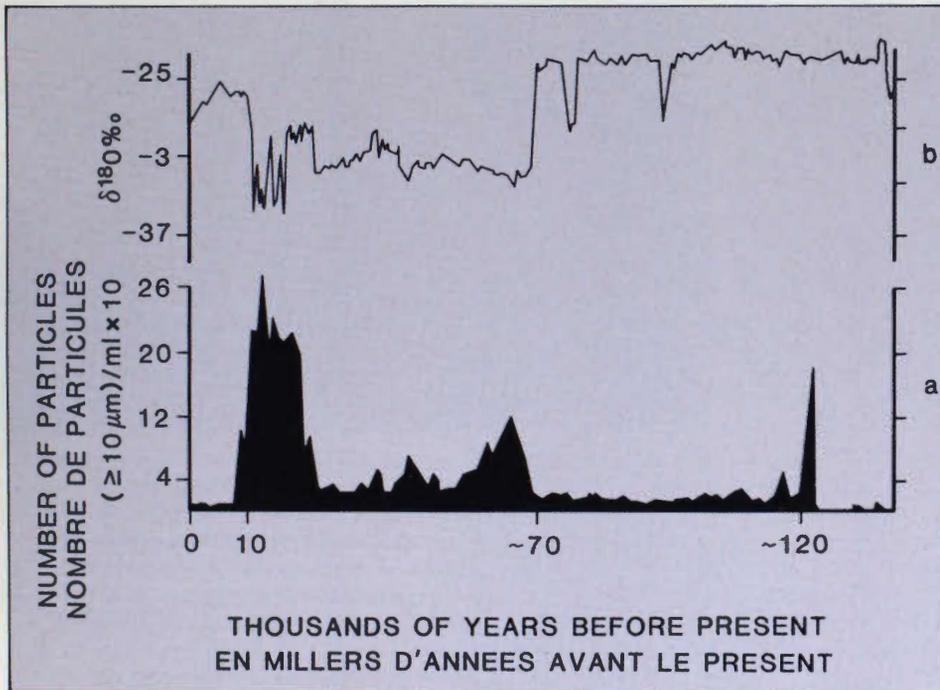


Figure 4 — Variation au cours des 100 000 dernières années de la concentration de microparticules dans de la glace échantillonnée à la calotte glaciaire Devon.

éruptions volcaniques (fig. 1). La plupart des concentrations élevées que l'on a relevées dans les glaces arctiques sont le fait d'éruptions en Islande; l'incidence d'éruptions majeures plus éloignées n'est pas aussi évidente. Toutefois, les célèbres éruptions de Krakatau et de Tambora, en Indonésie, peuvent être distinguées

Figure 3 — Variation de l'acidité sur la calotte glaciaire Agassiz et des émissions de SO₂ en Europe, de 1930 à aujourd'hui.

facilement à l'aide d'analyses simples et servent ainsi à dater certaines couches au sein des carottes de glace.

La concentration d'ions et de microparticules dans la neige semble varier à la fois de façon saisonnière et annuelle (fig. 2). Le sodium (Na) et les chlorures (Cl) atteignent un maximum à la fin de l'hiver; peu de temps après, la même tendance se manifeste dans le cas des sulfates (SO₄) et des microparticules. Viennent enfin les nitrates, dont la concentration atteint un maximum durant l'été. Nous nous sommes interrogés sur les raisons de cette variation temporelle. Nous savons que le printemps est la saison la plus « sale » dans ces régions et que la brume arctique, connue depuis longtemps des pilotes qui travaillent dans le Nord, est alors pire qu'aux autres saisons. Cette brume est probablement causée surtout par des gouttelettes microscopiques de H₂SO₄ et de HNO₃ (acide nitrique) qui sont principalement des sous-produits de l'activité industrielle. Le Na et les Cl sont habituellement d'origine marine et les microparticules, d'origine continentale (voir l'encadré).

Il y a quelques années, une étude menée par la Section de glaciologie a montré

now (Fig. 4). Both microparticle and ion concentrations are several times higher in ice deposited late in the last ice age. This is mainly due to enormous pressure-temperature gradients that developed between low and high latitudes because of the Laurentide Ice Sheet, which then covered most of Canada. The resultant weather patterns included strong south-to-north winds carrying aerosols.

Climate

Glaciers and ice caps exist because at some time in the past the amount of snow that fell during winter was greater than the amount that melted in summer. They persist as long as their accumulation of snow equals the amount of ice and snow that melts over any long period. At the moment, they appear to be losing mass slightly each year. However, their enormous 'reserves' will tide them over the present warm spell for several hundreds of years.

We have determined the balance of four different ice caps for the past 10 to 30 years by measuring the amount of snow

East of Agassiz Ice Cap, northern Ellesmere Island.



Partie est de la calotte glaciaire Agassiz, au nord de l'île d'Ellesmere.

que l'acidité de la neige est à la hausse depuis les années 1940 (fig. 3). Des études effectuées ultérieurement par d'autres chercheurs ont révélé que cette augmentation, qui se serait amorcée dès le siècle dernier, était attribuable à la fois aux nitrates et aux sulfates. Si nous continuons de mesurer la quantité de nitrates et de sulfates dans la neige, nous devrions être en mesure de décrire l'évolution de la pollution dans l'hémisphère pour plusieurs années à venir.

Source and Transport of Pollutants, Natural and Anthropogenic.

Some pollutants have both a natural and anthropogenic origin. For example, volcanoes and industry both emit CO_2 , SO_2 and NO_x . Similarly, radioisotopes can come from natural emissions, bomb tests and nuclear power plants. Before this century, natural emissions dominated; now anthropogenic sources are in the lead and are beginning to affect profoundly our climate and way of life.

Our work on several ice caps in the Canadian Arctic Islands has discovered a very pronounced radioisotope peak in snow deposited in July, 1963. This peak represents fallout from the Soviet Union's 1962 bomb tests. Antarctic snows show radioisotope peaks from the American and British tests of the 1950s.

Acid precipitation on Canadian ice caps has appeared in increasing concentrations in the snow since at least the 1930s. In Antarctica and Greenland, CO_2 (as measured in air trapped by the snow) has been increasing since the nineteenth century. Melting on all our ice caps prohibits accurate measurements of CO_2 trends there. We have found no trends in the dust concentrations in this century's snow.

However, the atmosphere carried enormous dust loads 18 000 years ago during the last ice age. Careful study of pollen concentrations (which reach even the North Pole) show interesting changes recently, such as a decrease in elm pollen (Dutch elm disease?) but an increase in ragweed pollen, probably due to clearing of the natural vegetation for cultivation.

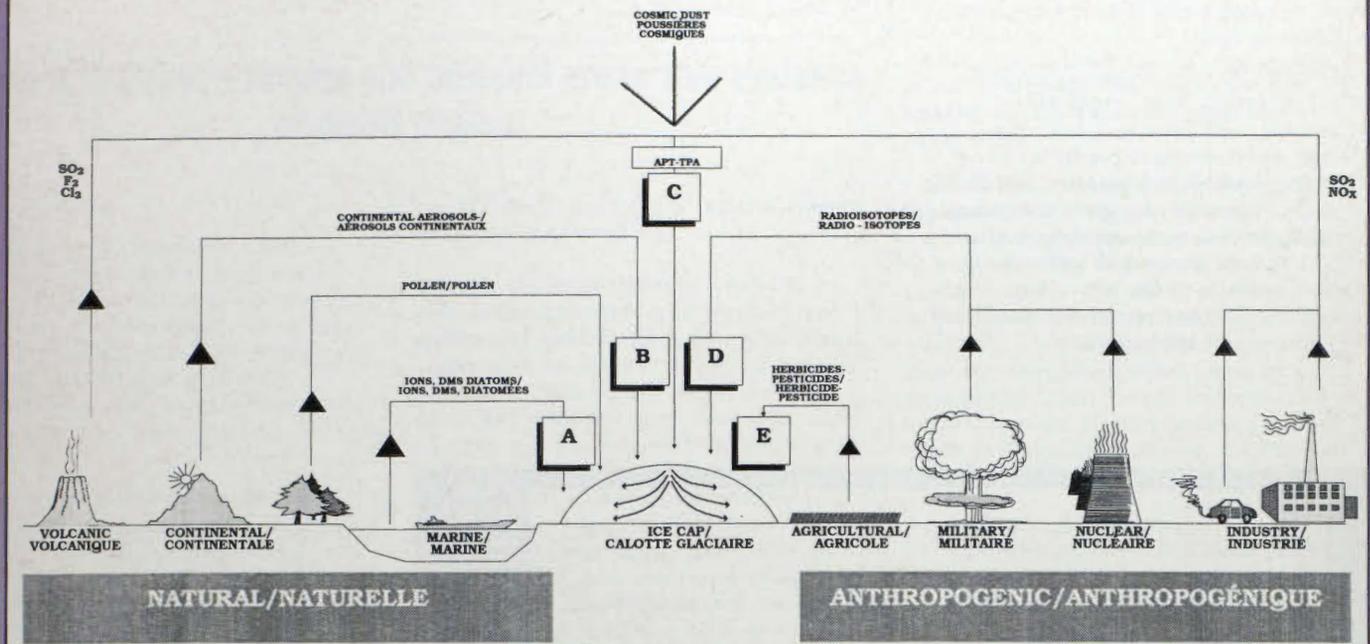


Les ions et les microparticules contenus dans la neige connaissent des variations saisonnières depuis des millénaires. Ainsi, en mesurant ces variations dans des carottes de glace prélevées en profondeur, nous pouvons établir une échelle de temps qui remonte à environ 7 000 ans. Notre échelle de temps devient de plus en plus inexacte au-delà de ce nombre, car elle est principalement fondée sur le résultat des comparaisons entre des données marines et des carottes de glace prélevées au Groënland et en Antarctique.

Nos carottes remontent jusqu'à la dernière période interglaciaire, il y a 100 000 ans. Dans le contexte actuel, il est intéressant de souligner qu'à certains moments de la

dernière époque glaciaire, l'atmosphère était beaucoup plus sale qu'elle ne l'est aujourd'hui (fig. 4). En effet, la glace formée à la fin de la dernière période glaciaire renferme beaucoup plus de microparticules et d'ions que la glace qui se forme actuellement. Ce phénomène s'explique surtout par la présence de gradients de pression et de température très prononcés qui se sont formés entre les basses et les hautes latitudes au moment où l'inlandsis Laurentidien recouvrait la majeure partie du Canada. Les conditions météorologiques qui se sont alors développées comprenaient des vents forts qui ont emporté des aérosols du sud au nord.

The History of Natural and Anthropogenic Pollution is Preserved in the Ice Cap L'histoire des polluants naturels et anthropogéniques est préservée dans les calottes glaciaires



Poles are measured each year to determine snow accumulation.

Les perches sont mesurées chaque année pour déterminer l'accumulation de neige.

Le climat

Les glaciers et les calottes glaciaires existent parce que, à un certain moment dans le passé, il est tombé plus de neige en hiver qu'il n'en a fondu en été. Ces accumulations persistent tant que la quantité de neige ajoutée équivaut à la quantité de neige et de glace qui fond sur une longue période quelconque. Il semble que la masse des glaciers et des calottes glaciaires diminue actuellement un peu à chaque année. Toutefois, les « réserves » énormes dont ces accumulations disposent leur permettront de subsister pendant des siècles, malgré les températures plus chaudes que nous connaissons actuellement.

Nous avons établi le bilan de quatre calottes glaciaires différentes pour les derniers 10 à 30 ans en mesurant la quantité de neige qui s'accumule et la quantité de glace qui fond à chaque année. En plus de déterminer si les calottes glaciaires s'accroissent ou diminuent, nous pourrions également savoir si l'intensification de l'effet de serre par le CO₂ provoquera une augmentation des chutes de neige au cours des hivers plus doux ou si la chaleur estivale, plus intense, fera fondre plus de glace.

Source et transport des polluants naturels et anthropogéniques

Certains polluants proviennent à la fois de sources naturelles et anthropogéniques. Par exemple, les volcans et les industries produisent tous deux du CO₂, du SO₂ et des NO_x. De la même façon, les isotopes radioactifs peuvent provenir de sources naturelles, d'essais nucléaires ou de centrales nucléaires. Avant ce siècle, les polluants étaient surtout de sources naturelles alors que maintenant les sources anthropogéniques dominent et commencent à influencer considérablement sur notre climat et notre manière de vivre.

Nos travaux sur plusieurs calottes glaciaires dans les îles de l'Arctique canadien ont révélé que la neige accumulée en juillet 1963 renfermait une quantité de radio-isotopes de beaucoup supérieure à la normale : ce sommet représente les retombées des essais nucléaires effectués en 1962 par l'U.R.S.S. En Antarctique, on a distingué des sommets dans la concentration de radio-isotopes qui sont le résultat des essais menés dans les années 1950 par les États-Unis et la Grande-Bretagne.

Depuis les années 1930 au moins, les précipitations acides se manifestent en concentrations croissantes dans la neige des calottes glaciaires du Canada. En Antarctique et au Groenland, le niveau de CO₂, mesuré dans l'air retenu par la neige, est à la hausse depuis le 19^e siècle. Au Canada, il nous est impossible de mesurer exactement la concentration de CO₂ dans les calottes glaciaires, car elles se liquéfient toutes partiellement au moment d'une période de fonte. Nous n'avons noté aucune tendance dans la quantité de poussière contenue dans la neige qui s'est accumulée au cours du 20^e siècle.

Toutefois, une quantité énorme de poussière se trouvait dans l'atmosphère il y a 18 000 ans (au cours de la dernière période glaciaire). Une étude soignée de la concentration de pollen (lequel atteint même le Pôle Nord) montre que des changements intéressants sont survenus récemment : entre autres, on a remarqué une baisse de la quantité de pollen d'orme, qui peut être expliquée par la maladie hollandaise de l'orme, et une plus grande quantité de pollen d'herbe à poux, probablement attribuable au fait qu'une grande partie de la végétation naturelle a été détruite pour faire place à l'agriculture.

that accumulated and the amount of ice that melted each year. Besides calculating whether the ice caps are gaining or losing ice, we will also be able to tell if warmer winters, predicted from the CO₂-enhanced 'greenhouse effect', will bring more snow or if increased summer heat will cause more ice to melt.

We might call the ice caps greenhouse effect detectors. They could prove especially good detectors, because greenhouse warming is predicted to be most pronounced at high latitudes. So far, we have measured no significant changes in either snow accumulation or ice melt (Fig. 5). In fact, the last 25 years are a marked contrast to the heavy melt years that characterized the warm period from the 1930s to the early 1960s.

Dr. Roy Koerner, Dr. Ram Dubey and Murti Parnandi are scientific researchers in the Glaciology Section of the GSC's Terrain Sciences Division.

GSC Contribution 18489

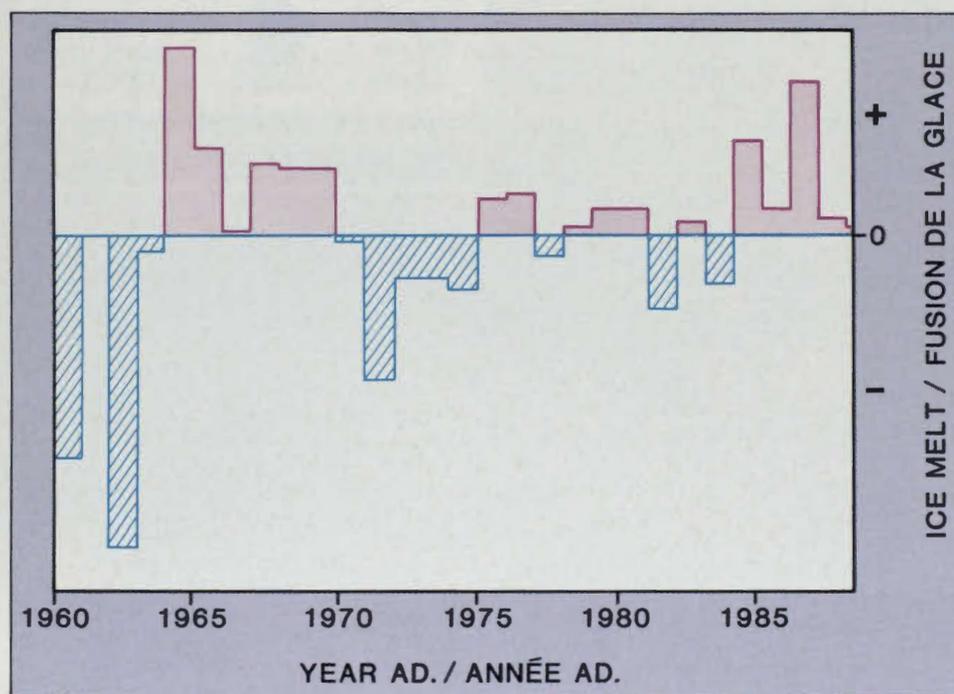


Figure 5 Combined normalized balance for Melville south and Meighen ice caps. Years with positive mass balance (mass gain) shown red; negative balance (loss), blue.

Figure 5 – Bilan normalisé combiné des calottes glaciaires de Melville Sud et de Meighen. Les années où le bilan glaciaire est positif (gain de masse) sont en rouge et les années où le bilan est négatif (perte de masse) sont en bleu.

Nous pourrions dire que les calottes glaciaires sont des « détecteurs » de l'effet de serre : elles pourraient même s'avérer particulièrement efficaces à ce titre puisqu'on prévoit que c'est dans les hautes latitudes que le réchauffement causé par l'effet de serre se fera le plus sentir. Jusqu'à aujourd'hui, nos résultats démontrent que ni l'accumulation de neige ni la fonte de glace n'ont varié de manière significative (fig. 5). En fait, on note un net contraste entre les derniers 25 ans et la période entre les années 1930 et 1960 où les températures étaient plus chaudes et l'ablation particulièrement intense.

MM. Roy Koerner, Ram Dubey et Murti Parnandi sont des chercheurs scientifiques à la Section de la glaciologie, Division de la science des terrains, Commission géologique du Canada.

Contribution de la CGC 18489

Vegetation Changes over 12 000 Years

Changes in Eastern Ontario and adjacent areas give evidence of global change

by T.W. Anderson

The natural landscape seems to us a stable world because it changes little, if at all, during our lifetime. But the landscapes we live in result from a long history of dynamic interplay between botanical, climatic and geological processes upon which human beings have superimposed their imprint in the last 150 to 200 years.

Records of this interplay, preserved in natural archives such as lake sediments and the fossils they contain, can be readily investigated. By reconstructing past environments, we can understand how natural systems, such as vegetation and soils, evolve in response to environmental changes and observe the rates of response. Understanding these processes is a necessary prerequisite to

predicting the response of natural systems to future climate change.

Perhaps the most versatile fossils for paleoenvironmental reconstruction are pollen and spores, which inform us about vegetation change and dynamics at a site over many time scales. Pollen profiles from lake sediment cores of Ramsay Lake, Quebec and Boyd Pond, New York (Fig. 1), for example, represent data bases which give some indication of the trend of vegetation change. As such data bases grow, we can aggregate spatial data bases and determine past vegetation changes throughout a broad region. An example of this type of analysis is a study of fossil pollen from several lakes and bogs in the Ottawa Valley - Lake Ontario region that date from about 12 000 years before present (BP).

Pollen and spores liberated from plants settle into lakes and bogs and are preserved there as fossils in the bottom sediments. We can retrieve a continuous core from the sediments using a specially designed piston sampler. Subsamples are extracted at close intervals in the core and are chemically treated to remove organic matter, clay and silt and to concentrate pollen and spores. We can examine the treated residue with a high-powered microscope.

Fossil pollen and spores are identified and tabulated by family, genus or species with the aid of a suitable reference collection of modern pollen and spores, (see examples in Fig. 2). Counts of at least 300 to 500 fossil tree, shrub and herb pollen constitute a pollen sum that forms the basis for calculating percentages of each pollen taxon. Pollen and spore percentages are plotted against sample depth in the pollen diagrams for Ramsay Lake and Boyd Pond.

Assemblages of fossil pollen, differentiated on the diagrams as pollen zones, and changes from one pollen assemblage to another are used to interpret vegetation history and climate change. The ages of key levels or zone boundaries on the pollen diagrams (e.g. increases in spruce, pine and hemlock, hemlock decline and second increase in

Changements de végétation au cours de 12 000 ans

Des changements dans l'Est de l'Ontario et les régions voisines témoignent de changements à l'échelle globale

par T.W. Anderson

Le paysage naturel nous paraît stable, car il change peu ou nullement durant notre vie. Cependant, les paysages dans lesquels nous vivons sont le résultat d'effets réciproques dynamiques à long terme entre les processus botaniques, climatiques et géologiques sur lesquels les êtres humains ont laissé leurs empreintes au cours des 150 à 200 dernières années.

Il est facile de rechercher les traces de ces effets préservés dans des archives naturelles comme les sédiments lacustres et les fossiles qu'ils contiennent. En reconstruisant les anciens milieux, nous pouvons comprendre comment les systèmes naturels, comme la végétation et les sols, évoluent en réponse aux changements dans l'environnement et observer les taux de réponse. Il faut

d'abord comprendre ces processus pour prévoir ensuite les futurs changements climatiques.

Les fossiles les plus versatiles pour la reconstruction paléoenvironnementale sont peut-être les pollens et les spores, lesquels nous permettent de déterminer quels ont été les changements de végétation et les processus dynamiques à un endroit donné au cours d'une très longue période. Les diagrammes polliniques des carottes de sédiments du lac Ramsay (Québec) et de l'étang Boyd (New York) (fig. 1), par exemple, représentent les bases de données fournissant une indication des tendances de l'évolution de la végétation. À mesure que ces bases prennent de l'importance, nous pouvons regrouper les bases de données spatiales et déterminer les

anciens changements de végétation dans toute une région. Citons, comme exemple de ce type d'analyse, une étude du pollen fossilisé datant d'environ 12 000 ans dans plusieurs lacs et tourbières de la vallée de l'Outaouais et de la région du lac Ontario,

Le pollen et les spores libérés par les plantes se déposent dans les lacs et les marécages et y sont préservés en tant que fossiles dans les sédiments du fond. Nous pouvons extraire des sédiments une carotte représentant l'accumulation continue grâce à un carottier à piston conçu à cette fin. Des sous-échantillons sont extraits de la carotte à intervalles rapprochés et sont traités par des moyens chimiques, afin d'en enlever les matières organiques telles la glaise et le limon et de concentrer le pollen et les spores. Nous pouvons alors examiner une petite partie des résidus traités sous un microscope très puissant.

Le pollen et les spores fossilisés sont identifiés et classifiés par famille, genre ou espèce en se reportant à une collection pertinente de grains de pollen ou de spores modernes dont certains sont indiqués à la figure 2. Au moins 300 à 500 pollens d'arbres, d'arbustes et de graminées fossilisés constituent une somme de pollen qui permet de calculer le pourcentage de chaque taxon de pollen. Les diagrammes de pollen du lac Ramsay

Figure 1 Abbreviated pollen diagrams for Ramsay Lake and Boyd Pond, showing only the dominant pollen taxa and interpreted vegetation history.

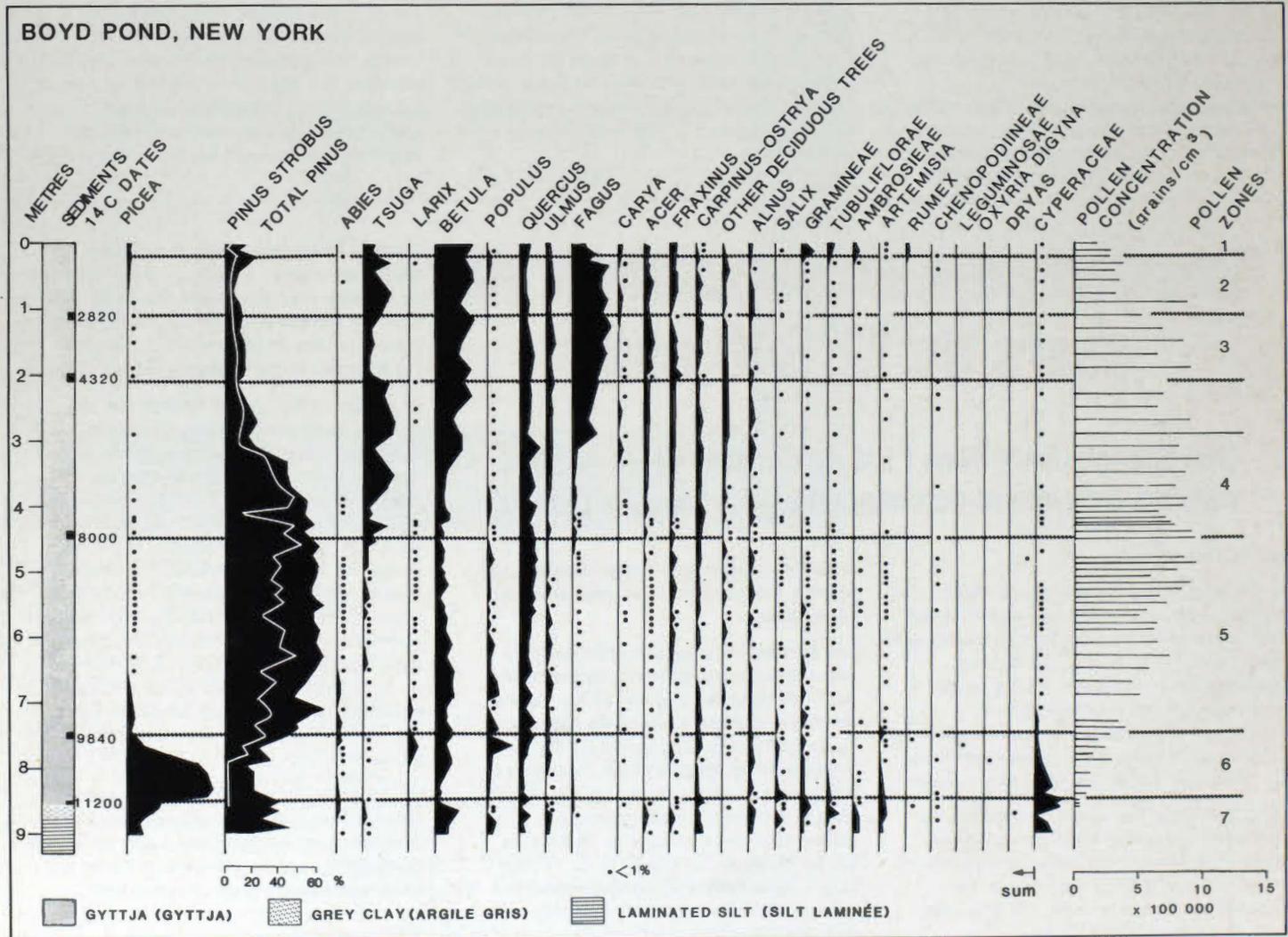
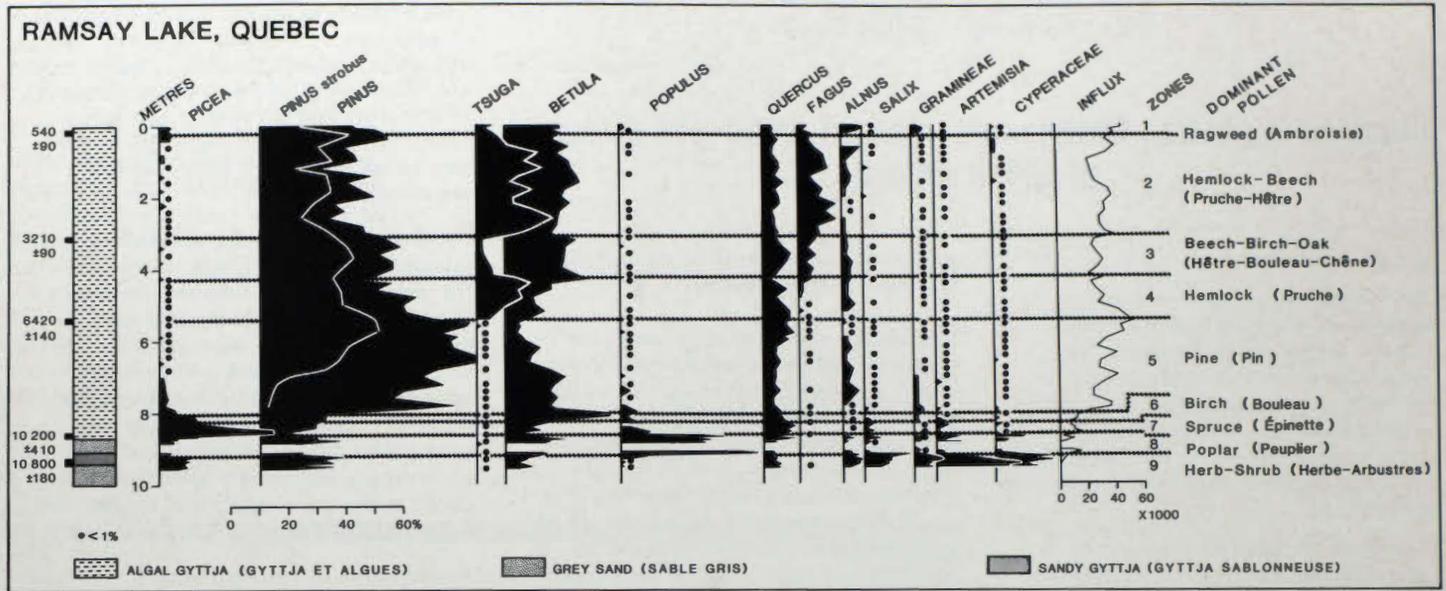


Figure 1 Diagrammes polliniques abrégés pour le lac Ramsay et l'étang Boyd indiquant seulement les principaux taxons de pollen et l'évolution interprétée de la végétation.

Figure 2 Photomicrographs of some modern pollen grains common to the Ottawa Valley.
(Bar = 10 microns)

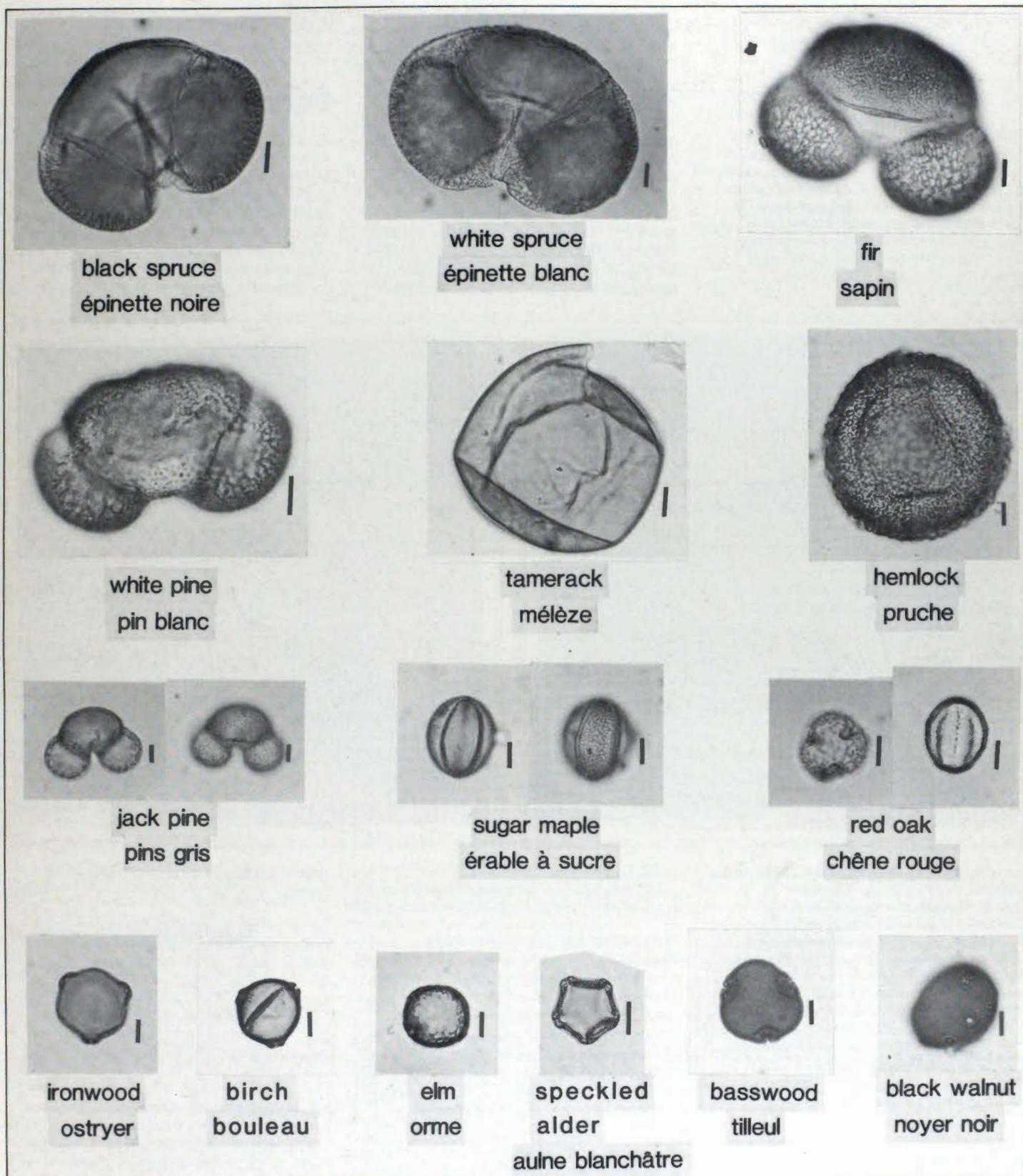


Figure 2 Photomicrographies de certains grains courants de pollen modernes dans la vallée de l'Outaouais. (Barre : 10 microns)

Figure 3 Paleogeographic and vegetation maps of the Ottawa Valley - Lake Ontario region for the past 12 000 years. The age of the glacial lake - Champlain Sea transition is based on radiocarbon dating of fossil ostracodes in the uppermost glacial lake sediments. Vegetation changes are inferred from radiocarbon-dated pollen profiles at several area sites. RL - Ramsay Lake. BP - Boyd Pond.

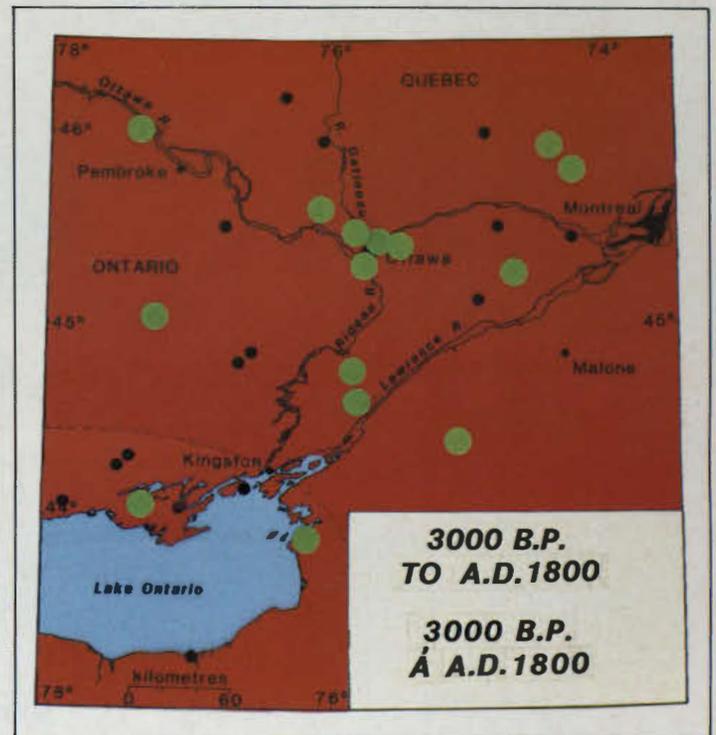
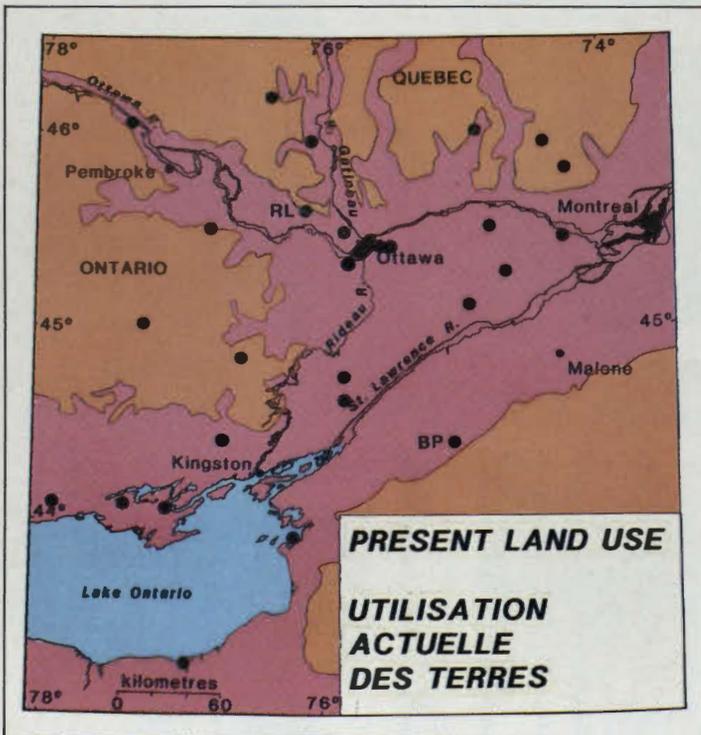


Figure 3 Cartes paléogéographiques et cartes végétales de la vallée de l'Outaouais et de la région du lac Ontario pour les 12 000 dernières années. L'âge de la transition des lacs glaciaires à la mer Champlain est fondé sur la datation au carbone radioactif d'ostracodes fossilisés dans la couche supérieure des sédiments des lacs glaciaires. Les changements de la végétation sont déterminés d'après les diagrammes de pollen datés au carbone radioactif dans plusieurs emplacements. RL - lac Ramsay. BP - étang Boyd.

hemlock), are determined by radiocarbon dating the organic fraction in the sediments. If we date key levels in several such pollen diagrams in any one area, we can chart changes in fossil pollen assemblages with time on a regional basis. Correlating the fossil pollen assemblages with modern pollen assemblages from known major vegetation regions (e.g. deciduous, mixed and boreal forests and tundra) provides the basis for reconstructing a record of vegetation change and forest migration.

Lakes and peat bogs that have been analyzed for fossil pollen by myself and other palynologists are indicated by dots on Figure 3. Color coding shows the dominant vegetation inferred from the

fossil pollen assemblages. The map sequence shows the progressive movement of vegetation into the Ottawa Valley - Lake Ontario region following retreat of the Laurentide Ice Sheet, associated glacial lakes and the Champlain Sea.

Vegetation History

A shrub-herb tundra vegetation possibly intermixed with woodlands of spruce, poplar, juniper and alder was the first major plant community to occupy the highlands of central Ontario and western New York and the margins of the glacial lakes and Champlain Sea. Tundra woodland gave way to spruce-poplar woodland to the south of the sea and to

et de l'étang Boyd présentent les pourcentages des pollens et des spores en fonction de la profondeur de l'échantillon.

Pour interpréter l'évolution de la végétation et les changements climatiques, nous utilisons les assemblages de pollen fossilisés, entre lesquels la distinction est établie sur les diagrammes par des tracés de zones polliniques, ainsi que les changements d'un assemblage de pollen à un autre. Les âges des principaux niveaux ou les limites de zones sur les diagrammes polliniques (p. ex. augmentation de l'épinette, du pin et de la pruche, déclin et seconde augmentation de la pruche), sont déterminés par datation au carbone radioactif de la partie organique des sédiments. Si nous datons les principaux niveaux de plusieurs diagrammes polliniques d'un secteur quelconque, nous pouvons tracer à l'échelle régionale les changements dans les assemblages de

pollen fossilisé au cours d'un certain temps.

La corrélation entre les assemblages de pollen fossilisé et les assemblages de pollen moderne des principales régions de végétation connues (p. ex. forêts de feuillues, forêts mixtes et boréales, tundra) forme le fondement de la reconstruction d'un relevé des changements de végétation et du déplacement des forêts.

Les lacs et les tourbières que des palynologues (dont je fais partie) ont analysés à la recherche de pollen fossilisé sont indiqués sous forme de pois sur la figure 3. La codification par couleur représente la végétation dominante d'après les assemblages de pollen fossilisé. La série de cartes permet de voir la propagation progressive de la végétation dans la vallée de l'Outaouais et la région du lac Ontario après le retrait de

poplar woodland to the north. The spruce arrival between 11 500 and 11 000 BP coincided with the retreat of a glacial lake phase from the Lake Ontario - Ottawa Valley - St. Lawrence River region and the submersion of the Ottawa - St. Lawrence lowland by marine waters of the Champlain Sea. With recession of the sea, spruce woodland expanded northward into the Ottawa Valley and replaced poplar by 10 200 BP.

Poplar was able to spread into areas north of the Champlain Sea earlier than spruce because its seeds were easily transported across the water. The Champlain Sea seems to have represented a physical barrier which impeded northward migration of spruce. However, once the

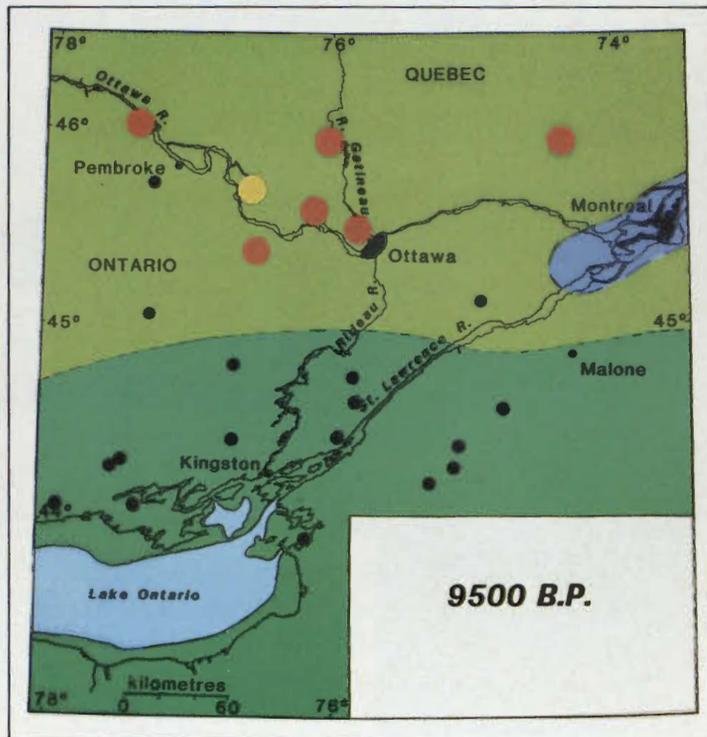
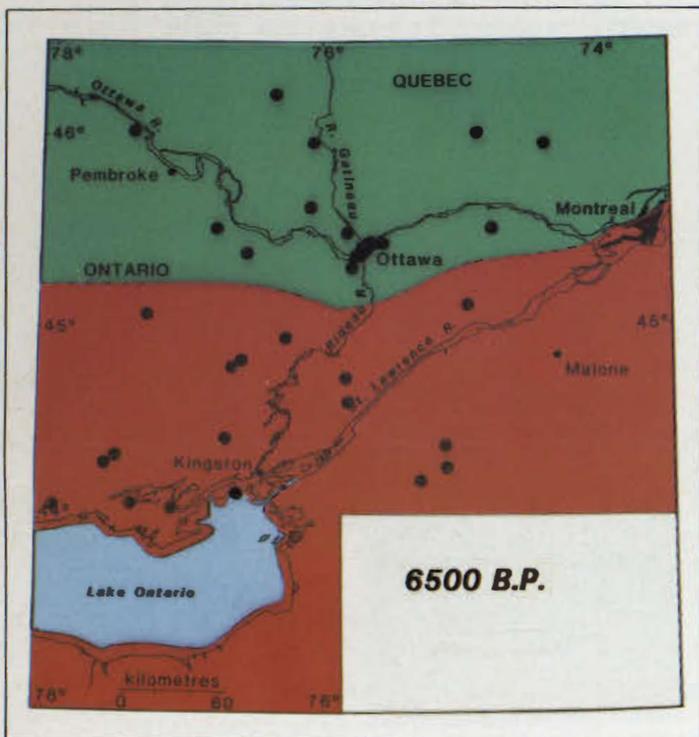
sea retreated out of the Ottawa Valley, spruce immediately advanced into southern Quebec.

Spruce dominated for about 1000 years until a mixed conifer-hardwood forest of jack pine, fir and birch migrated into the region. Birch, mainly white birch, dominated sites in the Ottawa Valley before jack pine. By 8500 BP a white pine-dominated forest had shifted northward into the southern Laurentians.

Hemlock seems to have entered the region from around the eastern end of Lake Ontario possibly as early as 8000 BP and spread northward at a rate of about 10 km per century. By 7500 BP the white pine-dominated forest of the southern part of the region had already been replaced

by a forest of hemlock, white pine, birch and mixed hardwoods. This forest spread northward but did not reach the Ottawa Valley until after 6500 BP. By 6000 BP this forest had covered the entire region from Lake Ontario to the southern Laurentians.

However, shortly after 5000 BP hemlock dominance was drastically reduced throughout the whole area, possibly because a pathogen spread through many of the hemlock populations. The tolerant hardwoods, beech and sugar maple, moved northward at this time, probably occupying openings left by hemlock. Hemlock populations increased again at about 3500 BP in the southern localities and at 3200 BP in the Ottawa Valley. Since about 3500 BP, vegetation has



l'inlandsis Laurentidien, de ses lacs glaciaires et de la mer Champlain.

Évolution de la végétation

Une toundra parsemée de graminées et d'arbrisseaux peut-être entremêlée de forêts-parcs d'épinettes, de peupliers baumier, de genévriers et d'aulnes constitue la première communauté botanique importante à avoir occupé les hautes terres du centre de l'Ontario et de l'ouest de l'état de New York ainsi que les rives des lacs glaciaires et de la mer Champlain. Cette toundra boisée a été remplacée par une pessière à peuplier au sud de la mer et par une peupleraie au nord. L'arrivée de l'épinette, entre 11 500 et 11 000 BP (avant l'Actuel), a coïncidé avec la disparition d'un lac glaciaire occupant la région du lac Ontario, de la vallée de l'Outaouais et du fleuve Saint-

Laurent ainsi que l'inondation des basses-terres de l'Outaouais et du Saint-Laurent par les eaux salées de la mer Champlain. Au fur et à mesure que la mer s'est retirée, la pessière s'est étendue vers le nord dans la vallée de l'Outaouais, si bien qu'elle a supplanté la peupleraie il y a 10 200 ans.

Le peuplier avait réussi à atteindre la région au nord de la mer Champlain avant l'épinette parce que ses graines avaient facilement traversé l'étendue d'eau. Ainsi, la mer Champlain semble avoir été un obstacle physique à la migration de l'épinette vers le nord. Toutefois, l'épinette a immédiatement envahi le sud du Québec dès que la mer s'est retirée de la vallée de l'Outaouais.

L'épinette a continué de dominer la région durant environ 1 000 ans jusqu'à l'arrivée d'une forêt mixte de conifères et de feuillus composée de pins gris, de sapins

et de bouleaux. Le bouleau, surtout le bouleau à papier, puis le pin gris ont dominé les sites de la vallée de l'Outaouais. Cependant, dès 8500 BP, une forêt dominée par le pin blanc s'était déplacée vers le nord, avait gagné le sud des Laurentides.

La pruche semble être partie de la rive est du lac Ontario et avoir pénétré dans la région peut-être aussi tôt que 8 000 BP; sa progression vers le nord s'est faite à un rythme d'environ 10 km par siècle. Il y a 7 500 ans, la forêt dominée par le pin blanc a cédé la place à une forêt composée de pruches, de pins blancs, de bouleaux et d'un mélange de feuillus. Cette forêt s'est étendue vers le nord, mais n'a atteint la vallée de l'Outaouais qu'après 6 500 BP. Dès 6 000 BP, cette forêt couvrait entièrement les terres entre le lac Ontario et la partie sud des Laurentides.

consisted largely of an association of hemlock, white pine and mixed hardwoods.

Some changes in the region's forests occurred after 3500 BP. Spruce increased slightly at most sites; white pine increased locally, as demonstrated at the top of the Ramsay Lake pollen diagram (Fig. 1); but tolerant hardwoods, such as sugar maple and beech, became less abundant. Pollen zone 1 (the ragweed zone) at the top of the Ramsay Lake and Boyd Pond diagrams illustrates pollen changes attributed to human intervention (European immigration and settlement in the early 1800s). For example, early colonial agriculture following forest clearance, which dates from about AD 1800, is clearly recognized by decreases in white pine and hemlock and increases in grasses and weeds. Areas now in farmland,

particularly in the Ottawa Valley, were selectively logged for white pine. The logs were transported to Britain for shipbuilding.

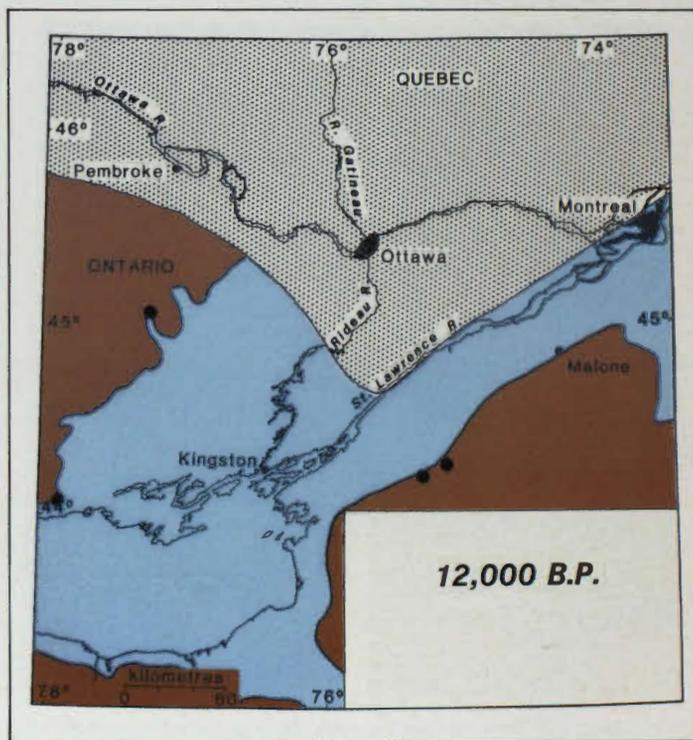
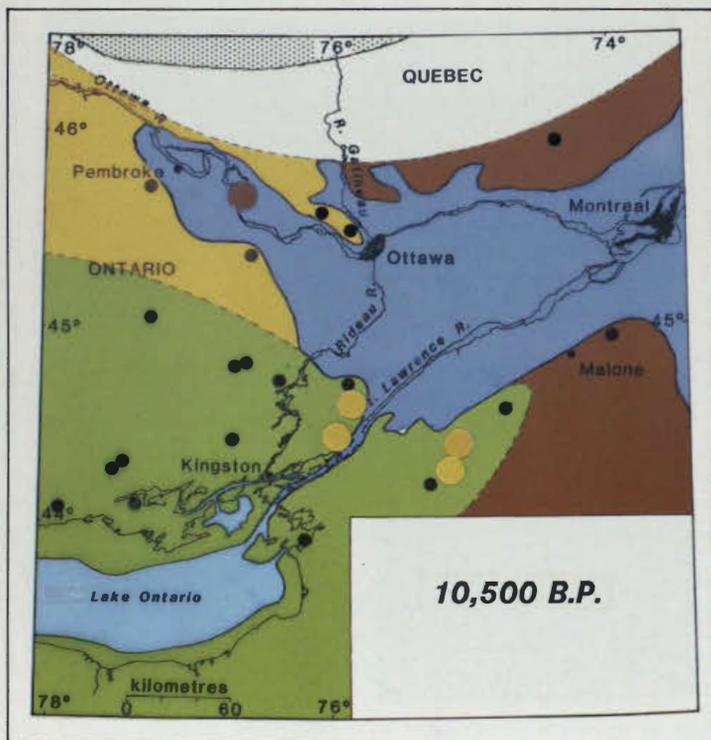
The presettlement forests of the early 1900s and today's land use of the region represent the current stage in the succession and gradual evolution of the vegetation over the past 12 000 years. Human influence for the past 150 to 200 years is readily apparent.

Paleoclimate Change

Tundra vegetation and then forest trees migrated into the region as the climate gradually warmed starting about 12 000 BP. Maximum warmth (about 1°C to 2°C above modern temperatures)

occurred between about 8000 and 4000 BP, the period in postglacial time that is commonly called the Hypsithermal interval. During this time, hemlock, beech, oak and maple expanded their ranges and shade-intolerant hardwoods such as elm, ash, hickory and basswood became more prominent.

The warmer climate, combined with widespread insect infestations, is thought to have wiped out much of the hemlock population shortly after 5000 BP. At or shortly after 3500 BP, a cooler and moister climate favored hemlock growth again and hemlock returned as a major constituent of the regional forest. Some pollen diagrams from the region exhibit increases in spruce between 3000 BP and the present. We think the slight rise in spruce towards the top of the Boyd Pond



Toutefois, peu après 5 000 BP, la prédominance de la pruche a diminué de façon massive dans toute la région, peut-être à cause de la présence d'un agent pathogène dans plusieurs des populations de pruches. Les feuillus tolérants, soit le hêtre et l'érable, ont alors avancé vers le nord et ont probablement occupé les vides laissés par la pruche. Les populations de pruches ont augmenté de nouveau il y a environ 3 500 ans dans les sites méridionaux et il y a 3 200 ans dans la vallée de l'Outaouais. Depuis environ 3 500 ans, le couvert végétal est principalement formé de pruches, de pins blancs et d'un mélange de feuillus.

Les forêts de la région ont connu quelques changements après 3 500 BP. On a noté une légère augmentation de l'épinette à la plupart des sites; le pin blanc a aussi augmenté à quelques endroits comme le

montre la partie supérieure du diagramme pollinique du lac Ramsay (fig. 1). Toutefois, les feuillus comme l'érable à sucre et le hêtre sont devenus moins abondants. Au haut des diagrammes du lac Ramsay et de l'étang Boyd, on retrouve la zone pollinique n° 1, dite zone de l'herbe à poux qui est le reflet de changements attribuables à l'intervention humaine (immigration d'Européens et colonisation au début du 19^e siècle). Par exemple, le défrichage et les débuts de l'agriculture coloniale, qui remontent à 1800 A.D. environ, sont clairement indiqués par une diminution du pin blanc et de la pruche assortie d'une augmentation des graminées et des mauvaises herbes. Dans les régions agricoles et plus particulièrement dans la vallée de l'Outaouais, le pin blanc a été abattu de façon sélective et les billes ont

été ensuite envoyées en Grande-Bretagne où elles furent utilisées en construction navale.

Les forêts intactes du début du 20^e siècle et l'utilisation actuelle des terres dans la région correspondent à l'étape de la succession et de l'évolution graduelle de la végétation que nous avons suivie pour les 12 000 dernières années. De plus, on voit clairement l'influence qu'exerce l'homme depuis 150 à 200 ans.

Évolution du paléoclimat

Avec le réchauffement graduel du climat qui s'est amorcé il y a environ 12 000 ans, la toundra et les essences forestières ont commencé à croître dans la région. Les températures ont atteint un maximum (environ 1 à 2 °C au-dessus des températures actuelles) entre 8 000 et 4 000 BP environ : cette période

LEGEND LÉGENDE

	Laurentide Ice Sheet glacier Laurentidien		Beech-Maple-Birch/Oak Hêtre-Érable-Bouleau / Chêne
	Glacial Lake Lac glaciaire		Beech-Birch-Hardwoods Hêtre-Bouleau-bois franc
	Champlain Sea la mer de Champlain		Sugar Maple-Beech-Oak- Hemlock-White Pine Érable à sucre-Hêtre- Chêne-Pruche-Pin blanc
	Herb-Shrub-Tundra Herbe-Arbustres-Toundra		Sugar Maple-Yellow Birch- Hemlock-White Pine. Érable à sucre-Bouleau des Alleghany-Pruche-Pin blanc
	Spruce Épinette		Spruce-Fir-Hardwoods Épinette-Sapin-bois franc
	Poplar Peuplier		Deciduous Forest Forêt décidue
	Birch Bouleau		Farmland Terres Agricoles
	Pine Pin		Non-Farmland Terres non Agricoles
	Hemlock-Birch- Hardwoods Pruche-Bouleau-bois franc		Lake and bog pollen profiles Profils polliniques de lacs et de tourbières
			Approximate boundary Limite approximative

postglaciaire est habituellement connue sous le nom de stade altithermal. À cette époque, les habitats de la pruche, de l'hêtre, du chêne et de l'érable ont pris de l'ampleur et les feuillus qui ne tolèrent pas l'ombre comme l'orme, le frêne, le caryer et le tilleul, sont devenus plus communs.

On croit qu'une bonne partie de la population de pruche a péri il y a un peu moins de 5 000 ans à cause du climat plus chaud et d'une importante infestation des insectes. Il y a 3 500 ans ou un peu moins, le climat est devenu plus frais et humide, ce qui a favorisé de nouveau la croissance de la pruche. Cette essence est alors redevenue l'une des principales composantes de la forêt régionale. On note, dans certains diagrammes polliniques de la région, une augmentation de l'épinette qui débute vers 3 000 BP et

qui se poursuit jusqu'à nos jours. Nous croyons, par exemple, que la légère augmentation de l'épinette vers le haut du diagramme de l'étang Boyd reflète une petite hausse du nombre d'épinettes dans la région; cette tendance se manifeste possiblement en réponse au refroidissement du climat qui se fait sentir depuis environ 3 500 ans.

Incidence des changements futurs du climat

Les modifications de la végétation illustrées dans la figure 3 pourraient être vues comme une expérience naturelle visant à étudier l'incidence de changements futurs du climat sur les forêts qui couvrent actuellement l'est de l'Ontario et les régions adjacentes. On

prédit que la température de la planète pourrait augmenter de 1,5 °C, voire même de 4 °C, au cours des 50 à 100 prochaines années; ce réchauffement entraînera nécessairement des changements au sein de la forêt, mais nous ne pouvons pour le moment qu'émettre des hypothèses quant à l'ampleur de ces modifications.

Le tableau que nous avons dressé de la période altithermale suggère que l'habitat de certains arbres et arbustes feuillus ainsi que de certaines espèces ayant des affinités méridionales, comme le caryer cordiforme (*Carya cordiformis*) et le micocoulier occidental (*Celtis occidentalis*), pourrait s'étendre vers le nord. Les essences forestières tolérantes s'adapteront et survivront aux changements climatiques rapides, alors que les espèces situées près de la limite sud de leur distribution, telles que

diagram, for example, reflects a small increase in spruce trees growing in the area, possibly in response to the cooler climate since about 3500 BP.

Implications for future climate change

The pattern of vegetation change depicted in Figure 3 could be considered a natural experiment to test the impact of future climate change on the present forests of eastern Ontario and adjacent areas.

Predicted global warming (as much as 1.5°C to 4°C over the next 50 to 100 years) will undoubtedly force changes on the forests but we can only speculate on the extent of these changes.

The record of the Hypsithermal period suggests that some deciduous trees and shrubs and some species with southern affinities, such as bitternut hickory (*Carya cordiformis*) and hackberry (*Celtis occidentalis*), might expand their northerly ranges. Tolerant tree species will adapt and survive the rapid changes predicted,

while others near their southern tolerance limit, such as spruces, fir and jack and red pine, may not be able to cope and could die off. Because insect infestations, forest fires and drought could be more widespread, entire forest communities may be threatened.

Better knowledge of forest history and vegetation migration during former periods of rapid climate change, documented through study of fossil pollen and spores, will increase our awareness of what might be expected in future climates.



l'épinette, le sapin, le pin rouge et le pin gris, ne pourront peut-être pas s'adapter aux nouvelles conditions climatiques et pourraient disparaître. De plus, les infestations des insectes, les feux de forêts et les sécheresses pourraient prendre de

l'ampleur et menacer des communautés forestières.

Par l'étude des pollens et des spores fossilisés, nous pouvons mieux connaître l'évolution de la forêt et la migration des

espèces végétales au cours de périodes où le climat a changé rapidement, ce qui nous permettra d'avoir une meilleure idée de ce qu'un nouveau climat pourrait amener.



Thane W. Anderson is a research scientist in the GSC's Terrain Sciences Division.

GSC Contribution 17989

Scientists retrieve cores of lake sediments in see-through plastic tubes.

Les scientifiques recourent des carottes de sédiments des lacs dans des tuyaux de plastique transparents.

Thane W. Anderson est un chercheur scientifique de la Division de la science des terrains, Commission géologique du Canada.

Contribution de la CGC 17989

Permafrost, Ground Ice and Global Change in the Beaufort Sea Coastlands

by D.G. Harry and S.R. Dallimore

Global environmental change may well have a greater effect on the coastal lowlands of northern Canada than on any other area of North America.

These lowlands, likely to experience the greatest warming according to current global circulation models, are extensively underlain by temperature-sensitive permafrost or perennially frozen ground (Fig. 1). The area is also vulnerable to changes in sea level and coastal erosion. Although the region is not densely populated, it contains oil and gas resources which are crucial to Canada's economic future.¹

Areas such as the Beaufort Sea coastlands are especially vulnerable to climatic

Pergélisol, glace de sol et changements globaux dans les terres en bordure de la mer de Beaufort

par D.G. Harry et S.R. Dallimore

Les changements environnementaux globaux peuvent avoir plus de répercussions sur les basses-terres côtières du nord du Canada que sur toute autre région de l'Amérique du Nord.

Ces basses-terres, qui subiront probablement le plus le réchauffement selon les modèles actuels globaux de circulation, reposent en grande partie sur du pergélisol sensible à la température ou sur un sol gelé en permanence (fig. 1). Ce secteur est également exposé aux effets des changements du niveau de la mer et de l'érosion côtière. La région n'est pas tellement habitée, mais elle recèle des ressources pétrolières et gazières qui sont vitales pour l'avenir de l'économie canadienne.

warming, since they are underlain by thick sequences of unconsolidated and frequently ice-rich Quaternary sediments. During climatic warming, these sediments will be subject to thermokarst processes of erosion and subsidence, resulting in substantial modification of the present

Figure 1 Permafrost map of Canada, indicating Beaufort Sea coastlands.

landscape. The potential increased extent of unstable terrain would affect both present and planned economic development. Researchers from the GSC's Terrain Sciences Division are currently analyzing ground ice distribution, and the geomorphic and geotechnical implications of permafrost and ground ice thaw.

Ground ice (frozen soil moisture) is a major component of permafrost in this area, and occurs as pore ice, layers and

lenses of segregated and intrusive ice, and ice wedges (Fig. 2). Stratigraphic and geophysical investigations have identified discrete massive bodies of ice up to 30 m thick and larger than 1 km² in area (Fig. 3). This ice may have formed beneath the ground surface or may be ancient glacier ice buried, preserved within permafrost, since the last ice age. Because this ice has little or no surface expression, we do not know the distribution of massive ice



Figure 1 Carte du pergélisol au Canada montrant les terres en bordure de la mer de Beaufort.

Étant donné qu'elles reposent sur des séquences épaisses de sédiments du quaternaire non consolidées et contenant souvent beaucoup de glace, les terres situées en bordure de la mer de Beaufort sont particulièrement vulnérables au réchauffement du climat. Au cours du réchauffement du climat, ces sédiments seront soumis aux processus thermokarstique d'érosion et de

glissement qui apporteront des modifications considérables au paysage actuel. Le développement économique actuel et celui que l'on prévoit dans l'avenir peuvent être affectés par l'accroissement possible de l'étendue de terrain instable. Les chercheurs de la Division des sciences des terrains de la CGC font actuellement une analyse de la répartition de la glace de sol et des conséquences géomorphiques et géotechniques possibles du pergélisol et du dégel de la glace de sol.

La glace de sol (le gel de l'humidité du sol) est dans ce secteur un des principaux

éléments du pergélisol. Elle se présente sous forme de glace interstitielle, de couches de glace, de glace de lentille de ségrégation et intrusives et de glace de centre en coin (fig. 2). Les recherches stratigraphiques et géophysiques ont permis de déceler des masses discrètes de glace pouvant s'étendre sur 1 km² et atteindre l'épaisseur de 30 mètres (fig. 3). Cette glace peut s'être formée sous la surface du sol ou peut aussi provenir d'anciens glaciers et avoir été enterrée et préservée dans le pergélisol depuis la dernière période glaciaire. Rien ne permet de déceler sa présence à la surface, de



Figure 2 Ground ice in unconsolidated sediments: (a) segregated ice layers (b) ice wedge.

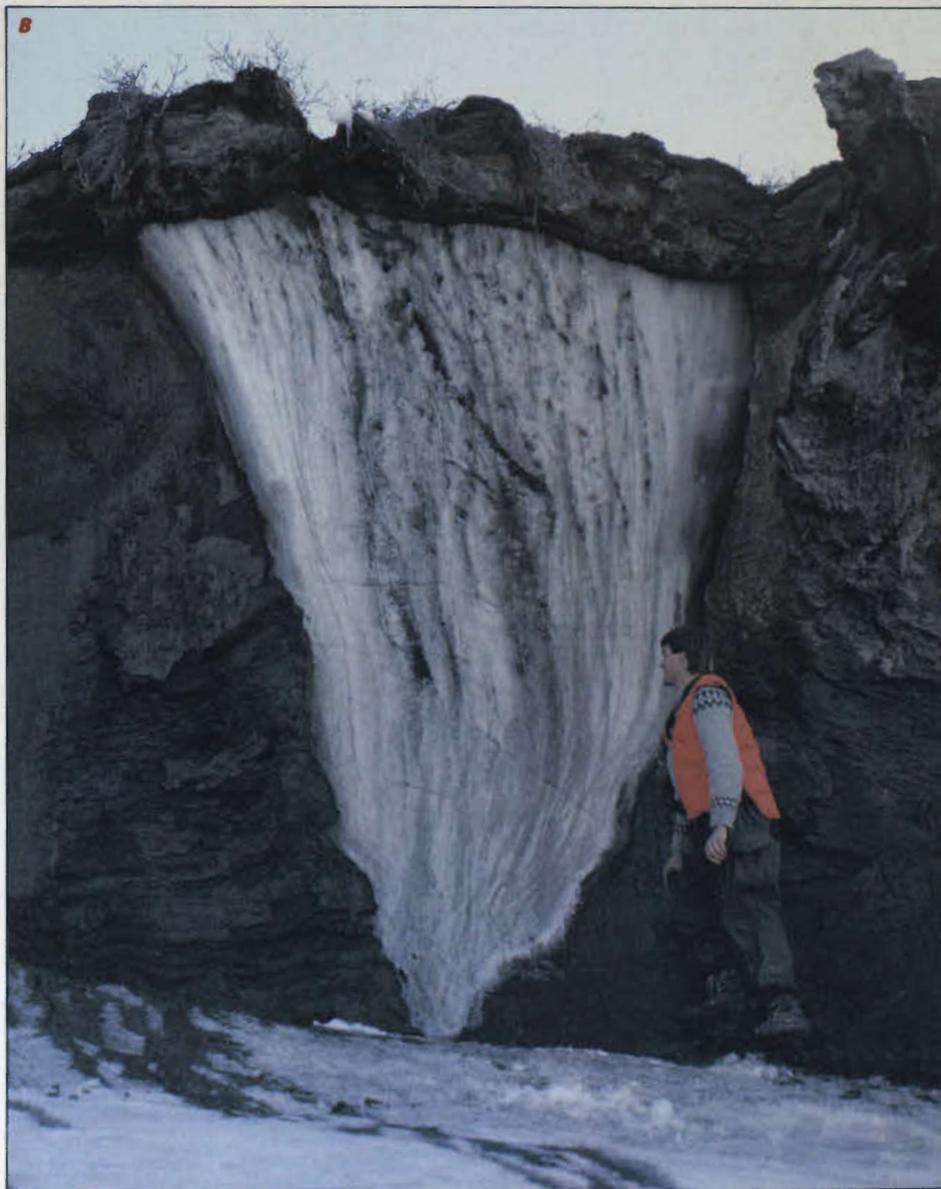
Figure 2 Glace de sol dans des sédiments non consolidés a) couches de glace de ségrégation b) glace de centre en coin

sorte que nous ne connaissons pas en détail quelle est la répartition de ces masses de glace. Nous pouvons cependant avoir une idée de leur étendue en regardant une carte montrant les sites où la glace est exposée dans des glissements régressifs causés par le dégel (fig. 4). Cela représente toutefois un minimum de la répartition totale, étant donné qu'il n'y a jamais eu de glissement lorsque ces masses sont situées à de grandes profondeurs ou dans des couches sédimentaires épaisses.

Le réchauffement futur des conditions climatiques pourrait augmenter l'épaisseur de ce qu'on appelle la couche active, soit la couche du sol qui gèle ou dégèle selon les saisons; il en résulterait une fonte d'une partie du pergélisol sur lequel repose le sol. La terre gelée située juste au-dessous de la couche active contient souvent beaucoup de glace, en raison de la glace d'accroissement qui s'est probablement formée durant les périodes antérieures de climat plus froid. La mobilisation de sédiments saturés et dégelés peut accroître la fréquence de détachement des couches actives, même lorsque le terrain n'est que légèrement incliné (fig. 5). Ces glissements superficiels (skinflows), semblables à des rubans, se produisent lorsqu'un revêtement de matière se déplace le long de la surface supérieure du pergélisol. Lorsque les déplacements des sédiments de surface

in detail. We can get some idea of its widespread nature from a map showing sites where ice is exposed in retrogressive thaw slumps (Fig. 4). However, this represents a minimum distribution, since massive ice also occurs at depth and in coarse sediments which are not subject to slumping.

Warmer summer air temperatures in the future would increase the depth of the active layer, the layer of ground which experiences seasonal freezing and thawing, and melt part of the underlying permafrost. Frozen ground just below the active layer is often particularly ice-rich, due to the accumulation of aggradational ice, probably formed during periods of cooler climate in the past. Mobilization of saturated, thawed sediment may increase the frequency of active layer detachments, even on relatively gently sloping ground (Fig. 5). These ribbon-like 'skinflows' occur when a veneer of material moves along the upper surface of permafrost. Where surficial sediment



removal exposes massive ice or icy beds, retrogressive thaw slumps may develop (Fig. 6) and may enlarge for several decades before stabilizing. In addition, if the underlying frozen ground warms, it may increase the rate of deep-seated creep, leading to greater slope instability in general.

We can attempt to predict climate change effects in permafrost regions by studying paleoenvironmental analogues. Permafrost has existed in this area since at least the time of the last glaciation, and at some locations predates the most recent glacial advance. It thus contains a full record of late Quaternary environmental change. For example, during the Holocene Hypsithermal interval, mean annual air temperatures appear to have been several degrees higher than at present. This interval was characterized by a deeper active layer (approximately 1.5 m, compared with 0.5 - 1.0 m at present).

In stratigraphic sections, Hypsithermal warming is often recorded by the presence of a thaw unconformity, a horizon within permafrost which marks a former episode of deep thaw, during which pre-existing ground ice structures (e.g. ice wedges)

Figure 4 *Distribution of retrogressive thaw slumps, Mackenzie Delta - Tuktoyaktuk Peninsula area.*

were truncated. Geomorphic evidence of climatic warming at this time is provided by the synchronous development of thermokarst landforms, such as thaw lakes, over much of the area.

These paleomodels suggest that regional thermokarst would likely be characterized by irregular subsidence and mass wasting

of the land surface. Topographic inversion may occur in areas of initially ice-cored terrain, as illustrated by the morphology of collapsed pingos (Fig. 7). Coastal erosion is also likely to increase, as a

Figure 3 *Massive ground ice, Peninsula Point, near Tuktoyaktuk.*



Figure 3 *Masse de glace de sol à la pointe de la péninsule près de Tuktoyaktuk.*

cela peut accroître le rythme de glissement profond, ce qui a pour résultat, en général, de rendre les pentes encore plus instables.

Nous pouvons tenter de prévoir les répercussions des changements climatiques dans les régions où il y a du pergélisol en étudiant des situations paléoenvironnementales analogues. Le pergélisol existe dans ces secteurs au moins depuis l'époque de la dernière glaciation et, à certains endroits, il s'y trouvait avant le mouvement glaciaire le plus récent. On peut donc y retrouver toutes les traces des changements environnementaux qui se sont produits au quaternaire. Par exemple, au cours de l'optimum thermique ou hypsithermal de l'holocène, les températures annuelles moyennes de l'air semblent avoir été de plusieurs degrés plus élevées que celles de notre époque. Cet intervalle a été caractérisé par une couche active plus profonde (environ 1,5 m, comparativement à 0,5 - 1,0 m, actuellement).

Dans les sections stratigraphiques, l'optimum thermique (hypsithermal) est souvent indiqué par la présence de dégel non conforme et de traces horizontales au sein du pergélisol qui marquent un épisode de grand dégel au cours duquel

mettent à découvert des masses ou des lits de glace, des glissements régressifs causés par le dégel peuvent se produire (fig. 6) et s'étendre durant plusieurs décennies avant de se stabiliser. De plus, si la terre gelée sous-jacente se réchauffe,

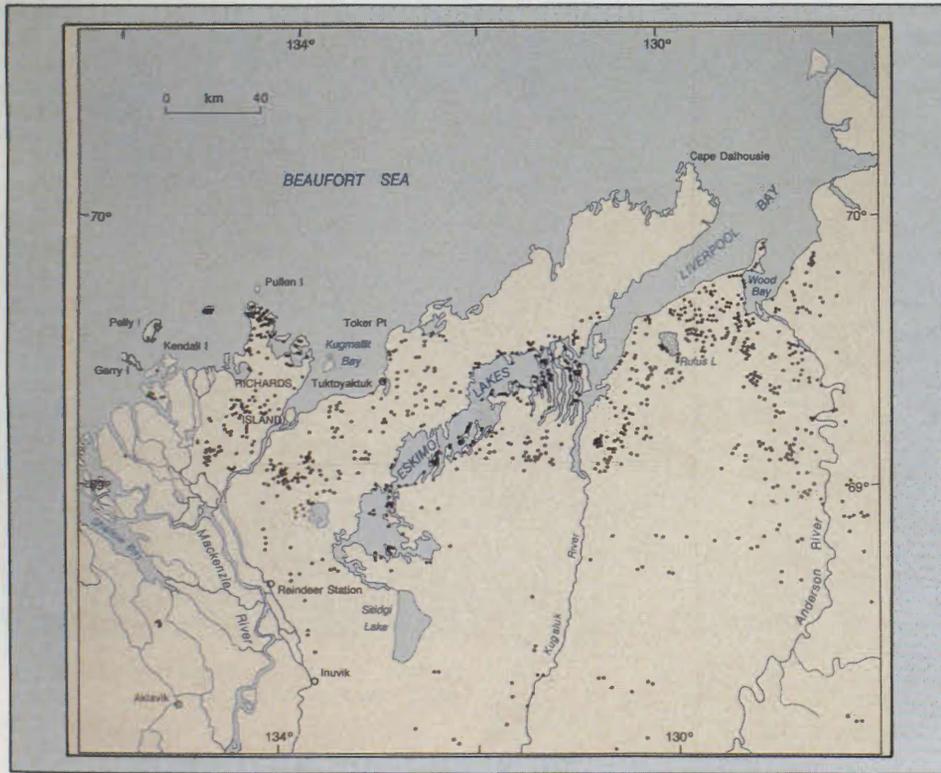


Figure 4 *Répartition des glissements régressifs causés par le dégel. Secteur du delta du Mackenzie et de la péninsule de Tuktoyaktuk.*



Figure 5 Glissement superficiel causé par le détachement d'une couche active à l'île Ellesmere.

les structures de glace dans le sol (c.-à-d. les glaces de centre en coin) ont été tronquées. Les preuves géomorphiques du réchauffement climatique de cette époque sont fournies dans une partie du secteur par le développement synchrone de formes de relief thermokarstiques telles des lacs formés par le dégel.

Ces paléomodèles laissent prévoir que les thermokarsts de la région seraient probablement caractérisés par des dénivellations irrégulières et une usure massive de la surface du terrain. Une inversion topographique peut se produire dans des secteurs où à l'origine le terrain était surtout formé de glace, comme l'illustre la morphologie de pingos effondrés (fig. 7). Il est aussi probable que l'érosion côtière augmentera à la suite du dégel du pergélisol, des niveaux plus élevés de la mer et de la longueur accrue des périodes au cours desquelles la mer est libérée de ses glaces.

Les effets des changements globaux sur les terrains en bordure de la mer de Beaufort peuvent avoir d'importantes répercussions sur le plan économique. Plusieurs établissements, pistes d'atterrissage et installations de défense ont été construits sur des terrains qui contiennent beaucoup de glace, qui sont



situés près du niveau de la mer (fig. 8) et qui devront peut-être être protégés par des mesures visant à atténuer ces effets ou à y remédier. De plus, on effectue beaucoup de travaux d'exploration des hydrocarbures dans ces régions pionnières et il est possible que l'on y exploite éventuellement des champs pétrolifères et gazifères, autant sur terre qu'au large des côtes de la mer de Beaufort. Les travaux de conception et d'évaluation de la

Figure 5 Active layer detachment failure (skinflow), Ellesmere Island.

result of permafrost thaw, higher sea levels and longer open water seasons.

The effects of global change on terrain in the Beaufort Sea coastlands may have significant economic implications. Many settlements, airstrips and defence facilities are located on ice-rich terrain near sea level (Fig. 8), and may need to be protected by mitigative and remedial action in the future. In addition, the area is currently a focus of frontier hydrocarbon exploration, with possible oil and gas fields located both on land and offshore in the Beaufort Sea. The design and assessment of production and transportation facilities, including pipelines, harbors and airstrips, is already under way. Since these structures will have a design lifetime of 20 to 50 years, an understanding of permafrost and ground ice response to climatic change will be crucial to planning and engineering design.

The risk of permafrost thaw, and associated terrain instability, has always formed a major constraint to the development of northern Canada. The

Figure 6 Retrogressive thaw slumps, Yukon Coastal Plain.

Figure 6 Glissement régressif causé par le dégel, plaine côtière du Yukon.

production et des installations pour le transport, y compris les pipelines, les ports et les pistes d'atterrissage, sont déjà en cours. Étant donné que cette infrastructure est conçue pour durer de 20 à 50 ans, il est d'une importance vitale que l'on comprenne, dès l'étape de la

effects of global change will present further challenges to geotechnical design and environmental protection in this frontier area.

Figure 7 Collapsed pingo, Hendrickson Island, Mackenzie Delta.

David Harry and Scott Dallimore are research scientists in the GSC's Terrain Sciences Division.

GSC Contribution 17789



Figure 7 Pingo effondré, île Hendrickson, delta du Mackenzie.

planification et de la conception technique, de quelle façon se comporteront le pergélisol et la glace de sol face au changement climatique.

Les risques d'un dégel du pergélisol et de l'instabilité du terrain qui y est relié a toujours été un obstacle majeur au développement du nord du Canada. Les répercussions des changements globaux feront naître de nouveaux défis que l'on devra relever dans les domaines de la conception géotechnique et de la protection de l'environnement.

MM. David Harry et Scott Dallimore sont des scientifiques spécialisés dans la recherche à la Division des sciences des terrains de la CGC.

Contribution de la CGC 17789

Figure 8 Coastal erosion of ice-rich permafrost, southern Banks Island.



Figure 8 Érosion côtière de pergélisol contenant beaucoup de glace, partie sud de l'île Banks.

Energy, Mines and Resources Canada explores Canada's landmass, manages the research and development of energy and mineral technology, and carries out policies and programs to ensure the equitable development and sound management of Canada's mineral and petroleum resources.

Le ministère de l'Énergie, des Mines et des Ressources explore la masse continentale du Canada, administre les travaux de recherche-développement en matière de technologie reliée à l'énergie et aux ressources minérales, et voit à la mise en oeuvre de politiques et de programmes qui visent à assurer une mise en valeur équitable et une saine gestion des ressources minérales et pétrolières du Canada.
