

Climatological Bulletin

Vol. 26, No. 1, April/avril 1992

Bulletin climatologique



Canadian Meteorological
and Oceanographic
Society

La Société Canadienne
de Météorologie et
d'Océanographie

Information for Contributors and Subscribers

As a publication of the Canadian Meteorological and Oceanographic Society, the CLIMATOLOGICAL BULLETIN provides a medium of information on climatology. The Editorial Board gives special encouragement to the submission of manuscripts on applied climatology (e.g., agriculture, commerce, energy, environment, fisheries, forestry, health, recreation, transportation, and water resources), climatic change and variability, climate impact studies, climate model applications (including physical climatology), and regional studies (including ocean areas). It is published with the aid of a grant from the Government of Canada through the Natural Sciences and Engineering Research Council.

Authors may submit their manuscripts to "Articles", "Research Notes" or "News and Comments". This should be indicated in the cover letter accompanying the manuscript. Articles and Notes are independently reviewed by at least two anonymous referees. News or comments are reviewed by the Editor in consultation with the Editorial Board. Manuscripts are accepted in either English or French. An abstract (in both English and French) is required for Articles and Notes.

Contributors should submit manuscripts to Alexander H. Paul, editor, CLIMATOLOGICAL BULLETIN, Department of Geography, University of Regina, Regina, Saskatchewan, S4S 0A2. All manuscripts should be typed double spaced on one side of good quality white paper, 28 cm x 21.5 cm, or its nearest equivalent. The abstract, list of references, tables, and a list of figure captions should be typed doubled spaced on separate sheets. Comments (including book reviews and opinions) and news items should not exceed 1 500 words. Furnish an original and three copies if possible, in the order listed below.

TITLE PAGE should include the full names of author(s), and professional affiliation(s).

The ABSTRACT should be less than 250 words, and typed on a separate page.

The TEXT of longer contributions should be typed double spaced on numbered pages, and divided into sections, each with a separate heading and numbered consecutively. The section heading should be typed on a separate line.

ACKNOWLEDGEMENTS are typed on a separate sheet immediately following the text.

If FOOTNOTES are required, they should be typed, double spaced, on a separate sheet under the heading "Notes" at the end of the text.

REFERENCES should be arranged alphabetically by senior author's last name. The text citation should consist of name(s) of the author(s) and the year of publication, for example Jones (1975) or (Jones, 1975). When there are two or more cited publications by the same author in the same year, distinguishing letters a, b, etc., should be added to the year. A reference to "in press" implies that the paper has been accepted for publication. Titles of periodicals should be given in full.

FIGURE LEGENDS must be provided for each figure, and should be typed together, double spaced, on a separate sheet.

ILLUSTRATIONS should be numbered sequentially. Original drawings, lettering, and symbols should be large enough so that after reduction, the smallest characters will be at least 1.5 mm high.

Each TABLE should be numbered sequentially. Type all tables double spaced on separate sheets.

Authors should use the International System of units, but may show other units in parentheses. Authors should provide instructions in the margin for any special type required (Greek letters, capitals, bold face, etc.).

Authors of articles and research notes are assessed publication charges of \$50 per journal page and are then entitled to 25 free copies. Lesser charges may be negotiated in cases of financial hardship, but do not entitle the authors to any free copies.

Correspondence regarding Society affairs, membership, Institutional subscriptions and back issues of the journal should be directed to the Corresponding Secretary, Canadian Meteorological and Oceanographic Society, P.O.Box 334, Newmarket, Ontario L3Y 4X7. Telephone (416) 898-1040, Fax. (416) 898-7937.

Renseignements pour les collaborateurs et les abonnés

Publication de la Société canadienne de météorologie et d'océanographie, le Bulletin climatologique offre un moyen d'information sur la climatologie. Le comité de rédaction encourage en particulier la soumission de manuscrits sur la climatologie appliquée (comme l'agriculture, le commerce, l'énergie, l'environnement, la pêche, la sylviculture, la santé, les loisirs, les transports, et les ressources en eau), les changements et la variabilité du climat, la prospective climatologique, les applications des modèles du climat (inclus la climatologie physique), et les études régional (inclus les océans). Il est publié grâce à une subvention accordée par le gouvernement canadien par l'intermédiaire du Conseil de recherches en sciences naturelles et en génie.

Les auteurs peuvent choisir de soumettre leurs manuscrits aux "Articles", "Notes de Recherches", ou "Nouvelles et Commentaires". Ils doivent l'indiquer sur la lettre d'accompagnement du manuscrit. Les articles de recherche et les "Notes" sont indépendamment soumis à l'examen d'au moins deux appréciateurs anonymes. Le rédacteur en chef examine les "Nouvelles et Commentaires" conjointement avec le comité de rédaction. On accepte les articles soit en français, soit en anglais. Il faut envoyer un résumé, de préférence en français et en anglais.

Les collaborateurs sont priés de soumettre leurs manuscrits à Alexander H. Paul, rédacteur en chef, BULLETIN CLIMATOLOGIQUE, Département de géographie, Université Regina, Regina, Saskatchewan, S4S 0A2. Il faut dactylographier tous les manuscrits à double interligne, sur un côté d'un papier blanc de bonne qualité, de 28 sur 21,5 cm ou des dimensions les plus rapprochées. Il faut dactylographier à double interligne, sur des feuilles à part, le résumé, la liste des références, les tableaux et la liste des légendes. Les commentaires, les critiques, les opinions et les informations ne doivent pas dépasser 1 500 mots. Fournir l'original et, si possible, trois copies, selon la disposition suivante:

LA PAGE DE TITRE doit comprendre: nom, prénoms des auteurs, ainsi que les affiliations professionnelles.

LE RÉSUMÉ, dactylographié sur une page à part, ne doit pas compter plus de 250 mots.

LE TEXTE. Il faut taper à double interligne, sur des pages numérotées, le texte des articles plus longs et le diviser en sections, chacune dotée d'une en-tête à part et numérotée dans l'ordre. Il faut dactylographier l'en-tête de section sur une ligne à part.

LES REMERCIEMENTS doivent être dactylographiés sur une page à part, après le texte.

LES NOTES DE BAS DE PAGE doivent être dactylographiées à double interligne, sur une feuille à part, au-dessous de l'en-tête "Notes", à la fin du texte.

LES RÉFÉRENCES doivent être disposées dans l'ordre alphabétique, d'après le nom de l'auteur principal. Les citations doivent comprendre le ou les noms du ou des auteurs et l'année de publication, comme Jones (1975) ou (Jones, 1975). Si l'on cite deux ou plusieurs publications du même auteur pendant la même année, il faut ajouter à l'année des lettres qui permettent de les différencier, comme a, b, etc. La mention "à l'impression" implique qu'on a accepté de publier la communication. Il faut indiquer les titres des périodiques en entier.

LES LÉGENDES: elles sont requises pour chaque figure. On dactylographiera ces légendes ensemble, à double interligne, sur une feuille à part.

LES ILLUSTRATIONS doivent être numérotées dans l'ordre. L'original des dessins, des caractères et des symboles doit être assez grand pour que, après réduction, le caractère le plus petit mesure au moins 1,5 mm de haut.

LES TABLEAUX doivent être numérotés dans l'ordre. La dactylographie pour tous les tableaux doit être à double interligne sur des feuilles à part.

Les auteurs doivent utiliser le système international de mesure, mais ils peuvent indiquer d'autres mesures entre parenthèses. Les auteurs doivent porter dans la marge des instructions pour tout caractère spécial voulu (lettres grecques, majuscules, caractères gras, etc.).

Les auteurs d'articles et de notes de recherche doivent payer des frais de publication de 50 \$ par page, ce qui donne droit à 25 copies gratuites. On peut négocier un taux réduit en cas de difficultés financières, mais l'auteur n'aura pas droit à des tirages gratuits.

La correspondance concernant les activités de la Société, les souscriptions des membres et des institutions et les numéros déjà parus, devrait être adressée au Secrétaire-correspondant, Société canadienne de météorologie et d'océanographie, C.P. 334, Newmarket, Ontario L3Y 4X7. Téléphone (416) 898-1040, Fax. (416) 898-7937.

Climatological Bulletin

Bulletin climatologique

Vol. 26, No. 1, April/avril 1992

2 FOREWORD / AVANT-PROPOS

ARTICLES

- 3 Soil Erodibility and the Frequency of Freeze-Thaw Cycles, Rainfall and Snowmelt on Frozen Soil in Canada
H.N. Hayhoe, D.R. Coote and R.G. Pelletier
- 16 Étude du bilan hydrique des sols au Québec méridional
Philippe Rochette et Pierre-André Dubé

NOTES

- 40 Climatic Highlights of 1991 in Canada
Aaron Gergye

BOOK REVIEWS / COMPTE-RENDU DE LECTURE

- 49 Meteorological Aspects of Emergency Response

NEWS AND COMMENTS / NOUVELLES ET COMMENTAIRES

- 53 Comments on GCMs and the Mackenzie Valley
- 57 Mackenzie Basin Impact Study
- 57 Great Lakes-St. Lawrence River Basin Pilot Project
- 58 International Conference on Impacts of Climatic Variations and Sustainable Development in Semi-Arid Regions
- 60 The Climate Diagnostic Research Group
- 62 Thirteenth International Congress of Biometeorology
- 62 Errata

ISSN 0541-6256

Editor / Rédacteur en chef

A.H. Paul

UNIVERSITY OF REGINA

Associate Editors / Rédacteurs associés

T.A. Allsopp
AES, ONTARIO REGION

S. Tabata
INSTITUTE OF OCEAN SCIENCES

D.W. Phillips
ATMOSPHERIC ENVIRONMENT SERVICE

R. Leduc
ENVIRONNEMENT QUÉBEC

G.A. McKay
ATMOSPHERIC ENVIRONMENT SERVICE

L.A. Mysak
McGILL UNIVERSITY

E.E. Wheaton
SASKATCHEWAN RESEARCH COUNCIL

S.J. Cohen
CANADIAN CLIMATE CENTRE

Foreword / Avant-Propos

This issue is mostly about agroclimatology but includes reactions from Stewart Cohen and David Etkin to the paper by Stuart and Judge on GCMs and the Mackenzie Valley in the December 1991 issue. It also contains a summary of climatic highlights in Canada in 1991 which we expect will become an annual feature. Our thanks to Bruce Findlay and Aaron Gergye of the Canadian Climate Centre. Thanks also to Richard Leduc who has agreed to become book review editor for the *Bulletin*.

La plupart de ce numéro concerne l'agroclimatologie mais il comprend aussi des commentaires de Stewart Cohen et David Etkin sur l'article de Stuart et Judge concernant des modèles de circulation globale et la vallée du Mackenzie dans le numéro de décembre 1991. Il contient également un sommaire du temps significatif au Canada en 1991. Nous attendons à ce que ce sommaire annuel soit contribué régulièrement. Nos remerciements à Bruce Findlay et à Aaron Gergye du Centre Canadien du Climat. Remerciements aussi à Richard Leduc qui accepte d'être rédacteur de comptes-rendus de lecture dans le *Bulletin*.

Alec Paul
Editor/Rédacteur en chef

Soil Erodibility and the Frequency of Freeze-Thaw Cycles, Rainfall and Snowmelt on Frozen Soil in Canada

H.N. Hayhoe,

D.R. Cooté

and

R.G. Pelletier

Agriculture Canada, Research Branch

Centre for Land and Biological Resources Research

Ottawa K1A 0C6

[Original manuscript received 31 January 1992;

in revised form 14 March 1992]

ABSTRACT

Soil freeze-thaw cycles and rainfall and snowmelt on soils frozen beneath the surface are events that have been found to increase soil erosion potential. In this study, measurements of soil temperature, snow on the ground and precipitation from 58 climatological stations across Canada are used to quantify the risk of freeze-thaw cycles and of occurrence of water erosion. The gamma distribution is used to model the cumulative frequency and to quantify risk. The results are used to generate maps that show the regional variations. The Prairies had the highest frequency of freeze-thaw cycles but the lowest risk of rainfall or snowmelt on soil frozen beneath the surface. Areas in Eastern Canada had frequent freeze-thaw cycles combined with a high risk of related water erosion. Areas of British Columbia had the lowest frequency of freeze-thaw cycles, and had a modest risk of rainfall on frozen soil.

RÉSUMÉ

On a démontré que les cycles de gel et de dégel, la pluie et la fonte des neiges sur des sols gelés sous la surface avaient pour effet d'accroître le potentiel d'érosion du sol. Dans cette étude, les données sur la température du sol, l'épaisseur de la couche de neige et les précipitations, mesurées dans 58 stations météorologiques réparties sur le territoire canadien, ont servi à quantifier les risques des cycles de gel et de dégel et à estimer les possibilités d'érosion causée par l'eau. On a comparé la fréquence cumulative à la courbe gamma et quantifié ces risques. Les résultats obtenus nous ont permis de construire des cartes de variations régionales. On a observé que les Prairies possédaient la fréquence la plus élevée des cycles de gel et de dégel, mais le plus bas taux de risque de précipitation et de fonte de neige sur des sols gelés sous la surface. De fréquents cycles de gel et de dégel combinés à un risque élevé d'érosion causée par l'eau ont été relevés dans l'Est du Canada. Par contre, en Colombie-Britannique, on a noté le plus bas taux de cycles de gel et de dégel et un risque modéré de pluie sur des sols gelés.

I. INTRODUCTION

Soil erosion is affected by many factors, including soil erodibility, the intensity and amount of rainfall, the speed and direction of wind, landscape topography, and soil surface cover. Most of these factors vary seasonally. Soil erodibility, as defined for use in the Universal Soil Loss Equation (USLE) is influenced primarily by soil texture, structure, organic carbon content, and the presence of coarse fragments (Wischmeier and Smith, 1978). Attempts to account for seasonal variation of soil erodibility when estimating soil erosion risk have been made only recently. A seasonal erodibility adjustment for the USLE was first estimated from mean monthly temperature (Mutchler and Carter, 1983). Unpublished work is currently focussing on the length of the frost-free period as a determinant of seasonal soil erodibility variation for use on the Revised USLE (personal communication, K. Renard, United States Department of Agriculture).

Agricultural land in Canada is almost all subject to freeze-thaw every year. Frozen soil is associated with increased runoff and erosion (Zuzel and Pikul, 1990; Chanasyk and Woytowich, 1986). Freeze-thaw cycles may adversely affect soil structure and increase erodibility in early spring (Edwards and Burney, 1987; Wall *et al.*, 1988). Aggregate stability tends to decrease with an increasing number of freeze-thaw cycles (Lehrsch *et al.*, 1990) and erodibility by wind consequently increases (Hilliard and Rostad, 1990). Soil frozen just below the surface can lead to saturated surface soil with a low shear strength that leaves it vulnerable to water erosion (Edwards and Burney, 1989; Coote *et al.*, 1988). Therefore rainfall frequency and amount as well as snowmelt during these conditions are important factors for assessing potential erosion.

Several studies which recognize the importance of the frequency and duration of soil freezing and thawing have been carried out. Hershfield (1974) used data from 1300 climate summaries in the United States to construct a map showing the annual frequency of air temperature freeze-thaw cycles. Dale *et al.* (1981) used published daily soil temperature data for selected depths to compute the number of freeze-thaw cycles for three locations in Indiana. Zuzel *et al.* (1986) used a soil frost simulation model to study the temporal characteristics of frozen soil in north-central Oregon. Hayhoe *et al.* (1991) used climatological records of soil temperature and rainfall at seven selected sites across Canada to estimate the risk of some factors that are known to contribute to soil erosion events. These include the frequency of freeze-thaw cycles at selected depths, and rainfall frequency and amounts on frozen soil with no snow cover. The gamma distribution was successfully applied to fit the cumulative frequency and estimate the risk in terms of the number of freeze-thaw cycles per year (Zuzel *et al.*, 1986). In this study we have extended the analysis to include data from 58 climatological stations across Canada and to include estimates of snowmelt runoff. They are used to generate risk maps for the frequency of freeze-thaw cycles, rainfall and snowmelt on soil frozen beneath the surface.

2. METHODS

Data were acquired for 58 climatological stations from the Atmospheric Environment Service for locations indicated on the map in Figure 1. The number of years of record analyzed for the climatological stations averaged 20 years; 80 per cent of the stations had 15 years or more. Daily data included maximum and minimum air temperatures, rainfall and total precipitation amounts, the presence of snow on the ground, and soil temperatures at depths of 5, 10, 20, 50, 100, and 150 cm. At the 5, 10 and 20 cm depths, soil temperatures were available for both the morning and the afternoon. Stations are generally located on level ground. Thermistors are used as the sensing element for soil temperature. In the summer, the surface is lawn grass maintained at 5–8 cm length, and in winter the snow is allowed to accumulate throughout the season.

A computer program used for counting events applied simple algorithms to estimate missing data. If the depth of snow on the ground was missing, it was estimated from snowfall and snowmelt using the model developed by McKay (1964). Since the actual snow depth was not as important as its presence or absence, this approach proved satisfactory. For the case where there was snow on the ground, if either the morning (8:00 h) or afternoon (16:00 h) soil temperature measurement was missing, the missing value was replaced with the available value. If there was no snow and either the morning or afternoon soil temperature measurement was missing, then the missing value was similarly replaced with the available measurement provided it exceeded 1°C and the minimum air temperature exceeded 0°C. For each parameter, missing data for each winter season not approximated by these algorithms, were counted. The winter season was defined as the period during which freeze-thaw cycles occur. If the count in any winter season exceeded three, the data for that category were not used in any calculations.

Freeze-thaw cycles were tabulated from the soil temperature data. Following the assumption used by Dale *et al.* (1981), a soil temperature greater than 0°C was considered a thaw and less than or equal to 0°C was considered a freeze. Each winter season began with thawed soil. Each time the soil temperature oscillated from thawed to frozen, one cycle was counted. Since soil temperatures at 5, 10 and 20 cm were available for both morning and afternoon, any daily freeze-thaw cycles that occurred were recorded.

The frequency and amount of rainfall on soil frozen at the 5 cm depth or below, that lacked snow cover, were calculated for three different depths (5, 10 and 20 cm) using the algorithm shown in Figure 2. Daily snowmelt was calculated using the model developed by McKay (1964) and used in the Versatile soil moisture budget (Baier *et al.*, 1979). The frequency and amount of snowmelt on soil frozen at the 5 cm depth or below were also calculated. The criteria were designed to detect the presence of an impermeable frozen layer within the top 20 cm of soil. The first criterion concerned rainfall or snowmelt on soil frozen at 5 cm, that remained frozen following the event (i.e. the rainfall or snowmelt did not thaw



FIGURE 1. Locations of the climatological stations used in this study.

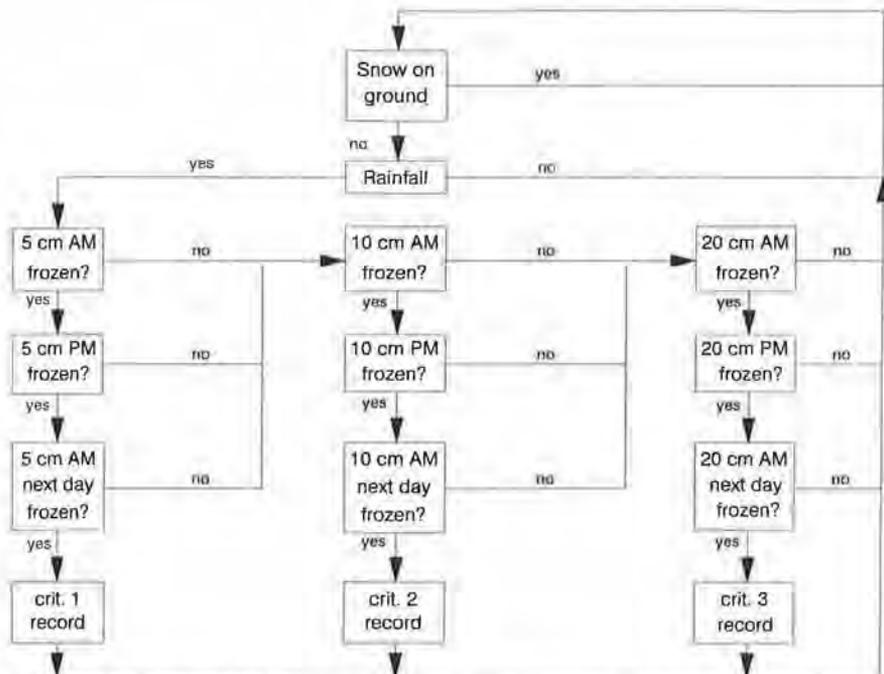


FIGURE 2 Flowchart of the algorithm used to count the frequency of rain on soil frozen at the 5 cm depth or below.

the frost layer). If the 5 cm depth did not meet the criterion then the 10 cm depth was checked. If this was not frozen then the 20 cm depth was checked. The second and third criteria led to calculation of the frequency of rainfall or snowmelt on soil with nearest-to-surface frozen layer at 10 cm and 20 cm respectively.

These data provide an indication of the variability in the number of freeze-thaw cycles and in the occurrence and amount of rainfall or snowmelt on soil frozen beneath the surface. To quantify the risk, the gamma distribution (Beyer, 1969) was used as described by Hayhoe *et al.* (1991). Zuzel *et al.* (1986) successfully used this probability distribution to model the number of freeze-thaw cycles in Oregon. It was used to calculate the frequency of freeze-thaw cycles as well as the amount of rain and snowmelt that would be expected to occur at least once in five years or at the 20 percent risk level. Isoline maps of Canada showing the spatial distribution of the mean and of the 20% risk level for freeze-thaw cycles, and rain and snowmelt on soils with frozen layers were produced using a computer software package (Surfer, 1990).

3. RESULTS AND DISCUSSION

The results show a clear indication of the regional difference in winter conditions that lead to increased soil erodibility. This is especially true for agricultural areas.

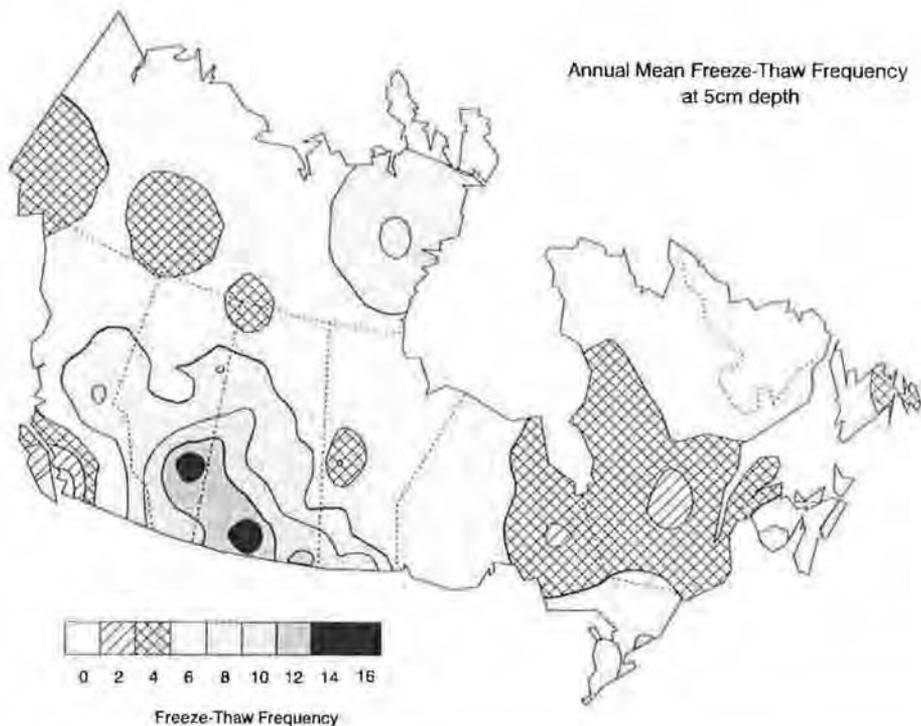


FIGURE 3. Average annual number of freeze-thaw cycles at 5 cm soil depth.

Northern areas in British Columbia, Ontario and Quebec have very few climatological stations that monitor soil temperature and therefore have poor spatial resolution.

Figures 3 and 4 show the distribution of average annual and 20% risk of freeze-thaw cycles in Canada. Heavier shading indicates areas with higher frequency or risk. All regions of Canada are at risk of freeze-thaw cycles at the 5 cm depth. The lowest risk occurs in the south-west region of British Columbia. At Vancouver, which exhibited the lowest frequency, freezing does not occur every year at 5 cm. The data show an average of 0.4 freeze-thaw cycles with at least 1.5 occurring once in 5 years. The Prairie region showed the most frequent freeze-thaw cycles as indicated by the dark grey and black areas in Figures 3 and 4. The highest value occurred at Swift Current with an average of 17.1 freeze-thaw cycles per year followed by Lacombe with 16.3, Vauxhall with 14.8, Morden with 14.4 and Kindersley with 14.3.

Repeated freeze-thaw cycles break down soil aggregates and this can

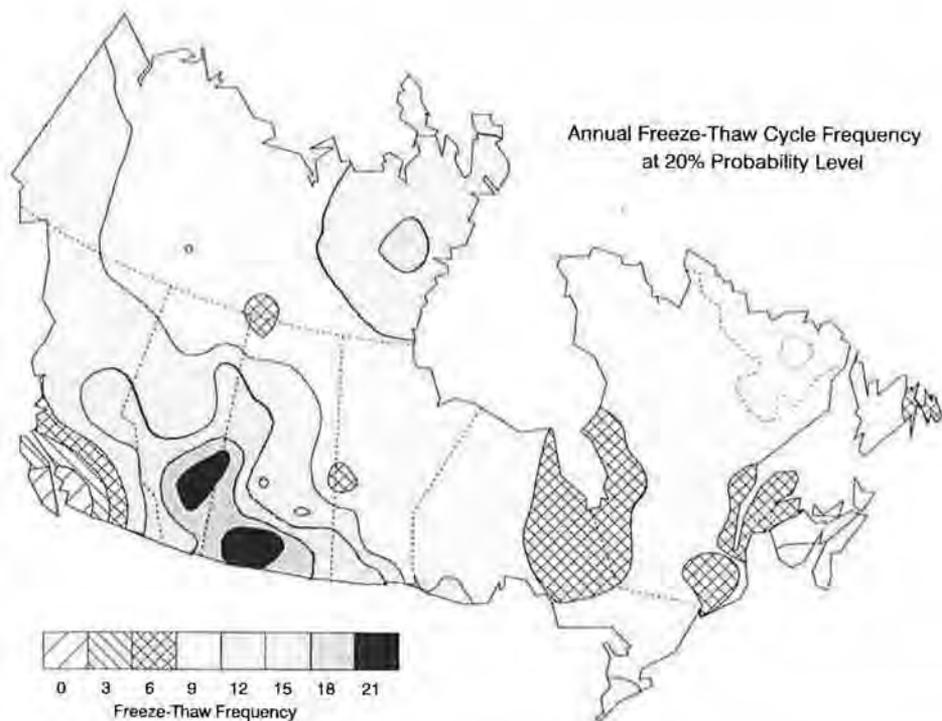


FIGURE 4. Annual freeze-thaw cycle frequency at 20% probability level at 5 cm soil depth.

result in more particles of the size range more susceptible to wind erosion, as noted by Wheaton (1984). Figure 4 indicates that all areas of Canada except south-western British Columbia are at risk of having at least 6 freeze-thaw cycles at the 20 percent probability level.

Figures 5 and 6 illustrate the regional risks of rain on soil which has frozen layers with no snow cover. The Prairies and Northern Canada have the lowest risk. The lowest mean rainfall on soil frozen beneath the surface was 0.2 mm at Lethbridge. The map of rainfall shows an increasing risk east of the Prairies with the highest levels occurring in southern Ontario and the Atlantic provinces. At Simcoe the mean rainfall on soil with frozen layers was 59.2 mm, and 100.7 mm at the 20 percent probability level. These values are similar to those reported for Harrow (Hayhoe *et al.*, 1991) and to values observed at Guelph. The highest mean rainfall on soil frozen beneath the surface was at Truro with a value of 67.4 mm, while the highest annual rainfall under these conditions at the 20 percent risk level was 155.6 mm at St. John's West.

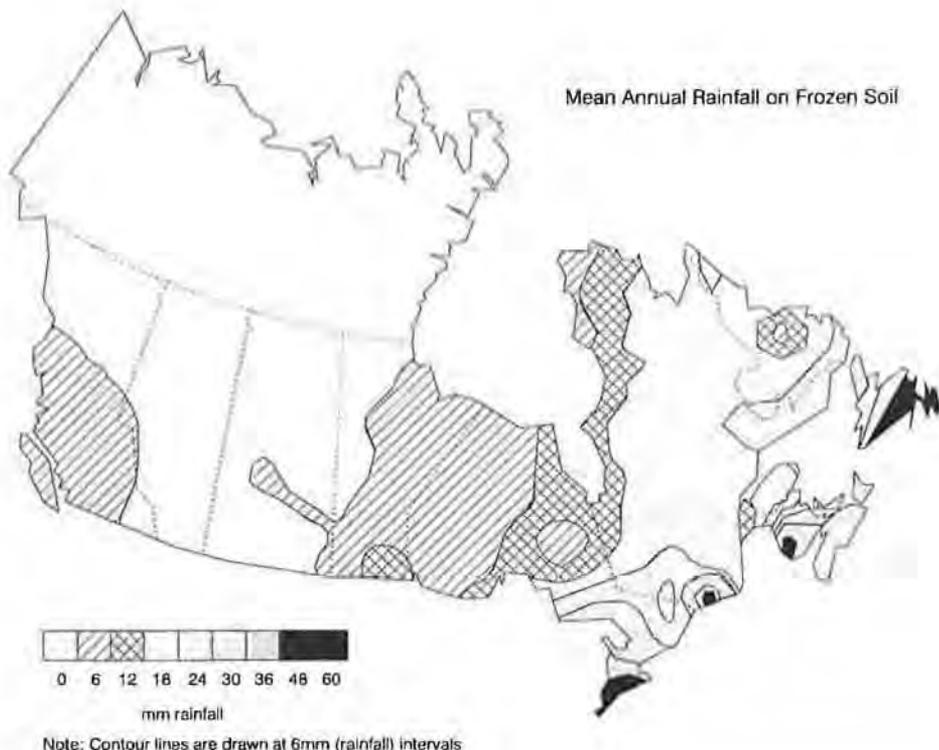


FIGURE 5. Average annual amount of rainfall on soil frozen at the 5–20 cm depth.

To understand better the differences in the events associated with winter erosion risk, we used a seeded cluster analysis with rainfall per year at the 20 percent risk level on soil which has frozen layers with no snow cover and the frequency of freeze-thaw cycles per year at the 20 percent risk level (STSC, 1987). The results are illustrated in Figure 7. The cluster of stations with conditions most likely to be associated with severe winter erosion events included Fredericton (F), St. John's West and Truro. It had the greatest amount of rain falling on soil frozen beneath the surface and a moderate number of freeze-thaw cycles. It is represented by the cluster of F's in Figure 7. The cluster with the next highest amount of rain on soil frozen beneath the surface was denoted by S's in Figure 7. It included Buctouche, Charlottetown, Harrow, Hoytblissville, Kentville, Simcoe (S), and Ste Anne de Bellevue. The remaining four clusters were characterized by increasing frequency of freeze-thaw cycles but lower amounts of rain falling on soil with a frozen layer beneath the surface. Three of these clusters were those associated with Vancouver (V), Winnipeg (W) and Ottawa (O), representing

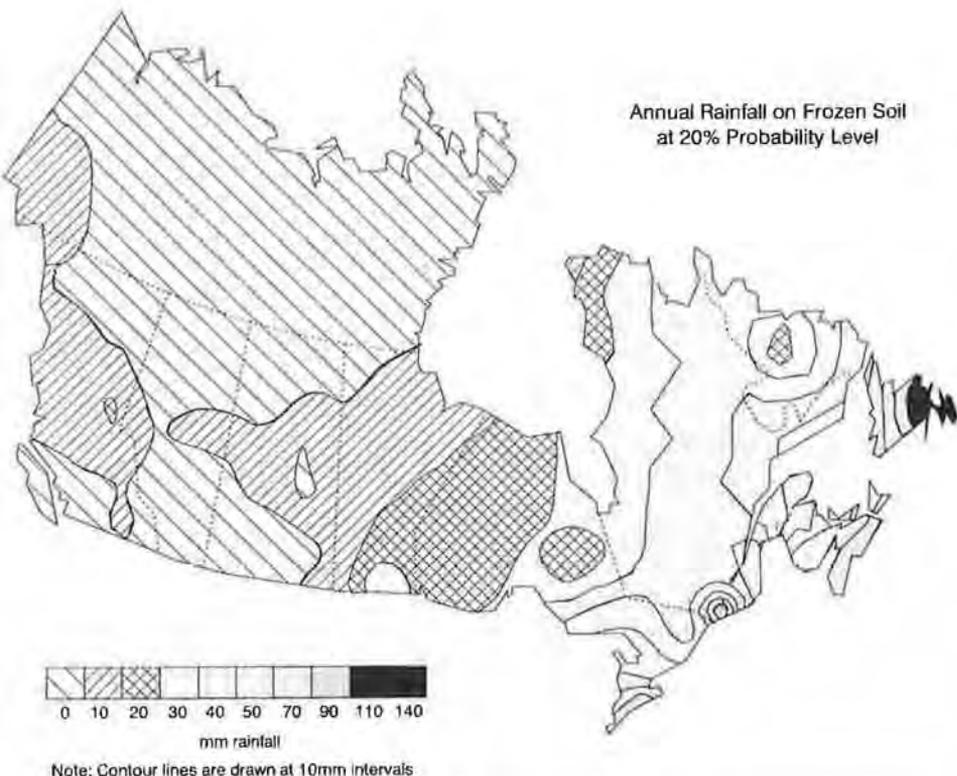


FIGURE 6. Annual mean rainfall at 20% probability on soil frozen at the 5–20 cm depth.

increasing frequency of freeze-thaw cycles. The cluster with the highest number of freeze-thaw cycles was denoted by L's and included Estevan, Indian Head, Lacombe (L), Morden, Swift Current, Vauxhall, and Vegreville. These locations were most likely to produce conditions favourable to wind erosion, i.e., frequent freeze-thaw cycles but low rainfall.

Figures 8 and 9 show the estimated mean and 20 percent probability level for annual snowmelt (McKay, 1964) on frozen soil. Although rainfall is more likely to produce soil detachment and erosion than is snowmelt, the latter can still be an important factor to consider. Edwards and Burney (1989) reported that in early spring, snowmelt and prolonged low-intensity rains are believed to be the main cause of soil erosion in Prince Edward Island, especially where the soil is still frozen just below the surface. The maps (Figures 8 and 9) show increasing amounts of snowmelt on soil frozen beneath the surface in Eastern Canada and are consistent with the observations of Edwards and Burney (1989). At Charlottetown the mean annual snowmelt on soil frozen beneath the surface was 88.8 mm and the

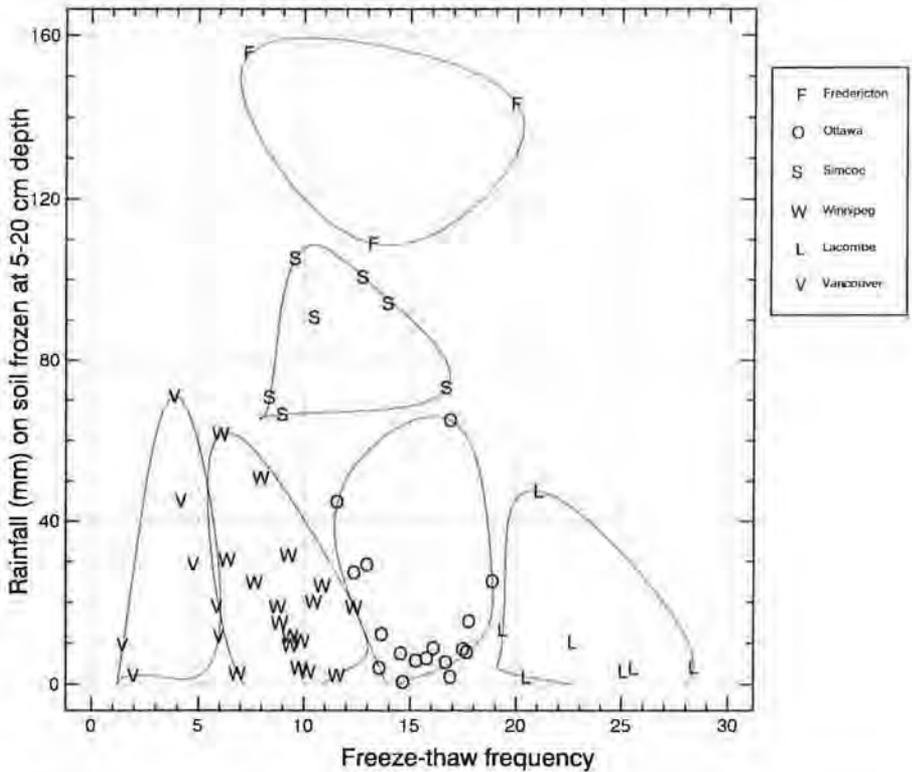


FIGURE 7. Plot of clusters classified by annual freeze-thaw cycles at 5 cm soil depth and the mean annual amount of rain falling on soil frozen at the 5-20 depth.

20 percent probability level was 198.5 mm. At the 20 percent probability level Normandin, St. Augustin, Caplan, Buctouche, Goose Bay and St. John's West all indicated as much or more snowmelt on partly frozen soil as Charlottetown, and La Pocatiere, Hoytblissville, and Fredericton all had over 170 mm.

CONCLUSIONS

Climatological data from 58 sites across Canada allowed a spatial characterization of winter conditions which may lead to severe soil erosion events. At the drier locations on the Prairies, frozen soil and freeze-thaw cycles are most likely to be contributing factors to water erosion. They also may lead to conditions favouring wind erosion. At sites in Eastern Canada, the frequency and amount of rain on soil

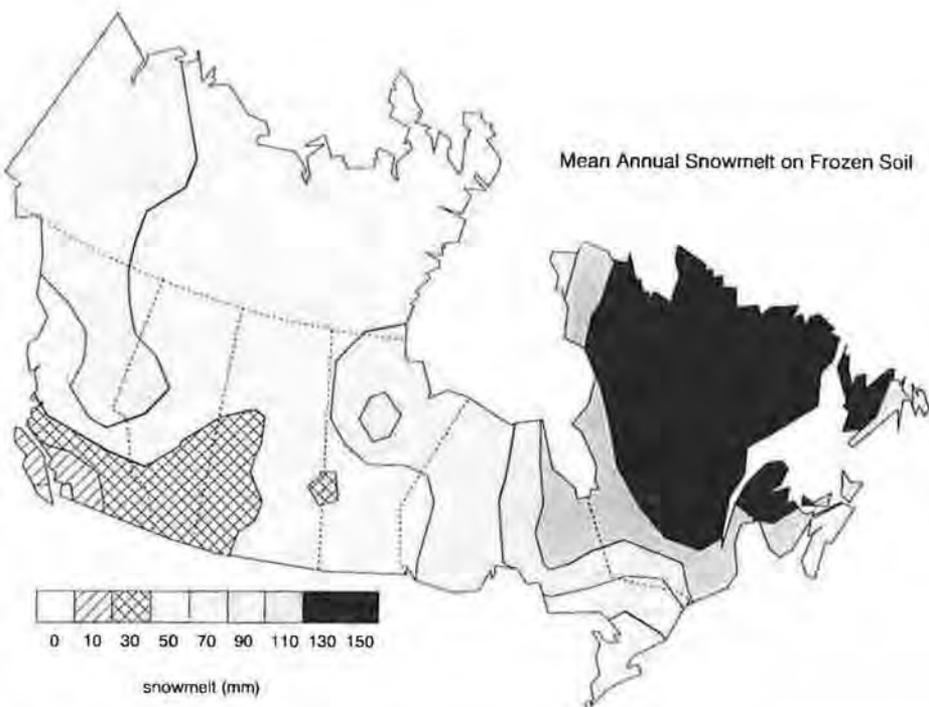


FIGURE 8. Mean annual amount of snowmelt on soil frozen at the 5–20 cm depth.

frozen beneath the surface contribute significantly to risk of water erosion. The estimate of snowmelt on soil that is not thawed beneath the surface provided additional information on a situation known to contribute to the risk of soil erosion. The gamma distribution provided an indication of frequencies and amounts occurring at least once in five years.

ACKNOWLEDGEMENTS

The authors are grateful to the Atmospheric Environment Service for assistance with the assembly of the data used in this study. Funding was provided by the National Soil Conservation Program, under the Soil Quality Evaluation Program administered by the Centre for Land and Biological Resources Research, Research Branch, Agriculture Canada.

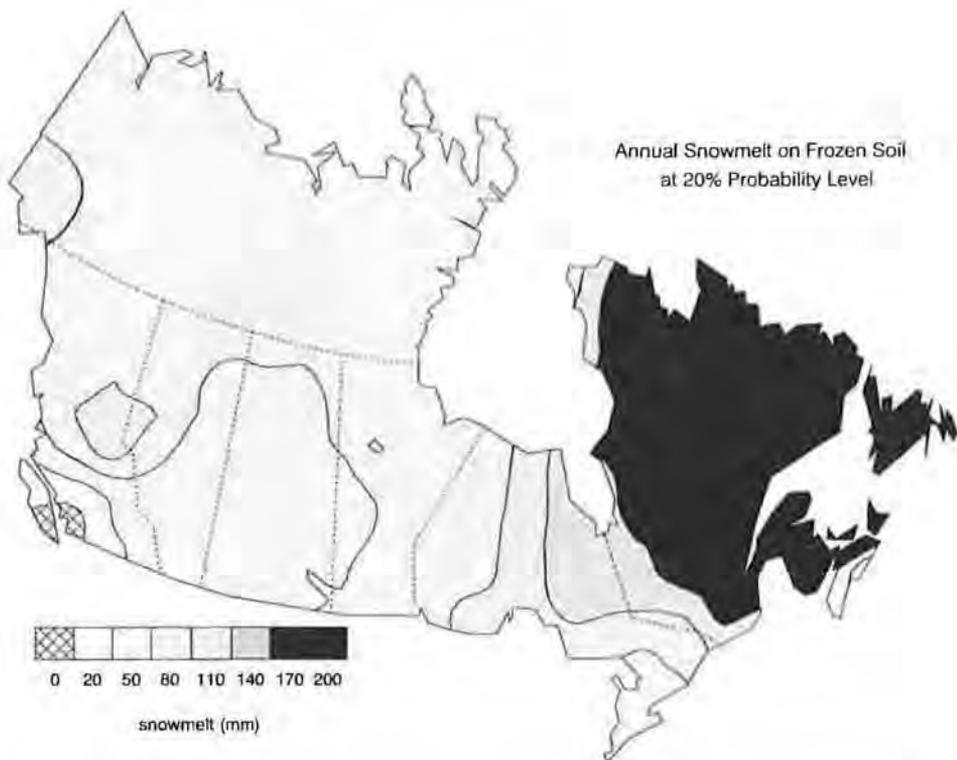


FIGURE 9. Annual mean amount of snowmelt at 20% probability on soil frozen at the 5–20 cm depth.

REFERENCES

- Baier, W., J.A. Dyer and W.R. Sharp, 1979. *The Versatile soil moisture budget*. Tech. Bull. 87, Agromet. Section, Research Branch, Agriculture Canada, Ottawa, 52 pp.
- Beyer W.H. (ed.), 1968. *Handbook of Tables for Probability and Statistics*. 2nd Edition, Chemical Rubber Co., Cleveland, Ohio, 642 pp.
- Chanasyk, D.S. and C.P. Woytowich, 1986. Snowmelt runoff from agricultural land in the Peace River region. *Can. Agric. Eng.*, 28(1):7–13.
- Coote, D.R., C.A. Malcolm-McGovern, G.J. Wall, W.T. Dickinson and R. Rudra, 1988. Seasonal variation of erodibility indices based on shear strength and aggregate stability in some Ontario soils. *Can. J. Soil Science*, 68:405–416.
- Dale, R.F., B.C. Reinke and J.E. Wright, 1981. Freeze-thaw cycles in Indiana soils. *Indiana Academy of Science Proceedings*, 90:408–415.
- Edwards, L.M. and J.R. Burney, 1987. Soil erosion losses under freeze/thaw and winter ground cover using a laboratory rainfall simulator. *Can. Agric. Eng.*, 29:109–115.

- Edwards, L.M. and J.R. Burney, 1989. The effect of antecedent freeze-thaw frequency on runoff and soil loss from frozen soil with and without subsoil compaction and ground cover. *Can. J. Soil Science*, 69:799–811.
- Hayhoe, H.N., R.G. Pelletier and S. Moggridge, 1991. Frequency analysis of freeze-thaw cycles and rainfall on frozen soil at seven Canadian locations. *Can. Agric. Eng.*, in press.
- Hershfield, D.M., 1974. The frequency of freeze-thaw cycles. *J. Applied Meteorology*, 13:348–354.
- Hilliard, C.R. and H.P.W. Rostad, 1990. *Seasonal variation of aggregate size distribution on clay-textured soils in Saskatchewan*. Publication M98, Sask. Inst. Pedology, Univ. of Sask., Saskatoon, 11 pp.
- Lehrsch, G.A., R.E. Sojka, D.L. Carter and P.M. Jolley, 1990. Effects of freezing on aggregate stability of soils differing in texture, mineralogy, and organic matter content. In Cooley, K.R. (ed.), *Proceedings of the International Symposium on frozen soil impacts on agricultural, range, and forest lands, Spokane, Washington, 21–22 March, 1990*. U.S. Army Cold Regions Research and Engineering Laboratory, Hanover, New Hampshire, CRREL Special Report 90-1: 61–69.
- McKay, G.A., 1964. *Relationships between snow survey and climatological measurements for the Canadian Great Plains*, paper prepared for the Western Snow Conference, Nelson, B.C. 19 pp.
- Mutchler, C.K. and C.E. Carter, 1983. Soil erodibility variation during the year. *Trans. ASAE*, 26(4):1102–1104, 1108.
- STSC, 1987. *STATGRAPHICS User's Guide, Version 2.6*. STSC, Inc., Rockville, MD. 470 pp.
- SURFER, 1990. *SURFER Reference Manual, Version 4*. Golden Software, Inc., Golden, Colorado. 480 pp.
- Wall, G.J., W.T. Dickinson, R.P. Rudra and D.R. Coote, 1988. Seasonal soil erodibility variation in southwestern Ontario. *Can. J. Soil Science*, 68:417–424.
- Wheaton, E.E., 1984. *Wind erosion – Impacts, causes, models and controls: A literature review and bibliography*. Publication E-906-48-E-84, Saskatchewan Research Council, Saskatoon. 19 pp.
- Wischmeier, W.H. and D.D. Smith, 1978. *Predicting rainfall erosion losses – a guide to conservation planning*. U.S. Department of Agriculture, Agric. Handbook No. 537. U.S. Government Printing Office, Washington, D.C., 58 pp.
- Zuzel, J.F., J.L. Pikul, Jr. and R.N. Greenwalt, 1986. Point probability distributions of frozen soil. *J. Climate and Appl. Meteor.*, 25:1681–1686.
- Zuzel, J.F. and J.L. Pikul, Jr., 1990. Frozen soil, runoff and soil erosion research in northeastern Oregon. In Cooley, K.R. (ed.), *Proceedings of the International Symposium on frozen soil impacts on agricultural, range, and forest lands, Spokane, Washington, 21–22 March, 1990*. U.S. Army Cold Regions Research and Engineering Laboratory, Hanover, New Hampshire, CRREL Special Report 90-1: 4–10.

Étude du bilan hydrique des sols au Québec méridional

*Philippe Rochette*¹

et

*Pierre-André Dubé*²

[Manuscrit reçu le 17 décembre 1990;

en forme révisée le 4 août 1991]

RÉSUMÉ

Une étude du bilan hydrique des sols agricoles a été menée dans la partie méridionale du Québec. Les variables étudiées ont été les valeurs mensuelles moyennes (mai à septembre) d'évapotranspiration potentielle (ETP), de pluie, du nombre de jours avec déficit hydrique et de la fraction présente de la réserve en eau utile du sol. L'ETP a été calculée à l'aide d'une version modifiée de l'équation #1 de Baier & Robertson et le modèle de bilan hydrique choisi fut le Bilan Hydrique Polyvalent (BHP). Les caractéristiques d'une culture de graminées en mélange ont été appliquées au BHP pour les données météorologiques de la période 1972–1982 à 227 stations météorologiques. Les résultats indiquent que les régions du Québec méridional les plus sujettes aux déficits hydriques sont la plaine de Montréal et la vallée de l'Outaouais et, à un degré moindre, le Témiscamingue et la côte nord-ouest de la Gaspésie. Les régions de Québec et des Cantons de l'Est sont, au contraire, celles où le manque d'eau est le moins susceptible de nuire à la croissance des végétaux.

ABSTRACT

A soil water budget study was carried out for the agricultural areas of Québec. The parameters used in the analysis were the monthly averages of potential evapotranspiration (PE), rainfall and available water present in the soil profile. PE was calculated by a modified version of the Baier and Robertson equation #1 and soil water content was estimated by the Versatile Soil Moisture Budget. A vegetation cover composed of mixed grasses was studied and the model was run over the growing season for an eleven-year period (1972–82) at 227 meteorological stations. The results indicate that the Montréal plain and the Ottawa Valley were the driest regions, followed by Témiscamingue and the northwest coast of the Gaspé Peninsula. The Québec City and Eastern Townships regions, on the other hand, were those where water shortage is less likely to affect crop growth.

¹ Centre de recherches sur les terres, Direction de la recherche, Agriculture Canada, Ottawa K1A 0C6

² Département de phytologie, Faculté des sciences de l'agriculture et de l'alimentation, Université Laval, Sainte-Foy (Québec) G1K 7P4.

I. INTRODUCTION

Même s'ils y sont plus sévères, les stress hydriques ne sont pas seulement observés sous des climats arides. En effet, Sneed et Patterson (1983), dans une analyse de la productivité végétale en climats humides, concluent que l'irrigation devrait y occuper une place plus importante dans la régie des cultures en raison de déficits hydriques suffisamment nombreux pour en diminuer significativement les rendements.

Les travaux de Dubé et Rochette (1985a et 1985b) ont également montré que la fraise et la pomme de terre étaient soumises à de fréquents déficits hydriques dans les régions du Québec où elles sont produites. Les auteurs ont conclu que le nombre et la sévérité de ces déficits peuvent réduire sensiblement les rendements de ces cultures si aucune irrigation n'est pratiquée. L'alimentation hydrique des plantes apparaît donc comme un élément non négligeable dans la détermination des rendements agricoles au Québec méridional.

L'étude du bilan hydrique d'une surface se fait sommairement en comptabilisant les gains, représentés principalement par les précipitations, et les pertes dont la majeure partie se fait sous forme de vapeur d'eau dans le processus d'évapotranspiration. Plusieurs études du bilan hydrique québécois ont été réalisées au cours des dernières décennies. Quelques-unes de leurs caractéristiques sont décrites sommairement au tableau 1. Dans leurs travaux, Chapman et Brown (1966) ont considéré que l'évapotranspiration se maintenait à son niveau potentiel (ETP) tant que la réserve en eau du sol n'était pas épuisée et que cette dernière ne commençait à être restaurée, jusqu'à un maximum de 100 mm, que lorsque les précipitations surpassaient l'ETP. Ils ont conclu que le Québec est une région

TABLEAU 1. Sommaire des études de bilan hydrique au Québec.

Auteurs	ETP ¹	Période étudiée	Saison étudiée	# de stations	Réserve en eau du sol (mm)
Chapman et Brown (1966)	T	1921-50	Année	N/D ²	100
Massin (1971)	T	1939-68	Mois (Mai-Oct.)	153	64, 89 114 et 140
Wilson (1971)	T	1931-60	Année	167 ³	300
Agric. Canada (1976)	BR1	1931-60	Année S.C. ⁴	120	100, 25

¹ T = Thornthwaite et BR1 = Baier & Robertson #1.

² Non-disponible.

³ Comprend aussi les stations du Nouveau-Québec.

⁴ Saison de croissance.

relativement humide dans le contexte canadien puisque seules les régions de la plaine de Montréal et de la vallée de l'Outaouais montrent un déficit annuel moyen de 25 mm. Ils soutiennent que, pour l'agriculture, l'avantage d'y avoir peu de déficits hydriques est annulé par les problèmes reliés à l'excès d'humidité au moment du séchage des fourrages de même qu'au semis et à la récolte. Ils identifient la région des Cantons de l'Est comme étant celle où les excès d'eau risquent d'être les plus nuisibles.

Massin (1971) a suivi la même procédure pour déterminer les fréquences relatives de déficit hydrique pour des sols ayant différentes réserves en eau facilement utilisable. Ses résultats pour la période de mai à octobre montrent eux aussi que les régions de Montréal et de l'Outaouais, de même que certains endroits du Lac St-Jean et de la Gaspésie, étaient les plus susceptibles de connaître des déficits hydriques alors qu'au contraire, celles des Laurentides et des Appalaches en étaient pratiquement épargnées. L'intérêt relatif aux résultats mensuels obtenus par Massin (1971) est diminué par le fait que l'équation de Thornthwaite (1948) fut utilisée pour le calcul de l'ETP. Il a en effet été montré que bien que les cumuls annuels d'ETP produits par cette équation soient satisfaisants, ils sont erronés en début de saison en raison du délai entre l'augmentation de la radiation et le réchauffement de l'air (Pelton *et al.*, 1960). Les valeurs d'ETP calculées par les équations de Thornthwaite (1948) et de Penman (1963) à Québec et à Montréal montrent bien l'erreur encourue au printemps (tableau 2).

Wilson (1971) a réalisé une étude annuelle du bilan hydrique québécois à l'aide de la méthode de Thornthwaite (1948). Cette fois, l'évapotranspiration réelle a été calculée en fonction de la fraction de la réserve en eau toujours présente dans le sol. Ses conclusions sont très voisines de celles de Chapman et Brown (1966).

Une autre méthode a également été employée pour définir l'intensité des déficits hydriques au Canada. Des polynômes du second degré exprimant le déficit pour la saison de croissance en fonction de la différence entre l'ETP et les précipitations (P) pour la même période ont été suggérées (Agriculture Canada, 1976). Les équations ont d'abord été calibrées expérimentalement aux stations de recherches régionales et ont ensuite été appliquées aux endroits où ETP et P étaient

TABLEAU 2. Valeurs moyennes de l'ETP (mm) selon les équations de Penman (P) et de Thornthwaite (T) à deux endroits du Québec méridional (1972-1982).

Station	ETP	Mai	Juin	Juillet	Août	Septembre	Saison
Québec	P	106	120	130	106	64	526
	T	75	113	134	114	68	504
Montréal	P	121	131	147	115	73	587
	T	84	118	140	120	74	536

connues. Dans cette étude, deux niveaux de réserve utile (25 et 100 mm), employant pour chacun desquels deux seuils de probabilité de connaître un déficit (10 et 50%), ont été considérés. Les régions de la plaine de Montréal, de la vallée de l'Outaouais et du Témiscamingue ont encore ici été identifiées comme étant celles où la probabilité de déficit hydrique est la plus grande alors que le reste du Québec était considéré comme une région relativement homogène et à plus faible risque.

Les études sur le bilan hydrique au Québec exécutées au cours des dernières décennies ont permis d'en préciser les différences spatiales moyennes pour la saison de croissance. Les résultats des analyses mensuelles (Massin, 1971) ne sont cependant pas sûrs en raison de l'absence d'une méthode fiable de calcul de l'ETP sur cet intervalle de temps, si bien que l'information quantitative produite a été réduite au bilan saisonnier ou annuel. C'est donc dans le but de produire des statistiques descriptives plus complètes et plus précises des conditions hydriques du sol du Québec, que fut entreprise une étude visant à y calculer le bilan hydrique journalier au cours de la saison de croissance.

2. MATÉRIEL ET MÉTHODES

Le territoire considéré dans cette étude est celui où se pratique l'agriculture dans la province de Québec. Il est principalement formé des plaines du St-Laurent et de l'Outaouais, des vallées incluses dans les massifs laurentien et appalachien, de l'Abitibi-Témiscamingue, du Lac St-Jean et de la côte gaspésienne.

Les variables météorologiques journalières utilisées ont été la précipitation et les températures minimale et maximale observées à 222 stations du réseau climatologique québécois où la qualité du dossier permettait le calcul du bilan hydrique de mai à septembre pour un minimum de huit années sur les onze couvertes par l'étude (1972-82). La vitesse moyenne du vent pour la saison estivale estimée par l'échelle de Beaufort (Ministère de l'Environnement du Québec, 1978) a également servi au calcul de l'ETP. La localisation des stations est indiquée à la figure 1.

2.1 *Bilan Hydrique*

Le bilan hydrique polyvalent (BHP-III) (Dyer et Mack, 1984) a été retenu pour cette étude. Il est la plus récente version d'un modèle multicouche proposé par Baier et Robertson (1966) comme une forme améliorée du Bilan Modulé (Holmes et Robertson, 1959). Le profil du sol étudié y est divisé en deux couches composées de zones de nombre et d'épaisseur variables qui constituent les unités où sont estimés les pertes et les gains journaliers en eau.

2.1.1 *sol et couvert végétal*

Pour une même demande atmosphérique, le bilan hydrique d'une surface dépend des caractéristiques hydrauliques du sol, de sa profondeur et du type de couvert

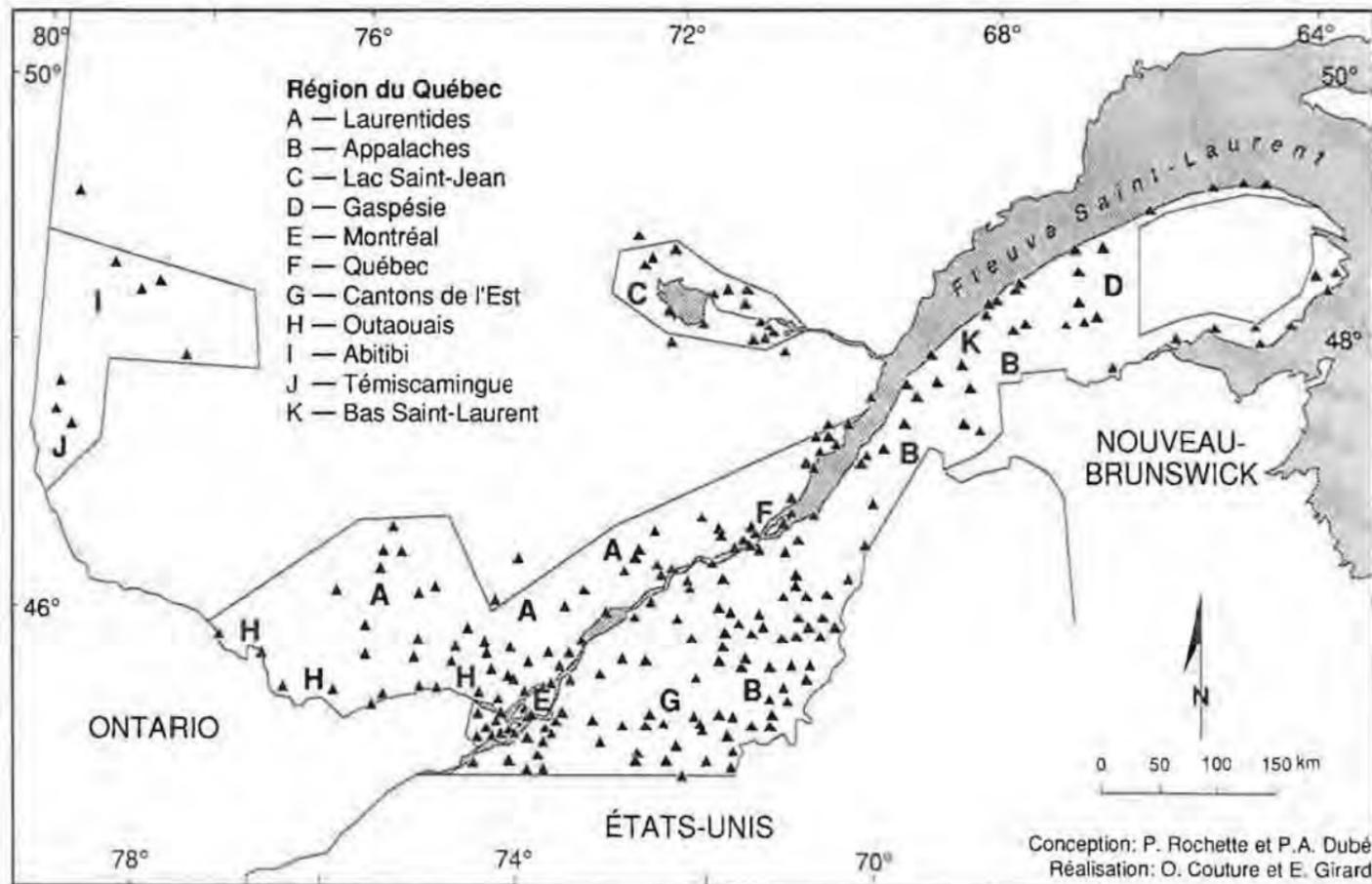


FIGURE 1. Territoire couvert et stations météorologiques utilisées.

Conception: P. Rochette et P.A. Dubé
 Réalisation: O. Couture et E. Girard

végétal présent. Chaque combinaison différent d'un type de sol et d'une culture produit donc un bilan hydrique qui lui est propre. Il est cependant impossible d'étudier toutes les combinaisons "sol/couvert végétal" qu'on retrouve au Québec agricole. C'est pourquoi nous avons choisi de nous limiter à une communauté végétale courante, soit un couvert de graminées fourragères considérées en croissance active constante dont les racines s'enfoncent jusqu'à 60 cm de profondeur, et à deux types de sol, soit un sable et un loam. Les sols retenus avaient une profondeur d'un mètre, divisée en deux couches et six zones. Leurs caractéristiques hydriques, présentées au tableau 3, sont celles déterminées par Clapp et Hornberger (1987). Un sol argileux a également été étudié. Les statistiques obtenues ont cependant été très voisines de celles obtenues pour le loam. Comme elles n'apportent aucune information nouvelle, elles ne sont pas présentées ici.

TABLEAU 3. Caractéristiques des sols étudiés.

SABLE (Réserve utile = 46 mm)							
Couche #	Zone #	Zone (cm)	Porosité totale (mm)	Capacité au champ (mm)	Point de flétriss. (mm)	Eau dispon. (mm)	K*
1	1	0-5	19.8	6.4	2.5	3.9	0.55
	2	5-12.5	29.6	9.5	3.8	5.7	0.19
	3	12.5-25	49.4	15.9	6.3	9.6	0.17
	4	25-50	98.8	31.8	12.5	19.3	0.08
2	5	50-75	98.8	31.8	12.5	19.3	0.03
	6	75-100	98.8	31.8	12.5	19.3	0.01
Profil			395.2	127.2	50.1	77.1	1.03
LOAM (Réserve utile = 76 mm)							
Couche #	Zone #	Zone (cm)	Porosité totale (mm)	Capacité au champ (mm)	Point de flétriss. (mm)	Eau dispon. (mm)	K*
1	1	0-5	22.6	12.6	6.2	6.4	0.55
	2	5-12.5	33.8	18.8	9.3	9.5	0.19
	3	12.5-25	56.4	31.4	15.6	15.8	0.17
	4	25-50	112.8	62.8	31.2	31.6	0.08
2	5	50-75	112.8	62.8	31.2	31.6	0.03
	6	75-100	112.8	62.8	31.2	31.6	0.01
Profil			451.2	251.2	124.7	126.5	1.03

* Coefficient fonction du couvert végétal.

2.1.1 évapotranspiration

L'évapotranspiration réelle (ETR), exprimée en millimètres, est calculée par BHP-III à l'aide de la relation suivante:

$$ETR = \sum_{j=1}^n K_j \frac{S_j}{C_j} Z_j \cdot ETP \quad (1)$$

- où: n = Nombre de zones sur l'ensemble du profil, (numérotées de la surface vers le bas du profil);
 K_j = Coefficient fonction du couvert végétal pour la zone "j";
 S_j = Fraction présente de la réserve en eau utile au début de la journée dans la zone "j" (mm);
 C_j = Réserve en eau utile de la zone "j" (mm);
 Z_j = Coefficient d'ajustement selon le patron d'assèchement du sol.

L'ETR a été considérée égale à l'ETP pour des teneurs en eau supérieures à 50% de la réserve utile pour le loam et 30% pour le sable. Sous ces seuils, le rapport ETR/ETP décroissait de façon linéaire.

La méthode d'estimation de l'ETP retenue dans cette étude a été celle de BR_{LAVAL} (Rochette et Dubé, 1989 et 1990), une adaptation de l'équation #1 de Baier et Robertson (1965):

$$ETP = a (a_{0i} + a_{1i} TX + a_{2i} EC + a_{3i} RE) \quad (4)$$

- où: a = Coefficient adimensionnel d'ajustement saisonnier fonction du nombre de jours après le premier mai;
TX = Température maximale de la journée considérée (°C);
EC = Différence entre l'écart des températures minimale et maximale de la journée considérée et la normale climatique du même écart pour le mois (°C);
RE = Radiation au sommet de l'atmosphère pour la journée (cal/cm²/jr);
 i = Indice correspondant à la classe du vent estival moyen de la station étudiée ($i = 1, 16$).

Cette équation a été calibrée à l'aide de l'ETP calculée par l'équation de Penman à onze endroits du Québec méridional et pour seize vitesses de vent. Le choix de la version à utiliser est donc fonction de l'endroit étudié et des conditions estivales de vent qui y prévalent (Rochette et Dubé, 1990).

Les variables mensuelles compilées ont été, pour chaque type de sol, la moyenne de la fraction présente de la réserve en eau utile et le nombre moyen de jours avec déficit hydrique. Un déficit hydrique était considéré lorsque au moins 60% de la réserve utile était épuisée.

2.2 Groupement et Cartographie

En plus des statistiques moyennes mensuelles, la variation spatiale moyenne pour l'ensemble de la saison de croissance a été déterminée pour les trois thèmes étudiés: la précipitation, l'ETP et le bilan hydrique. Les descripteurs utilisés pour le zonage des trois thèmes ont été respectivement les valeurs mensuelles moyennes (mai à septembre) de pluie, d'ETP et de la fraction de la réserve en eau utile présente dans le loam.

Une analyse en composantes principales en mode "R" a été exécutée afin de déterminer la structure des données et d'isoler la dimension "intensité" de chaque thème (SAS, 1982). Les composantes obtenues représentent des pôles ou axes de groupement. Comme l'extraction des composantes est faite selon le critère de maximiser la variance expliquée par chacune, ces axes peuvent servir à discriminer les individus. A cette fin, les notes des stations sur la composante "intensité" ont été utilisées pour répartir les individus dans cinq groupes. La composante "intensité" était caractérisée par un coefficient élevé et de même pour tous les descripteurs. Une composante de ce type était présente pour chaque thème en raison de la corrélation entre les valeurs mensuelles des descripteurs d'un même thème. La cartographie a été réalisée à l'aide du logiciel "SYMAP" (Dougenik et Sheenan, 1975).

3. RÉSULTATS ET DISCUSSION

3.1 Groupement

Les deux premières composantes principales extraites de chaque thème sont présentées au tableau 4. Dans chaque cas, la première représente la majeure partie de la variance des descripteurs originaux, soit 69% pour la pluie, 77% pour le bilan hydrique et 92% pour l'ETP. Elles constituent l'aspect "intensité" de chaque thème et les notes des stations sur ces composantes ont été utilisées pour le groupement.

Les secondes composantes issues de l'analyse expriment l'effet maritime sur la distribution de la pluie et de l'ETP au cours de la saison. On y voit nettement l'opposition entre les valeurs de mai et de septembre. Cette information climatique n'est pas désirée dans les zonages proposés dans cette étude et a donc été négligée.

3.2 Évapotranspiration potentielle

3.2.1 zonage

L'examen de la carte illustrant le zonage de l'ETP au Québec (figure 2) montre un gradient marqué dans l'axe nord-sud et un autre, plus faible, dans celui est-ouest. Le premier gradient est causé par la différence d'énergie radiative disponible sur l'ensemble de la saison selon la latitude et le second par l'effet réducteur du climat maritime du golfe St-Laurent sur l'ETP des régions de l'est du Québec.

TABLEAU 4. Composantes principales, normées aux valeurs propres, extraites des ensembles de descripteurs de l'ETP, de la pluie estivale et du bilan hydrique.

ETP		
Mois	Comp. 1	Comp. 2
Mai	0,924	0,352
Juin	0,989	0,033
Juillet	0,980	0,095
Août	0,969	-0,183
Septembre	0,939	-0,291
% de la variance expliquée	92%	5%

PLUIE		
Mois	Comp. 1	Comp. 2
Mai	0,774	0,558
Juin	0,881	0,066
Juillet	0,833	-0,301
Août	0,874	0,127
Septembre	0,787	-0,445
% de la variance expliquée	69%	12%

BILAN HYDRIQUE		
Mois	Comp. 1	Comp. 2
Mai	0,772	0,592
Juin	0,930	0,126
Juillet	0,946	0,019
Août	0,930	-0,173
Septembre	0,797	-0,541
% de la variance expliquée	77%	14%

La zone 1 est limitée à la région de la côte sud-est de la Gaspésie. Les travaux antérieurs (Chapman et Brown, 1966; Wilson, 1971; Agriculture Canada, 1976) ont aussi identifié la Gaspésie comme un des territoires agricoles du Québec ayant la plus faible ETP saisonnière. Une particularité de notre étude est cependant d'y avoir identifié une différence d'ETP entre les côtes nord-ouest et sud-est. La cause de la plus grande ETP sur la côte nord-ouest réside en grande partie dans les vitesses de vent plus grandes qui y sont observées (Vigeant, 1984; Leduc, 1982) et dont l'effet sur l'ETP a pu être exprimé par notre méthode de calcul.

La zone 2 couvre, en plus du nord de la Gaspésie, le nord-ouest de l'Abitibi, les Laurentides au nord de Montréal et de Québec et une grande partie des Cantons de l'Est. Les valeurs d'ETP relativement faibles qu'on observe dans cette zone sont dues au climat frais qui la caractérise, sauf dans les Cantons de l'Est où il semble que les vents faibles aux stations localisées dans les vallées (Leduc, 1982) en soient davantage responsables. La vitesse moyenne du vent durant la

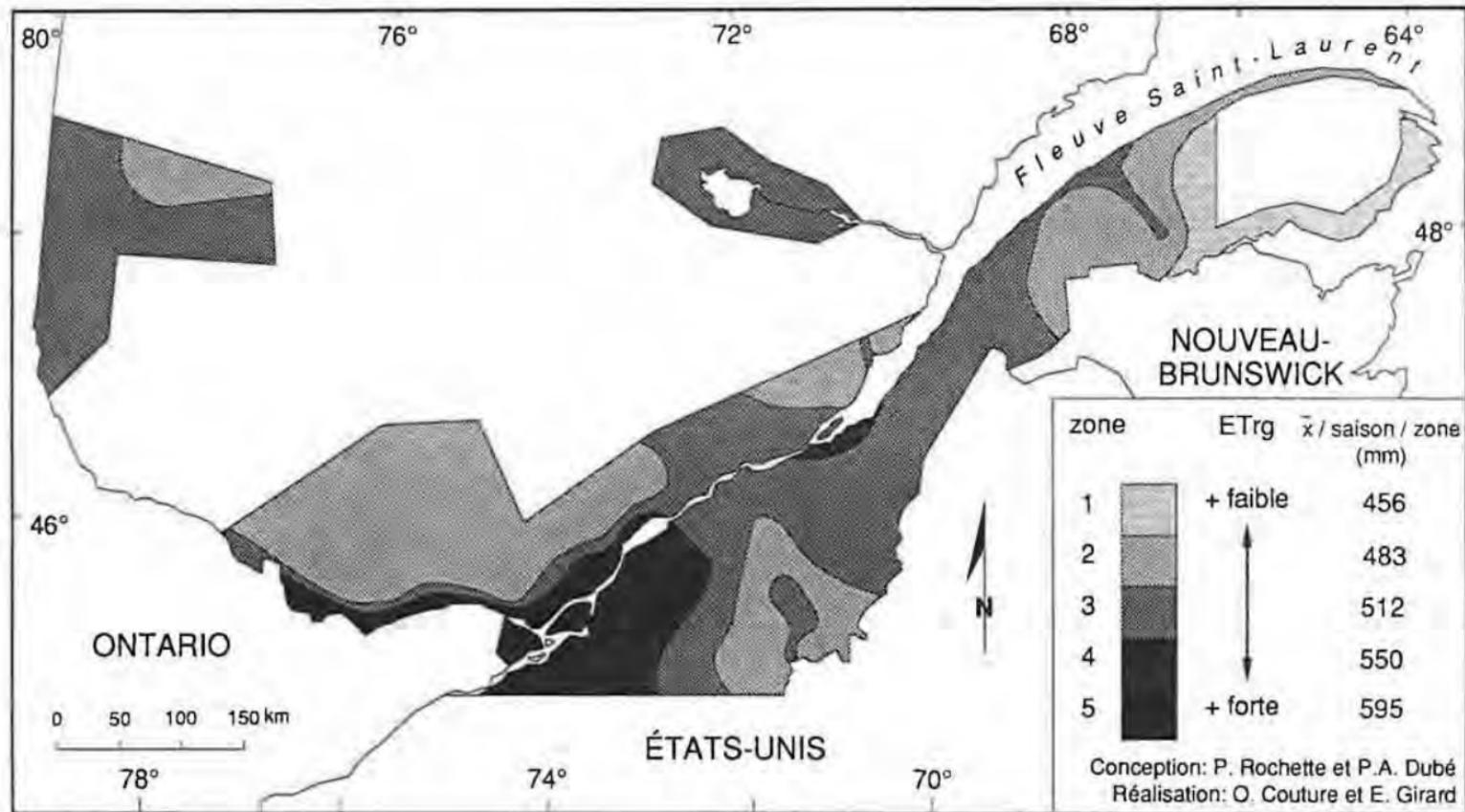


FIGURE 2. Variation spatiale de l'évapotranspiration potentielle (mai à septembre) au Québec méridional (1972-1982).

saison de croissance à l'aéroport de Sherbrooke est en effet une des plus basse parmi les stations du Québec méridional rapportées par Environnement Canada (1982). Cette étude est la première à identifier la région des Cantons de l'Est à une zone d'aussi faible ETP.

La zone 3 est celle incluant la plus grande proportion du territoire étudié. Elle regroupe la majeure partie de la vallée du St-Laurent moyen, des Appalaches et de l'Abitibi ainsi que le Lac St-Jean en entier. Nos résultats n'expriment donc aucun des gradients indiqués par Wilson (1971) et Chapman et Brown (1966) sur la rive sud du St-Laurent entre les Cantons de l'Est et la Gaspésie. L'effet réducteur du climat frais des hautes terres des Appalaches sur l'ETP y est compensé, selon nous, par les vitesses de vent plus élevées associées à ces endroits exposés, expliquant ainsi l'homogénéité de cette région. Notre zonage, sur cet aspect, se rapproche de celui proposé par Agriculture Canada (1976).

La zone 4 est essentiellement une région de transition de faible étendue entre la région d'ETP maximale et la zone 3. Ailleurs en province, seule une petite enclave au sud de Québec, près du St-Laurent, est classée dans cette zone.

La plus forte ETP moyenne (zone 5) sur le territoire où se pratique l'agriculture au Québec se trouve dans la plaine de Montréal. Sur cet aspect, notre étude ne fait que confirmer ce qu'avaient proposé les études de zonage précédentes (Wilson, 1971; Chapman et Brown, 1966 et Agriculture Canada, 1976).

3.2.2 Statistiques

Les statistiques, par zone, des valeurs moyennes d'ETP sur la période étudiée aux stations utilisées sont présentées au tableau 5. L'ETP saisonnière varie de 456 à 595 mm de la zone 1 à la zone 5. Ces valeurs sont de 20 à 30% supérieures à celles proposées dans la seule autre étude couvrant la même saison (Agriculture Canada, 1976). Ces différences sont importantes et peuvent être expliquées par l'étude de périodes différentes ou par le fait que l'équation utilisée par Agriculture Canada (1976) ne soit pas représentative des conditions québécoises (Rochette et Dubé, 1990). L'ETP annuelle calculée à l'aide de l'équation de Thornthwaite par Chapman et Brown (1966) et Wilson (1971) est environ 10% supérieure aux valeurs saisonnières présentées dans cette étude dans toutes les régions du Québec, sauf celle de Montréal, où elle y est pratiquement égale.

Les statistiques mensuelles du tableau 5 sont les premières à être présentées pour le Québec sur ce pas de temps. Elles montrent que les mois où l'ETP est la plus forte et la plus faible sont respectivement juillet et septembre et que les valeurs de ce dernier égalent moins de la moitié de celles du premier. Les mois de mai et août sont pratiquement identiques et représentent 75% de l'ETP de juillet. Finalement, juin suit immédiatement juillet, dont il est de 8 à 10% inférieur.

Les minima et maxima expriment les valeurs extrêmes moyennes

TABLEAU 5. Statistiques de l'évapotranspiration potentielle (ETP) au Québec méridional (mm) (1972-1982).

Zone	#STAT	MAI			JUN			JUILLET			AOÛT			SEPTEMBRE			SAISON		
		MOY	MIN	MAX	MOY	MIN	MAX	MOY	MIN	MAX	MOY	MIN	MAX	MOY	MIN	MAX	MOY	MIN	MAX
1	28	92	81	100	108	101	115	115	109	121	91	85	97	52	46	57	456	440	478
2	67	97	85	105	113	105	120	122	116	129	97	90	104	55	50	60	483	466	503
3	70	104	92	113	118	110	125	128	122	135	103	96	110	60	55	66	512	495	533
4	44	110	97	121	126	117	133	138	130	145	111	104	119	66	59	72	550	529	576
5	30	122	108	135	134	127	142	149	141	159	118	112	125	72	63	80	595	574	625
Total	239	104	92	113	119	111	126	129	123	137	103	97	110	60	54	66	515	497	538

(#STAT = Nombre de stations météorologiques; MOY = Moyenne sur la période; MIN et MAX = Moyenne, par zone, des valeurs minimale et maximale enregistrées à chaque station sur la période étudiée)

rencontrées, au cours de la période étudiée, aux stations de chaque zone. Les écarts entre les deux valeurs pour un même mois se chevauchent entre deux zones voisines, si bien qu'en certaines années, il peut théoriquement ne pas y avoir de différences entre l'ETP moyen de deux zones différentes. Ainsi, si au cours de la même année, les conditions du mois de mai favorisaient une ETP maximum dans la zone 1 et minimum dans la zone 4, on pourrait n'observer, pour cette année-là, aucune différence entre l'ETP mensuel de ces deux zones. Sur une base saisonnière, le clivage est plus net entre les zones.

3.3 Pluie estivale

3.3.1 Zonage

Il n'existe pas, pour la pluie estivale (figure 3), de gradients spatiaux aussi nets que pour l'ETP. On note cependant une bande orientée nord-sud entre $72^{\circ} 30'$ et $70^{\circ} 00'$ de longitude où les valeurs sont supérieures aux moyennes provinciales.

La zone 1 regroupe les endroits présentant les plus basses hauteurs de pluie pour la saison. Il s'agit de la région de la vallée de l'Outaouais moyen qui, selon Chapman et Brown (1966), forme l'extrémité est d'une enclave plus sèche située dans le nord-est ontarien. Cette zone comprend aussi certaines portions de la rive sud du St-Laurent à la hauteur du Bas-du-Fleuve et de la Gaspésie.

La rive sud du St-Laurent dans le Bas-du-Fleuve, les Laurentides au nord de Ottawa et les basses terres du St-Laurent en amont de Trois-Rivières forment la majeure partie de la zone 2 qui est complétée par le sud du Témiscamingue et l'ouest du Lac St-Jean.

La zone 3, quant à elle, comprend presque tout l'Abitibi-Témiscamingue, les Laurentides au nord de Montréal et à l'ouest de Trois-Rivières et quelques autres territoires marquant la transition entre les régions de plus faibles et de plus fortes précipitations. Les zones 4 et 5 sont pratiquement limitées à la zone du sud du Québec méridional dans les limites de la bande nord-sud définie plus haut.

3.3.2 Statistiques

Les statistiques de pluie estivale sont présentées au tableau 6. Les valeurs moyennes de hauteurs de pluie saisonnières vont de 426 à 617 mm de la zone 1 à la zone 5. Elles sont supérieures d'environ 20% à celles obtenues par Chapman et Brown (1966) avec les données de la période 1921-50. Les stations météorologiques utilisées par ces autres n'ayant pas été précisées, il nous est cependant impossible de conclure fermement sur cette question des niveaux de précipitation estivale. Les valeurs mensuelles de juin à septembre sont, pour leur part, semblables entre elles et dépassent celles du mois de mai de 20 à 30%.

Les extrêmes moyens sur la période 1972-82 montrent une très grande amplitude, si bien que pour tous les mois, les précipitations maximales de la zone 1 dépassent largement les moyennes de la zone 5. L'examen des minima saisonniers révèle que la zone 1 se distingue principalement de la zone 2 par une

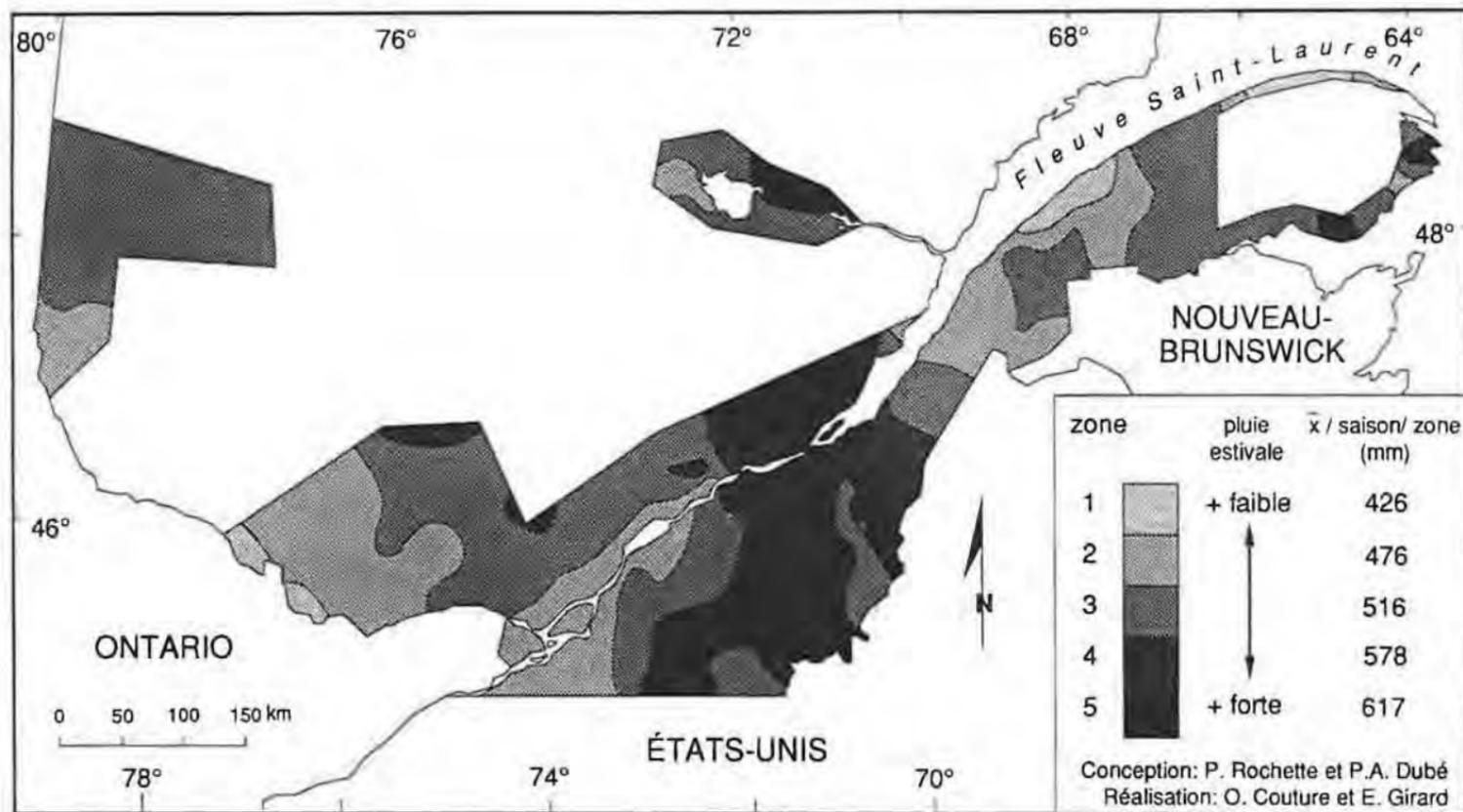


FIGURE 3. Variation spatiale de la pluie estivale (mai à septembre) au Québec méridional (1972–1982).

TABLEAU 6. Statistiques de la pluie estivale (mai-septembre) au Québec méridional (mm) (1972-1982).

Zone	#STAT	MAI			JUN			JUILLET			AOÛT			SEPTEMBRE			SAISON		
		MOY	MIN	MAX	MOY	MIN	MAX	MOY	MIN	MAX	MOY	MIN	MAX	MOY	MIN	MAX	MOY	MIN	MAX
1	15	69	28	123	82	33	148	88	46	167	91	40	165	89	36	175	426	287	616
2	56	80	25	150	96	41	169	94	42	169	100	39	163	101	48	165	476	342	617
3	87	85	28	161	108	53	186	105	47	189	110	46	183	107	56	174	516	378	683
4	42	93	31	177	116	60	193	118	51	215	127	58	219	122	69	189	578	427	764
5	24	104	37	187	124	71	195	126	51	246	135	66	224	129	72	197	617	450	819
Total	224	86	29	161	106	52	181	106	47	194	112	48	188	109	57	177	522	380	692

(#STAT = Nombre de stations météorologiques; MOY = Moyenne sur la période; MIN et MAX = Moyenne, par zone, des valeurs minimale et maximale enregistrées à chaque station sur la période étudiée)

plus faible précipitation en année sèche. Cette zone est donc celle où la sécheresse risque de frapper le plus durement au Québec méridional.

3.4 Bilan hydrique

3.4.1 Zonage

La zone 1 (figure 4) est limitée à une faible superficie qui correspond assez bien au territoire identifié par Massin (1971) et Wilson (1971) comme celui où les déficits hydriques saisonniers sont les plus fréquents ou les plus importants. Dans cette zone, les différences principales par rapport aux travaux précédents sont l'ajout du sud du Témiscamingue et le retrait d'une partie du Lac St-Jean (Massin, 1971) et de l'embouchure du Saguenay (Wilson, 1971). Dans la région de Montréal, les conditions plus sèches sont le résultat de la combinaison de pluies moins abondantes et d'ETP plus forte. Ailleurs dans la zone, les faibles précipitations sont davantage responsables de la plus grande fréquence de jours avec déficit hydrique.

La zone 2 comprend les territoires adjacents à la zone 1 et certaines enclaves plus sèches ailleurs dans la province. La région de la vallée du St-Laurent, classée dans cette zone entre Montréal et Trois-Rivières, représente une différence importante par rapport aux travaux précédents (Massin, 1971; Agriculture Canada, 1976) qui avaient identifié un gradient plus marqué dans l'axe du fleuve et moins prononcé en s'en éloignant. C'est aussi la première fois que la rive sud du fleuve entre Québec et le Bas-du-Fleuve est identifiée à un climat aussi sec. Par ailleurs, la région formée du Bas-du-Fleuve et de la côte nord de la Gaspésie est confirmée comme un endroit relativement sec pour sa localisation nordique et maritime. Les territoires du sud de la province couverts par cette zone sont caractérisés par des précipitations sous la moyenne provinciale et une ETP plus forte, alors que ceux du nord connaissent une ETP faible ou moyenne mais des précipitations nettement inférieures.

La zone 3 est celle qui regroupe la plus grande étendue. Elle représente une bonne partie des Laurentides, des Appalaches et de la Vallée du St-Laurent ainsi que le nord de l'Abitibi et le sud du Lac-St-Jean. Cette zone est caractérisée en grande partie par des conditions de précipitations et d'ETP près des moyennes provinciales. Seule une petite région au nord-est de Montréal a été classée zone 3 malgré une ETP très forte et des précipitations moyennes. Ce résultat inattendu est possiblement dû à une distribution plus régulière de la précipitation au cours de la saison.

Les zones 4 et 5 sont les endroits les plus humides du territoire sous étude. Elles sont formées par la région des Appalaches au sud de Québec, la côte sud-est de la Gaspésie et les hautes Laurentides, la région de Québec et le nord du Lac St-Jean. Les deux territoires agricoles les plus importants compris dans ces zones sont les Cantons de l'Est et Québec. Leur identification à des conditions hydriques du sol très humides s'apparente davantage aux résultats de Massin (1971) qu'à ceux de Wilson (1971) et d'Agriculture Canada (1976).

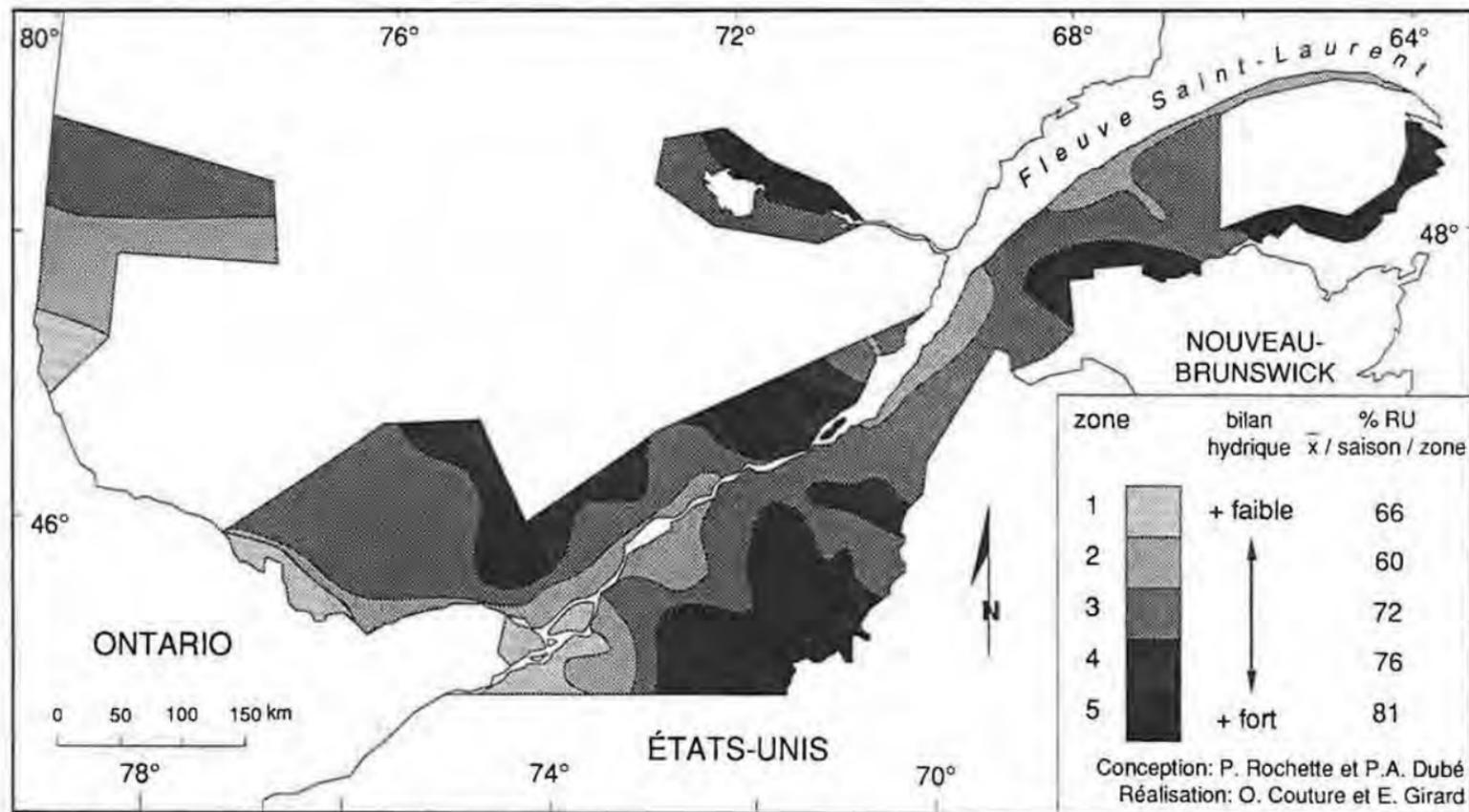


FIGURE 4. Variation spatiale du bilan hydrique d'un sol loameux (mai à septembre) au Québec méridional (1972-1982).

Les territoires occupés par ces zones sont le plus souvent caractérisés par la combinaison d'une faible ETP et de fortes précipitations. Le climat humide de la région de Québec est cependant dû principalement à des précipitations importantes.

De façon globale, on peut affirmer que, malgré certaines différences soulignées plus haut, le zonage proposé dans cette étude est très voisin de celui de Massin (1971). Cette constatation vient appuyer l'opinion de Pelton *et al.* (1960) sur la valeur de l'équation de Thornthwaite pour l'estimation de l'ETP saisonnière.

3.4.2 Statistiques

Le présent travail décrit les conditions hydriques du sol au Québec par le nombre mensuel moyen de jours avec déficit hydrique et par la moyenne mensuelle de la fraction présente de la réserve utile. Les valeurs moyenne, minimale et maximale de chaque descripteur ont été calculées à chacune des stations. Les moyennes, par zone, de ces valeurs sont présentées aux tableaux 7 et 8. Les valeurs minimales et maximales illustrent les conditions moyennes, prévalant dans chaque zone, aux années les plus sèches et aux plus humides.

3.4.2.1 jours avec déficit hydrique

Le nombre moyen de jours avec déficits pour l'ensemble de la saison varie, de la zone 1 à la zone 5, de 38 à 6 pour le sable et de 24 à 1 pour le loam. Ces valeurs sont très variables d'une saison à l'autre, pouvant doubler et même tripler en année très sèche et devenir nulles en année humide.

Les mois les plus durement touchés par les déficits sont juin, juillet et août. En moyenne, au cours de cette période, une journée sur trois pour le sable et une journée sur quatre pour le loam connaissent un déficit hydrique dans la zone 1. Dans la zone 5, les probabilités de connaître une journée avec déficit y sont respectivement réduites à 7 et 0%.

En mai, les déficits sont inexistantes pour le loam, peu importe la zone, alors que, pour le sable, leur nombre moyen passe de trois à un et leur nombre maximal de neuf à trois de la zone 5 à la zone 1. En raison du déficit climatique ($P - ETP$) que connaît le Québec méridional en mai (-18 mm), nous nous serions attendus à y trouver un nombre plus grand de jours avec déficit. Ces valeurs, probablement trop faibles, sont dues au fait que les conditions hydriques au début de chaque saison ont été fixées comme étant celles de la capacité au champ. Ce postulat, nous le croyons, est valable pour les années dites normales où le sol, bien alimenté par la fonte des neiges, n'a pas été trop asséché par une ETP encore relativement faible. Nous savons cependant qu'en certaines autres années, le sol est déjà appauvri en eau au premier mai et qu'alors, les jours avec déficits sont plus abondants que ceux indiqués par notre étude (Dutil *et al.*, 1987). Les statistiques données pour le mois de mai au tableau 7 doivent donc être perçues comme les valeurs moyennes les plus faibles, propres aux saisons qui débutent avec une réserve utile qui n'est pas entamée.

Les nombres moyens de jours avec déficit hydrique du mois de

TABLEAU 7. Statistiques des jours avec déficit hydrique au Québec méridional (mm) (1972-1982).

SABLE																			
ZONE	#STAT	MAI			JUN			JUILLET			AOÛT			SEPTEMBRE			SAISON		
		MOY	MIN	MAX	MOY	MIN	MAX	MOY	MIN	MAX	MOY	MIN	MAX	MOY	MIN	MAX	MOY	MIN	MAX
1	24	3	0	9	9	0	24	13	1	27	9	0	26	4	0	19	38	8	79
2	51	2	0	8	6	0	18	9	0	24	7	0	22	2	0	10	25	3	61
3	65	1	0	6	4	0	14	6	0	19	4	0	19	1	0	6	16	1	45
4	57	1	0	4	2	0	9	4	0	16	3	0	15	1	0	5	10	0	36
5	25	1	0	3	1	0	6	3	0	14	1	0	6	0	0	1	6	0	18
Total	222	1	0	6	4	0	14	7	0	20	5	0	18	1	0	8	18	2	47

LOAM																			
ZONE	#STAT	MAI			JUN			JUILLET			AOÛT			SEPTEMBRE			SAISON		
		MOY	MIN	MAX	MOY	MIN	MAX	MOY	MIN	MAX	MOY	MIN	MAX	MOY	MIN	MAX	MOY	MIN	MAX
1	24	0	0	0	4	0	13	10	0	25	8	0	26	3	0	17	24	1	66
2	51	0	0	0	1	0	7	5	0	21	5	0	22	1	0	8	13	0	46
3	65	0	0	0	1	0	3	2	0	12	2	0	16	1	0	4	5	0	27
4	57	0	0	0	0	0	1	1	0	7	1	0	10	0	0	3	3	0	19
5	25	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0	0	2	0	0	0	1	0	4
Total	222	0	0	0	1	0	4	3	0	13	3	0	15	1	0	6	8	0	31

(#STAT = Nombre de stations météorologiques; MOY = Moyenne sur la période; MIN et MAX = Moyenne, par zone, des valeurs minimale et maximale enregistrées à chaque station sur la période étudiée)

TABLEAU 8. Statistiques de la fraction présente de la réserve utile (sable et loam) au Québec méridional (mm) (1972-1982).

SABLE																			
ZONE	#STAT	MOY	MAI		JUN		JUILLET			AOUT			SEPTEMBRE			SAISON			
			MIN	MAX	MOY	MIN	MAX	MOY	MIN	MAX	MOY	MIN	MAX	MOY	MIN	MAX	MOY	MIN	MAX
1	24	66	49	86	51	25	78	43	20	73	52	21	76	67	31	89	56	39	70
2	51	69	51	88	57	32	80	50	25	75	57	26	81	75	47	91	62	45	75
3	65	72	55	90	63	40	83	57	34	81	64	34	83	80	58	93	67	54	78
4	57	74	56	91	67	46	85	62	36	84	69	38	88	83	58	94	71	57	81
5	25	76	60	92	73	56	88	67	41	88	75	52	90	88	70	95	76	67	85
Total	222	72	54	90	62	40	83	56	32	80	64	34	84	79	54	93	67	53	78

LOAM																			
ZONE	#STAT	MOY	MAI		JUN		JUILLET			AOUT			SEPTEMBRE			SAISON			
			MIN	MAX	MOY	MIN	MAX	MOY	MIN	MAX	MOY	MIN	MAX	MOY	MIN	MAX	MOY	MIN	MAX
1	24	74	61	90	57	36	81	47	26	76	53	24	79	67	33	91	60	43	75
2	51	77	63	92	64	42	85	55	31	79	59	29	85	76	47	93	66	49	80
3	65	79	66	93	69	49	87	63	41	85	67	38	87	82	59	95	72	58	83
4	57	81	67	94	73	55	88	68	45	88	74	44	91	85	61	96	76	62	86
5	25	83	70	95	79	63	91	73	50	92	79	58	93	91	76	97	81	72	89
Total	222	79	65	93	69	49	87	62	39	84	67	38	87	81	56	95	71	57	83

(#STAT = Nombre de stations météorologiques; MOY = Moyenne sur la période; MIN et MAX = Moyenne, par zone, des valeurs minimale et maximale enregistrées à chaque station sur la période étudiée)

septembre sont faibles. Malgré cela, il est intéressant de noter que les valeurs maximales restent relativement élevées pour un mois où les précipitations moyennes dépassent largement l'ETP moyen. Ces valeurs, tout comme celles du mois d'août, sont de bons indicateurs du potentiel de sécheresse. En effet, elles sont expliquées par des précipitations inférieures aux moyennes de ces mois qui prolongent les déficits hydriques engendrés par la forte ETP de mai, juin et juillet. En saisons "normales", le surplus climatique de précipitation comble la réserve entamée par les conditions plus sèches des mois précédents. Lors d'années de plus faibles précipitations en août et septembre, le déficit d'un loam se prolonge jusqu'à représenter plus de la moitié du mois d'août dans les zones 1, 2 et 3 et du mois de septembre dans la zone 1.

Les conditions de sécheresse peuvent être définies comme étant celles où environ la moitié, ou plus, des jours d'un mois sont touchés par un déficit hydrique. Une culture de plantes fourragères aux caractéristiques semblables à celles définies dans cette étude serait donc sujette à connaître une sécheresse en toutes zones sur sol léger (tableau 7). Cette sécheresse serait cependant limitée au mois de juillet en zone 5 alors qu'elle pourrait se produire de juin à septembre dans la zone 1.

3.4.2.2 fraction présente de la réserve en eau utile

La fraction présente de la réserve en eau utile pour l'ensemble de la saison varie, de la zone 1 à la zone 5, de 56 à 76% pour le sable et de 60% à 81% pour le loam (tableau 8). Les mois présentant les statistiques moyennes les plus faibles sont juillet et août. On n'y observe cependant aucune valeur moyenne mensuelle inférieure à 40%, seuil que nous avons fixé et au-dessous duquel est considéré un déficit hydrique. Le sable, dans la zone 1, s'en approche toutefois en juillet (43%). Mai et septembre sont les mois où la teneur en eau du sol est la plus élevée. On note également peu de différence entre les valeurs pour le sable et celles pour le loam en septembre. Cette ressemblance, qui n'est pas observée en mai, est due à la faible ETP de la fin de l'été qui entraîne la domination du bilan hydrique par les précipitations.

4. CONCLUSION

Les calibrations régionales de BR_{LAVAI} utilisées ont donné des valeurs saisonnières moyennes d'ETP dont la variation spatiale au Québec diffère légèrement des zonages précédents. Les différences sont plus grandes dans les zones de moyenne et de faible ETP. Elles sont dues, selon nous, à la plus grande précision de BR_{LAVAI} , en raison de ses calibrations locales et de sa prise en compte de certaines conditions locales particulières. Les valeurs moyennes estimées sont environ 10% inférieures à celles obtenues pour l'année entière par l'équation de Thornthwaite (Wilson, 1971 et Chapman et Brown, 1966), mais sont supérieures à celles proposées pour la même saison par Agriculture Canada (1976).

Le zonage de la pluie saisonnière montre un patron semblable à celui

proposé par Chapman et Brown (1966) mais les valeurs moyennes de la période 1972–82 sont de 20% supérieures à celles de la période 1921–50.

Le zonage du bilan hydrique saisonnier du sol obtenu dans cette étude est semblable à celui proposé par Massin (1971). Les différences observées sont dues en partie à l'étude de périodes différentes, à l'emploi d'une méthode mieux adaptée aux conditions du Québec pour le calcul de l'ETP et à l'utilisation d'un modèle de bilan hydrique journalier plus détaillé.

La méthode de bilan hydrique employée a permis une évaluation quantitative des conditions hydriques journalières du sol. Les valeurs mensuelles moyennes des conditions journalières ajoutent une information utile au zonage relatif produit par des méthodes moins élaborées. La fraction présente de la réserve en eau utile a été calculée et, pour chaque zone, les nombres moyen, minimal et maximal de jours avec déficit sur la période de 11 ans étudiée ont permis d'en caractériser l'impact journalier sur les cultures. Sur le sable étudié, la fraction moyenne de la réserve utile présente en juillet passe de 43 à 67% de la zone 1 à la zone 5, alors que le nombre de jours avec déficit décroît de 13 à 3 entre les deux mêmes zones. Sur le loam, les zones 4 et 5 sont exemptes de mois avec sécheresse, la zone 3 est faiblement susceptible d'en être frappée en juillet et août et seule la zone 1 peut en subir une de juin à septembre.

L'information obtenue du calcul du bilan hydrique journalier peut être utile à la planification agricole. Nous croyons qu'il serait intéressant d'appliquer cette méthode à l'étude d'autres combinaisons sol/culture et d'évaluer ainsi la variation spatiale des besoins en irrigation de certaines productions agricoles pratiquées au Québec et qui sont sensibles aux déficits hydriques.

REMERCIEMENTS

Cette étude a été assistée financièrement par le Ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation du Québec. Les auteurs aimeraient remercier M. Oliva Couture pour son assistance dans le traitement des données et le tracé original des cartes, M. Etienne Girard pour la réalisation finale des cartes et Mme Johanne Boisvert pour nous avoir fourni la plus récente version du Bilan Hydrique Polyvalent.

REFERENCES

- Agriculture Canada, 1976. *Atlas agroclimatique du Canada*. (17 cartes).
- Baier, W. et G.W. Robertson, 1965. Estimation of latent evaporation from simple weather observations. *Can. J. Plant Sci.*, 45:276–284.
- Baier, W. et G.W. Robertson, 1966. A new versatile soil moisture budget. *Can. J. Plant Sci.*, 46:299–315.
- Chapman, L.J. et D.M. Brown, 1966. *The climate of Canada for agriculture*. Can. Dept. Forestry and Rural Development, Ottawa, The Canada Land Inventory, Rep. #3, 28 pp. et 24 figures.

- Clapp, R.B. et G.M. Hornberger, 1978. Empirical equations for some hydraulic properties. *Water Resources Research*, 14:601–604.
- Dougenik, J.A. et D.E. Sheenan, 1975. *Symap user's manual*. Harvard Univ., Grad. School Design, Cambridge, Mass., 65 pp.
- Dubé, P.A. et P. Rochette, 1985a. Les déficits hydriques. Dans: *Symposium sur l'eau – L'eau vue l'aspect agrométéorologique. Cahier de conférences, C.P.V.Q., AGDEX #070, Tome II. Min. Agr. Pêch. Alim. Qué., Québec*, pp. 27–114.
- Dubé, P.A. et P. Rochette, 1985b. Emploi de l'irrigation pour la culture de la fraise. Dans: *Symposium sur la culture de la fraise. Cahier de conférences, C.P.V.Q., AGDEX #230/20, Min. Agr. Pêch. Alim. Qué., Québec*, pp. 47–88.
- Dutil, J.P., P.A. Dubé et R. Lagacé, 1987 *Adaptation et validation d'un bilan hydrique applicable à la régie saisonnière des productions agricoles au Québec – PHASE 1: Suivi d'un réseau au champ*. Rapport pour le contrat: Approv. Serv. Canada #21ST-019016-4-S103, #série OST84-00047, 61 pp.
- Dyer, J.A. et A.R. Mack, 1984. *Le bilan hydrique du sol polyvalent*. Contrib. #82–33. Inst. Rech. Terres, Agriculture Canada, Ottawa, 26 pp.
- Environnement Canada, 1982. *Normales climatiques au Canada. Vol. 5 – Vent*. Publication du programme climatique canadien, Service de l'Environnement Atmosphérique, 284 pp.
- Holmes, R.M. et G.W. Robertson, 1959. A modulated soil moisture budget. *Monthly Weather Review*, 87:101–106.
- Leduc, R., 1982. Vent mensuel moyen sur le Québec méridional. *Feuillelet Météorologique*, 21:147–160.
- Massin, B., 1971. *Les déficits hydriques au Québec*. Min. Rich. Nat. Québec, MP-34, 284 pp.
- Ministère de l'Environnement du Québec, 1985. *Statistiques sur les vents. Observations à 8:00 et 18:00 heures, (1977–1984)*. Service de la météorologie, Québec.
- Pelton, W.L., K.M. King et C.B. Tanner, 1960. An evaluation of Thornthwaite and mean temperature methods for determining potential evapotranspiration. *Agronomy J.*, 52:387–395.
- Penman, H.L., 1963. *Vegetation and hydrology*. Technical Communication no. 53, Commonwealth Bureau of Soils, CAB, Farnham Royal, Bucks, England, 124 pp.
- Rochette, P. et P.A. Dubé, 1989. Calibration d'une équation simple pour le calcul de l'évapotranspiration potentielle. *Naturaliste can. (Rev. Écol. Syst.)*, 116:193–203.
- Rochette, P. et P.A. Dubé, 1990. Variabilité spatiale de l'estimation de l'évapotranspiration potentielle au Québec méridional. *Naturaliste can. (Rev. Écol. Syst.)*, (à l'impression).
- Sneed, R.E. et R.P. Patterson, 1983. The future role of irrigation in humid climates, Dans: *Crop reactions to water and temperature stresses in humid, temperate climates*. Roper, C.D. et P.J. Kramer, (éds.), pp. 187–201.
- Statistical Analysis System (SAS), 1982. *SAS user's guide: Statistics*. SAS Institute Inc., Cary, North Carolina, 584 pp.

- Thornthwaite, C.W. 1948. An approach toward a rational classification of climate. *Geographical Review*, 38:55-94.
- Vigeant, G., 1984. *Cartes climatologiques du St-Laurent (Fleuve et Golfe)*. Service de l'Environnement Atmosphérique, Environnement Canada, St-Laurent, Québec, 15 pp. et 5 cartes.
- Wilson, W.C., 1971. *Le climat du Québec: Atlas agroclimatique, 1^{ère} Partie*. Service Météorologique du Canada, Etude climatologique #11, 5 pp. et 65 cartes.

Climatic Highlights of 1991 in Canada

Aaron Gergye

Forecasting and Real Time Reporting
Canadian Climate Centre
Downsview, Ontario

OVERVIEW

The combination of an amplified ridge on the west coast of North America and a more southerly migration of the Arctic vortex over Davis Strait (Figure 1) resulted in a warmer than normal year for all of Canada except for the northeastern parts. This year was a continuation of the observed temperature anomaly pattern for the past decade with positive anomalies over most of the country except for the Keewatin District of the Northwest Territories, Baffin Island, Newfoundland and Labrador, and northeastern Quebec, where negative temperature anomalies prevailed (Figures 2 and 3). Annual precipitation was above normal in most of northern and western Canada (Figure 4), especially in southern Saskatchewan, but generally below normal in eastern Canada.

British Columbia's summer months were cool and unsettled, but a warm dry September extended the growing season in many areas, allowing fruit to mature. Farmers in the Fraser Valley were even able to pick a second strawberry crop, while the grain harvest was completed earlier than normal in the Peace River district with slightly above average yields.

Ample precipitation from mid-April and into the summer raised soil moisture levels across the southern Prairies to generally above normal values, resulting in a bumper crop year. On the down side, however, the agricultural community had to endure low market prices.

In Ontario and Quebec, fall harvesting progressed well. Ontario corn matured two to three weeks early, and the apple crop was abundant and of good quality, well above the five-year average.

It was a bad forest fire year in Quebec. By the end of August, Quebec reported 1089 forest fires which had destroyed over 383 000 hectares of forest. The five-year mean for the same period is 913 fires with 43 400 hectares burned. With a dry summer across the Maritimes, apples were smaller in size than normal and yields were down due to May frosts.

A combination of continuing cool weather and prevailing northwest winds, which began in April and persisted across Newfoundland and Labrador, hindered the northward retreat of the Labrador ice pack. This year was one of the worst ice-years on record on Canada's east coast, seriously disrupting the fishing stocks and season length, coastal ferry services and supply shipping to Labrador. In some communities, essential supplies had to be airlifted in. Early in the month

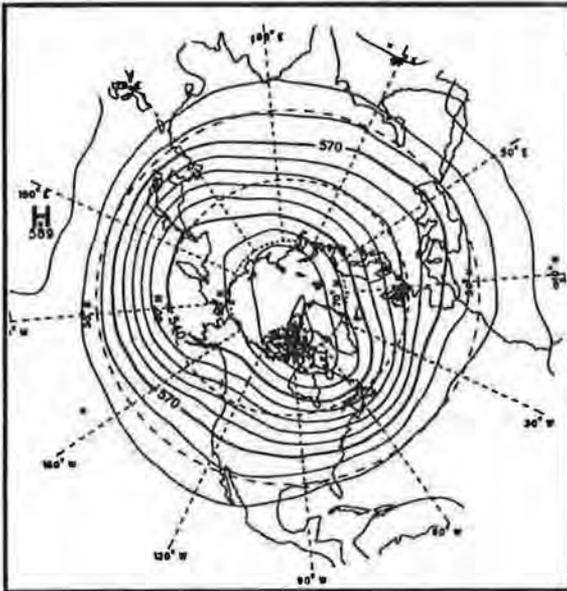


FIGURE 1. Mean 50kPa geopotential heights, year 1991 (6 decametre interval).

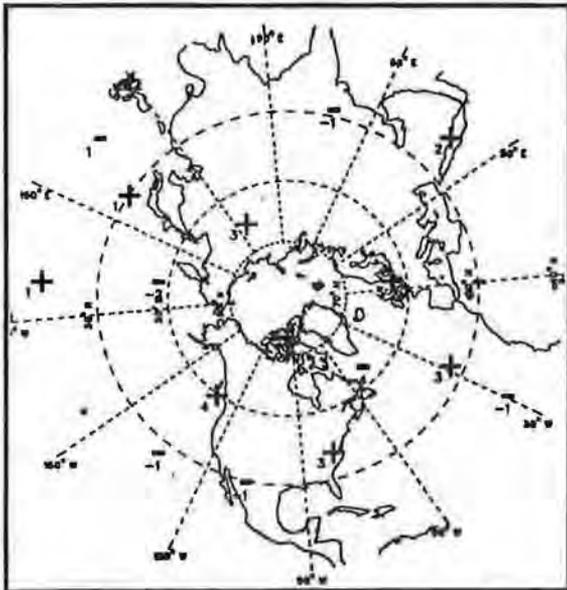


FIGURE 2. Mean 50kPa geopotential height anomaly in decametres for 1991 compared to 1951-1980 normal.

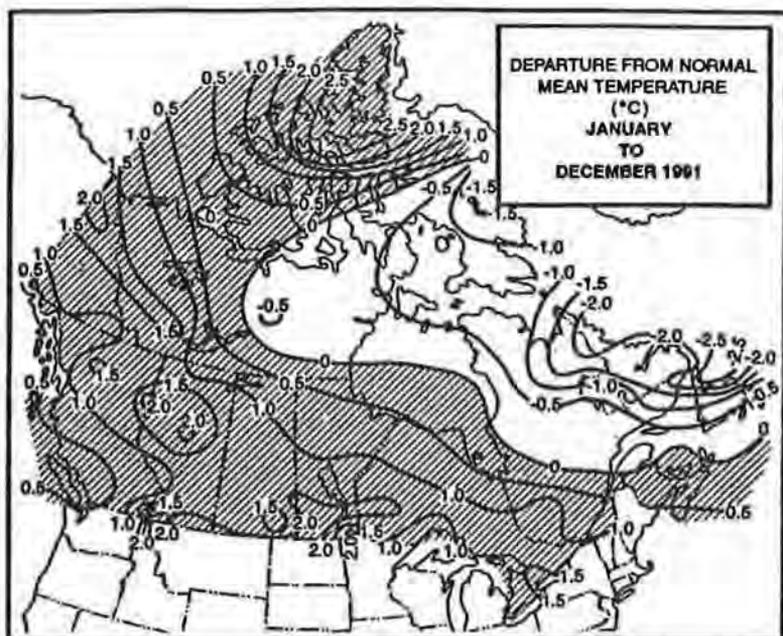


FIGURE 3.

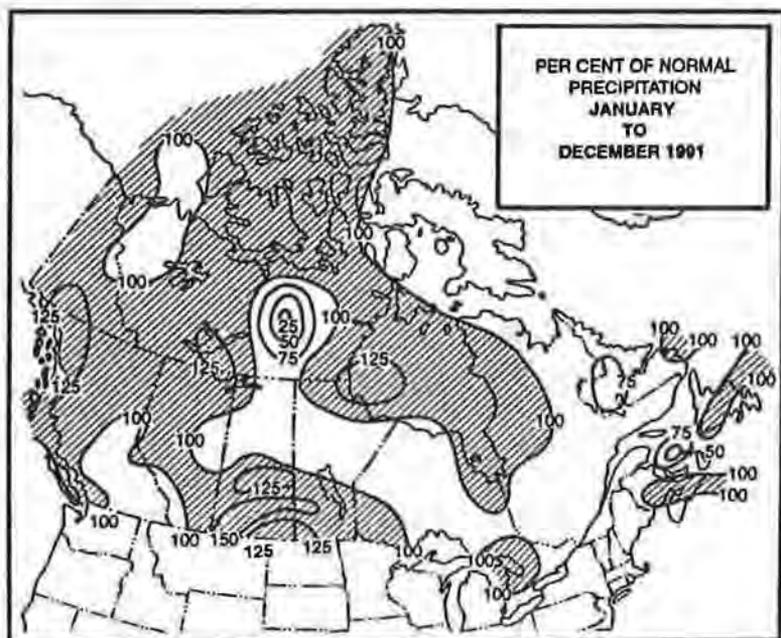


FIGURE 4.

of August, the heavy ice conditions along the Labrador coast finally receded allowing the shipping season to begin some six to eight weeks later than normal.

TEMPERATURES

The year began with frigid Arctic air covering the western half of Canada. Temperatures during January were in the -50°C range in the Yukon Territory, while -40°C minimum low temperatures were common across the Prairies.

Numerous minimum low temperature records were broken. During the second week of the month, temperatures did an about face. With Chinook winds sweeping down the eastern slopes of the Rocky Mountains, daily maximums jumped 40 to 60 degrees $^{\circ}\text{C}$ in the Yukon and Northwest Territories. In southern Alberta, the thermometer soared into double-digit values.

Warm temperatures in February dominated the southern half of the country. Across British Columbia and the Prairies, many record-high mean monthly and daily maximum temperatures were established. Abbotsford, B.C. recorded the highest daily maximum for Canada during the month with 19.1°C , just short of their all time high of 20.6°C for the month. Across southern and central Ontario, it was the warmest February for many locations since 1984, while in Quebec, ninety new daily temperature records were set during the month.

During the first week of March, cold Arctic air spilled southwards across the Prairies. Snow, strong winds and temperatures in the minus 25°C range raised the concerns of ranchers, as the calving season began.

Record warm weather spread eastwards across the country early in April, sending daytime temperatures into the mid to high twenties. In Winnipeg, the first week of April was the hottest since records began in 1872. At Petawawa, Ontario the thermometer climbed to 29°C on April 7, the highest temperature recorded during April 1991 for the country.

During the first week of May, low temperature records were broken in southern Manitoba and Saskatchewan, including near freezing low temperature records in Saskatoon and Yorkton, Saskatchewan, that had stood for 78 years. The Maritimes were stricken with a hard frost twice during the same week around the middle of May. The hardest hit area was the bountiful Annapolis Valley of Nova Scotia, where 10 to 60 percent of the apple blossoms were frost bitten on the morning of the 19th, and another 25 to 30 percent were damaged on the 23rd. The Gravenstein apple variety was totally lost while other soft crops such as blueberries and strawberries were injured by the freeze.

Warm weather during the last three weeks of May led to rapid runoff from snowmelt, threatening nine communities in British Columbia with severe flooding. The Cascade Mountains had snowpacks over 60 percent above normal amounts, the highest since 1972.

Ontario and Quebec also experienced unseasonably warm weather as temperatures jumped into the 30°C range. In southern Ontario, it was the warmest May on record for most locations from Kingston to Windsor. The city of Toronto

tied the record monthly mean temperature set in 1975 as the warmest May in 151 years.

During June, sunny and dry conditions in Ontario promoted the warmest spring season ever recorded in the province. Five of the first six months of the year were warmer than normal, while the city of Toronto experienced the warmest first six months in 151 years of record, with a six month mean of 2.2°C above the 1951–80 normal.

Across the Prairies and Ontario, warm and dry conditions prevailed during August. Between August 4 and 9, maximum temperatures rose to record high values as many locations in Alberta recorded temperatures in the 30°C range. The highest reading recorded was at Esther, Alberta on August 10, with a searing 42.4°C. By August 30, as the warm core moved eastward, Ottawa recorded the highest daily maximum of 34.8°C for the month in Ontario. Toronto recorded the fourth warmest summer since records were first taken in 1840.

Cool unsettled weather across Newfoundland caused slow crop maturation during August. The annual fall harvest of blueberries was less than 50 percent ripe by the end of the month and the strawberry crop was not picked until late in August. September was cool and dreary as well. By the end of September the blueberries had finally ripened.

On November 30, strong southerly winds gusting to as high as 111 km/h pushed temperatures into the mid-teens across southern Ontario. In Toronto, the temperature reached 17.6°C toppling the 1908 record of 13.9°C.

PRECIPITATION, DROUGHTS AND FLOODS

The combination of warm weather and record monthly precipitation during April across southern and central Ontario caused some of the worst flooding in 60 years, especially along the Trent-Severn Waterway, northeast of Toronto. Muskoka, Ontario had the wettest April with records dating back to 1938. Farmers in southern Ontario were unable to seed the saturated fields and the most extensive flooding since 1957 occurred along Quebec's Chaudière River between April 7 and 10. Over 1000 residents along the river had to be evacuated and flood damage surpassed 10 million dollars.

During mid-May, serious forest fires occurred in northeastern Ontario. Two fires burned out of control near Chapleau, while a third blazed near Timmins. All were man-started but were assisted by dry ground litter, low relative humidities and low foliage moisture in conifers due to cold seasonal dormancy. At one point six water bombers were used to fight the fires. More than 7000 hectares of forest were destroyed.

For the month of May, Saskatchewan and Manitoba reported a multitude of record high temperatures and thunderstorms. Dozens of tornadoes were spawned; fields and basements were flooded and the ground was pelted with hail. On May 28, at least nine tornadoes touched down in southern Saskatchewan, but with no loss of life. Near Swift Current, Saskatchewan, the ground was

covered with 14 cm of hail. In Manitoba, on May 22, heavy rains of 100 and 150 millimetres were reported in the towns of Rossburn and Foxwarren, resulting in flooded basements.

Across the Prairies, wet weather persisted into June, with numerous reports of funnel clouds and tornadoes in Alberta. During April, May and June, Regina received 329 mm of rain, surpassing the 1902 record of 286.7 mm. Some areas of Saskatchewan were inundated with up to 300 percent of their normal monthly amounts in June.

From Ontario eastward, dry weather became a concern to the agricultural community as well as the forest industry. In southern Ontario, high temperatures and drying winds left potentially bountiful crops in dire need of moisture. The worst forest fires in almost half a century were burning along the north shore of the St. Lawrence River. The two principal fires located in the Betsiamites and Forestville areas of Quebec covered 1900 square km and 900 square km, respectively. Across the Maritimes, the dry weather which began in mid-May caused wells to dry up and river levels to drop well below normal values. Crops began to be stressed by the lack of moisture while some municipalities restricted the use of their water supplies.

Dry, sunny weather continued into June across the Maritime provinces and caused a record number of forest fires in Nova Scotia, dry wells, and record low lake and river levels. Farmers experienced dwindling yields of fruits, vegetables, hay and silage.

On August 19 and 20, Essex County, just south of Windsor, Ontario was inundated with up to 300 millimetres of rain, causing flooding and road washouts. Damage was estimated at one million dollars.

More than 130 mm of rain drenched the lower mainland of British Columbia during the final week of August, causing severe flooding in the Howe Sound area, north of Vancouver. Washouts and flooding occurred at many points along the Squamish Highway between Vancouver and Whistler. At Britannia Beach, the highway was under 30 cm of water, as a normally tranquil creek cut a new channel through the town. Hundreds of people were forced to flee their homes. Footings on the British Columbia Rail line near Alta Lake were washed out, halting trains between Vancouver and Lillooet. Flood damage was estimated to be in the four million dollar range.

In British Columbia, two major rainstorms between October 8 and 14 inundated the northern coastal area with well over 200 mm of rain, with some areas receiving up to 340 mm. Raging floods stranded more than 1000 residents in this remote area. A number of small communities along the Nass River, including the towns of Greenville and Canyon City, 140 km northwest of Terrace, were isolated for days until road crews could repair washed out roads. On November 10 and 11, a slow-moving storm, with winds gusting to 110 km/h, waterlogged Nova Scotia. The hardest hit region was the southwest shore, where amounts as much as 154 mm of rain at Liverpool were recorded. Halifax received 126 mm. A state of emergency was declared in Queen's County. Due to extensive flooding of roads

and homes evacuations were necessary.

November produced record rainfalls of between 100 and 200 mm on British Columbia's north coast. As well, snowfalls in excess of 200 cm were reported in northwestern British Columbia. Some mountain passes in British Columbia and the southern Yukon received almost 300 cm of snow.

STORMS, BLIZZARDS, AND TROPICAL STORMS

On January 12, a major Atlantic storm intensified over Newfoundland waters producing 20-metre high seas and a reported wind gust of 169 km/h at Bonavista. The storm resulted in the sinking of a cargo ship, 400 km off the southeast coast of Newfoundland, claiming 33 lives.

On February 14, a storm producing 15 to 25 cm of snow across southern Quebec resulted in the death of one person in the Eastern Townships. On the same day, heavy rain and lightning caused flooding and power outages in southwestern Nova Scotia. In Quebec on the 19th, freezing precipitation south of Quebec City resulted in a traffic accident which claimed three lives. Across Newfoundland, several winter storms during the month caused blizzard-like conditions, closing schools and highways. Winds reached 130 km/h in some coastal communities.

Traditionally a fickle month across Canada, March of 1991 was no exception. The Vancouver area received 15 to 25 cm of snow with as much as 40 cm near Chilliwack, east of Vancouver. Even in balmy Victoria, where flowers were already in bloom, 15 cm of snow blanketed the city, while outside the city, as much as 35 cm of snow was reported on the ground. On March 10, scattered thunderstorms across British Columbia's lower mainland spawned several funnel clouds and a tornado touched down at Pitt Meadows, east of Vancouver. Tornadoes in this part of the country are rare at any time of the year.

Eastern Canada also experienced late winter storms. During the first week of March, freezing precipitation coated the southern parts of Ontario and Quebec. Some areas reported up to 25 mm of ice accretion.

Across the Maritimes several storms struck during the month. On March 4, up to 13 hours of freezing rain was reported in Sydney, while in Fredericton, freezing rain and ice pellets lasted almost 24 hours. The storm was one of the most expensive on record for the Nova Scotia Power Corporation.

On the evening of the 11th, a major storm stalled just to the east of Cape Breton Island, N.S. Strong easterly winds across Cape Breton and Newfoundland pushed sea ice tightly against the coastline, causing disruptions to shipping and ferry services. Another storm on March 27 and 28 churned wind gusts in excess of 100 km/h across the southern parts of Ontario and Quebec. Sarnia, Ontario recorded gusts up to 159 km/h, the highest winds ever reported in southwestern Ontario, with the second highest in the province at 161 km/h recorded at Ottawa's Rockcliffe Airport, on May 11, 1959.

During July, there were numerous severe weather outbreaks across the

country. Some notable events occurred when a tornado was reported 55 km west of Prince George, B.C. on the 2nd, and also when golf ball-size hail peppered Red Deer, Alberta, on the 3rd. On the 18th, a violent storm passed through Eriksdale, Manitoba flattening 46 cm diameter maple trees and moving 800 kg bales of hay a distance of 150 metres. A tornado ripped through a farm near Russell, Manitoba on the 21st, while in the Riding Mountain National Park area, there were reports of over 100 mm of rain in less than three hours causing creeks and rivers to overflow.

On the 18th, severe thunderstorms across northwestern Ontario produced torrential rains and wind gusts up to 160 km/h, ripping down 160 000 hectares of mature forest just south of Red Lake, in less than half an hour. The area was the largest blowdown of trees in the history of Ontario, representing five to seven years of wood to saw mills in the Kenora area. The millions of strewn trees, if left unharvested, could over the next few years become an extreme forest fire hazard.

On August 19, Hurricane Bob moved up the eastern seaboard packing winds of up to 220 km/h. As Bob moved into New Brunswick, the storm was downgraded to a tropical storm. Digby, N.S. reported the strongest wind gusts of 130 km/h. Northern New Brunswick received the most rain, between 60 and 100 mm. Elsewhere, 50 km/h winds and 50 mm rainfalls were common.

On August 27, an F3 tornado with winds of 250 to 330 km/h cut a swath of destruction 75 to 150 metres wide along a distance of 1.5 km through the town of Maskinongé, Quebec. Damage was estimated at 17 million dollars, with no loss of life. A tornado of this magnitude occurs only about once in 15 years in this part of Canada. On August 30, thunderstorms with winds gusting to 120 km/h overturned 16 aircraft at Gatineau Airport, Quebec.

In southern British Columbia, winds exceeding 100 km/h on October 12 caused a plane to flip over at Kamloops Airport. On the 16th, gusts to 156 km/h were reported at Vernon, B.C., causing considerable damage, while in the Vancouver area, two freighters collided as a result of dragging anchors, and a commercial passenger aircraft parked at Vancouver Airport was pushed into the side of a terminal building.

During the latter half of October, six snowstorms dumped more than 10 times the monthly normal on parts of the Prairies. The central portions received the most snow during the month, recording between 60 and 90 cm by month's end. There were prolonged power outages and road closures as a result of these storms.

Between October 28 and 30, the Maritimes experienced a major windstorm with gusts to 120 km/h. There were power outages as well as reports of damaged fishing boats. Hurricane force winds prevailed off the southeastern coast of Nova Scotia. Average wave heights were 17.4 m on the Scotian Slope, with a maximum of 30.7 m at the same location. A bulk carrier took on water near Sable Island and a Japanese fishing vessel lost power. Both returned safely to the port of Halifax.

On November 15 and 16, storm force winds in excess of 100 km/h ravaged the B.C. coast and to a lesser extent the interior valleys. Solander, on the

exposed outer coast of northwest Vancouver Island, reported a maximum gust of 171 km/h, and many other locations reported gusts in excess of 125 km/h.

During the first week of December, most of the country received heavy snowfalls. The mountain passes of the Yukon Territory and northwestern British Columbia had two heavy snowfalls. Whitehorse received 44.5 cm of snow. Numerous daily snowfall records were set between December 2 and 4, causing transportation problems and avalanches.

Across the Prairies, 20 to 30 cm of snow during the first week gave accumulations near December monthly averages for many locations. On Baffin Island, blizzard conditions on December 5 paralysed the town of Iqaluit for 24 hours. Schools, offices and stores were all closed.

Across southern and central Ontario, snow and freezing rain caused school closures and many power outages on December 2 and 3. Yet another snowstorm on December 5 and 6 dumped another 10 to 20 cm of snow on southern Ontario.

Three snowstorms buried the Maritimes with 35 to 60 cm of snow. Across Newfoundland, rain, freezing rain, snow and winds gusting to 111 km/h dealt hardship to public and marine concerns.

Book Reviews

Compte-rendu de lecture

Meteorological aspects of emergency response

M.L. Kramer, W.M. Porch, eds., 1990.

American Meteorological Society, ISBN 1-878220-00-4, 119 pp.

This AMS monograph contains five contributions:

Role of meteorology in emergency response, R.J. Engelmann and W.F. Wolff;

Meteorological measurements in emergency response, T.V. Crawford;

Predictive meteorology in support of emergency response, P.E. Merilees, J. Pudykiewicz;

Atmospheric dispersion modeling for emergency response, R.M. van Aalst;

The evaluation of emergency response trace gas and dense gas dispersion models, M.H. Dickerson, D.E. Ermak.

As you can see, two of Canada's best-known researchers have contributed to this publication.

In their introduction the editors inform us that these contributions are the invited presentations from a workshop on the meteorological aspects of emergency situations (such as equipment failure). Eighty-five specialists attended the workshop. The five papers included here focus on important problems identified by researchers in the emergency-measures field: measurement, models, forecasting, and model evaluation.

The first paper discusses the role of meteorology in emergency situations. According to its authors, the primary goal of the involvement of meteorology is to reduce the level of exposure of the population to airborne hazards. They discuss the concept of level of exposure with a specific example and emphasize that the meteorological expertise available must be varied and flexible. Thus the meteorologist must be well trained and be provided with the tools needed to face new and unexpected situations. The authors stress the need for research aimed at improving forecasting of wind direction, particularly in the case of light winds, and of air movement in the presence of topographic obstacles and buildings.

Crawford discusses the question of meteorological measurements in emergency situations. Besides data on emissions, meteorological observations are essential in the estimation of levels of exposure and decisions on the necessary actions to be taken. The author first makes the distinction between climatological and meteorological data, then discusses meteorological factors important in emergency situations: wind, turbulence and diffusion, the mixing layer, and deposition. The author then specifies the criteria which measurements of these parameters must meet and indicates the level of precision required. He emphasizes procedures for quality control and finishes by considering future developments.

Merilees and Pudykiewicz use the Chernobyl accident to demonstrate the role of forecasting in emergency situations. The impact of such an event is examined at micro-, meso- and macro-scale. The authors define the problem for each of these scales and employ the case of Chernobyl to illustrate the use of the available tools. They close with some observations on the current system of forecasting and some thoughts on future considerations.

In his paper van Aalst deals with dispersion modeling for emergency situations. He establishes objectives and requirements for the models and provides a general classification scheme for them. He discusses the case of the Chernobyl accident, for which he presents the results obtained from three different models.

The final contribution concerns the evaluation of the dispersion models used in emergency situations. Dickerson and Ermak deal first with various aspects of the models, particularly their objectives, accuracy and uses. The clear description of these aspects allows a fuller understanding of the difficulties involved in evaluating the models. The authors present two types of statistical techniques used in evaluating performance, "difference" methods and "ratio" methods. Next they discuss the evaluation of real-time models; the results are based on experiments done with trace gases. A final section concerns the dispersion of heavy gases, and the paper closes with recommendations on the development of "expected performance criteria" needed in more systematic evaluation of the models.

This monograph covers a number of complex topics ranging from synoptic-scale forecasting to the dispersion of heavy gases. The models and techniques used by each of the specialists have little in common apart from their overall perspective. In stark contrast, in an event leading to an emergency situation, everyone is confronted with one and the same problem and at that moment the integration of techniques and capabilities becomes absolutely essential. The lesson we must learn from this monograph is the necessity to work towards a close collaboration between the various persons and agencies involved in these situations.

Richard Leduc
Division de la qualité de l'air
Environnement Québec

Meteorological Aspects of Emergency Response

M.L. Kramer, W.M. Porph, eds., 1990.

American Meteorological Society, ISBN 1-878220-00-4, 119 pp.

Cette monographie publiée par l'AMS comprend 5 textes, soit:

Role of meteorology in emergency response. R.J. Engelmann,

W.F. Wolff;

Meteorological measurements in emergency response.

T.V. Crawford;

Predictive meteorology in support of emergency response.

P.E. Merilees, J. Pudykiewicz;

Atmospheric dispersion modeling for emergency response.

R.M. van Aalst;

The evaluation of emergency response trace gas and dense gas dispersion models, M.H. Dickerson, D.E. Ermak.

Comme vous pouvez le constater, deux de nos meilleurs chercheurs au Canada ont contribué à cette publication.

Dans leur présentation, les éditeurs nous apprennent que ces textes sont les présentations des conférenciers invités lors d'un atelier portant sur les aspects météorologiques des situations d'urgence (comme un accident technologique) auquel ont participé 85 spécialistes. Ces textes s'intéressent aux aspects importants identifiés par des chercheurs oeuvrant dans le domaine des urgences soit la mesure, les modèles, la prévision et l'évaluation des modèles.

Le premier texte discute du rôle de la météorologie en situation d'urgence et selon les auteurs, le but premier de l'utilisation de la météorologie est de réduire l'exposition (réduction de la dose). Les auteurs discutent de la notion de dose à l'aide d'un exemple et ils insistent sur le fait que les capacités de la météorologie doivent être variées et flexibles. Ainsi, le météorologiste doit être formé et doit avoir à sa disposition des outils lui permettant de faire face à des situations nouvelles et inédites; selon les auteurs, il est nécessaire de poursuivre les recherches dans le but d'améliorer la prévision de la direction du vent (par vent faible) et celle de l'écoulement en présence d'obstacles (topographie, bâtiments).

Le texte de Crawford discute des mesures météorologiques lors des situations d'urgence. Tout autant que les données relatives aux émissions, les observations météorologiques sont essentielles si on désire évaluer les expositions et prendre les actions qui s'imposent. L'auteur fait tout d'abord la distinction entre les données climatologiques et les données météorologiques puis il discute des processus météorologiques significatifs lors de telles situations soit le vent, la turbulence et la diffusion, la couche de mélange et la déposition. Pour ces paramètres l'auteur énonce ensuite des critères que doivent rencontrer les mesures et il indique les niveaux de précision requis. Finalement, il insiste sur les procédures de contrôle de la qualité et il termine avec des considérations sur les développements futurs du problème.

Dans leur texte, Merilees et Pudykiewicz utilisent l'accident de Chernobyl pour démontrer le rôle de la prévision en situation d'urgence. L'impact d'un tel événement a été examiné selon trois échelles soit la microéchelle, la mésoéchelle et la macroéchelle. Les auteurs définissent le problème pour chacune de ces échelles puis se servent du cas de Chernobyl pour montrer l'utilisation des outils dont on dispose. Ils terminent par des remarques sur le système de prévision actuel et des considérations sur les développements futurs.

Le texte de van Aalst discute du problème de la modélisation de la dispersion pour les situations d'urgence. L'auteur établit les objectifs des modèles puis discute des spécifications qu'ils doivent rencontrer et il donne une classification générale des modèles. Il discute du cas de l'accident de Chernobyl pour lequel il donne des résultats obtenus à partir de trois modèles différents.

Le dernier texte s'intéresse à l'évaluation des modèles de dispersion employés en situation d'urgence. Les auteurs précisent tout d'abord divers concepts relatifs aux modèles soit leurs objectifs, leur précision et leur utilisation. Ces concepts, clairement établis, permettent par la suite de mieux comprendre les difficultés reliées à l'évaluation. Dickerson et Ermak présentent deux catégories de techniques statistiques employées pour évaluer la performance soit celle de la différence et celle du rapport. Ils discutent ensuite de techniques pour évaluer les modèles en temps réel; les résultats sont basés sur des expériences menées avec un gaz traceur. Les auteurs consacrent finalement une dernière section à la dispersion des gaz lourds puis terminent par des recommandations sur l'évaluation des modèles (définition et évaluation de critères de performance).

Cette monographie fait le tour de domaines très complexes qui vont de la prévision à grande échelle à la dispersion de gaz lourds. Les modèles et techniques employés par chacun des spécialistes n'ont souvent rien en commun, tout autant que leur préoccupation respective. Par contre, lors d'un événement conduisant à une situation d'urgence, tous sont confrontés à un seul et même problème et c'est à ce moment que l'intégration des moyens et des habiletés est forcée de se faire. La leçon que nous pouvons tirer de cette monographie est l'obligation de jeter les bases d'une étroite collaboration entre les divers intervenants impliqués lors de tels événements.

Richard Leduc
Division de la qualité de l'air
Environnement Québec

News and Comments

Nouvelles et commentaires

COMMENTS ON GCM'S AND THE MACKENZIE VALLEY

SHOULD IMPACTS RESEARCH WAIT FOR CERTAINTY?

Stewart J. Cohen

Canadian Climate Centre

Downsview, Ontario M3H 5T4

The recent paper by Stuart and Judge (1991) compares the outputs of three General Circulation Models (GCM) for the Mackenzie Valley, and concludes that there are errors in regional scale simulations of the current average climate. The authors go on to state that GCMs should not be applied to any social or economic impact analysis of the Mackenzie Valley for fear of undermining the credibility of global warming research, and that "the commissioning of detailed socio-economic studies using only GCM-based scenarios of climate change is premature."

This argument has already been raised on various occasions.

Proponents have said that we need to wait for more certainty in the science before policy issues, including limitation and adaptation strategies, should be considered by governments, business and other stakeholders. The attention given by funding agencies to research on reducing scientific uncertainties related to global warming, without comparable funding for socio-economic impact studies, is a reflection of considerable support for this point of view.

Others have noted that the use of GCM-based scenarios creates a distraction away from important issues related to impacts and adaptation, and that impacts research should develop an alternative, such as temporal or spatial analogues, risk assessment and sensitivity analyses based on probabilities of exceeding critical thresholds for the sector in question (e.g. agriculture).

Unfortunately, all of these approaches contain shortcomings of their own, so the "uncertainty" problem will not be resolved just by finding an alternative to GCMs.

I think it is important to remind ourselves that global warming exists as an issue because of the GCM simulations of future climates with a doubling of atmospheric concentrations of carbon dioxide. GCM simulations have been important factors in the creation of the Intergovernmental Panel on Climate

Change, in the national impacts studies recently completed in the United Kingdom, Australia, New Zealand and the United States, in sectoral studies (e.g. agriculture, water resources), and in the negotiations on a global convention on climate change. In all of these cases, uncertainties have been noted, and many different approaches to developing regional scenarios from GCM simulations have been tried. In fact, I have argued that in order to meet the challenge of regional impact studies (Cohen, 1990), we need a standard approach to developing scenarios so that it would be possible to compare results among impact studies using the same GCM (Cohen, 1991).

Regardless of the approach used, however, several points should be made:

1. Socio-economic impact studies are needed now because governments want to know what global warming means to their jurisdictions.
2. GCM-based scenarios should be included in all impact studies because they enable these studies to build bridges between global warming science and a wide range of policy issues related to adaptation.
3. Studies should use more than one global warming scenario (GCM-based and others) so that consumers of this information (scientists, policy makers, stakeholders, etc.) will see the uncertainties expressed in terms of impacts, not degrees Celsius. This will demonstrate regional sensitivities to global warming within the context of the best available information provided by global warming science.

The Mackenzie Valley is within the study area of the Mackenzie Basin Impact Study (MBIS), supported by the Government of Canada's Green Plan and other sources. MBIS will consider four scenarios. Three are based on GCMs. The fourth is a temporal analogue derived from instrumental and proxy data sources. Whether or not the impacts from these scenarios will be the same is not the important question. It really boils down to filling an information gap between global warming science and regional policy concerns at a time when long term issues are being considered. These include interjurisdictional water resources agreements, native land claims, transfer of responsibilities from national to regional governments, and investments in infrastructure and new economic development opportunities. Many of these are long term planning, investment, management and political issues which contain elements that may be affected by climate change. These long term decisions are being made now, with information that is available today.

Should the scientific community wait for certainty before providing its voice to the debate on the future of Canada's north and other regions? When will we achieve "certainty?" Should governments, industries and the public consider global warming in light of the best information available, or "no comment?" If the scientific community says "no comment," other voices may come to dominate the debate.

Those that believe that global warming will or may happen are likely to accept scenarios as scenarios, and learn from the experience of looking at the future differently from the past. Efforts to improve GCMs, Limited Area Models and regional climate data bases should continue to be supported, but if global warming research is not interpreted in regional, environmental and human terms, there will be an information gap between scientists and stakeholders (governments, industry, the public). Who will fill that gap, and with what? I would suggest that impact researchers are best suited to do so and that GCM-based scenarios are one of several tools that need to be used to deliver credible analyses.

REFERENCES

- Cohen, S.J. 1990. Bringing the global warming issue closer to home; the challenge of regional impact studies. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 71, 520–526.
- Cohen, S.J. 1991. Caveats in applying GCM output to regional impact assessment. In Sanderson, M. (ed.), *Proceedings of a Symposium on Climate Scenarios, 12 June, 1991*, University of Waterloo, 16–32.
- Stuart, R.A. and A.S. Judge. 1991. On the applicability of GCM estimates to scenarios of global warming in the Mackenzie Valley area. *Climatological Bulletin*, 25, 3, 147–169.

Comments on “On the Applicability of GCM Estimates to Scenarios of Global Warming in the Mackenzie Valley Area”, R.A. Stuart and A.S. Judge, *C.B.* 25(3), 147–169.

David Etkin

Canadian Climate Centre

4905 Dufferin Street

Downsview, Ontario M3H 5T4

In this paper the authors review the climate of the Mackenzie Valley and compare it to three second generation GCM's. They note significant differences between model 1xCO₂ climates and the observed climate, and between the model climates themselves, both in a 1xCO₂ and 2xCO₂ mode. Their observations are quite valid; it has often been noted that model climates differ from observed climates and from each other. These differences may well be in part due to cloud related processes as discussed by the authors, but are almost certainly also associated with differences in the treatment of the oceans and other parameterizations and feedbacks. There are other observations the authors could have made as well, to argue that the 2xCO₂ GCM's will not look like a 'true' future climate (e.g. the GCM 2xCO₂ runs are equilibrium climates, unlike the real system which is in a transient state, or that they are not realistically hooked into the ocean system). Unfortunately, some of the conclusions that the authors derive from their observations do not follow, as they fail to distinguish between useful concepts of prediction and scenarios.

The authors point out the 'failure' of the models to simulate current climate accurately, and the large 'errors' associated with them. While this is true, I would argue that on a larger scale the models are very successful indeed, and it is their successes which allow for them to be treated as useful tools in climate change studies. Climate prediction on a regional scale is a challenging task indeed (in fact, it is very challenging even on a hemispheric scale!), and no modeller would pretend that such capabilities exist at this time. Users need to be, and generally are, aware of this. What the current crop of GCM's provide are internally consistent model climates which can be used to provide a set of *scenarios* of future climate change. I have occasionally been critical of impact studies based on GCM scenarios for reasons similar to those outlined by the authors; however, the question 'What does climate change mean to us?' cannot be avoided and has the force of inevitability. There is no really satisfactory way to answer this question, and therefore it has to be addressed obliquely. GCM climate scenarios, possibly along with other types of scenarios, have the potential of being used to provide some sort of bounds to the climate change problem, of placing sensitivity studies in context, or of providing impact scenarios that are useful from a policy perspective. As well, many risk analyses are scenario based.

It is not possible to provide meaningful quantitative error bounds on climate predictions, and when considering the impacts of climate change on a variety of physical, ecological or socio-economic systems, uncertainty compounds in complicated and non-linear ways. Nevertheless we do know that mankind is altering the climate system of the planet, and it is important to develop methodologies which attempt to assess what it all means. It is far less satisfying to do this within the context of scenarios than within the context of accurate prediction; nevertheless, uncertainty is something we have to learn to live with.

In a conversation with Dr. Judge, subsequent to reading the paper, he emphasized that the purpose of the paper was to show that GCM outputs may not in many cases (I would argue 'in any cases') be used to predict the rate and degree of warming at different locations. The authors achieved their goal, though they did not demonstrate that usefulness does not exist from a scenario perspective. The authors would have written a more balanced paper, though, had they not only critiqued certain types of impact studies, but also acknowledged their strengths and usefulness, and proposed alternate methodologies.

MACKENZIE BASIN IMPACT STUDY (MBIS)

The Mackenzie study is one of several projected within the Global Warming Science Program of the federal government's environmental action plan, known as the Green Plan. The Minister of Environment announced the Program on January 27, 1992. Stewart Cohen of the Canadian Climate Centre is the Project Leader for the MBIS (Phone: 416-739-4389; Fax: 416-739-4297).

The MBIS is now in its second year of activities. Support has been provided so far for studies of runoff, Peace River ice, agriculture, wildlife response to burns, resource accounting, tourism, permafrost, freshwater fisheries and tree line fire. We hope to have our first interim report completed at the end of 1992.

S. Cohen
Canadian Climate Centre
Downsview, Ontario M3H 5T4

STATUS REPORT GREAT LAKES-ST. LAWRENCE RIVER BASIN PILOT PROJECT ON RESPONSES TO THE IMPACTS OF CLIMATE CHANGE

BACKGROUND

Initial impact studies sponsored by the Canadian Climate Program identified the potential social, economic and political consequences of global warming on Canadians. In order to develop effective policies and response strategies on a regional scale, it is now necessary to conduct second generation, integrated impact assessments which will consider the interactions of various economic sectors within a region under a warmer climate. The Canadian Climate Centre has initiated a project on the response to climate change in the Great Lakes-St. Lawrence Basin. This project is part of the Green Plan initiative – "Reducing the Uncertainties" with a target of "Maintaining Global Environmental Security". The project will be binational and it will build upon impact studies already completed in Canada and the United States, and will develop new approaches to global warming at a regional level. The study area will include the Great Lakes Basin and the St. Lawrence River Basin above Trois Rivières. This project will have a strong policy orientation and its scope will include identifying actions to minimize future impacts and to take advantage of opportunities that arise.

ACTIVITIES

- i. Prepared a draft project plan;
- ii. Initiated contacts and discussions for potential partnerships with Canadian

- government organizations, individuals, academic institutions and industry;
- iii. Initiated discussions with American interests to develop a joint Canada-U.S. study framework and project plan;
 - iv. Contracted studies on: 1) a review of climate impact assessments in the Great Lakes-St. Lawrence Basin and an inventory of current relevant research in the Basin; 2) a preliminary investigation of the climate change-economy link;
 - v. Prepared a paper on the project plan for presentation at the annual meeting of the American Association for the Advancement of Science; and
 - vi. Participated in workshops to develop climate change scenarios for the study basin.

Linda Mortsch
Canadian Climate Centre
Atmospheric Environment Service
4905 Dufferin Street
Downsview, Ontario M3H 5T4

INTERNATIONAL CONFERENCE ON IMPACTS OF CLIMATIC VARIATIONS AND SUSTAINABLE DEVELOPMENT IN SEMI-ARID REGIONS

Fortaleza, Brazil

January 27 – February 1, 1992

The above conference, known as ICID, was organized by the Esquel Group Foundation, a Brazilian NGO with links to similar autonomous groups in other Latin American countries. The purpose was to attract world attention to the problems of semi-arid regions, and to provide input to PREPCOM3, the last preparatory meeting before the United Nations Conference on Environment and Development (UNCED).

The ICID international advisory committee included P. Usher (UNEP), H. Ferguson (Geneva), M. Parry (UK), M. Glantz (US), J. Hardoy (Argentina), W. Degefu (Ethiopia) and L. Heathcote (Australia). ICID was organized and directed by A. Magalhães (Brazil), and supported by the governments of Ceará State and Brazil, as well as UNEP and others. J. Goldemberg (Brazil) and other Brazilian (federal and Ceará State) politicians participated in the opening and closing plenary sessions.

There were about 600 participants from more than 40 countries, with about 80% from Brazil. Other participants from Canada were E. Wheaton (Saskatchewan Research Council) and T. Meredith and L. Dupigny (McGill). Several UN agencies (FAO, UNEP, UNCDF) were represented, along with research institutes that have extensive involvement in tropical semi-arid regions, particularly the Sahel and Northeast Brazil. Most notable were ORSTOM and CIDAC from France, and several research groups from Germany. A number of

climate impacts researchers and program organizers were present, including: M. Glantz, J. Topping, N. Rosenberg, P. Morrisette, B. Easterling, D. Wilhite (all U.S.), T. Downing (UK), Z.-c. Zhao (PRC), N. Ninh (VietNam), S. Panturat (Thailand), Y. Izrael (Russia), S. Huq (Bangladesh), T. Farago (Hungary), A. Subramaniam (India) and L. Heathcote (Australia).

Last July, I was invited by the organizing committee to participate in ICID. Ian Burton and Elaine Wheaton (via Jag Maini) were also contacted. After some discussion, we agreed to submit two papers: a) Adapting to Global Warming: Regional Options (Burton, Cohen), and b) Prairies Case Study (Cohen, Wheaton, J. Masterton). I coordinated and edited both papers, and they were reprinted and translated by ICID staff. I presented the adaptation paper while E. Wheaton and I were co-presenters of the Prairies case study.

The agenda included theme papers, case studies (many were from the Sahel and Northeast Brazil) and working group discussions. The 10 working groups were each restricted to 5–10 selected participants. The conference statement, entitled the "Declaration of Fortaleza" was first drafted by a small committee led by Ambassador J. Yriart (Uruguay) and modified by working-group representatives (chairs or rapporteurs).

More than fifty papers were presented, including the two I co-authored. Topics included impacts of variations and extremes, impacts of scenarios (3 papers: "MINK" region of the US, Mexico, Canadian Prairies), and development of agriculture and water development projects, particularly in the Sahel and Northeast Brazil. Y. Izrael reviewed the IPCC Working Group II report. There was also considerable interest in V. Rodrigues' (Brazil) paper on desertification in Northeast Brazil, and M. Glantz's provocative essay, "Drought Follows the Plow."

There appeared to be genuine concern about global warming, though the focus of ICID was more on existing problems. For example, N. Rosenberg and P. Morrisette of Resources for the Future met with the Governor of Ceará and Esquel Brasil Foundation to discuss a new climate impacts study of Northeast Brazil, following the methodology used in the MINK study. Planning for this had been initiated several months earlier.

Recommendations were included in both the Working Group reports and the Declaration of Fortaleza, with a focus on semi-arid regions, particularly in tropical and sub-tropical zones. When they are revised, they will list the following needs: a) broad social and political changes, b) land tenure reform and agrarian reform, c) compensation for natural and synthetic derivatives of genetic resources, d) greater participation and decentralization in planning, management and decision making, e) new investments from multilateral development agencies, f) education and extension services, g) technology transfer, h) integrated monitoring, i) integrated regional impact assessment, j) establishment of air quality standards, k) development of small energy systems for rural areas, and l) establishment of research networks focussing on problems of the semi-arid regions.

Following the conference, I participated in a one-day field trip to the interior of Northeast Brazil. Our group of about 100, led by A. Magalhães, visited a dam in Quixadá, completed in 1906 (after 22 years of construction). We also saw a fish hatchery near the dam, examples of local landscape and farming practices (including burning to prepare fields for planting). The final event was a music show in Caninde, held near a huge outdoor amphitheatre which had been built as a public works project to reduce unemployment during a recent drought.

The semi-arid regions, particularly the Sahel and Northeast Brazil, want a strong message sent to UNCED about their needs for sustainable development. During the final plenary, J. Goldemberg noted that UNCED could be a forum for denunciations, demands without compromises, and debates over the Amazon. He is hopeful that UNCED can be a catalyst for sustainable development, but believes that new rules and directions are needed regarding technology transfer, energy use, financing, access to water and other resources, and application of scientific information.

I do not know what effect ICID could have on PREPCOM3, the debate on trace gas emissions or UNCED itself. ESQUEL Foundation, organizer of ICID, has established a network in many Latin American countries and strong links with Sahelian countries and researchers in France, Germany and the U.S. I do not believe that semi-arid regions of the developing world are looking for "handouts" from developed countries. Rather, they are anxious for new rules and new partnerships so that they can find their own way to prepare for the future.

S. Cohen
Arctic Adaptation Division
Canadian Climate Centre
Downsview, Ontario M3H 5T4

THE CLIMATE DIAGNOSTIC RESEARCH GROUP

The Climate Diagnostic Research Group (CDRG) was formed about five years ago by John Knox and Kaz Higuchi, after consuming a few beers over lunch at a Mexican restaurant north of the AES Headquarters. We wanted to bring together a few individuals in the Canadian Climate Centre (CCC) and the Atmospheric Research Directorate (ARD) in AES who had expressed a common interest in conducting climate and climate-related research using historical data. We wanted to increase our knowledge and understanding of the climate system by performing diagnostic studies on it.

At the beginning, the Group was basically composed of Kaz Higuchi (ARD), John Knox (CCC), Amir Shabbar (CCC), and Neil Sargent (CCC). The Group provided a vehicle and a forum for discussion on scientific problems related to climate dynamics and evolution, as well as for initiating scientific projects. The

Group's initial small size and the common scientific interest of the individual members proved to be very productive and successful. Under the name of CDRG, we published our first paper in the *AMS Journal of Climate* in 1988. A number of interesting papers in other scientific journals followed. What has been very pleasing in this respect was that the group constituted an ad hoc gathering of individuals who performed these climate diagnostic research activities on a part-time basis, but with sharing of duties. Furthermore, since the Group has had no "formal" recognition of its existence, its function was not organized. There is nothing like organized science to kill scientific initiatives and curiosity, not to mention crazy ideas. We allowed ourselves the luxury that interest and curiosity be the guide to our scientific exploration. We met quite frequently but irregularly.

Very recently the nature of the Group has been transformed. The Group is now used as a forum for scientific discussions on matters related to physics and chemistry of the atmospheric component of the climate system. The membership has also expanded to about twenty, mainly from ARD and CCC, consistent with the above new theme of the Group function. Furthermore, the Group now meets on a regular basis (once every month), and is also used for "current climate discussion". The group is no longer used formally as a vehicle for discussion on technical details of Group projects. Such meetings on projects are now organized on a need-to-meet basis by those members involved. However, CDRG meetings are used most appropriately as places to report progress on various scientific projects carried out with Group participation.

The group would like to expand its basis of information exchange and scientific collaboration. We would like to establish a communication network with other Canadian researchers who are directly involved in climate data analysis, and to explore the possibility of organizing a short (perhaps 2 days) "symposium" on climate diagnostic work sometime in the very near future. We can then use a Canadian journal of climate (such as *Climatological Bulletin*) to carry the results of such a gathering.

Kaz Higuchi
John Knox
Climate Diagnostic Research Group
Atmospheric Environment Service
4905 Dufferin Street
Downsview, Ontario M3H 5T4

THIRTEENTH INTERNATIONAL CONGRESS OF BIOMETEOROLOGY

THEME: Adaptations to Global Atmospheric Change and Variability

The Convention Centre, Calgary, Alberta, September 12-18, 1993

The International Society of Biometeorology announces its 13th Congress, which will address issues of humans, animals, plants, invertebrates, and microorganisms in relation to climatic change and variability. Interactions related to health and disease, production and performance, dwelling, architecture, clothing, energy and transport will all be within the scope of the congress.

We invite you to attend and participate in this timely and important international congress. Plans are underway to make the congress a scientifically and socially rewarding experience. It is not too early to make your plans now for the thirteenth international congress of biometeorology in 1993.

For further information, please write to:

Dr. N.N. Barthakur
Secretary, Organizing Committee
Department of Renewable Resources
McGill University - Macdonald Campus
21,111 Lakeshore Rd.
Ste-Anne-de-Bellevue, Quebec
H9X 1C0 Canada

Phone: (514) 398-7938

Fax: (514) 398-7983

ERRATA

In the article by J. Bursey and R. Shaw on "The representativeness of precipitation measurements on Canadian East Coast drilling platforms" in *Climatological Bulletin*, 25, 3, December 1991: 131-146, the following corrections should be made:

Column 3, Table 6, p. 143 should be headed "PLATFORM/ST. JOHN'S".

Column 3, Table 7, p. 144 should be headed "SAME POPULATION AS ST. JOHN'S?"