



Environment
Canada

Environnement
Canada

10/16/14
read + return

15

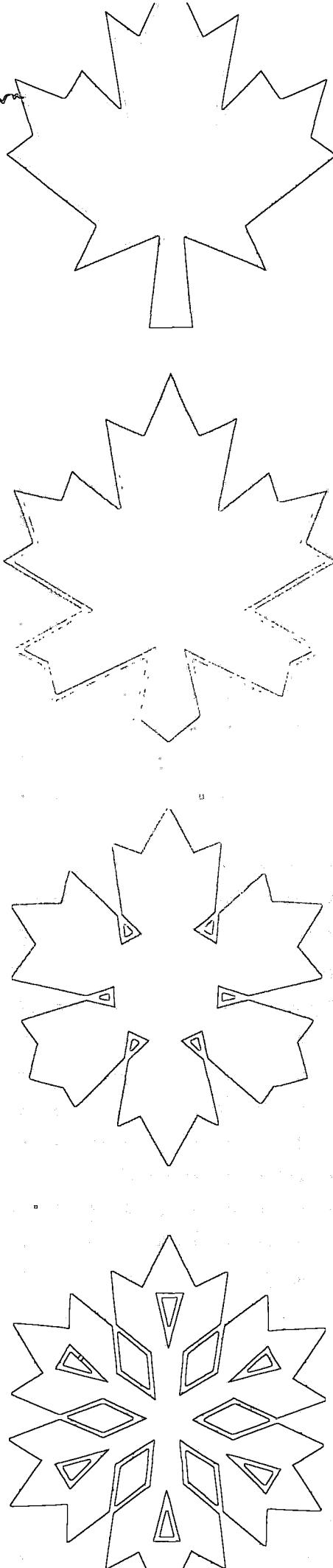
CLIMATE CHANGE DIGEST

Adaptation to Climate
Change and Variability in
Canadian Water Resources

CCD 93-02

QC
981.8.C5
C65
no.93-02

unada



CLIMATE CHANGE DIGEST

- CCD 88-05 Implications of Climatic Change for Tourism and Recreation in Ontario
- CCD 88-06 Estimating Effects of Climatic Change on Agriculture in Saskatchewan, Canada
- CCD 88-07 Socio-Economic Assessment of the Physical and Ecological Impacts of Climate Change on the Marine Environment of the Atlantic Region of Canada - Phase I
- CCD 88-08 The Implications of Climate Change for Natural Resources in Quebec
- CCD 88-09 CO₂ Induced Climate Change in Ontario: Interdependencies and Resource Strategies
- CCD 89-01 Climate Warming and Canada's Comparative Position in Agriculture
- CCD 89-02 Exploring the Implications of Climatic Change for the Boreal Forest and Forestry Economics of Western Canada
- CCD 89-03 Implications of Climatic Change for Prince Albert National Park, Saskatchewan
- CCD 89-04 Implications of Climate Change on Municipal Water Use and the Golfing Industry in Quebec
- CCD 89-05 The Effects of Climate and Climate Change on the Economy of Alberta
- CCD 90-01 Implications of Climate Change for Small Coastal Communities in Atlantic Canada
- CCD 90-02 The Implications of Long-Term Climatic Changes on Transportation in Canada
- CCD 91-01 Climate Change and Canadian Impacts: The Scientific Perspective
- CCD 92-01 Global Warming: Implications for Canadian Policy
- CCD 92-02 Review of Models for Climate Change and Impacts on Hydrology, Coastal Currents and Fisheries in B.C.
- CCD 93-01 Impacts of Climatic Change on the Beaufort Sea-Ice Regime: Implications for the Arctic Petroleum Industry
- CCD 93-02 Adaptation to Climate Change and Variability in Canadian Water Resources

5939

BVAEP Vancouver, Env. Can. Lib/Bib.



36 007 250



Environment
Canada

Environnement
Canada

QC
981.8
C5
C65
no. 93-02

**ADAPTATION TO CLIMATE CHANGE AND VARIABILITY
IN CANADIAN WATER RESOURCES**

summarized for

**Climate Change Digest
Atmospheric Environment Service**

by

William K. Nuttle

Rawson Academy of Aquatic Science

This Report Contributes to State of Environment Reporting

**LIBRARY
ENVIRONMENT CANADA
PACIFIC REGION**



This paper contains a minimum of 50% recycled fibres,
including 10% post-consumer fibres.

INTRODUCTION

The Canadian Climate Centre (CCC) has funded a number of studies to investigate the potential impacts of climate warming. A list of earlier titles in the series appears on the inside front cover.

DISCLAIMER

This publication
by Dr. William K.
The views and op-
and do not neces-
Canada or any ag-

study conducted
quatic Science.
of the authors
e Government of

Single copies of
by writing to th-

QC Adaptation to climate change
981.8.C5 and variability in Canadian
C65 water resources.
no.93-02

free of charge,

Climate Pr
Canadian C
4905 Duffe
Downsview,
M3H 5T4

(416) 739-

To purchase cop
Adaptation to C
Resources, Rawso

e, W.K. 1993,
Canadian Water
write to:

The Rawso
Suite 404
Ottawa, O
K1N 7B7

CANADA

Published by Authority of the
Minister of the Environment

© Minister of Supply and Services
Canada 1993

Catalogue No. EN57-27/1993-02
ISBN 0-662-59789-3
ISSN 0835-3980

ADAPTATION TO CLIMATE CHANGE AND VARIABILITY IN CANADIAN WATER RESOURCES

1. STUDY HIGHLIGHTS

This paper is a survey of topics and issues related to adaptation to climate change in Canadian water resources. The principal findings are as follows:

- Growing concerns for the environment and adoption of the goal of sustainable resource development act to emphasize the climatic limits to water resources. Water resources are especially sensitive to changes in variability in climate and hydrology.
- Based on what we now know about global warming, significant changes in climate and hydrology are plausible within a time period that matters for managers of water resources. Global warming will tend to exacerbate existing water resources problems in the southern Prairies and the Great Lakes. The Prairies can expect increased drought during the summer growing season, and the Great Lakes can expect a decline in mean lake levels to historic low levels.
- Measures for adapting to climate change can be categorized as traditional (supply) management, non-traditional (demand) management, and non-management. Traditional practices stress system reliability. They provide some adaptation to climate change, but they are limited in their ability to respond to rapid change. Non-traditional and non-management measures stress flexibility and resilience. These measures have the advantage that they also address other, more pressing concerns of water resources managers, and thus they can be implemented immediately, before the effects of climatic change are evident.
- Water resources managers require methods of assessing the vulnerability of water resources systems to climate change to help identify when and where adaptive measures should be applied.
- Adaptation to climate change requires ongoing observation and interpretation of climate, hydrology and related environmental processes. Ways must be found to detect the onset of climate change, and we must continue to improve our understanding of climate, hydrology and the links between them.

2. VARIABILITY, CHANGE AND ADAPTATION

Water is intrinsic to climate and an essential resource for society. Evaporation of water from the oceans and the continents, condensation into clouds and precipitation are the engine that drives the weather, which determines climate. Water in its terrestrial forms, as rivers, lakes and groundwater, is used in agriculture, energy production, transportation and recreation. The prospect of global warming caused by an enhanced "greenhouse"

effect has focussed attention on the impacts of climate change on society and the natural environment. Society is faced with the need to adapt to a changing climate. Even if current initiatives to control emissions of carbon dioxide are successful, a certain amount of climate change is now inevitable. Water resources is one area where the impacts of climate change are likely to be large and adaptation measures will be necessary.

2.1 ADAPTATION IN WATER RESOURCES

How well are Canadians adapted to their climate? What can be done to adapt better to a changing climate? Water resources are, by their nature, sensitive to variations in climate and hydrology. Water resources systems are well adapted to the variations in climate and hydrology that occur on seasonal, interannual and decadal time scales. However, climate change and its consequences have been implicitly ignored in the planning and design of most water resources systems. For the most part, it has been thought sufficient by hydrologists and water resources managers to characterize climate and hydrologic processes as random variation superimposed on an unchanging mean climate, the assumption of stationarity. This has been justified by the argument that interannual and interdecadal variability in the recorded data of precipitation, stream flow and the like, combined with the uncertainties introduced by errors in measuring these processes, overwhelm the changes during these periods that are associated with climate change.

Predictions of imminent, rapid global warming raise the issue of the long term variability and changeability of climate and motivate us to re-examine the assumptions underlying design and practice in water resources. The purpose of this paper is to provide a survey of topics and issues related to climate change and adaptation in water resources in Canada. Therefore, the emphasis is on what can be done to improve our adaptation to climate change. Three questions guided this study. What types of climate change are possible in the next 30 to 50 years, the time frame relevant in planning large water resources projects? What will be the effect of these changes on water resources? How can managers and water resources institutions respond to a changing climate?

2.2 CLIMATE VARIABILITY AND CHANGE

The distinction between climate variation and climate change is largely arbitrary. The "mean" climate is often defined in terms of 30 year averages of climate parameters, also known as the climate normals. Deviations in daily, seasonal and annual mean quantities from the climate normals are taken as measures of the daily, seasonal and interannual variability of climate. Variation in the climate normals themselves can be taken as evidence of change in the mean climate, although a certain amount of "noise" in the climate normals is still expected. Climate change refers to both changes in "mean" climate and changes in the deviations from the mean. Changes in the frequency and magnitude of flood and drought are especially important to water resources.

Long term changes in Canada's climate are apparent as trends in climate and hydrologic parameters over the last 100 years or so for which records have been collected. Whether these trends are evidence for a permanent change in mean climate or whether they are manifestations of long term, quasi-periodic

variations in climate is a distinction with little practical meaning in terms of our adaptation to climate. For most people, and for society at large, change is measured as the difference between what is being experienced and what is expected based on past experience. Therefore, the definition of climate change depends on the length of human memory and on the underlying rate of change taking place in society at large.

3. WATER RESOURCES AND CLIMATE

The field of water resources is also changing in response to society's evolving concerns and objectives for resource management. Traditionally, water has been viewed narrowly in terms of its ability to satisfy the needs of domestic, municipal, agricultural and industrial users. The main objective of water resources management has been to "meet the demand for reliable water supply and flood protection no matter how that demand changes" (Riebsame 1988). Often, water resources development has been used to stimulate industrial and agricultural development. Traditional practice has concentrated on intervention in the hydrologic cycle by constructing facilities (storage reservoirs, diversion canals) to overcome flood hazards and the natural hydrologic constraints on the reliable supply of water.

In recent years, environmental concerns have become widespread in society. With regard to water, these manifest themselves as a concern for the effects of pollution and a growing recognition for the important roles water plays in natural ecosystems. Future management of water resources must be consistent with the objective of sustainable development, that is "development that meets the needs of the present without compromising the ability of future generations to meet their own needs" (WCED 1987). In addition, society is less inclined to bear the cost of ever expanding facilities required by strict adherence to a supply based strategy for managing water resources, and interest is increasing in ways to manage the demand for water by society (Tate 1990). Taken together, these factors contribute to a broadening view of water resources, one which emphasizes the natural limits on water use by society, including those posed by climate change.

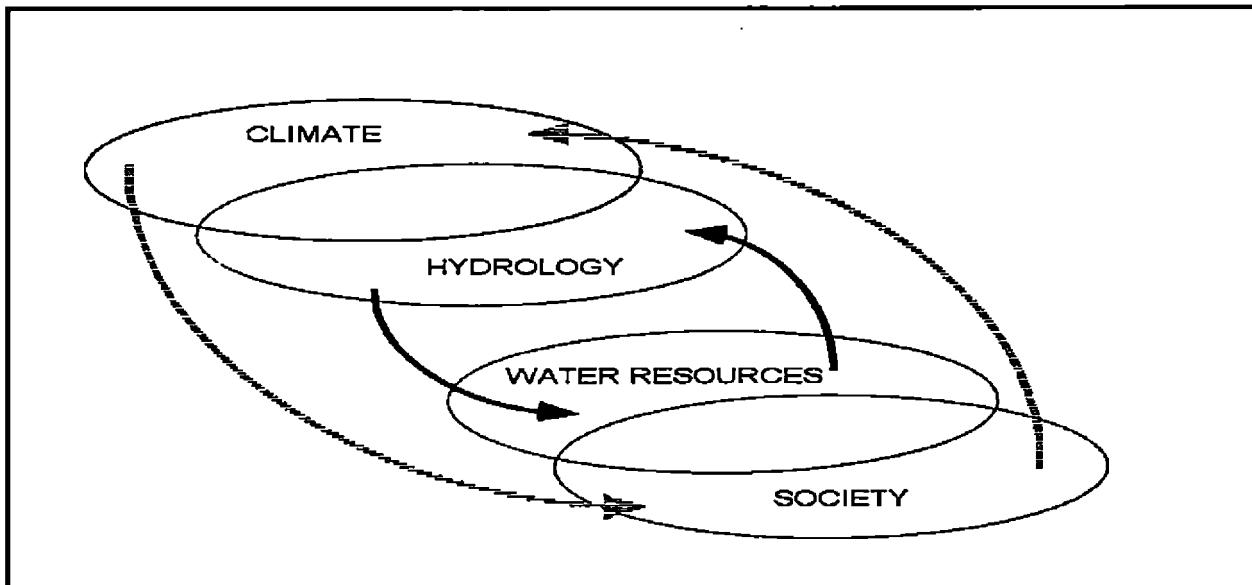
3.1 WATER USE BY SOCIETY

Water is used for municipal and industrial supply, irrigation, waste disposal, hydro-electric power generation, navigation, fish and wildlife production and recreation. In general, water use by society can be divided into two classes; withdrawal uses and non-withdrawal uses (also called in-stream uses). Withdrawal uses are characterized by the removal of water from a water body (river, stream, lake or reservoir) for use elsewhere, and these include municipal and industrial supply, irrigation, and water used in thermal power plants for cooling. Water withdrawn from a water body is either consumed, usually lost by evaporation, or discharged back into the water body. Nonwithdrawal uses employ water as it exists in lakes, rivers and streams, and these include both traditional uses (such as shipping, hydro-electric power production, disposal of wastes and recreation), and "uses" associated with water's role in the environment at large, such as fish and wildlife production.

3.2 LINKS TO CLIMATE

Hydrology forms the primary link between water resources and climate (Figure 3.1). The atmospheric components of the hydrological cycle overlap with climate processes, these include evaporation, atmospheric transport of water vapor and precipitation. The link with water resources occurs through the terrestrial components of the hydrological cycle such as runoff, stream flow and groundwater, i.e. the components not directly involved in climate processes. Similarly, elements of water resources fall both inside and outside of society. Elements inside of society include institutions, political constituencies, and patterns of water use. Elements external to society include the facilities, such as reservoirs, canals, and dykes, that are used to manipulate the hydrologic cycle and tame flood waters.

Figure 1. Linkages Between Climate and Water Resources



The interface between hydrology and water resources can be defined in terms of water flow, water storage, and the state of water (Table 3.1). Flow, storage and state of water are determined by hydrologic processes that may be modified through the intervention of water resources systems. The results determine the quantity and quality of water available for use by society. The effects of climate change on hydrology propagate through the hydrology/water resources interface and affect the availability of water for use by society. Climate change can affect water use indirectly through other links between climate and society. For example temperature may affect the demand for water; however only the effects of climate on hydrology and water supply will be discussed below.

Table 3.1 Interface Between Hydrology and Water Resources

Flow	Storage	State
Stream flow	Lake/Reservoir Levels	Water Quality
Groundwater	Soil Moisture	Snow and Ice

3.3 FLOW VARIABILITY AND SYSTEM RELIABILITY

Management of water resources is sensitive to variation in hydrologic processes occurring on all time scales. Municipal, industrial, and agricultural water uses are most sensitive to variation in flows occurring on seasonal, interannual and decadal time scales. For this reason, it has been easy to ignore the effects of climate change in designing these facilities. Larger facilities, such as reservoirs or systems of reservoirs providing multi-year storage capacity in drought prone areas, are more sensitive to variation occurring over longer time scales. Because climate change includes both changes in the mean climate over periods of several decades, or longer, as well as changes in the nature of seasonal and interannual climate variations that may occur within this period, all aspects of water resources can be affected by climate change.

Water resources facilities designed to prevent the impacts of flood and drought are very sensitive to the extremes of variation in precipitation, stream flow and soil moisture. Designs for flood protection are usually based on estimated flood levels with a frequency of recurrence of 100 to 200 years. A great deal of uncertainty is inherent in these estimates given the relatively short records of stream flow that are available. Estimating the magnitude of flood and drought for use in the design and operation of water resources facilities is further complicated by the fact that the sources of variability in precipitation and stream flow are not known. The largest floods arise from large, short term departures from the normal range of variation in stream flow, known as the Noah effect. The severity of drought depends on the length of time experiencing precipitation or stream flow below a threshold, a characteristic of flow variability, also known as persistence. The occurrence of persistent periods of above average or below average flow is known as the Joseph effect. The Noah and Joseph effects are observable in records of a number of different geophysical parameters (Mandelbrot 1977).

3.4 REGIONAL DIFFERENCES

Canada can be divided into four regions in order to capture some of the geographic variation in climate, hydrology and the impacts of climate change; Western Canada (British Columbia, Alberta, Saskatchewan and Manitoba); Central Canada (Ontario and western Quebec); Atlantic Canada (eastern Quebec, New Brunswick, Nova Scotia, Prince Edward Island, Newfoundland and Labrador); and Northern Canada (Yukon and Northwest Territories, and the northernmost parts of British Columbia, Alberta, Saskatchewan, Manitoba, and Quebec). Each of these regions encompasses a large range of climate and hydrologic conditions. However, each region is unique in the challenges presented to managers of water resources and the difficulties in assessing the possible impacts of climate change.

Hydrology in Western Canada is characterized by two distinct hydrologic regimes; runoff from water rich, snow fed, mountainous catchments in the Rocky Mountains, and the Interior Mountains of British Columbia, supplies water to a few large rivers draining through arid regions, the Prairies of Alberta, Saskatchewan and Manitoba and the Interior Plateau of British Columbia. These rivers supply water for irrigation, municipal supply, hydro-electric generation, as well as supporting valuable fisheries.

Water resources issues in Central Canada are dominated by the Great Lakes and the St. Lawrence River. Together, the five Great Lakes are the primary source of water for large populations in Canada and the United States as well as providing a vital transportation link between world markets and industrial areas in both countries. Managing water quality and extreme fluctuations in lake levels and the flow of the St. Lawrence River are ongoing concerns. Groundwater is used extensively for municipal supply in southern Ontario, and issues of sustainable supply and groundwater quality are gaining attention.

Hydrology in Atlantic Canada is characterized by a large number of relatively small river basins, each draining directly to the sea. Water resources development tends to be small in scale, confined to small hydro-electric development and water supply reservoirs. Groundwater is an important source of water in the region, and it is the sole source of fresh water on Prince Edward Island.

The distinctive characteristics of hydrology in Northern Canada derive from the presence of permafrost and the low, annual supply of water from precipitation. Northern Canada is defined here as the area with extensive permafrost coverage, often taken as the area north of the -1 degree Celsius isotherm (Prowse 1990). This corresponds roughly to the area north of 55 degrees latitude, 60 degrees near the west coast.

4. IMPACTS OF GLOBAL WARMING

Canada's climate has changed in the past, and there is no reason to believe that the present climate will continue unchanged in the future (Hengeveld 1991). The question for managers of water resources is whether the impacts of climate change will be large enough and rapid enough to require measures undertaken specifically to counter its effects. Alternatively, gradual change may be accommodated as water resource systems are modified to accommodate changes in society, e.g. economic growth. It is not now possible to reliably predict all aspects of future climate change. However, it is possible to review some changes that are considered possible within the next 50 years and their impacts on hydrology and water resources. While a number of factors have been implicated as causes of climate change, here we consider the only the changes in climate anticipated as a result of global warming related to an enhancement of the "greenhouse effect".

4.1 PREDICTING CLIMATE CHANGE

How can we predict the climate 20, 50 or 100 years in the future when we can't reliably predict the weather for the day after tomorrow? The answer to this lies in the difference between "climate" and "weather". The phenomena that make up weather are the result of the short term, small scale fluxes of heat and water driven by turbulent transport in the atmosphere. This close association with atmospheric turbulence is responsible for the inherent unpredictability of weather systems. By contrast, "climate" carries the notion of averaging in time and/or space. Therefore, climate reflects less the turbulent variability of weather and more the constraints on atmospheric processes posed by the conservation of mass, momentum and energy. These constraints provide the basis for forecasting mean climate conditions (Somerville 1987).

Confidence in the predictability of mean climate does not extend to the prediction of how the variability of climate may change. Model simulations of climate have shown only limited success in replicating the observed variability in the present climate (Smith and Tirpac 1989). This is discouraging given the sensitivity of water resources to variability in the hydrologic cycle.

4.2 CLIMATE SCENARIOS

A "climate scenario" represents a possible, rather than probable, future climate. Possible climates for the purpose of investigating impacts on hydrology and water resources have been constructed from 1) observed conditions in the region of interest during warmer periods or periods of drought, 2) current climate conditions in another region experiencing a warmer climate, 3) ad hoc scenarios formulated to assess the sensitivity to climate change in a region, and 4) scenarios based on output from general circulation models of climate (GCMs). In recognition of the considerable uncertainty inherent in these techniques, the results are referred to as climate scenarios rather than predictions.

Most GCM scenarios are designed to simulate climate conditions in equilibrium with an atmosphere containing double the pre-industrial concentration of carbon dioxide, the "2xCO₂ scenario". These scenarios are generally considered to represent possible climates for the middle of the next century (Houghton et al. 1990). The Canadian Climate Centre (CCC) has developed one of the most advanced GCMs. Because the results of the CCC model have been available only since the end of 1989, most existing studies of the impacts of global warming on water resources that have used GCM scenarios are based the results of four other GCMs; the Geophysical Fluid Dynamics Laboratory model (GFDL), the Goddard Institute for Space Sciences model (GISS), the United Kingdom Meteorological Office model (UKMO), and the Oregon State University model (OSU).

4.3 IMPACTS OF GLOBAL WARMING ON HYDROLOGY

Projected effects of global warming on mean annual runoff in Canada are summarized in Table 4.1. Little is known about the effect that global warming will have on groundwater recharge. The effects of climate variability on groundwater are not well understood, but in general changes in regional groundwater recharge should follow changes in mean annual runoff.

In spite of their problems, the impact studies provide an indication of the type and direction of changes to expect. Global warming will tend to exacerbate existing water resources problems in the southern Prairies and the Great Lakes basin. The Prairies can expect increased drought during the summer growing season, which has implications for the future of irrigated agriculture there. The Great Lakes can expect a decline in water levels and river discharge to historic low levels, which has implications for shipping, recreational water use and hydro-electric power generation. In other regions the picture is less clear. In Atlantic Canada and in Western Canada west of the Rocky Mountains, the smaller scale of hydrological units limits our ability to infer regional effects from GCM scenarios. Assessment of hydrological impacts in Northern Canada is further complicated by lack of

understanding of hydrological processes, especially the response of permafrost to climate change.

Table 4.1 Projected Changes in Climate and Hydrology Based on 2xCO₂ Scenario

Region	Temp (°C)	Precip (%)	Runoff (%)	GCM	Study
	+2.0 to 3.0	+23	+20	UKMO/83	Ripley (1987) Pacific Drainage
	+2.5 to 3.0	+23	+235	UKMO/83	Ripley (1987); Gulf of Mexico drainage
Western Canada	+2.5 +4.4	+18 +19	-20 +28	GFDL/80 GISS/84	Haas and Marta (1988); S. Saskatchewan R.
	+2.8 +4.5	+48 +10	+83 - 5	GFDL/80 GISS/84	Zaltsburg (1990); Wilson Creek, Manitoba
	+2.2 +4.4 +3.0 +6.7 +4.6	+18 +19 + 8 + 7.5 +19	-58 +38 + 8 -15 +34	GFDL/80 GISS/84 OSU/88 GFDL/87 GISS/87	Cohen (1991); Saskatchewan R.
	+3.1 to 3.7 +4.3 to 4.8	+0.8 +6.5	- 8.2 -10.9	GFDL/80 GISS/84	Cohen (1986, 1987); Great Lakes
	+3.2 to 7.2	0-6	-11 to -25	GISS GFDL OSU	Hartmann (1990); Great Lakes
Central Canada	+4.7	+0.03	-16	GISS	Sanderson and Smith (1990); Grand River
	+3.5 +4.7	+17.5 +15	+10.9 +15.7	GFDL/80 GISS/84	Singh (1988); James Bay
Atlantic Canada	+4.0 +4.0 to 4.7	-2 to -3 +5.9 to +7.5	+20 +35		Saulesleja (1989); Maritimes NFLD/Labrador
	+4.5 to +5	+15 to +20	-5	CCC	Morin and Slivitsky (1992) Moisie River
Northern Canada	+2 to +3.5	+54	+95	UKMO/83	Ripley (1987)

table adapted and updated from original provided by T. Marta

There is considerable room for improving our understanding of the links between climate and regional hydrology. Further improvements in our capacity to predict climate change are also needed and should be pursued. However, more research in these areas will not change the message of relevance here: Significant climate change is plausible within a period of time that matters to managers of water resources. Until our ability to predict these changes improves, we must assume the worst. Klemes¹ has summarized the possible impacts on water resources as:

- less water available
- greater extremes and fluctuations in general
- less advantageous seasonal distribution of precipitation and/or runoff.

5. ADAPTING TO CLIMATE CHANGE

Managers of water resources are faced with the certainty that climate will change, and the distinct possibility that climate will change quickly in the near future. What can be done to better adapt the management of water resources to a changing climate? Where should measures be taken to reduce sensitivity of water resources systems to climate change? Will adaptation to climate change be difficult? In addressing the above questions, it is convenient to borrow a conceptual framework proposed by Kates (1985) for describing how societies cope with hazards of climate.

Kates organizes adaptive measures into three categories based on the type of action taken in response to a hazard to society; change use, reduce loss, and accept loss. Further, adaptive measures can be categorized as either incidental or purposeful. Incidental adaptation to climate variability occurs when an action motivated for another purpose, for example in response to changes in the demand for water, has the additional effect of reducing the effect of climate change on a water resources system. Purposeful adaptation refers to measures undertaken explicitly to address the effects of climate change.

5.1 INCIDENTAL ADAPTATION

Incidental adaptation already occurs as the result of good practice in water resources management. Even assuming that climatic and hydrologic processes are stationary, errors of observation and interpretation introduce considerable uncertainty into what can be known about these processes. Managers account for this uncertainty by 1) designing for robustness, resilience and adjustability as well as reliability in water resources systems, 2) monitoring climate and hydrology and adjusting systems to maintain desired performance, and 3) maintaining "excess capacity" as a buffer against the unexpected.

Robustness refers to the insensitivity of a system to errors and uncertainties in the information used in the design of the system. Resilience refers to both the ability of a system to operate under conditions different from those it was designed for (Matalas and Fiering 1977), and the ability of

¹ V. Klemes, Implications of possible climate change for water management and development. Canadian Water Resources Association Newsletter, April 1992.

a system to recover quickly from failure (Riebsame 1988). Adjustability refers to the ability of managers to change the system in response to evolving conditions at minimal cost.

Riebsame (1988) describes how the normal practice of modifying the operating rules for an existing reservoir as data on precipitation and stream flow accumulates from monitoring can also serve as adaptation to a changing climate. In general, this approach is limited in its ability to deal with rapid change, and there may be limits on the adjustability of a system. For example, changes in the operating rules can degrade the performance of a reservoir meant to serve multiple, possibly conflicting purposes, such as flood control and water supply.

Excess capacity refers to the ability of a system to perform beyond normal requirements, at least for short periods of time. Traditionally, excess capacity has been built in to systems by constructing facilities larger than needed as a buffer against increases in water use and uncertainties in estimated natural supply or hazard of flood and drought. One objective of the water conservation programs, in which there is a growing interest, is to maintain excess capacity in the face of growing demand without the expense of constructing larger facilities.

5.2 PURPOSEFUL ADAPTATION

Management options for accommodating climate change can be broadly organized into three categories; traditional management options (supply management), non-traditional management options (demand management), and non-management options. These roughly correspond to Kates' categories of societal response; reduce loss, change use, and accept loss. Some specific adaptations to the effects of climate change on flow, storage and state of water are summarized in Table 5.1.

Options that fall under the traditional approach to managing water resources (reduce loss) involve manipulating the hydrology of a basin through construction of reservoirs or modifications to natural channels in order to maintain the reliability of water supplies and provide protection from flood and drought. The primary effect of climate change is that it increases the uncertainty about future flows, storage and state of water. The unpredictability of climate change is a barrier to responding through traditional management, in part, because there is no way to quantify the benefit to society of undertaking the cost of constructing larger dams and levees required to maintain system reliability in face of growing uncertainty. As a result, many managers have the opinion that nothing should be done to respond to climate change until there is clear, compelling evidence that change has already begun, e.g. a catastrophic drought or flood.

Non-traditional options (change use) emphasize maintaining system reliability through increased flexibility by adjusting water use to match changes in hydrology. Rather than isolating society from the effects of climate variability, this approach seeks to minimize the impact of unexpected and catastrophic events (Holling 1978). Adaptive measures in this category include some innovative methods for demand management that are currently under development in Canada (Tate 1990). These measures offer the best

opportunities to improve adaptation to climate change because many can be implemented to address other problems that face water resources managers.

Table 5.1 Adaptation to Climate Change in Water Resources

	Change Use (Location, Use)	Reduce Loss (Prevent, Modify Effects)	Accept Loss (Share, Bear Loss)
Flood	<ul style="list-style-type: none"> • Restrict development on flood plains • Change operating rules to increase flood storage in reservoirs 	<ul style="list-style-type: none"> • Construct/upgrade flood storage reservoirs, dykes, river channelization • Review dam safety 	<ul style="list-style-type: none"> • Improved flood forecasting and flood warning • Formulate evacuation plans • Flood insurance, disaster relief • Plan for disaster relief and emergency preparedness
Drought	<ul style="list-style-type: none"> • Reduce water requirements • Abandon/expand agricultural lands 	<ul style="list-style-type: none"> • Increase water stored in reservoirs • Change farming practices to increase soil moisture • Expand irrigation 	<ul style="list-style-type: none"> • Contingency plans for allocating water during shortages • Share water supplies regionally
Ground-water	<ul style="list-style-type: none"> • Increase/reduce use as sustainable yield changes 	<ul style="list-style-type: none"> • Increase number/depth of wells to exploit recharge over larger area • Exploit new sources of water (e.g. surface water) 	<ul style="list-style-type: none"> • Institute management of groundwater withdrawals
Lake Levels	<ul style="list-style-type: none"> • Restrict lakeshore development • Increase/reduce recreation and shipping as levels change 	<ul style="list-style-type: none"> • Dredge harbors, raise seawalls and bulkheads • Construct water level control structures • Interbasin transfers to maintain levels 	<ul style="list-style-type: none"> • Flood insurance • Disaster relief
Soil Moisture	<ul style="list-style-type: none"> • Expand/abandon agricultural land • Expand forest by planting • Change crops • Change tillage systems • Manage wetland habitat to reduce loss/degradation by other causes 	<ul style="list-style-type: none"> • Expand irrigation • Construct artificial wetlands 	<ul style="list-style-type: none"> • Subsidize agriculture • Crop insurance, farm income supports

Table 5.1 Adaptation to Climate Change in Water Resources (continued)

	Change Use (Location, Use)	Reduce Loss (Prevent, Modify Effects)	Accept Loss (Share, Bear Loss)
Water Quality	<ul style="list-style-type: none"> •Expand/restrict use of affected water bodies •Redirect fishery to exploit species that benefit from change •Change land use practices to control erosion •Control point and non-point discharge of wastes 	<ul style="list-style-type: none"> •Increase/decrease level of water treatment •Stock lakes and rivers from hatcheries •Augment stream flow during low-flow events •Install aeration and/or other mixing devices 	<ul style="list-style-type: none"> •Subsidize fishery
Snow and Ice	<ul style="list-style-type: none"> •Increase/reduce recreational use and shipping •Expand/restrict hydro-generation as ice allows 	<ul style="list-style-type: none"> •Increase/decrease investment in ice breaking to maintain shipping channels •Modify water intake structures to prevent ice build-up 	<ul style="list-style-type: none"> •Subsidize expansion of alternative modes of bulk transport •Contingency plans for interruption of service

Adjustments in the third category fall well outside of the bounds of traditional water resources management. These measures implicitly accept the fact that climate change may mean more frequent failure of water resource systems. Failure is planned for rather than trying to avoid it at all cost. These measures attempt to minimize the effects of failure on society and/or share the consequences of failure broadly within society.

5.3 VULNERABLE COMPONENTS

Adjustments to adapt to climate change should be undertaken first where the vulnerability to climate change is the greatest. The question of where to act has two aspects. The first concerns identifying those activities associated with managing water resources are most sensitive to change or at the greatest risk of failing as a result of change. The second concerns the geographic location where patterns of water use and climate coincide to maximize sensitivity to changes in climate. The work that has been done in each of these areas serves only to illustrate possible approaches to identifying areas sensitive to climate. As yet, there is no clear answer to the question of when to act.

Identifying areas of vulnerability within multi-component, and multi-sectorial water resources systems that serve most Canadians presents managers with a complex task. While studies by Klemes (1985), Rogers and Fiering (1990) and Riebsame (1988) provide a guide on how to assess the climate sensitivities of one element of water resources systems, they fall short of the goal of identifying the most sensitive component in the regional system. Break point analysis offers an approach that may be used to assess an

entire, interconnected system. Under this approach, one identifies the limits in terms of climate and hydrologic parameters beyond which components or subsystems would fail to perform. These break points can then be compared both within the system to identify vulnerable components and against anticipated range of climate conditions to assess the risk of failure of the system (WMO 1987).

5.4 VULNERABLE REGIONS

Identifying geographic regions vulnerable to climate change is based on the principle that regions that are currently operating close to the limits imposed by climate on the availability of water are the most susceptible to changes in climate. Gleick (1990) suggests five indices for use to quantitatively assess the vulnerability of water resource systems to climate change. These are 1) the ratio of storage in a basin to annual supply; 2) the ratio of consumptive use to supply; 3) the ratio of hydro-electric generation to total power generation; 4) the ratio of groundwater overdraft to total groundwater withdrawal; and 5) the ratio of annual stream flow with a 5% exceedance to the stream flow with a 95% exceedance. Information is available for a preliminary assessment of the vulnerability of Canadian water resources based some of these indices.

5.4.1 RATIO OF CONSUMPTIVE USE TO SUPPLY

Regions where annual consumption of water is large relative to the reliable annual supply are especially vulnerable to interruptions to supply caused by fluctuations in annual runoff. A region is vulnerable if the ratio of consumption to runoff is greater than 0.2, allowing for water needed to satisfy in-stream uses. By this measure, the Assiniboine-Red, Missouri, and South Saskatchewan basins are vulnerable to water shortages.

5.4.2 RATIO OF HYDRO-ELECTRIC TO TOTAL POWER GENERATION

Regions that depend on hydro-electric generation for a significant portion of their total electric power requirements are susceptible to disruptions caused by variability in stream flow. Gleick used a threshold of 0.25 for this ratio in his assessment of climate vulnerability in the U.S. By this criteria, all of Canada is vulnerable; 65% of the total electric supply comes from hydro-electric generation, however, vulnerability varies within Canada. Some provinces have no hydro-electric generation, such as Prince Edward Island and Nova Scotia, while other provinces depend on hydro-electricity almost entirely. The most vulnerable provinces include Quebec, Manitoba, British Columbia, and Ontario, which is vulnerable indirectly because of purchases made from other provinces. Hydro-electricity is an area where vulnerability to climate change may mean opportunity. Increased basin supply is projected for northern Quebec, meaning that more water will be available for generating electricity provided that reservoir capacity is sufficient to capture it. Increases in consumptive use of water may decrease water available for hydro-electric generation in Ontario and Manitoba; however a decline in the demand for electricity with warmer temperatures may compensate to some extent (Sanderson 1987).

5.4.3 RATIO OF GROUNDWATER OVERDRAFT TO TOTAL WITHDRAWAL

The ratio of groundwater overdraft to total groundwater withdrawals measures the degree to which groundwater currently is being over exploited as a source of water and therefore is unavailable as an alternative supply. Information on groundwater use and availability in Canada is scarce, so it is difficult to say to what extent over exploitation is occurring. Groundwater is widely used as the primary source of domestic water in rural areas, but that alone probably would not tax groundwater supplies. However, a number of large communities rely solely on groundwater for their municipal supplies (Hess 1986). These communities may be vulnerable to changes in recharge rates brought on by climate change.

5.4.4 RATIO OF 5% EXCEEDANCE FLOW TO 95% EXCEEDANCE FLOW

The ratio of high flow to low flow is a measure of the variability in the hydrologic system. Areas that experience high variability are most susceptible to flood and drought, and these areas are vulnerable to changes in the frequency of extreme events as a consequence of climate change. Gleick (1990) suggests that areas where this ratio exceeds 3 be classed as vulnerable. In Canada, the Okanagan, Missouri, Assiniboine-Red, and Churchill rivers fall into this category. Variability is also high enough in the Winnipeg and South Saskatchewan rivers to be a concern.

The indices discussed above measure vulnerability principally with respect to shortfalls of supply and risks of flood and drought. Quantitative measures of vulnerability associated with other impacts of climate change have not been identified. Vulnerability related to non-withdrawal uses of water is particularly difficult to assess. Issues of concern include the effect of higher water temperatures on thermal power generation, fish, and microbial processes and thus on assimilative capacity and water quality. Presently, low water temperatures in Arctic rivers reduce their capacity to assimilate municipal wastes relative to that in rivers in the south. Fluctuations in the levels of the Great Lakes will affect shipping, water intake and outfall structures, shoreline development, and extreme low water introduces the risk that contaminants in the sediments may be reintroduced into the water column.

5.3 DIFFICULTY OF ADAPTATION

Some adaptation to climate will be easy and relatively painless to accomplish. Managers of water resources must constantly adapt to changes in society, and this continual change can be used to improve adaptation to climate as well. For example, a recent report by the Adaptation Panel of the U.S. National Academy of Science (National Academy of Science, 1991) notes that if the national economy grows at 2 to 3 percent per year, the long term average for industrialized societies, then half of all capital stock will always be less than 30 years old. This rate of turnover of infrastructure is fast relative to the 50 to 100 year time period that it will take to realize the changes projected for the 2xCO₂ climate scenarios. Adaptation to reduced water supplies can be accomplished by fitting all new construction with water efficient appliances. Other programs designed to reduce costs to users, such as water audits that identify areas where cost saving changes in water use can be made, also reduce our vulnerability to climate change by maintaining a

buffer between the demand for water and the amount of water that climate can deliver.

Long lived components of water resources systems present challenges to better adaptation to climate. Pipelines and treatment plants are designed for a working life of 40 years and typically serve longer before being replaced. Dams and levees designed to reduce the risk of flooding are affected by the changes in variability that may occur with climate change. The future performance of these long lived elements is most vulnerable to changing conditions. Designs that anticipate change may be warranted for new facilities of this type. The questions of when and how to modify existing systems to reduce their vulnerability to climate change present new problems to hydrologists and engineers.

Finally, water resource systems operate at the interface between human society and natural systems (i.e. climate, hydrology and ecology) and our dependence on these unmanaged systems is largely unknown. The response of these systems to climate change may be drastic and unpredictable (e.g. loss of the boreal forest, changes in lake dynamics). Projections of global warming coincide with the period of general adjustment as society tries to move toward sustainable use of natural resources. In this situation one cannot be confident that adaptation to climate change will always be easy.

6. MANAGING CHANGE

Better adaptation to climate variability and change in water resources requires strategies that anticipate variability and uncertainty and accommodate them. Rather than trying to isolate society from the effects of change and variability, a better objective may be to prevent surprise and catastrophe. Adaptation measures under the categories of "change use" and "share loss" (Table 5.1) are examples of how this approach can be adopted.

Adaptation requires the ongoing observation and interpretation of climate, hydrology and related environmental processes. This is an extension of the monitoring that is currently conducted as part of managing water resources systems. Emphasis should be given to finding ways to monitor for the onset of climate change and to modifying techniques of hydrologic analysis so as not to give too much weight to the past in anticipating future climate. Water resources managers should assess the vulnerability of existing and planned systems to climate change and develop criteria for deciding how and when to modify each system to reduce its vulnerability. Finally, we should continue to improve our understanding of the fundamental processes controlling climate and hydrology.

Adaptation can be defined as bringing ourselves into harmony with changed circumstances. The traditional view of climate as variable but unchanging is giving way to the realization that climate is changeable and is changing. The traditional view of water as an unlimited, essentially free resource is increasingly questioned as society confronts the need for sustainable development that recognizes on constraints on the resource. These changes define the fundamental challenges for adaptation in water resources.

7. ACKNOWLEDGEMENTS

This study was supported in part by a contract from the Climate Adaptation Branch of the Atmospheric Environment Service, Department of the Environment. The final report was improved significantly as the result of comments on a preliminary draft by R. Bocking, S. Kerr, M. Sanderson, M. Slivitsky, P. Sly and D. Thompson (Fellows of the Rawson Academy); I. Burton and A. Saulesleja (Atmospheric Environment Service); and external reviewers A. Banga and A. Kassem.

8. REFERENCES

1. Cohen, S.J. 1986. Impacts of CO₂-induced climatic change on water resources in the Great Lakes basin. *Climatic Change* 8:135-153.
2. Cohen, S.J. 1991. Possible impacts of climatic warming scenarios on water resources in the Saskatchewan River sub-basin Canada. *Climatic Change* 19:291-317.
3. Gleick, P.H. 1990. Vulnerability of water resource systems. pp 223-240 in P.E. Waggoner (ed) *Climate Change and U.S. Water Resources*. John Wiley and Sons, New York.
4. Haas, J. and T.J. Marta, 1988. Assessing the effect of climate change on the operation of a water supply reservoir. Inland Waters Directorate, Environment Canada (unpublished manuscript).
5. Hartmann, H.C. 1990. Climate Change Impacts on Great Lakes Levels and Flows: Energy and Transportation Implications. pp 239-246. In: G. Wall and M. Sanderson (ed) *Climate Change : Implications for Water and Ecological Resources*. Department of Geography Publication Series, Occasional Paper No. 11, University of Waterloo, Waterloo, Ontario.
6. Hengeveld, H. 1991. Understanding Atmospheric Change. SOE Report 91-2, Environment Canada, Ottawa, Ontario.
7. Hess, P.J. 1986. Ground Water Use in Canada, 1981. NHRI Paper No. 28, IWD Technical Bulletin No. 140, Inland Waters Directorate, Ottawa, Ontario.
8. Holling, C.S. 1978. *Adaptive Environmental Assessment and Management*. John Wiley and Sons, Chichester.
9. Houghton, J.T., G.J. Jenkins and J.J. Ephraums. 1990. *Climate Change: The IPCC Scientific Assessment*. Cambridge University Press. Cambridge.
10. Kates, R.W. 1985. The Interaction of Climate and Society. pp 3-36 in R.W. Kates, J.H. Ausubel, and M. Berberian (eds) *Climate Impact Assessment*. John Wiley and Sons, Chichester.
11. Klemes, V. 1985. *Sensitivity of Water Resource Systems to Climate Variations*. World Meteorological Organization, WCP-98.

12. Mandelbrot, B.B. 1977. *Fractal Geometry of Nature.* W.H. Freeman and Co., New York.
13. Matalas, N.C. and M.B. Fiering 1977. Water resource systems planning. pp 999-110 in: *Climate Climatic Change and Water Supply.* National Academy of Science, Washington, DC.
14. Morin, G.M. and M. Slivitsky, 1992. Impacts de changements climatiques sur le régime hydrologique: Le cas de la rivière Moisie. *Revue des Sciences de l'Eau* 5:179-195.
15. National Academy of Science, 1991. *Policy Implications of Greenhouse Warming: Report of the Adaptation Panel.* National Academy Press, Washington, D.C. (prepublication manuscript).
16. Prowse, T.D. 1990. Northern Hydrology: An Overview. pp 1-36 in T.D. Prowse and C.S.L. Ommenney (eds) *Northern Hydrology: Canadian Perspectives.* NHRI Science Report No. 1, National Hydrology Research Institute, Saskatoon, Saskatchewan.
17. Riebsame, W.E. 1988. Adjusting water resources management to climate change. *Climatic Change* 13:69-97.
18. Ripley, E.A. 1987. Climatic Change and the Hydrological Regime. pp 137-178 in M.C. Healey and R.R. Wallace (ed) *Canadian Aquatic Resources.* Department of Fisheries and Oceans, Ottawa.
19. Rogers, P.P. and M.B. Fiering, 1990. From flow to storage. pp 207-222 in P.E. Waggoner (ed) *Climate Change and U.S. Water Resources.* John Wiley and Sons, New York.
20. Sanderson, M. 1987. Implications of Climatic Change for Navigation and Power Generation in the Great Lakes. *Climate Change Digest* 87-03, Atmospheric Environment Service, Environment Canada.
21. Sanderson M. and J. Smith. 1990. Climate Change and Water in the Grand River Basin, Ontario. pp 243-261. In: Proceedings of 43rd Conference of the Canadian Water Resources Association, Penticton, B.C.
22. Saulesleja, A. 1989. Possible Impacts of Climate Change in Eastern Canada. pp 21-22. In: R.G. Lawford and T.J. Marta (ed), *Proceedings of a Workshop on Climate Change and Water Resources.* Technical Workshop Series No. 9, National Hydrology Research Centre, Saskatoon, Saskatchewan.
23. Singh, B. 1988. The Implications of Climatic Change for Natural Resources in Quebec. *Climate Change Digest* 88-08, Atmospheric Environment Service.
24. Smith, J.P. and D. Tirpac, 1989. The Potential Effects of Global Climate Change on the United States. Hemisphere Publishing Corporation, New York.

25. Somerville, R.C.J. 1987. The predictability of weather and climate. *Climatic Change* 11:239-246.
26. Tate, D.M. 1990. Water Demand Management in Canada: A State-of-the-Art Review. Social Science Series No. 23, Inland Waters Directorate, Environment Canada, 52 pp.
27. WCED 1987. *Our Common Future*. Oxford University Press, London.
28. WMO 1987. *Water Resources and Climate Change: Sensitivity of Water - Resource Systems to Climate Change and Variability*. World Meteorological Office WCAP-4, WMO/TD-No. 247.
29. Zaltsberg, E. 1990. Potential changes in mean annual runoff from a small watershed in Manitoba due to possible climate changes. *Canadian Water Resources Journal* 15:333-344.

25. Singh, B. 1988. *Impact du changement climatique sur les ressources naturelles du Québec.* Sommaire du changement climatique 88-08, Service de l'environnement atmosphérique.
26. Smith, J.P. et D. Tirpac, 1989. *The Potential Effects of Global Climate Change on the United States.* Hemisphere Publishing Corporation, New York.
27. Somerville, R.C.J. 1987. *The predictability of weather and climate.* Climatic Change 11 : 239-246.
28. Tate, D.M. 1990. *Gestion de la demande d'eau au Canada : examen des mesures actuelles.* Série des sciences sociales n° 23, Direction générale des eaux intérieures, Environnement Canada, 52 p.
29. Zaltsberg, E. 1990. *Potential changes in mean annual runoff from a small watershed in Manitoba due to possible climate changes.* Canadian Water Resources Journal 15 : 333-344.

11. Kates, R.W. 1985. *The Interaction of Climate and Society*. p. 3-36 in R.W. Kates, J.H. Ausubel et M. Berberian (éd.) *Climate Impact Assessment*. John Wiley and Sons. Chichester.
12. Klemes, V. 1985. *Sensitivity of Water Resource Systems to Climate Variations*. Organisation météorologique mondiale, WCP-98.
13. Mandelbrot, B.B. 1977. *Fractal Geometry of Nature*. W.H. Freeman and Co., New York.
14. Matalas, N.C. et M.B. Fiering. 1977. *Water resource systems planning*. p. 99-110 in : *Climate Climatic Change and Water Supply*. National Academy of Science, Washington, DC.
15. Morin, G.M. et M. Slivitsky, 1992. *Impacts de changements climatiques sur le régime hydrologique : le cas de la rivière Moisie*. Revue des Sciences de l'eau 5 : 179-195.
16. National Academy of Science, 1991. *Policy Implications of Greenhouse Warming : Report of the Adaptation Panel*. National Academy Press, Washington, D.C. (manuscrit de prépublication).
17. OMM 1987. *Water Resources and Climate Change : Sensitivity of Water - Resource Systems to Climate Change and Variability*. Bureau météorologique mondial WCAP-4, WMO/TD-No. 247.
18. Prowse, T.D. 1990. *Northern Hydrology : An Overview*. p. 1-36 in T.D. Prowse et C.S.L. Ommannay (éd.) *Northern Hydrology : Canadian Perspectives*. Rapport scientifique n° 1, Institut national de recherches hydrologiques, Saskatoon (Saskatchewan).
19. Riebsame, W.E. 1988. *Adjusting water resource management to climate change*. *Climatic Change* 13 : 69-97.
20. Ripley, E.A. 1987. *Climatic Change and the Hydrological Regime*. p. 137-178 in M.C. Healey et R.R. Wallace (éd.) *Canadian Aquatic Resources*. Pêches et Océans, Ottawa.
21. Rogers, P.P. et M.B. Fiering, 1990. *From flow to storage*. p. 207-222 in P.E. Waggoner (éd.) *Climate Change and U.S. Water Resources*. John Wiley and Sons, New York.
22. Sanderson, M. 1987. *Répercussion d'un changement de climat sur la navigation et la production d'électricité dans les Grands Lacs*. Sommaire du changement climatique n° 87-03, Service de l'environnement atmosphérique, Environnement Canada
23. Sanderson M. et J. Smith. 1990. *Climate Change and Water in the Grand River Basin, Ontario*. p. 243-261. In : Compte rendu de la 43^e conférence annuelle de l'Association canadienne des ressources hydriques, Penticton (C.-B.)
24. Saulesleja, A. 1989. *Possible Impacts of Climate Change in Eastern Canada*. p. 21-22. In : R.G. Lawford et T.J. Marta (éd.), *Proceedings of a Workshop on Climate Change and Water Resources*. Série des ateliers techniques n° 9. Centre national de recherches hydrologiques, Saskatoon (Saskatchewan).

nous avons toujours eue que l'eau est une ressource tout à fait libre et illimitée est de plus en plus mise en doute en cette époque où la société doit faire face aux besoins d'un développement durable qui reconnaît les contraintes imposées à cette ressource. Ces changements définissent les défis fondamentaux de l'adaptation en ce qui a trait aux ressources en eau.

7. REMERCIEMENTS

Cette étude a bénéficié en partie d'un contrat accordé par la Direction de l'adaptation climatique, Service de l'environnement atmosphérique, Environnement Canada. Le rapport final a été amélioré sensiblement grâce aux commentaires sur la version préliminaire formulés par R. Bocking, S. Kerr, M. Sanderson, M. Slivitsky, P. Sly et D. Thompson (membres de la Rawson Academy); I. Burton et A. Saulesleja (Service de l'environnement atmosphérique); et par les réviseurs externes A. Banga et A. Kassem.

8. RÉFÉRENCES

1. CMED (Commission mondiale de l'environnement du développement, 1987. *Notre avenir à tous*. Éditions du Fleuve, Montréal.
2. Cohen, S.J. 1986. *Impacts of CO₂-induced climatic change on water resources in the Great Lakes basin*. Climatic Change 8 : 135-153.
3. Cohen, S.J. 1991. *Possible impacts of climatic warming scenarios on water resources in the Saskatchewan River sub-basin Canada*. Climatic Change 19 : 291-317.
4. Gleick, P.H. 1990. *Vulnerability of water resource systems*. p 223-240 in P.E. Waggoner (éd.) *Climate Change and U.S. Water Resources*. John Wiley and Sons, New York.
5. Haas, J. et T.J. Marta. 1988. *Assessing the effect of climate change on the operation of a water supply reservoir*. Direction générale des eaux intérieures. Environnement Canada. (manuscrit inédit).
6. Hartmann, H.C. 1990. *Climate Change Impacts on Great Lakes Levels and Flows : Energy and Transportation Implications*. p. 239-246. In : G. Wall et M. Sanderson (éd.) *Climate Change : Implications for Water and Ecological Resources*. Department of Geography Publication Series, Occasional Paper No. 11, University of Waterloo, Waterloo (Ontario).
7. Hengeveld, H. 1991. *Comprendre l'atmosphère en évolution*. Rapport EDE 91-2, Environnement Canada, Ottawa (Ontario).
8. Hess, P.J. 1986. *Utilisation des eaux souterraines au Canada, 1981*. Rapport INRH n° 28, Collection des rapports techniques n° 140, Direction générale des eaux intérieures, Ottawa (Ontario).
9. Holling, C.S. 1978. *Adaptive Environmental Assessment and Management*. John Wiley and Sons, Chichester.
10. Houghton, J.T., G.J. Jenkins et J.J. Ephraums. 1990. *Climate Change : The IPCC Scientific Assessment*. Cambridge University Press. Cambridge. Disponible en français, OMM Genève, sous le titre : Aspects scientifiques du changement climatique.

programmes de réduction des coûts pour les utilisateurs, comme les vérifications des ressources en eau qui identifient les domaines où on peut apporter des changements rentables à l'utilisation de l'eau, réduisent également notre vulnérabilité au changement climatique en maintenant une zone tampon entre la demande en eau et la quantité d'eau rendue disponible par le climat.

Les composants longue durée des systèmes de ressources en eau présentent des défis en ce qui a trait à une meilleure adaptation au climat. Les pipelines et les usines de traitement sont conçus pour une durée de 40 ans et sont généralement exploités plus longtemps avant d'être remplacés. Les modifications de la variabilité entraînées par le changement climatique ont une incidence sur les barrages et levées conçus pour réduire les risques d'inondation. Le rendement futur de ces composants longue durée est très vulnérable à l'évolution des conditions. Les conceptions qui intègrent le changement s'imposeront peut-être pour les nouvelles installations de ce type. Les questions de savoir quand et comment modifier les systèmes existants afin de réduire leur vulnérabilité au changement climatique présentent de nouveaux problèmes aux hydrologues et ingénieurs.

Enfin, les systèmes de ressources en eau sont situés à l'interface de la société humaine et des systèmes naturels (c.-à-d. le climat, l'hydrologie et l'écologie), et nous connaissons très peu notre dépendance vis-à-vis de ces systèmes non aménagés dont la réaction au changement climatique peut être brutale et imprévisible (c.-à-d. perte de forêts boréales, changements dans la dynamique des lacs). Les projections du réchauffement du globe coïncident avec la période d'ajustement général, la société se dirigeant vers une utilisation durable des ressources naturelles. Dans une telle situation, on ne peut pas être certain que l'adaptation au changement climatique sera toujours facile.

6. GÉRER LE CHANGEMENT

Une meilleure adaptation à la variabilité et au changement climatiques des ressources en eau exige des stratégies qui anticipent la variabilité et l'incertitude, et s'y adaptent. Plutôt que d'essayer d'isoler la société des effets du changement et de la variabilité, un meilleur objectif consisterait probablement à éviter les surprises et les catastrophes. Les mesures d'adaptation des catégories «utilisation du changement» et «partage des pertes» (tableau 3) en sont des exemples.

L'adaptation exige l'observation et l'interprétation constantes du climat, de l'hydrologie et des processus environnementaux connexes. Il s'agit d'un prolongement de la surveillance qui se fait actuellement dans le cadre de la gestion des systèmes de ressources en eau. L'accent doit être mis sur la recherche de moyens permettant de détecter le changement climatique dès le début et sur la modification des techniques d'analyse hydrologique afin de ne pas accorder trop d'importance au passé dans les prévisions du climat à venir.

Les gestionnaires des ressources en eau doivent évaluer la vulnérabilité au changement climatique des réseaux existants et prévus et élaborer des critères afin de décider quand et comment modifier chaque réseau pour réduire sa vulnérabilité. Enfin, nous devons continuer d'améliorer nos connaissances des processus fondamentaux qui régissent le climat et l'hydrologie.

On peut définir l'adaptation comme l'effort que nous faisons pour nous mettre en harmonie avec des conditions changeantes. L'opinion qu'on a toujours eue que le climat varie mais ne change pas a évolué et nous nous rendons compte maintenant que le climat peut changer et qu'il le fait. L'opinion que

en Ontario et au Manitoba; cependant, une diminution de la demande d'électricité liée à des températures plus clémentes pourrait compenser cette hausse jusqu'à un certain point (Sanderson, 1987).

5.4.3 RAPPORT SUREXPLOITATION DES EAUX SOUTERRAINES/PRÉLÈVEMENT TOTAL

Le rapport entre la surexploitation des eaux souterraines et le prélèvement total de ces eaux indique à quel point elles sont actuellement surexploitées comme source d'alimentation en eau. Il existe peu d'information sur l'utilisation et la disponibilité des eaux souterraines au Canada; il est donc difficile de connaître le degré de surexploitation. Les eaux souterraines sont beaucoup utilisées comme principale source d'eau domestique dans les régions rurales, mais, à eux seuls, ces prélèvements n'en menacent probablement pas les approvisionnements. Cependant, plusieurs grandes collectivités y puisent toute leur eau (Hess, 1986); elles peuvent donc être vulnérables au changement des taux de réalimentation causé par le changement climatique.

5.4.4 RAPPORT DÉBIT EXCÉDENTAIRE DE 5% / DÉBIT EXCÉDENTAIRE DE 95%

Le rapport entre débits élevé et est une mesure de la variabilité du réseau hydrologique. Les régions à forte variabilité sont les plus susceptibles d'inondations et de sécheresses; elles sont vulnérables aux changement de la fréquence des événements extrêmes dû à un changement climatique. Gleick (1990) propose que les régions où ce rapport dépasse 3 soient considérées comme vulnérables. Au Canada, les rivières Okanagan, Missouri, Assiniboine-Rouge et Churchill entrent dans cette catégorie, et la variabilité des rivières Winnipeg et Sud Saskatchewan est suffisamment élevée pour inquiéter.

Les indices ci-dessus mesurent la variabilité principalement en ce qui a trait aux pénuries d'alimentation et aux risques d'inondation et de sécheresse. On n'a pas encore établi de mesures quantitatives de la vulnérabilité associée aux autres impacts du changement climatique. La vulnérabilité liée aux utilisations sans prélèvement est particulièrement difficile à évaluer. Les questions d'importance comprennent l'effet de températures plus élevées de l'eau sur la production d'énergie thermique, les poissons et les processus microbiens et, donc, sur la capacité d'assimilation et la qualité de l'eau. À l'heure actuelle, les basses températures de l'eau dans les rivières de l'Arctique réduisent leur capacité à assimiler les déchets urbains par rapport à celle des rivières du sud du pays. Les fluctuations du niveau des Grands Lacs auront un impact sur la navigation, les structures de prise d'eau et les exutoires, et l'aménagement du littoral. Un niveau extrêmement bas s'accompagne d'un risque que les contaminants contenus dans les sédiments soient relargués dans l'eau.

5.5 DIFFICULTÉ D'ADAPTATION

Une certaine partie de l'adaptation au climat se fera relativement sans mal. Les gestionnaires des ressources en eau doivent en effet constamment s'adapter aux changements survenus dans la société; on peut donc faire de même pour améliorer l'adaptation au climat. Par exemple, un rapport récent de l'Adaptation Panel de la National Academy of Science des États-Unis (National Academy of Science, 1991) remarque que, si l'économie nationale croît de 2 à 3 % par année, soit la moyenne à long terme des pays industrialisés, la moitié de tous les stocks de capital auront toujours moins de 30 ans. Ce taux de roulement des infrastructures est élevé par rapport à la période de 50 à 100 ans des scénarios climatiques de doublement du CO₂ prévus. On peut s'adapter à des approvisionnements en eau réduits en équipant toutes les nouvelles constructions d'appareils à faible consommation d'eau. D'autres

elles n'ont toutefois pas atteint l'objectif qui consistait à identifier le point le plus fragile du réseau régional. L'analyse des conditions limites offre une approche qui peut être utilisée pour évaluer l'ensemble du réseau interrelié. On peut en effet ainsi déterminer les limites, en termes de paramètres climatiques et hydrologiques, au-delà desquelles les éléments ou sous-systèmes cessent de fonctionner. On peut ensuite comparer ces conditions limites à l'intérieur du système, pour identifier les composants vulnérables, et à diverses conditions climatiques prévues, pour évaluer le risque de défaillance du réseau (OMM, 1987).

5.4 RÉGIONS VULNÉRABLES

La détermination des régions géographiques vulnérables au changement climatique est basée sur le principe que les régions actuellement proches des limites de disponibilité de l'eau imposées par le climat sont les plus vulnérables au changement climatique. Gleick (1990) propose cinq indices pour évaluer quantitativement la vulnérabilité des systèmes de ressources en eau au changement climatique : 1) le rapport entre le stockage d'un bassin et l'alimentation annuelle; 2) le rapport entre l'utilisation de consommation et l'alimentation; 3) le rapport entre la production d'hydroélectricité et la production énergétique totale; 4) le rapport entre la surexploitation des eaux souterraines et le prélèvement total des eaux souterraines; et 5) le rapport entre le débit annuel d'un cours d'eau avec un excédent de 5 % et le débit de ce cours d'eau avec un excédent de 95 %. On dispose actuellement d'information pour effectuer une évaluation préliminaire de la vulnérabilité des ressources en eau du Canada basée sur certains de ces indices.

5.4.1 RAPPORT UTILISATION DE CONSOMMATION/ALIMENTATION

Les régions où la consommation annuelle d'eau est importante par rapport à l'alimentation annuelle fiable sont principalement vulnérables aux interruptions d'approvisionnement causées par des fluctuations du ruissellement annuel. Une région est considérée comme vulnérable lorsque le rapport entre la consommation et le ruissellement est supérieur à 0,2. D'après ce critère, les bassins des rivières Assiniboine-Rouge, Missouri et Sud Saskatchewan sont vulnérables aux pénuries d'eau.

5.4.2 RAPPORT HYDROÉLECTRICITÉ/PRODUCTION TOTALE D'ÉNERGIE

Les régions qui dépendent de la production hydroélectrique pour un pourcentage important de leurs besoins totaux en électricité sont vulnérables aux perturbations causées par la variabilité du débit des cours d'eau. Gleick a utilisé un seuil de 0,25 pour ce rapport dans son évaluation de la vulnérabilité des États-Unis au climat. D'après ce critère, tout le Canada est vulnérable, 65 % de toute notre électricité étant produite dans des centrales hydroélectriques; cependant, la vulnérabilité varie d'un endroit à l'autre au Canada. Certaines provinces comme l'Île-du-Prince-Édouard et la Nouvelle-Écosse n'ont aucune centrale hydroélectrique alors que d'autres en dépendent presque entièrement. Les provinces les plus vulnérables sont le Québec, le Manitoba et la Colombie-Britannique. L'Ontario l'est indirectement, étant donné qu'elle achète de l'électricité des autres provinces.

L'hydroélectricité est un domaine où la vulnérabilité des uns au changement climatique peut offrir des occasions aux autres. On prévoit une alimentation accrue du bassin hydrographique dans le nord du Québec, ce qui signifie qu'il y aura une plus grande quantité d'eau pour produire de l'électricité, à condition que la capacité des réservoirs soit suffisante pour la capter. L'augmentation de l'utilisation de consommation de l'eau peut faire baisser la quantité d'eau disponible pour la production hydroélectrique

Tableau 3. Adaptation au changement climatique dans les ressources en eau (suite)

	Changer l'utilisation (Endroit, utilisation)	Réduire la perte (Prévenir, modifier les effets)	Accepter la perte (Partager, supporter la perte)
Humidité du sol	<ul style="list-style-type: none"> • Étendre/abandonner les terres agricoles • Augmenter la superficie des forêts en plantant • Changer de récoltes • Changer de système de travail du sol • Gérer l'habitat des terres humides afin de réduire les pertes et la détérioration par les autres causes 	<ul style="list-style-type: none"> • Augmenter l'irrigation • Construire des terres humides artificielles 	<ul style="list-style-type: none"> • Subventionner l'agriculture • Assurance-récolte, programmes de soutien du revenu agricole
Qualité de l'eau	<ul style="list-style-type: none"> • Augmenter/réduire l'utilisation des plans d'eau touchés • Rediriger les pêcheries afin d'exploiter les espèces qui bénéficient du changement climatique • Modifier les pratiques d'utilisation des sols pour lutter contre l'érosion • Contrôler les émissions ponctuelles et diffuses de déchets 	<ul style="list-style-type: none"> • Augmenter/diminuer le niveau de traitement des eaux • Ensemencer les lacs et les rivières par des stocks provenant d'écloseries • Augmenter le débit des cours d'eau en période de basses eaux • Installer des dispositifs d'aération ou autres dispositifs de brassage des eaux 	<ul style="list-style-type: none"> • Subventionner les pêcheries
Neige et glace	<ul style="list-style-type: none"> • Augmenter/réduire les utilisations récréatives et la navigation • Augmenter/restreindre la production d'hydroélectricité en fonction des glaces 	<ul style="list-style-type: none"> • Augmenter/diminuer les investissements en matière de brise-glace pour maintenir les voies de navigation ouvertes • Modifier les structures de prise d'eau pour empêcher l'accumulation des glaces 	<ul style="list-style-type: none"> • Subventionner l'expansion des autres modes de transport en vrac • Mesures d'urgence pour l'interruption du service

5.3 ÉLÉMENTS VULNÉRABLES

Les ajustements nécessaires pour l'adaptation au changement climatique doivent d'abord se faire là où la vulnérabilité au changement climatique est la plus grande. Cette question comporte deux aspects. Le premier concerne l'identification des activités associées à la gestion des ressources en eau qui sont les plus sensibles au changement ou les plus sujettes à être interrompues par le changement. Le deuxième concerne les endroits où la coïncidence de l'utilisation de l'eau et des régimes climatiques maximise la sensibilité au changement du climat. Le travail accompli jusqu'à présent dans chacun de ces domaines ne sert qu'à illustrer les approches possibles à la détermination des régions sensibles au climat. Nous n'avons encore aucune réponse nette à cette question.

L'identification des zones vulnérables à l'intérieur de systèmes multisectoriels à éléments multiples de ressources en eau, qui desservent la plupart des Canadiens constitue une tâche complexe pour les gestionnaires. Bien que les études faites par Klemes (1985), Rogers et Fiering (1990) et Riebsame (1988) constituent en quelque sorte un guide pour l'évaluation de la sensibilité d'un élément précis des systèmes de ressources en eau au climat,

Tableau 3. Adaptation au changement climatique dans les ressources en eau

	Changer l'utilisation (Endroit, utilisation)	Réduire la perte (Prévenir, modifier les effets)	Accepter la perte (Partager, supporter la perte)
Inondation	<ul style="list-style-type: none"> • Restreindre l'aménagement des plaines d'inondation • Modifier les règles d'exploitation afin d'augmenter la capacité de stockage des réservoirs 	<ul style="list-style-type: none"> • Construire/améliorer les réservoirs de stockage des eaux d'inondation, les digues, les chenaux de rivière • Vérifier la sécurité des barrages 	<ul style="list-style-type: none"> • Améliorer les systèmes de prévision et d'avertissement en cas d'inondation • Élaborer des plans d'évacuation • Assurances contre les inondations, secours aux sinistrés • Plan de secours aux sinistrés et protection civile
Sécheresse	<ul style="list-style-type: none"> • Réduire les besoins en eau • Abandon/expansion des terres agricoles 	<ul style="list-style-type: none"> • Augmenter la quantité d'eau stockée dans les réservoirs • Changer les pratiques agricoles pour accroître l'humidité du sol • Augmenter l'irrigation 	<ul style="list-style-type: none"> • Mesures d'urgence pour répartir l'eau durant les pénuries • Partager les approvisionnements en eau à l'échelle régionale
Débit des cours d'eau	<ul style="list-style-type: none"> • Augmenter/réduire l'utilisation en fonction des changements de débit • Augmenter/réduire la production d'hydroélectricité • Accroître l'efficacité régionale des réseaux d'approvisionnement en eau grâce à la coordination • Réduire les fuites • Réaffecter les approvisionnements disponibles 	<ul style="list-style-type: none"> • Accroître le débit/rendement en augmentant la capacité du réservoir • Exploiter de nouvelles sources d'eau (p. ex. les eaux souterraines, le transfert d'un bassin à un autre) 	<ul style="list-style-type: none"> • Partager les sources en eau par des interconnexions et une gestion coordonnée • S'accorder d'une plus faible fiabilité pour accroître les approvisionnements réels
Eaux souterraines	<ul style="list-style-type: none"> • Augmenter/réduire l'utilisation en fonction des changements du rendement durable 	<ul style="list-style-type: none"> • Accroître le nombre et la profondeur des puits afin d'exploiter l'alimentation en eau sur une plus grande superficie • Exploiter de nouvelles sources d'eau (p. ex. les eaux de surface) 	<ul style="list-style-type: none"> • Instaurer la gestion du prélèvement des eaux souterraines
Niveau des lacs	<ul style="list-style-type: none"> • Restreindre l'aménagement des rives • Augmenter/réduire les loisirs et la navigation en fonction du changement du niveau 	<ul style="list-style-type: none"> • Draguer les ports, surélever les ouvrages de protection des côtes et les murs de retenue • Construire des ouvrages de contrôle du niveau de l'eau • Échange d'eau entre les bassins pour maintenir les niveaux 	<ul style="list-style-type: none"> • Assurance-inondation • Secours aux sinistrés

l'adaptabilité d'un système comporte donc probablement des limites. Par exemple, les changements des règles d'exploitation peuvent diminuer le rendement d'un réservoir conçu pour des fonctions multiples et probablement divergentes, comme la lutte contre les inondations et l'alimentation en eau.

La capacité excédentaire est la capacité d'un réseau à fournir un rendement supérieur à la normale, du moins pour de courtes périodes. Les réseaux d'alimentation en eau ont toujours eu une capacité excédentaire du fait que l'on construisait des installations dont la capacité était supérieure aux besoins réels pour absorber les augmentations subites de l'utilisation de l'eau et les incertitudes quant à l'alimentation naturelle ou les risques d'inondation et de sécheresse. Un des objectifs des programmes de conservation de l'eau, qui gagne en popularité, est de maintenir cette capacité excédentaire malgré la demande croissante sans pour autant construire des ouvrages plus importants.

5.2 ADAPTATION INTENTIONNELLE

Les options de la gestion face au changement climatique peuvent être réparties en trois grandes catégories : classiques (gestion de l'offre); non classiques (gestion de la demande); et non-gestion. On y retrouve à peu près les catégories de réaction sociale de Kates : réduire la perte, changer l'utilisation et accepter la perte. Le tableau 3 résume quelques adaptations particulières aux effets du changement climatique sur le débit, le stockage et l'état de l'eau.

Les options du type gestion classique des ressources en eau (réduire la perte) comprennent la modification de l'hydrologie d'un bassin par la construction de réservoirs ou la modicication de chenaux naturels afin de maintenir la fiabilité des ressources en eau et assurer une protection contre les inondations et la sécheresse. Le changement climatique a pour principal effet d'accroître l'incertitude au sujet des débits, du stockage et de l'état futur de l'eau. L'impossibilité de prévoir le changement climatique nous empêche de répondre par une gestion classique, en partie parce qu'il n'existe pas de façon de quantifier les avantages que représenterait pour la société la construction de digues et de barrages plus gros permettant de conserver la fiabilité du système malgré l'incertitude croissante. De nombreux gestionnaires sont donc d'avis qu'il ne faut rien faire pour répondre au changement climatique avant d'avoir une preuve évidente que ce changement a déjà commencé, comme une sécheresse ou une inondation catastrophique.

Les options non classiques (changer l'utilisation) mettent l'accent sur le maintien de la fiabilité du système par l'accroissement de la souplesse en ajustant l'utilisation de l'eau selon les changements de l'hydrologie. Cette approche cherche à minimiser l'impact d'événements catastrophiques imprévus plutôt qu'à protéger la société des effets de la variabilité du climat (Holling, 1978). Les mesures d'adaptation de cette catégorie comprennent certaines méthodes innovatrices de gestion de la demande en cours d'élaboration au Canada (Tate, 1990). Ce sont elles qui offrent les meilleures possibilités d'améliorer l'adaptation au changement climatique étant donné que l'application de plusieurs d'entre elles règlent d'autres problèmes auxquels doivent faire face les gestionnaires des ressources en eau.

Les ajustements de la troisième catégorie sortent du cadre de la gestion classique des ressources en eau. Ces mesures acceptent implicitement le fait que le changement climatique peut entraîner des défaillances plus fréquentes des systèmes de ressources en eau. Les gestionnaires tiennent compte de ces problèmes plutôt que d'essayer de les éviter à tout prix. Ce genre de mesure cherche à minimiser les effets du problème sur la société et à faire partager les pertes par tous.

prévoir ces changements de façon sûre. Klemes¹ a résumé les impacts possibles sur les ressources en eau :

- moins d'eau disponible
- extrêmes et fluctuations plus marqués en général
- répartition saisonnière des précipitations et du ruissellement moins avantageuse.

5. ADAPTATION AU CHANGEMENT CLIMATIQUE

Les gestionnaires des ressources en eau sont confrontés à la certitude que le climat va changer, et à la très nette possibilité que ce changement sera rapide. Que faire pour mieux adapter la GRE à un climat en pleine évolution? Où appliquer des mesures pour réduire la sensibilité des systèmes de ressources en eau vis-à-vis du changement climatique? L'adaptation au changement sera-t-elle difficile? Pour répondre à ces questions, on se doit d'emprunter un cadre conceptuel proposé par Kates (1985) pour décrire la façon dont la société fait face aux hasards du climat.

Il classe les mesures d'adaptation en trois catégories basées sur le type de mesures prises en réponse à un danger pour la société : changer l'utilisation, réduire la perte et accepter la perte. De plus, les mesures d'adaptation peuvent être accidentelles ou intentionnelles. Il y a adaptation accidentelle à la variabilité du climat lorsqu'une action visant un autre but, par exemple en réponse au changement de la demande en eau, se trouve à réduire l'impact du changement climatique sur un système de ressources en eau. On parle d'adaptation intentionnelle pour les mesures prises uniquement pour contrer les effets du changement climatique.

5.1 ADAPTATION ACCIDENTELLE

Nous voyons déjà des exemples d'adaptation accidentelle consécutive aux bonnes pratiques en matière de GRE. Même si nous supposons que les processus climatiques et hydrologiques ne changent pas, les erreurs d'observation et d'interprétation introduisent un degré considérable d'incertitude dans ce que nous en connaissons. Les gestionnaires compensent cette incertitude 1) en ayant un souci de robustesse, de résistance et d'adaptabilité ainsi que de fiabilité lors de la conception des systèmes de ressources en eau, 2) en surveillant le climat et l'hydrologie, et en ajustant les systèmes de façon à maintenir le rendement désiré, et 3) en maintenant une «capacité excédentaire» pour prévoir l'imprévu.

La robustesse d'un système désigne son insensibilité aux erreurs et incertitudes qui entachent l'information utilisée lors de sa conception. Sa résilience est à la fois sa capacité de fonctionner dans des conditions différentes de celles pour lesquelles il a été conçu (Matalas et Fiering, 1977) et aussi de récupérer rapidement après une panne (Riebsame, 1988). Son adaptabilité est la possibilité pour les gestionnaires de le modifier en réponse à l'évolution des conditions, et à un coût minimal.

Riebsame (1988) décrit comment la pratique normale de modification des règles d'exploitation d'un réservoir existant à mesure que s'accumulent les données sur les précipitations et le débit tirées de la surveillance peut également servir pour l'adaptation à un changement climatique. Cette approche est généralement limitée dans sa capacité de réaction à un changement rapide;

¹ V. Klemes, Implications of possible climate change for water management and development. Bulletin de l'Association canadienne des ressources hydriques, avril 1992.

Tableau 2. Changements prévus au niveau du climat et de l'hydrologie en fonction du scénario 2xCO₂

Région	Température (°C)	Précipitations (%)	Ruisseaulement (%)	MCG	Étude
	+2,0 à 3,0	+23	+20	UKMO/83	Ripley (1987); Bassin hydrographique du Pacifique
	+2,5 à 3,0	+23	+235	UKMO/83	Ripley (1987); Bassin hydrographique du golfe du Mexique
Ouest canadien	+2,5 +4,4	+18 +19	-20 +28	GFDL/80 GISS/84	Haas et Marta (1988); Riv. Sud Saskatchewan
	+2,8 +4,5	+48 +10	+83 -5	GFDL/80 GISS/84	Zaltsburg (1990); Ruisseau Wilson, Manitoba
	+2,2 +4,4 +3,0 +6,7 +4,6	+18 +19 +8 +7,5 +19	-58 +38 +8 -15 +34	GFDL/80 GISS/84 OSU/88 GFDL/87 GISS/87	Cohen (1991); Riv. Saskatchewan
	+3,1 à 3,7 +4,3 à 4,8	+0,8 +6,5	-8,2 -10,9	GFDL/80 GISS/84	Cohen (1986, 1987); Grands Lacs
	+3,2 à 7,2	0-6	-11 à -25	GISS GFDL OSU	Hartmann (1990: Grands Lacs
Centre	+4,7	+0,03	-16	GISS	Sanderson et Smith (1990); Grand River
	+3,5 +4,7	+17,5 +15	+10,9 +15,7	GFDL/80 GISS/84	Singh (1988); Baie James
Atlantique	+4,0 +4,0 à 4,7	-2 à -3 +5,9 à +7,5	+20 +35		Saulesleja (1989); Maritimes T.-N./Labrador
	+4,5 à +5	+15 à +20	-5	CCC	Morin et Slivitsky (1992); Rivière Moisie
Nord	+2 à +3,5	+54	+95	UKMO/83	Ripley (1987)

Tableau adapté et mis à jour à partir d'un original fourni par T. Marta

Il y a encore beaucoup à faire pour améliorer nos connaissances en ce qui a trait aux liens entre le climat et l'hydrologie régionale. Il faudra améliorer davantage notre capacité de prévision du changement climatique et poursuivre les travaux en ce sens. Ces recherches ne modifieront cependant en rien l'essentiel : un important changement climatique est plausible dans un laps de temps pertinent pour les gestionnaires des ressources en eau. Nous devons supposer le pire jusqu'à ce que nous puissions améliorer la capacité à

décourageant étant donné la sensibilité des ressources en eau vis-à-vis de la variabilité du cycle hydrologique.

4.2 SCÉNARIOS CLIMATOLOGIQUES

Un «scénario climatologique» représente un climat futur possible plutôt que probable. Afin d'étudier les impacts sur l'hydrologie et les ressources en eau, des modèles de climat possible ont été construits à partir 1) des conditions observées dans la région à l'étude durant les périodes plus chaudes ou les périodes de sécheresse, 2) des conditions climatiques actuelles dans une autre région qui connaît un climat plus chaud, 3) de scénarios spécialement formulés pour évaluer la sensibilité au changement climatique d'une région, et 4) de scénarios basés sur les résultats de modèles de circulation générale (MCG). Étant donné l'incertitude considérable inhérente à ces techniques, les résultats sont considérés comme des scénarios climatiques plutôt que des prévisions.

La plupart des scénarios MCG sont conçus pour simuler des conditions climatiques en équilibre dans une atmosphère contenant le double des concentrations préindustrielles de dioxyde de carbone, soit le «scénario $2\times CO_2$ ». Ils sont généralement considérés comme représentant les climats possibles vers le milieu du siècle prochain (Houghton et al., 1990). Le Centre climatologique canadien (CCC) a mis au point l'un des MCG les plus perfectionnés. Étant donné que les résultats du modèle du CCC n'ont été rendus publics que vers la fin de 1989, la plupart des études existantes concernant les impacts du réchauffement du globe sur les ressources en eau qui ont utilisé des scénarios de MCG sont basées sur les résultats de quatre autres : le modèle du Geophysical Fluid Dynamics Laboratory (GFDL); celui du Goddard Institute for Space Sciences (GISS); celui de l'United Kingdom Meteorological Office (UKMO); et celui de l'Oregon State University (OSU).

4.3 IMPACTS DU RÉCHAUFFEMENT DU GLOBE SUR L'HYDROLOGIE

Le tableau 2 résume les effets prévus du réchauffement du globe sur le ruissellement annuel moyen au Canada. On connaît très peu l'effet de ce réchauffement sur l'alimentation des nappes souterraines. Les effets de la variabilité climatique sur les eaux souterraines ne sont pas bien connus, mais en général les changements subis au niveau régional devraient être semblables à ceux du ruissellement annuel moyen.

Malgré leurs problèmes, les études d'impacts donnent une bonne indication du type et de la direction du changement probable. Le réchauffement du globe aura tendance à aggraver les problèmes actuels de ressources en eau dans le sud des Prairies et le bassin des Grands Lacs. Les Prairies peuvent s'attendre à une sécheresse accrue au cours de la saison de croissance estivale, qui pourrait se répercuter sur l'avenir de l'agriculture irriguée dans cette région. On peut s'attendre à une baisse du niveau de l'eau dans les Grands Lacs et à ce que les débits des rivières atteignent leur plus bas niveau historique, d'où des incidences sur la navigation, l'utilisation de l'eau pour les loisirs et la production d'hydroélectricité. Le tableau est moins clair dans les autres régions. Sur la côte de l'Atlantique et dans l'ouest du Canada, à l'ouest des Rocheuses, le fait que les unités hydrologiques soient moins importantes limite notre aptitude à déduire des effets régionaux à partir des scénarios des MCG. Le peu de connaissance des processus hydrologiques, spécialement de la réaction du pergélisol au changement climatique, complique encore l'évaluation des impacts hydrologiques dans le Nord canadien.

Canada et aux États-Unis et assurent un lien de transport vital entre les marchés mondiaux et les zones industrielles des deux pays. La gestion de la qualité des eaux, de même que les fluctuations extrêmes du niveau des lacs et du débit du Saint-Laurent, sont des préoccupations constantes. Les eaux souterraines sont beaucoup utilisées pour l'approvisionnement des villes du sud de l'Ontario, et les questions d'un approvisionnement durable en eaux souterraines de qualité attirent de plus en plus l'attention.

Dans la région atlantique, l'hydrologie est caractérisée par un grand nombre de bassins hydrologiques relativement petits qui se jettent tous directement dans la mer. L'exploitation des ressources en eau y est de faible envergure, confinée à de petits barrages hydroélectriques et réservoirs d'alimentation en eau. Les eaux souterraines sont une source importante d'eau douce dans cette région et la seule dans l'île-du-Prince-Édouard.

Les caractéristiques distinctives de l'hydrologie dans le nord du Canada sont la présence du pergélisol et le faible approvisionnement annuel en eau provenant des précipitations. Le nord est défini dans cet ouvrage comme la zone couverte en grande partie par le pergélisol, souvent considérée comme la région au nord de l'isotherme de -1 °C (Prowse, 1990) qui correspond à peu près à celle située au nord de 55N pour la majeure partie du Canada, et au nord de 60N sur la côte ouest.

4. IMPACTS DU RÉCHAUFFEMENT DU GLOBE

Le climat canadien a déjà changé dans le passé et il n'y a aucune raison de croire qu'il ne changera pas de nouveau (Hengeveld, 1991). La question que se posent les gestionnaires des ressources en eau est de savoir si les impacts du changement climatique seront suffisamment importants et rapides pour qu'on doive prendre des mesures spéciales afin d'en contrer les effets. Par ailleurs, si le changement est graduel, les systèmes de ressources en eau pourront être modifiés de façon à tenir compte des changements survenant dans la société, comme la croissance économique. Il est impossible de prévoir avec exactitude tous les aspects du changement climatique à venir. On peut cependant en identifier certains, jugés probables au cours des 50 prochaines années, et leurs impacts sur l'hydrologie et les ressources en eau. Bien que de nombreux facteurs aient été tenus responsables du changement climatique, le présent ouvrage ne traite que des changements résultant du réchauffement du globe imputable à une augmentation de «l'effet de serre».

4.1 PRÉVOIR LES CHANGEMENTS CLIMATIQUES

Comment prévoir le climat d'ici 20, 50 ou 100 ans alors que nous ne pouvons prévoir avec précision le temps du lendemain? La réponse à cette question se situe au niveau de la différence entre «climat» et «temps». Les phénomènes qui font le temps sont le résultat de flux de chaleur et d'eau, à court terme et à petite échelle, provoqués par la turbulence atmosphérique. Cette association étroite est responsable de l'imprévisibilité inhérente des systèmes météorologiques. Par contre, le «climat» fait appel à la notion de moyenne dans le temps et l'espace. Il reflète donc moins la variabilité turbulente des conditions météorologiques et plus les contraintes imposées aux processus atmosphériques par la conservation de la masse, de la quantité de mouvement et de l'énergie. Ces contraintes sont à la base de la prévision des conditions climatiques moyennes (Sommerville, 1987).

La confiance vis-à-vis de la prédictibilité du climat moyen ne signifie pas qu'on peut prévoir à quel point la variabilité du climat peut changer. Les simulations par modèles climatiques n'ont qu'assez peu réussi à reproduire la variabilité du climat actuel (Smith et Tirpac, 1989). Ce résultat est

des débits à des échelles interannuelle et décennale; c'est pourquoi il a été facile de laisser de côté les effets du changement climatique lors de la conception de ces ouvrages. Les grosses installations comme les réservoirs ou les réseaux de réservoirs assurant un stockage pluriannuel de l'eau dans les régions susceptibles de sécheresse sont plus sensibles aux variations à des échelles de temps plus longues. Tous les aspects des ressources en eau peuvent être touchés par le changement climatique étant donné que ce dernier comprend à la fois des variations du climat moyen sur des périodes de plusieurs décennies ou plus et des changements de la nature des fluctuations climatiques saisonnières et interannuelles qui peuvent s'opérer au cours de cette période.

Les installations de ressources en eau conçues pour prévenir les impacts des inondations et des sécheresses sont très sensibles aux variations extrêmes des précipitations, des débits des cours d'eau et de l'humidité du sol. Les ouvrages de protection contre les inondations sont généralement conçus en fonction de niveaux d'inondation qui se produisent une fois tous les 100 à 200 ans. Ces estimations contiennent une grande part d'incertitude étant donné la période relativement courte pour laquelle nous possédons des registres des débits des cours d'eau. L'estimation de l'importance des inondations et des sécheresses lors de la conception et de l'exploitation des installations des ressources en eau se complique en outre du fait que nous ne connaissons pas les sources de la variabilité des précipitations et du débit des cours d'eau. Les inondations les plus fortes sont le résultat d'importants écarts à court terme par rapport à la fourchette normale de variation des débits des cours d'eau, appelés effet Noé. La gravité d'une sécheresse dépend de la période au cours de laquelle les précipitations ou le débit des cours d'eau se sont maintenus sous un seuil, une caractéristique de la variabilité du débit, également appelée persistance. L'existence de périodes persistantes de débit au-dessus ou au-dessous des moyennes est également appelée effet Joseph. On peut observer les effets Noé et Joseph dans les registres de différents paramètres géophysiques (Mandelbrot, 1977).

3.4 DIFFÉRENCES RÉGIONALES

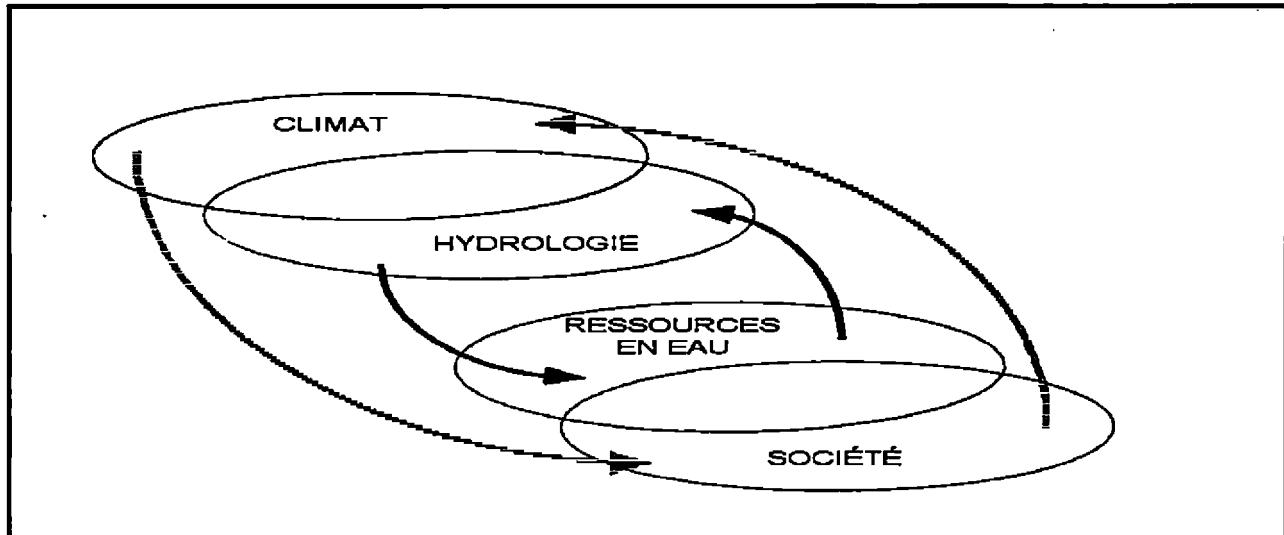
Le Canada peut être divisé en quatre régions géographiques basées sur les variations du climat, de l'hydrologie et des impacts prévus du changement climatique : l'ouest (Colombie-Britannique, Alberta, Saskatchewan et Manitoba); le centre (Ontario et ouest du Québec); l'atlantique (est du Québec, Nouveau-Brunswick, Nouvelle-Écosse, Île-du-Prince-Édouard, Terre-Neuve et Labrador); et le nord (Yukon et Territoires du Nord-Ouest, et les parties les plus septentrionales de la Colombie-Britannique, de l'Alberta, de la Saskatchewan, du Manitoba et du Québec). Chacune de ces régions connaît une vaste gamme de conditions climatiques et hydrologiques. De plus, chacune est unique en ce qui a trait aux défis que doivent relever les gestionnaires des ressources en eau et aux difficultés à évaluer les impacts possibles du changement climatique.

Dans l'ouest, l'hydrologie est caractérisée par deux régimes distincts : les eaux de ruissellement des bassins hydrographiques montagneux riches en eau provenant des neiges des Rocheuses et des montagnes de l'intérieur de la Colombie-Britannique fournissent l'eau à un petit nombre de cours d'eau importants qui coulent dans des régions arides des Prairies et dans le plateau intérieur de la Colombie-Britannique. Ces cours d'eau alimentent l'irrigation, l'approvisionnement des villes, la production d'hydroélectricité et soutiennent d'importantes pêcheries.

Les questions des ressources en eau dans le centre du Canada se posent surtout pour les Grands Lacs et le Saint-Laurent. Ensemble, les cinq Grands Lacs constituent la principale source d'eau de grands bassins de population au

avec les ressources en eau se fait par les éléments terrestres du cycle hydrologique comme le ruissellement, le débit des cours d'eau et les eaux souterraines, c.-à-d. ceux qui ne sont pas directement en jeu dans les processus climatologiques. Parallèlement, certains éléments des ressources en eau sont directement liés à la société et d'autres non. Les éléments qui sont liés à la société comprennent les institutions, les bases politiques et les modèles d'utilisation de l'eau. Les éléments non liés à la société comprennent les installations, comme les réservoirs, les canaux et les digues, utilisées pour modifier le cycle hydrologique et lutter contre les inondations.

Figure 1. Liens entre le climat et les ressources en eau



L'interface entre l'hydrologie et les ressources en eau peut se définir en termes de débit, stockage et état de l'eau (tableau 1), régis par les processus hydrologiques, qui peuvent être modifiés par les interventions des systèmes de ressources en eau. Le résultat de ces interventions détermine la quantité et la qualité de l'eau disponible pour la société. Les effets du changement climatique sur l'hydrologie se propagent par l'interface hydrologie/ressources en eau et influent sur la disponibilité de l'eau utilisée par la société. Le changement climatique peut également influer directement sur l'utilisation de l'eau par le biais d'autres liens entre le climat et la société. Par exemple, la température peut influer sur la demande en eau; cependant, on ne discutera ici que des effets du climat sur l'hydrologie et l'approvisionnement en eau.

Tableau 1. Interface entre l'hydrologie et les ressources en eau

Débit	Stockage	Etat
Cours d'eau	Niveaux des lacs et des réservoirs	Qualité de l'eau
Eaux souterraines	Humidité du sol	Neige et glace

3.3 VARIABILITÉ DU DÉBIT ET FIABILITÉ DU SYSTÈME

La GRE est sensible aux variations des processus hydrologiques qui surviennent à toutes les échelles de temps. Les utilisations urbaines, industrielles et agricoles de l'eau sont très influencées par les variations

à quoi on s'attend d'après l'expérience du passé. La définition de changement climatique dépend donc de la durée de la mémoire humaine et de l'évolution de la société en général.

3. RESSOURCES EN EAU ET LE CLIMAT

Le domaine des ressources en eau change également en réaction à l'évolution des préoccupations et objectifs de la société relativement à la gestion de cette ressource. L'eau a toujours été considérée de façon étroite en termes de sa capacité à satisfaire les besoins des utilisateurs domestiques, urbains, agricoles et industriels. Le principal objectif en matière de gestion des ressources en eau (GRE) a toujours été de «répondre à la demande d'un approvisionnement fiable en eau et de la protection contre les inondations, quels que soient les changements de cette demande» (Riebsame, 1988). La mise en valeur des ressources en eau a souvent été utilisée pour stimuler le développement industriel et agricole. La pratique classique consistait principalement à intervenir dans le cycle hydrologique en construisant des installations (réservoirs, canaux de dérivation) afin d'éloigner tout risque d'inondation et de surmonter les contraintes hydrologiques naturelles pesant sur un approvisionnement fiable en eau.

Depuis quelques années, la société se préoccupe de plus en plus de l'environnement. En ce qui a trait à l'eau, on s'inquiète des effets de la pollution et on reconnaît de plus en plus le rôle important de l'eau dans les écosystèmes naturels. La future GRE doit tenir compte de l'objectif du développement durable, c'est-à-dire un «développement qui répond aux besoins actuels sans compromettre l'aptitude des générations à venir à répondre à leurs propres besoins» (CMED, 1987). La société est moins prête à subir le coût d'installations de plus en plus importantes nécessaires au respect d'une stratégie basée sur l'offre; on s'intéresse de plus en plus aux moyens de gérer la demande en eau de la société (Tate, 1990). Ensemble, ces facteurs contribuent à améliorer notre conception des ressources en eau, conception qui met l'accent sur les limites naturelles de l'utilisation de l'eau par la société, y compris celles imposées par le changement climatique.

3.1 UTILISATION DE L'EAU PAR LA SOCIÉTÉ

L'eau est utilisée pour l'approvisionnement urbain et industriel, l'irrigation, l'élimination des déchets, la production d'hydroélectricité, la navigation, la reproduction du poisson et de la faune, et les loisirs. L'utilisation de l'eau par la société peut être divisée en deux grandes catégories : les utilisations par prélèvement et les utilisations sans prélèvement (également appelées utilisations à même le cours d'eau). Les premières consistent à puiser de l'eau dans un cours d'eau, lac ou réservoir pour l'utiliser ailleurs; elles comprennent l'approvisionnement des municipalités et des industries, l'irrigation et le refroidissement des centrales thermiques. L'eau puisée dans une masse d'eau est soit consommée, généralement perdue par évaporation, soit rejetée dans le plan d'eau en question. Les utilisations sans prélèvement utilisent l'eau des lacs et des cours d'eau et comprennent les utilisations classiques comme la navigation, la production d'hydroélectricité, l'élimination des déchets et les loisirs, et les «utilisations» associées au rôle de l'eau dans l'environnement en général, comme la reproduction du poisson et de la faune.

3.2 LIENS AVEC LE CLIMAT

L'hydrologie forme le premier lien entre les ressources en eau et le climat (fig. 1). Les constituants atmosphériques du cycle hydrologique recoupent les processus climatologiques, et comprennent l'évaporation, le transport atmosphérique de la vapeur d'eau et les précipitations. Le lien

les rivières, les lacs et les eaux souterraines, l'eau est utilisée pour l'agriculture, la production d'énergie, les transports et les loisirs. La perspective d'un réchauffement global causé par un accroissement de l'effet de serre a mis en relief les impacts du changement climatique sur la société et le milieu naturel, et le besoin de s'adapter. Même si les initiatives actuelles visant à limiter les émissions de dioxyde de carbone et autres gaz à effet de serre sont couronnées de succès, un certain degré de changement climatique est inévitable. Ses répercussions sur les ressources en eau seront probablement considérables; c'est pourquoi il faut prendre des mesures d'adaptation.

2.1 ADAPTATION DES RESSOURCES EN EAU

Les Canadiens sont-ils bien adaptés au climat actuel et que peut-on faire pour mieux s'adapter à un climat en pleine évolution? Les ressources en eau sont de par leur nature sensibles aux variations du climat. Les systèmes de ressources en eau sont bien adaptés aux variations climatiques qui se produisent d'une saison, d'une année ou d'une décennie à l'autre, mais pas à celles induites par le changement climatique. La plupart des hydrologues et des gestionnaires des ressources en eau ont toujours travaillé en supposant un climat moyen constant, justifiés en cela par l'hypothèse selon laquelle la variabilité interannuelle et interdécennale des données enregistrées sur les précipitations, les débits, etc. dépassait de loin ce qu'entraînerait le changement climatique au cours de ces périodes.

Le rapport a pour but de faire le relevé des sujets et questions liés au changement climatique et à l'adaptation des ressources en eau au Canada. Trois questions ont guidé l'étude : Quels types de changement climatique sont possibles dans les 30 à 50 prochaines années, c'est-à-dire sur une période pertinente pour planifier les grands projets en matière de ressources en eau? Quels effets auront ces changements sur les ressources en eau? Comment les gestionnaires et les institutions responsables de ces ressources peuvent-ils répondre à un changement climatique?

2.2 VARIABILITÉ ET CHANGEMENT CLIMATIQUES

Le climat est le résultat net des processus géophysiques qui créent les conditions météorologiques. La variabilité est introduite par des changements du forçage externe, comme les variations saisonnières du rayonnement solaire à la surface de la terre, et les interactions entre les divers processus climatique. Le climat «moyen» est souvent défini en termes de moyenne des paramètres climatiques établie sur 30 ans, également appelée normale climatologique. Les écarts des valeurs quotidiennes, saisonnières et annuelles moyennes par rapport aux normales climatologiques sont considérées comme la mesure de la variabilité du climat. Une tendance à la hausse ou à la baisse des normales climatologiques peut être considérée comme la preuve d'un changement climatique, bien qu'on s'attende à un certain «bruit de fond» dans ces normales. Le changement climatique se compose donc des fluctuations aussi bien du climat «moyen» que de l'importance des écarts par rapport à la moyenne. Les changements dans la fréquence et l'importance des inondations et des sécheresses sont particulièrement significatifs en ce qui a trait aux ressources en eau.

Les changements à long terme du climat canadien se manifestent dans les tendances des paramètres climatologiques et hydrologiques enregistrées au cours des 100 dernières années. Le fait de savoir si ces tendances sont une preuve de changement du climat moyen ou des manifestations de variations quasi périodiques à long terme du climat n'est guère important en ce qui a trait à notre adaptation au climat. Pour la plupart des gens, le changement est mesuré en termes de différences entre ce que l'on connaît actuellement et ce

ADAPTATION AU CHANGEMENT CLIMATIQUE ET VARIABILITÉ DES RESSOURCES EN EAU DU CANADA

1. FAITS SAILLANTS DE L'ÉTUDE

Le présent rapport est un relevé des sujets et des questions liés à l'adaptation des ressources en eau du Canada au changement climatique, dont les principales constatations sont:

- Les préoccupations croissantes vis-à-vis de l'environnement et l'adoption de l'objectif de développement durable des ressources mettent l'accent sur les limites imposées par le climat aux ressources en eau.
- D'après ce que nous savons du réchauffement global, d'importants changements climatiques ayant des effets sur les processus hydrologiques peuvent survenir sur une période pertinente pour les gestionnaires des ressources en eau. Le réchauffement du globe aura tendance à aggraver les problèmes de ressources en eau qui existent déjà dans le sud des Prairies et les Grands Lacs. On peut s'attendre à ce que les Prairies connaissent un accroissement de la sécheresse au cours de la saison de croissance estivale, et les Grands Lacs, une baisse du leur niveau moyen jusqu'aux minimums historiques.
- Les mesures d'adaptation au changement climatique peuvent être classées en mesures de gestion classiques (de l'offre), mesures de gestion non classiques (de la demande) et mesures de non-gestion. Les pratiques classiques mettent l'accent sur la fiabilité du système. Elles offrent une certaine adaptation au changement climatique, mais elles sont limitées par leur incapacité à réagir à un changement rapide. Les mesures non classiques et de non-gestion mettent l'accent sur la souplesse et sur la résilience. Elles ont l'avantage de viser également d'autres préoccupations plus pressantes des gestionnaires des ressources en eau et peuvent donc être appliquées immédiatement, avant que les effets du changement climatique soient évidents.
- Les gestionnaires des ressources en eau ont besoin de méthodes leur permettant d'évaluer la vulnérabilité des systèmes de ressources en eau au changement climatique pour savoir où et quand appliquer les mesures d'adaptation.
- L'adaptation au changement climatique exige une observation et une interprétation constantes du climat, de l'hydrologie et des processus environnementaux connexes. Il faut donc trouver des moyens de détecter dès le début tout changement climatique et continuer d'améliorer nos connaissances du climat, de l'hydrologie et des liens qui les unissent.

2. VARIABILITÉ, CHANGEMENT ET ADAPTATION

L'eau a une influence considérable sur le climat et elle est essentielle pour la société. L'évaporation de l'eau des océans et des continents et sa condensation en nuages, ainsi que les précipitations, créent les conditions météorologiques qui déterminent le climat. Sous ses formes terrestres, comme

INTRODUCTION

Le Centre climatologique canadien (CCC) a financé plusieurs études touchant les effets éventuels du réchauffement du climat. La liste des titres antérieurs de la série figure au verso de la première page de couverture.

DÉNÉGATION DE RESPONSABILITÉ

La présente publication renferme le résumé des résultats d'un étude menée par M. William K. Nuttle, de l'Académie Rawson des Sciences de l'Eau. Les avis et opinions qui y sont exprimés sont ceux des auteurs. Ils n'expriment, ni ne reflètent nécessairement ceux du gouvernement du Canada ou de tout organisme de celui-ci.

Pour obtenir à titre gracieux des exemplaires de cet ouvrage, écrire à la :

Division des produits et des publications
Centre climatologique canadien
4905, rue Dufferin
Downsview (Ontario)
M3H 5T4
Tél. : (416) 739-4331/4328

Pour acheter des exemplaires des rapports au complet, Nuttle, W.K. 1993, *Adaptation to Climate Change and Variability in Canadian Water Resources*, Rawson Academy Occasional Paper No. 7, écrire à :

L'Académie Rawson des Sciences de l'Eau
Appartement 404
1, rue Nicholas
Ottawa (Ontario)
K1N 7B7

Publié avec l'autorisation du
ministre de l'Environnement

© Ministre des Approvisionnements
et Services Canada 1993

No de catalogue EN57-27/1993-02
ISBN 0-662-59789-3
ISSN 0835-3980



Environnement
Canada Environment
Canada

**ADAPTATION AU CHANGEMENT CLIMATIQUE ET VARIABILITÉ
DES RESSOURCES EN EAU DU CANADA**

Résumé pour le

**Sommaire du changement climatique
Service de l'environnement atmosphérique**

Préparé par

William K. Nuttle

Rawson Academy of Aquatic Science

**La présente publications s'inscrit dans le cadre des
rapports sur l'état de l'environnement**



Ce papier contient un minimum de 50% de fibres recyclées
dont 10% de fibres recyclées après consommation.

SOMMAIRE DU CHANGEMENT CLIMATIQUE

- SCC 88-05** Les répercussions du changement climatique sur le tourisme et les loisirs en Ontario
- SCC 88-06** L'évaluation des effets du changement climatique sur l'agriculture en Saskatchewan, au Canada
- SCC 88-07** L'évaluation socio-économique des conséquences physiques et écologiques du changement climatique sur le milieu marin dans la région de l'Atlantique : phase I
- SCC 88-08** Les répercussions d'un changement climatique sur les ressources naturelles du Québec
- SCC 88-09** Le changement climatique causé par le CO₂ en Ontario : interdépendances et stratégies en matière de ressources
- SCC 89-01** Le réchauffement climatique et la position relative du Canada en agriculture
- SCC 89-02** L'exploration de l'incidence du changement climatique sur la forêt boréale et l'économie forestière de l'ouest du Canada
- SCC 89-03** Les répercussions du changement climatique sur le parc national de Prince-Albert, en Saskatchewan
- SCC 89-04** Les répercussions d'un changement climatique sur les besoins en eau des municipalités et sur l'industrie du golf au Québec
- SCC 89-05** Les effets du climat et du changement climatique sur l'économie de l'Alberta
- SCC 90-01** Les répercussions du changement de climat sur les petites localités côtières de la région de l'Atlantique, au Canada
- SCC 90-02** Les répercussions du changement climatique à long terme sur le transport au Canada
- SCC 91-01** Le changement climatique et ses répercussions sur le Canada : le point de vue scientifique
- SCC 92-01** Répercussions du réchauffement planétaire sur la politique du gouvernement canadien
- SCC 92-02** Étude de modèles de prévision des variations climatiques et de leurs incidences sur l'hydrologie, les courants côtiers et les pêches en Colombie-Britannique
- SCC 93-01** Incidences du changement climatique sur le régime glacial de la mer de Beaufort : Répercussions sur l'industrie pétrolière dans l'Artique
- SCC 93-02** Adaptation au changement climatique et variabilité des ressources en eau du Canada



Environnement
Canada Environment
Canada

SOMMAIRE DU CHANGEMENT CLIMATIQUE

Adaptation au changement
climatique et variabilité
des ressources en eau
du Canada

SCC 93-02

Canada

