

Impacts de changements climatiques sur le régime hydrologique : le cas de la rivière Moisie

Impacts of climatic changes on the hydrological regime: Moisie river case

G. Morin and M. Slivitzky

Volume 5, Number 2, 1992

URI: <https://id.erudit.org/iderudit/705127ar>

DOI: <https://doi.org/10.7202/705127ar>

[See table of contents](#)

Publisher(s)

Université du Québec - INRS-Eau, Terre et Environnement (INRS-ETE)

ISSN

0992-7158 (print)

1718-8598 (digital)

[Explore this journal](#)

Cite this article

Morin, G. & Slivitzky, M. (1992). Impacts de changements climatiques sur le régime hydrologique : le cas de la rivière Moisie. *Revue des sciences de l'eau / Journal of Water Science*, 5(2), 179–195. <https://doi.org/10.7202/705127ar>

Article abstract

The output of the Canadian Climate Center (CCC) General Circulation Model (GCM), coupled with the hydrologic deterministic model CEQUEAU is used to evaluate the possible impact of a doubling of atmospheric CO₂ on the hydrologic regime of the Moisie river on the North Shore of the St Lawrence.

In regions where snow plays an important contribution to the annual runoff and the ground is covered with snow for periods from 4 to 6 months, the seasonal variations of climatic changes under a 2 x CO₂ scenario may have very different impact on hydrologic regimes; Figures 1 and 3 show the annual and winter distributions of temperature changes for Quebec under the CCC 2 x CO₂ scenarios, white figure 2 shows the possible changes in annual precipitation. The annual temperature will increase around 4 to 5° C, white winter temperatures may increase as much as 6 to 9° C; annual precipitation will increase by 15 % to 20 %.

The CEQUEAU hydrologic model (MORIN et al., 1981; MORIN et COUILLARD, 1990) is a deterministic model which takes into account number of physiographic characteristics of the drainage basin (such as elevation and percent of forest and lake area) as defined in number of square grids. The model uses for input daily minimum and maximum temperatures and daily solid and liquid precipitation (rainfall and snowfall). As such meteorological information is usually available for a limited number of stations, the values are interpolated to each grid element of the drainage basin.

The CEQUEAU deterministic model uses the degree-days method (CORPS OF ENGINEERS, 1960) to estimate daily snowmelt under forest canopy and in the open and Thornthwaite equation to calculate daily evapotranspiration, for each square grid of the basin. Daily water budget, using linear reservoir storage for soil moisture and ground water storage is then used on each square grid element, to estimate daily runoff production; this daily runoff production on each grid is then routed downstream to the basin outlet.

The CEQUEAU model is applied to the drainage basin of the Moisie river on the North shore of the Saint-Lawrence river. The Moisie river drainage basin covers an area of 19 248 km², and we have used square grids of 20 km by 20 km to model this basin which is oriented roughly north to south with a length of 320 km and a width of 70 km.

Climatic Normals for the 1951-1980 period for the Sept Îles and Wabush Lake climate stations are used to calculate the coefficients of the Thornthwaite formula for the present conditions.

Daily temperatures and precipitation for the Sept Îles and Wabush Lake climate stations are then used as input to the CEQUEAU model, to calculate the flows for the 1966-1989 period. Even if calculations of flows have been made on a daily scale monthly values are used for the analysis of results. Table 1 presents a comparison of monthly and annual observed and calculated runoff for this period and show that the model satisfactorily reproduces the observed flows; the annual difference is only - 1.2 % while monthly differences vary from - 7 % to + 6 %.

Monthly flows (fig. 4) adequately represent the annual cycle and there is no important under or over estimation of mean monthly values. Frequency analysis of all monthly flows (fig. 5) show that the observed sequence is adequately simulated even for extreme values. The coefficient of correlation between annual observed and calculated flows is 0.88 and the error of estimation of calculated values is only 48 mm.

Monthly changes in temperature and precipitation as output by the Canadian GCM under a 2 x CO₂ scenario are then used to simulate daily flows under changed climate conditions. The values at the grid points of the GCM are interpolated to the Sept-Îles and Wabush Lake Stations.

Climate normals for the two stations, table 2, are first modified by these monthly changes in precipitation and temperature to reflect new conditions for the application of the Thornthwaite formula under a 2 x CO₂ scenario. Then daily temperature and precipitation values for the 1966-1989 period are modified by these monthly changes and used as input to the CEQUEAU model. The hydrologic results of this 2 x CO₂ scenario are presented in table 3 and figures 7 to 10. White annual runoff is reduced by only about 5 %, monthly values show much larger variations.

Figure 7 and table 3 present a comparison of average monthly flows under present and the 2 x CO₂ scenario. Winter flows are significantly increased (from 19 % to 210 %) due to much more frequent snow melts in the beginning and end of winter, and winter low flows are significantly higher. The monthly spring flow is about the same (fig. 7), but is concentrated in a shorter period. Summer flows (June to October) decrease by 25 % to 40 % due to increase in temperature and therefore evapotranspiration but are still higher than winter flows.

Figure 8 shows the coefficients of variation of monthly flows. Like mentioned previously one notices a significant increase for winter months (December to March), due to more frequent snow melts, while for the month of April the coefficient of variation is significantly reduced. For the summer months (May to October) the variation does not change very much.

Probability distribution of simulated annual flows (fig. 9) show that for wet years the probability of occurrence does not change significantly, while for dry years, i.e. runoff of about 600 mm, corresponding to the driest years in the 1966-1989 period, the probability of not exceedance goes from 0, 12 to 0,28; i.e. the years of low runoff will happen much more frequently.

For summer months the situation will be different as it is the wet years that will be more affected by changes in temperature; as an example for the month of August (fig. 10) the probability of occurrences of dry years will not change as drastically as the frequency of wet years; increases in temperature and therefore possible evapotranspiration, will have no effect if no sufficient soil moisture is available.

Impacts de changements climatiques sur le régime hydrologique : le cas de la rivière Moisie

Impacts of climatic changes
on the hydrological regime :
Moisie river case

G. MORIN¹, M. SLIVITZKY

Reçu le 29 avril 1991, accepté pour publication le 14 janvier 1992*.

SUMMARY

The output of the Canadian Climate Center (CCC) General Circulation Model (GCM), coupled with the hydrologic deterministic model CEQUEAU is used to evaluate the possible impact of a doubling of atmospheric CO₂ on the hydrologic regime of the Moisie river on the North Shore of the St Lawrence.

In regions where snow plays an important contribution to the annual runoff and the ground is covered with snow for periods from 4 to 6 months, the seasonal variations of climatic changes under a 2 x CO₂ scenario may have very different impact on hydrologic regimes; Figures 1 and 3 show the annual and winter distributions of temperature changes for Quebec under the CCC 2 x CO₂ scenarios, while figure 2 shows the possible changes in annual precipitation. The annual temperature will increase around 4 to 5° C, while winter temperatures may increase as much as 6 to 9° C; annual precipitation will increase by 15 % to 20 %.

The CEQUEAU hydrologic model (MORIN *et al.*, 1981; MORIN et COUILLARD, 1990) is a deterministic model which takes into account number of physiographic characteristics of the drainage basin (such as elevation and percent of forest and lake area) as defined in number of square grids. The model uses for input daily minimum and maximum temperatures and daily solid and liquid precipitation (rainfall and snowfall). As such meteorological information is usually available for a limited number of stations, the values are interpolated to each grid element of the drainage basin.

The CEQUEAU deterministic model uses the degree-days method (CORPS OF ENGINEERS, 1960) to estimate daily snowmelt under forest canopy and in the open and Thornthwaite equation to calculate daily evapotranspiration, for each square grid of the basin. Daily water budget, using linear reservoir storage for soil moisture and ground water storage is then used on each square grid

1. INRS-Eau, 2800, rue Einstein, suite 105, Québec (Québec), G1X 4N8.

*. Les commentaires seront reçus jusqu'au 30 décembre 1992.

element, to estimate daily runoff production ; this daily runoff production on each grid is then routed downstream to the basin outlet.

The CEQUEAU model is applied to the drainage basin of the Moisie river on the North shore of the Saint-Lawrence river. The Moisie river drainage basin covers an area of 19 248 km², and we have used square grids of 20 km by 20 km to model this basin which is oriented roughly north to south with a length of 320 km and a width of 70 km.

Climatic Normals for the 1951-1980 period for the Sept Iles and Wabush Lake climate stations are used to calculate the coefficients of the Thornthwaite formula for the present conditions.

Daily temperatures and precipitation for the Sept Iles and Wabush Lake climate stations are then used as input to the CEQUEAU model, to calculate the flows for the 1966-1989 period. Even if calculations of flows have been made on a daily scale monthly values are used for the analysis of results. Table 1 presents a comparison of monthly and annual observed and calculated runoff for this period and show that the model satisfactorily reproduces the observed flows ; the annual difference is only - 1.2 % while monthly differences vary from - 7 % to + 6 %.

Monthly flows (*fig. 4*) adequately represent the annual cycle and there is no important under or over estimation of mean monthly values. Frequency analysis of all monthly flows (*fig. 5*) show that the observed sequence is adequately simulated even for extreme values. The coefficient of correlation between annual observed and calculated flows is 0.88 and the error of estimation of calculated values is only 48 mm.

Monthly changes in temperature and precipitation as output by the Canadian GCM under a 2 x CO₂ scenario are then used to simulate daily flows under changed climate conditions. The values at the grid points of the GCM are interpolated to the Sept-Iles and Wabush Lake Stations.

Climate normals for the two stations, table 2, are first modified by these monthly changes in precipitation and temperature to reflect new conditions for the application of the Thornthwaite formula under a 2 x CO₂ scenario. Then daily temperature and precipitation values for the 1966-1989 period are modified by these monthly changes and used as input to the CEQUEAU model.

The hydrologic results of this 2 x CO₂ scenario are presented in table 3 and figures 7 to 10. While annual runoff is reduced by only about 5 %, monthly values show much larger variations.

Figure 7 and table 3 present a comparison of average monthly flows under present and the 2 x CO₂ scenario. Winter flows are significantly increased (from 19 % to 210 %) due to much more frequent snow melts in the beginning and end of winter, and winter low flows are significantly higher. The monthly spring flow is about the same (*fig. 7*), but is concentrated in a shorter period. Summer flows (June to October) decrease by 25 % to 40 % due to increase in temperature and therefore evapotranspiration but are still higher than winter flows.

Figure 8 shows the coefficients of variation of monthly flows. Like mentioned previously one notices a significant increase for winter months (December to March), due to more frequent snow melts, while for the month of April the coefficient of variation is significantly reduced. For the summer months (May to October) the variation does not change very much.

Probability distribution of simulated annual flows (*fig. 9*) show that for wet years the probability of occurrence does not change significantly, while for dry

years, i.e. runoff of about 600 mm, corresponding to the driest years in the 1966-1989 period, the probability of not exceedence goes from 0,12 to 0,28 ; i.e. the years of low runoff will happen much more frequently.

For summer months the situation will be different as it is the wet years that will be more affected by changes in temperature ; as an example for the month of August (*fig. 10*) the probability of occurrences of dry years will not change as drastically as the frequency of wet years ; increases in temperature and therefore possible evapotranspiration, will have no effect if no sufficient soil moisture is available.

Key-words : *impacts, climatic variation, hydrology, $2xCO_2$, model, Moisie, Québec.*

RÉSUMÉ

Les résultats du modèle de circulation générale (MCG) à haute résolution du Centre climatologique canadien (CCC) sont utilisés pour estimer l'ampleur des impacts d'éventuels changements climatiques sur le régime hydrologique d'une rivière de la côte nord du Saint-Laurent.

Pour le Québec, le MCG du CCC prévoit des augmentations annuelles de l'ordre de 0 à 15 % pour les précipitations et de 4 à 5° C pour les températures, tandis que les variations saisonnières seraient beaucoup plus importantes, les températures hivernales (décembre à février) augmentant de 6 à 9° C et les précipitations 15 à 20 %.

Le modèle hydrologique CEQUEAU est appliqué au bassin versant de la rivière Moisie, pour simuler les débits dans le contexte climatique actuel et dans ce nouveau contexte climatique. Pour ce bassin versant, les précipitations annuelles seraient pratiquement inchangées alors que les températures annuelles augmenteraient de 4° C.

En appliquant, aux 24 dernières années (1986-1989), les changements mensuels de précipitation et température découlant du MCG, le débit annuel moyen serait réduit d'environ 5 % et l'écart-type augmenterait de 15 %. La probabilité des années humides serait pratiquement inchangée alors que pour les années les plus sèches enregistrées au cours de ces 25 dernières années soit 600 mm, la probabilité de non dépassement dans ce nouveau contexte climatique passerait de 0,12 à 0,28 ; les débits annuels, d'occurrence décennale, diminueraient d'environ 10 %.

On assisterait à une modification plus importante dans la distribution mensuelle des écoulements. Les débits moyens des mois d'été (juillet à septembre) seraient réduits d'environ 35 % tandis que pour les mois d'hiver les écoulements moyens seraient plus soutenus.

Mots clés : *impact, changement climatique, hydrologie, $2 \times CO_2$, modèle, Moisie, Québec.*

INTRODUCTION

L'utilisation de modèles hydrologiques déterministes couplés aux résultats des modèles atmosphériques de circulation générale (MCG) offrent des nombreux avantages pour évaluer les changements du régime hydrologique suite à un doublement dans la concentration de CO_2 (IPCC, 1990b). Cette approche permet entre autres, d'évaluer la sensibilité des bassins hydrologiques à la modification des caractéristiques climatiques lorsque des prévisions régionales sont disponibles.

Ces méthodes ont été appliquées récemment avec succès au bassin des Grands Lacs du Bouclier canadien (COHEN, 1986, 1987 ; CROLEY, 1990 ; HARTMANN, 1990 ; CROLEY et HARTMANN, 1989). Cependant la faible résolution spatiale des MCG utilisés limitait l'application de telles méthodes à des bassins de grandes dimensions.

Par ailleurs dans les régions où le régime nival est prépondérant, une connaissance des changements climatiques à l'échelle annuelle seulement ne permet pas d'évaluer les impacts sur les régimes hydrologiques. En effet lorsque la fonte du couvert nival contribue pour une part importante à l'écoulement annuel, des changements saisonniers différents des températures et des précipitations, peuvent entraîner des modifications totalement différents du régime hydrologique. Il devient donc important d'examiner l'impact sur le régime hydrologique des changements intra-annuels des caractéristiques climatiques.

L'arrivée de MCG à haute résolution spatiale, fournissant des estimations des changements climatiques mensuels et saisonniers, et l'utilisation de modèles hydrologiques déterministes permettent maintenant d'améliorer nos estimations des impacts hydrologiques. Il faut souligner cependant que ces estimations hydrologiques saisonnières vont toujours demeurer très dépendantes de la précision des changements climatiques saisonniers et régionaux fournis par les modèles de circulation générale.

MATÉRIEL ET MÉTHODES

Les modèles de circulation générale (MCG)

Différents modèles de circulation générale ont été utilisés jusqu'à maintenant dans les études hydrologiques nord-américaines mentionnées précédemment (COHEN, 1986 ; CROLEY et HARTMANN, 1989). En particulier, pour les études sur les Grands Lacs du Bouclier canadien, les résultats du modèle GISS du « Goddar Institute for Space Science » avec une résolution horizontale de $8^\circ \times 10^\circ$ (latitude-longitude) et du modèle GFDL du « Geophysical Fluid Laboratory » avec une résolution de $5^\circ \times 8^\circ$ ont servi de base pour les modèles hydrologiques (IPCC, 1990a).

Le MCG à haute résolution du Centre climatologique canadien (CCC) (IPCC, 1990a ; CCC, 1990), avec une résolution de $3,75^\circ \times 3,75^\circ$ (latitude-longitude) et dont les résultats ne sont disponibles que depuis 1990, permet d'obtenir une meilleure approximation des variations régionales des modifications climatiques.

Nous avons donc décidé, pour cette étude, d'utiliser les résultats les plus récents, qui permettent une meilleure évaluation de l'impact sur le Québec d'un doublement de concentration de CO_2 . Les figures 1 et 2 présentent les différences de température et de précipitation annuelle pour le Québec dans le cas de doublement dans la concentration de CO_2 . L'augmentation de la température annuelle serait de l'ordre de 4°C à 5°C (fig. 1) alors que les précipitations annuelles (fig. 2) augmenteraient de 5 % à 15 %.

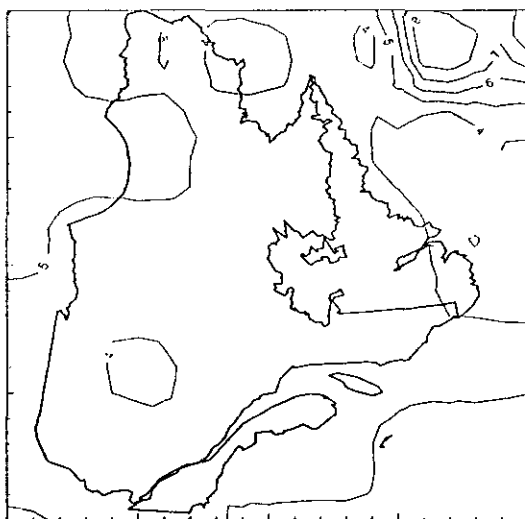


Figure 1 Différence de température annuelle (en $^\circ \text{C}$) pour $2 \times \text{CO}_2$ par rapport à $1 \times \text{CO}_2$ telle que calculée par le modèle de circulation générale du Centre climatologique canadien, pour la province de Québec.

Annual temperature difference ($^\circ \text{C}$) between $2 \times \text{CO}_2$ and $1 \times \text{CO}_2$ as calculated by the Canadian Climate Centre General Circulation model, for the province of Quebec.

Toutefois les changements saisonniers seraient beaucoup plus importants. A titre d'indication dans la figure 3, nous présentons les variations des températures hivernales (décembre à février) qui augmenteraient de 5°C à 10°C pour le Québec. Pour cette même saison, les précipitations augmenteraient de 5 % à 20 %, alors que pour l'été (juin à août) on observerait une augmentation moyenne de 3°C à 4°C pour les températures et de 0 % à 10 % pour les précipitations.

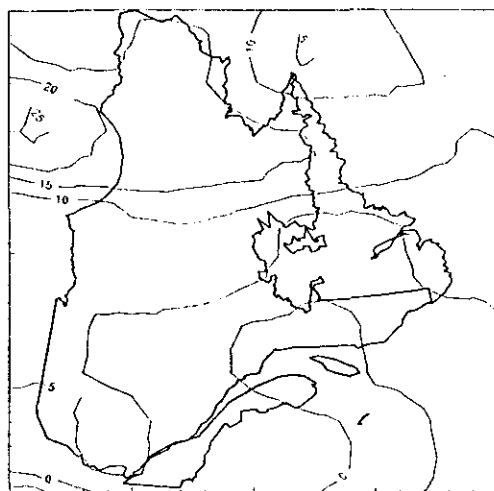


Figure 2 Différence de précipitation annuelle (en %) pour $2 \times \text{CO}_2$ par rapport à $1 \times \text{CO}_2$ telle que calculée par le modèle de circulation générale du Centre climatologique canadien, pour la province de Québec.

Annual precipitation difference (%) between $2 \times \text{CO}_2$ and $1 \times \text{CO}_2$ as calculated by the Canadian Climate Centre General circulation model, for the province of Québec.

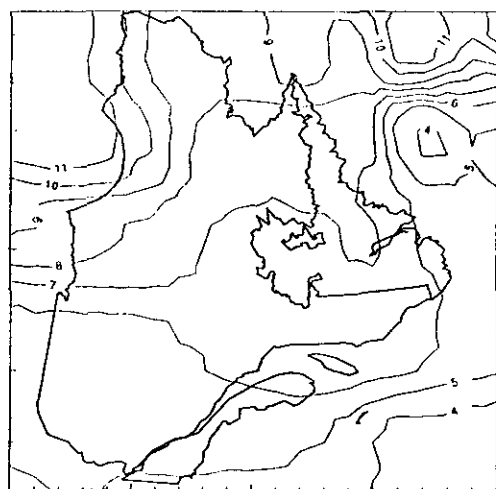


Figure 3 Différence de température (en °C) pour l'hiver (décembre à février) pour $2 \times \text{CO}_2$ par rapport à $1 \times \text{CO}_2$ telle que calculée par le modèle de circulation générale du Centre climatologique canadien, pour la province de Québec.

Winter (December to February) temperature differences (°C) between $2 \times \text{CO}_2$ and $1 \times \text{CO}_2$ as calculated by the Canadian Climate Centre General circulation model, for the province of Québec.

Le modèle hydrologique CEQUEAU

Le modèle hydrologique CEQUEAU développé à l'INRS-Eau (MORIN *et al.*, 1981 ; MORIN et COUILLARD, 1990) est un modèle conceptuel à bilan qui prend en compte les caractéristiques physiques du bassin versant par le découpage de celui-ci en éléments appelés « carreaux ». La dimension de chaque « carreau » dépend de la superficie du bassin versant étudié, de sa topographie et du nombre de stations météorologiques disponibles. Pour chaque « carreau » les caractéristiques physiographiques (altitude, % forêt, % lac, % marais) nécessaires pour effectuer le bilan hydrologique sont évaluées. Un deuxième découpage de chaque « carreau » est ensuite nécessaire pour reproduire le cheminement de l'eau dans le réseau hydrographique. A cette fin, on subdivise chaque « carreau » en « carreaux partiels » à l'aide des lignes de partage des eaux des sous-bassins. La seule caractéristique physique liée au « carreau partiel » est sa superficie exprimée en pourcentage du « carreau » et la direction de l'écoulement.

En plus des données physiographiques décrivant le bassin, le modèle requiert, pour les simulations, les données journalières des précipitations liquides et solides ainsi que les températures maximales et minimales de l'air sur chacun des « carreaux ». Ces données n'étant disponibles qu'à un nombre limité de stations, le modèle permet différentes options d'interpolation, qui sont : la régression, la pondération en fonction des deux ou trois stations voisines ou le polygone de Thiessen.

Le modèle CEQUEAU comporte deux parties principales visant à décrire le mieux possible la production et le cheminement de l'eau vers l'exutoire du bassin versant. La première partie, soit la « fonction de production », concerne l'écoulement vertical de l'eau et a pour but d'effectuer sur chaque « carreau » le bilan de l'eau dans le sol, les lacs et les marécages. Elle représente de manière simple mais réaliste les différents processus que suivra l'eau atmosphérique entre le moment où elle atteint le sol et celui où elle rejoint la rivière. Ces processus sont schématisés dans le modèle CEQUEAU par la représentation du sol sous forme de réservoirs communiquant entre eux. Les différents transferts de masse sont estimés par des relations mathématiques dont les paramètres sont déterminés lors de la calibration du modèle.

L'origine de l'alimentation en eau atmosphérique du bassin versant est la pluie ou la fonte de neige. Les équations de base du calcul de la fonte potentielle de neige sont tirées du rapport « Runoff from Snowmelt » du Corps d'ingénieurs de l'armée américaine (CORPS OF ENGINEERS, 1960) et utilisent une méthode simple de degré-jour. Pour estimer la fonte réelle, le modèle effectue le bilan des stocks de neige sur chaque « carreau » séparé en deux parties : une partie forêt et une partie découverte. Le modèle tient compte également de deux phénomènes qui retardent la disponibilité de l'eau de fonte soit : le réchauffement et le mûrissement du stock de neige.

L'évapotranspiration potentielle journalière est calculée par la formule de Thornthwaite modifiée pour tenir compte de la durée potentielle d'ensoleillement en fonction de la latitude et du jour de l'année. L'évapotranspiration réelle au-dessus de la partie terrestre est calculée sur chaque « carreau » en

fonction de la disponibilité de l'eau dans le sol. L'évapotranspiration se fait à taux potentiel si la disponibilité de l'eau dans le sol dépasse un certain seuil, dans le cas contraire l'évapotranspiration diminue linéairement en fonction de la baisse des réserves d'eau dans le sol.

La seconde partie, qu'on appelle « fonction de transfert », concerne l'écoulement dans le réseau de drainage et a pour but d'effectuer sur chaque « carreau partiel » le transfert de l'eau en rivière et de tenir compte, s'il y a lieu, des lacs et des ouvrages de régularisation. Le transfert en rivière est estimé en utilisant un coefficient qui représente le volume d'eau qui s'écoule d'un « carreau » à un autre pour un pas de temps donné. Ce coefficient tient compte de la capacité d'amortir la crue par emmagasinement dans le cours d'eau et est calculé pour chaque « carreau partiel », en tenant compte de la superficie de la rivière et des lacs, s'ils sont situés sur le réseau hydrographique, et de la superficie du bassin versant en amont.

La discrétisation spatiale du bassin versant, le calcul de la production sur chaque « carreau » et le cheminement de l'eau d'un « carreau partiel » à l'autre permettent d'estimer les débits à n'importe quel point du réseau hydrographique, de suivre l'évolution spatio-temporelle des phénomènes, de prévoir l'effet de modifications physiques du bassin versant et de prendre en compte les aménagements réels ou prévus.

Durant la dernière décennie, plusieurs applications sur des rivières du Québec, de la France et de l'Algérie ont été faites. Ces applications ont concerné des bassins versants variant de 5 km² à 100 000 km² avec des « carreaux » variant de 0,25 km² à 900 km². Récemment dans le cadre de l'inter-comparaison des modèles hydrologiques parrainée par l'Organisation Météorologique Mondiale, le modèle CEQUEAU a été l'un des onze modèles testés sur six rivières de six pays différents (WMO, 1986).

Application au bassin versant de la rivière Moisie

La rivière Moisie située sur la basse Côte-Nord du Saint-Laurent a un bassin versant d'une superficie de 19 248 km² orienté nord-sud. Nous avons utilisé des « carreaux » de 20 km par 20 km pour la discrétisation du bassin versant qui s'étend sur une longueur de 320 km et qui a largeur moyenne d'environ 70 km. Nous avons utilisé les données météorologiques des stations Sept-Iles, située au sud du bassin versant, et de Wabush, située au nord du bassin versant. La calibration du modèle a été faite pour la période 1966 à 1989 en utilisant les débits mesurés à l'aval de la rivière Moisie près de Sept-Iles.

Une attention particulière a été portée à l'ajustement des paramètres d'évapotranspiration pour en faciliter l'estimation avant et après les changements climatiques. Ainsi pour les simulations des conditions actuelles l'exposant et l'index de la formule de Thornthwaite ont été calculés en utilisant, pour les stations Sept-Iles et Wabush, les températures mensuelles normales pour la période 1951 à 1980 (SEA, 1981a, 1981b). Pour les conditions prévalant après les modifications climatiques, nous avons utilisé ces mêmes valeurs normales modifiées pour tenir compte des changements prévus par le modèle de circulation générale du Centre climatologique canadien.

RÉSULTATS ET DISCUSSIONS

Analyse des résultats

Calage et validation du modèle CEQUEAU

Même si les simulations pour les conditions naturelles et modifiées ont été faites à l'échelle journalière l'analyse des résultats est faite à l'échelle mensuelle et annuelle seulement. Le tableau 1 donne les lames moyennes mensuelles et annuelle observées et calculées par le modèle hydrologique pour la période 1966 à 1989. La comparaison des lames d'écoulements observées et calculées montre une différence de l'ordre de $-1,2\%$ pour la lame annuelle et des différences variant entre -7% et 6% pour les lames mensuelles.

Tableau 1 Lame moyenne mensuelle et annuelle pour la période de 1966 à 1989 observées et calculées pour les conditions actuelles de la rivière Moisie.

Table 1 *Annual and monthly runoff of the Moisie river in it's actual state, observed and calculated for the 1966-1989 period*

Mois	Observées	Conditions actuelles		
		Calculées	Différence	
	mm	mm	mm	%
Janvier	18,6	18,4	-0,2	-1,1
Février	14,0	13,1	-0,9	-6,4
Mars	13,6	12,6	-1,0	-7,3
Avril	27,4	28,2	0,8	2,9
Mai	166,6	166,3	-0,3	-0,2
Juin	149,0	147,2	-1,8	-1,2
Juillet	70,4	74,8	4,4	6,2
Août	57,5	54,5	-3,0	-5,2
Septembre	60,5	57,4	-3,1	-5,1
Octobre	67,3	65,7	-1,6	-2,4
Novembre	47,9	48,0	0,1	0,2
Décembre	29,8	28,6	-1,2	-4,0
Année	723,4	714,8	-8,6	-1,2

Les lames mensuelles moyennes calculées (*fig. 4*) reproduisent bien le cycle annuel observé et il n'y a pas de sur ou sous-estimation importante des valeurs moyennes mensuelles. Les courbes des débits moyens mensuels classés (*fig. 5*) montrent une bonne similitude entre les valeurs observées et calculées aussi bien pour les débits faibles que pour les débits élevés. La figure 6 montre que les lames annuelles calculées pour les années 1966 à 1989 se comparent bien aux lames observées. Il n'y a pas d'erreur systématique puisque les points sont situés de part et d'autre de la ligne à 45° . Le coefficient de corrélation entre les débits annuels observés et calculés est de 0,88 et l'erreur d'estimation des débits calculés est de l'ordre de 48 mm. L'analyse de ces résultats montre que le modèle hydrologique tel qu'ajusté permet de reproduire adéquatement les débits de la rivière Moisie, à partir des données météorologiques des stations Sept-Iles et Wabush.

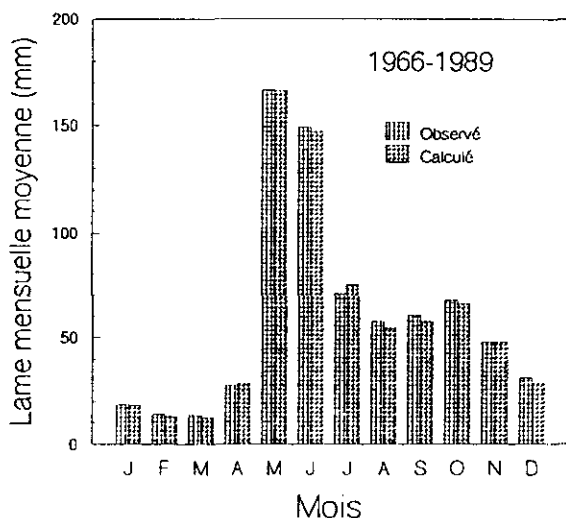


Figure 4 Lame moyenne mensuelle de la rivière Moisie observées et calculées par le modèle CEQUEAU pour la période 1966 à 1989.

Monthly mean runoff for the Moisie river, observed and calculated values with the CEQUEAU model, for the 1966-1989 period.

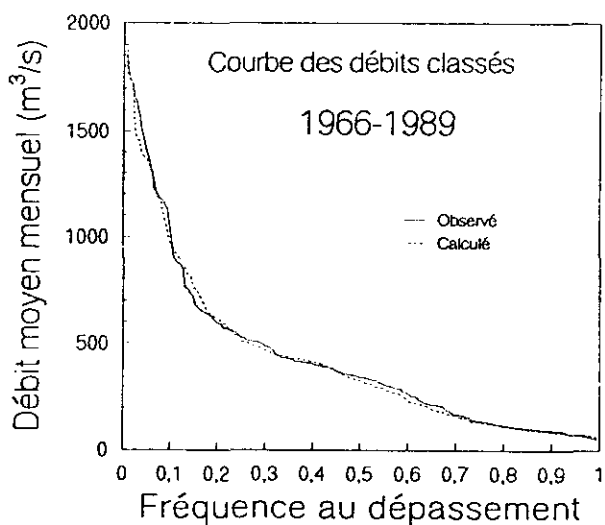


Figure 5 Comparaison des débits moyens mensuels classés de la rivière Moisie, observés et calculés par le modèle CEQUEAU pour la période 1966 à 1989.

Classified monthly mean flows for the Moisie river, observed and calculated values the CEQUEAU model, for the 1966-1989 period.

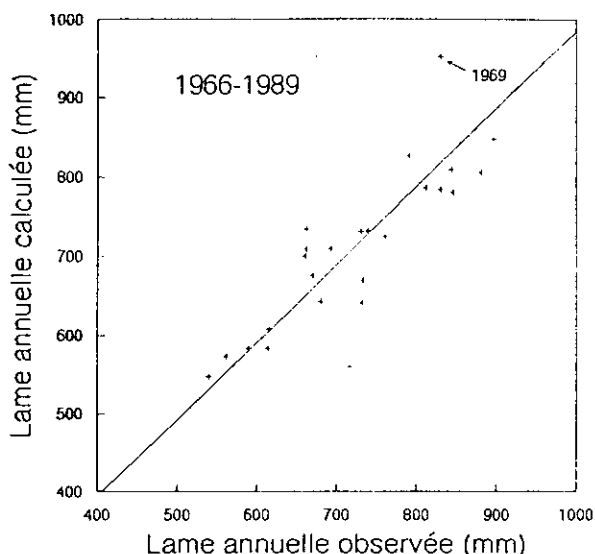


Figure 6 Lames annuelles de la rivière Moisie observées et calculées par le modèle CEQUEAU pour la période 1966 à 1989.

Annual mean runoff of the Moisie river, observed and calculated with the CEQUEAU model, for the 1966-1989 period.

Changement climatique

Le tableau 2 donne les normales climatiques de 1951 à 1980 (SAE 1981 a, b) qui ont été utilisées pour le calcul de l'index et de l'exposant de la formule de Thornthwaite. On retrouve également sur ce tableau les changements mensuels, des températures et des précipitations aux stations, Sept-Îles et Wabush, pour un scénario de $2 \times \text{CO}_2$. Ces changements aux stations météorologiques ont été estimés par interpolation entre les valeurs aux nœuds du modèle de circulation générale du Centre climatologique canadien. Suite à ces changements de températures et de précipitations, on obtient une estimation des débits de la rivière Moisie en introduisant dans le modèle hydrologique les nouvelles données météorologiques. Ainsi pour les simulations hydrologiques les données de précipitations journalières aux stations de Sept-Îles et de Wabush ont été modifiées du pourcentage des changements prévus pour le mois, alors que les températures journalières ont été modifiées en additionnant le changement prévu pour le mois. Les lames mensuelles et annuelle des écoulements simulés, correspondant à un scénario de $2 \times \text{CO}_2$, sont présentées au tableau 3.

Si on compare les lames mensuelles et annuelle simulées pour un scénario de $2 \times \text{CO}_2$ et les lames calculées pour les conditions actuelles, on observe que la lame moyenne annuelle est réduite de 5 % seulement. Par contre on observe une plus grande variation des lames mensuelles.

Les lames moyennes mensuelles calculées pour les conditions naturelles et simulées avec les données météorologiques estimées pour un scénario de

Tableau 2 Modifications des températures et précipitations mensuelles aux stations Sept-Iles et Wabush estimées à l'aide des résultats du modèle de circulation générale du Centre climatologique canadien.

Table 2 Monthly modifications of temperatures and precipitations at the Sept-Iles and Wabush stations, estimated by the Canadian Climate Centre General circulation model.

Mois	Températures				Précipitations			
	Normales (° C)		Différence (° C) pour 2 x CO ₂		Normales (mm)		Différence (%) pour 2 x CO ₂	
	Sept-Iles	Wabush	Sept-Iles	Wabush	Sept-Iles	Wabush	Sept-Iles	Wabush
Janvier	-14,0	-22,3	7,7	6,6	95,5	65,1	8,9	7,1
Février	-12,5	-20,8	7,4	5,9	79,5	48,2	22,7	27,1
Mars	-6,6	-13,8	5,3	4,5	82,8	56,8	5,5	-4,2
Avril	0,0	-5,6	2,4	2,3	78,4	52,5	-5,8	18,1
Mai	5,9	2,7	4,1	3,3	84,0	59,7	14,0	29,8
Juin	11,7	10,1	4,1	5,4	90,2	83,7	5,1	9,1
Juillet	15,2	13,5	3,5	4,0	97,0	105,8	-22,7	-0,2
Août	14,1	11,8	3,3	3,5	104,1	94,3	-1,0	-7,9
Septembre	9,3	6,2	3,6	3,5	112,2	94,0	3,5	-9,9
Octobre	3,6	-0,7	2,7	2,1	96,5	84,8	-24,2	-10,5
Novembre	-2,5	-8,1	1,7	1,3	100,1	76,8	-2,0	-3,2
Décembre	-11,0	-11,0	4,4	7,7	104,6	73,0	-2,5	19,8
Année	1,1	-3,8	4,2	4,2	1 124,9	894,7	-1,5	3,7

Tableau 3 Lame moyenne mensuelle et annuelle pour la période de 1966 à 1989 calculées pour les conditions actuelles de la rivière Moisie et avec modification des températures et précipitations estimées pour 2 x CO₂.

Table 3 Annual and monthly runoff of Moisie river in it's actual state, for the 1966-1989 period, calculated with modifications of the temperature and precipitations estimated for 2 x CO₂.

Mois	Conditions actuelles		Scénario 2 x CO ₂	
	Calculées	Simulées	Différence*	
	mm	mm	mm	%
Janvier	18,4	23,8	-5,4	-29,3
Février	13,1	24,7	11,6	88,5
Mars	12,6	39,1	26,5	210,3
Avril	28,2	77,4	49,2	174,5
Mai	166,3	170,3	4,0	2,4
Juin	147,2	85,4	-61,8	-42,0
Juillet	74,8	52,0	-22,8	-30,5
Août	54,5	36,2	-18,3	-33,6
Septembre	57,4	42,5	-14,9	-26,0
Octobre	65,7	49,4	-16,3	-24,8
Novembre	48,0	43,9	-4,1	-8,5
Décembre	28,6	34,1	5,5	19,2
Année	714,8	678,8	-36,0	-5,0

* La différence est estimée par rapport aux débits calculés par le modèle hydrologique.

2 x CO₂ sont montrées à la figure 7. On observe sur cette figure que pour un scénario de 2 x CO₂ la crue de fonte de neige a lieu un peu plus tôt que la crue actuelle mais est du même ordre de grandeur. Les étiages d'hiver sont beaucoup moins faibles que ceux calculés pour les conditions naturelles. Pour les mois de décembre à avril on observe des augmentations d'écoulements variant de 19 à 210 %. Cette augmentation s'explique par l'occurrence de fontes partielles en période hivernale suite au réchauffement de la température de l'air. Les étiages d'été sont plus prononcés et les lames écoulées sont légèrement supérieures aux lames écoulées durant les mois d'hiver. Pour les mois d'été, soit juin à octobre, on observe une diminution des lames écoulées de 24 à 42 % causée par l'augmentation de l'évapotranspiration.

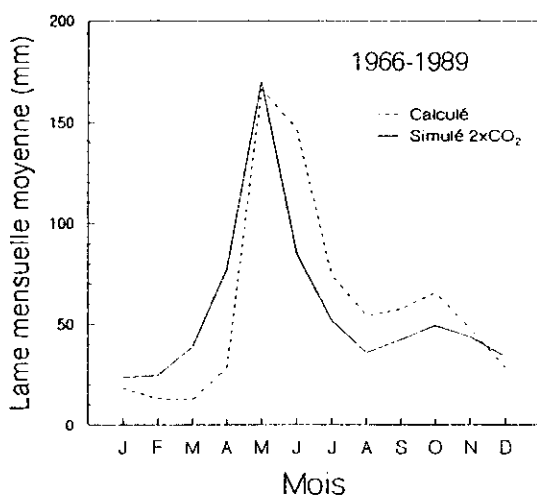


Figure 7 Lame moyenne mensuelle de la rivière Moisie calculées (1 x CO₂) et simulées (2 x CO₂) par le modèle CEQUEAU pour la période 1966 à 1989.

Monthly mean runoff of the Moisie river, calculated (1 x CO₂) and simulated (2 x CO₂) with the CEQUEAU model, for the 1966-1989 period.

La figure 8 montre les coefficients de variation des lames mensuelles écoulées pour les conditions actuelles et pour un scénario de 2 x CO₂. Pour les mois d'été les coefficients de variation changent peu par contre on observe une variation importante pour les mois d'hiver. Pour un scénario de 2 x CO₂ les coefficients de variation des mois de janvier, février et mars sont beaucoup plus élevés alors qu'on observe une baisse importante pour le mois d'avril. L'augmentation des coefficients de variation des mois d'hiver s'explique par des fontes partielles qui se produisent tout au long de l'hiver. Étant donné ces fontes partielles au cours de l'hiver, la proportion de l'écoulement du mois d'avril, provenant de la fonte de neige, diminue et a pour effet de faire diminuer le coefficient de variation pour ce mois.

La figure 9 nous montre la distribution de probabilité ajustée aux lames annuelles calculées pour les conditions naturelles et simulées pour les conditions qui prévalent avec 2 x CO₂. On observe sur cette figure que la probabilité

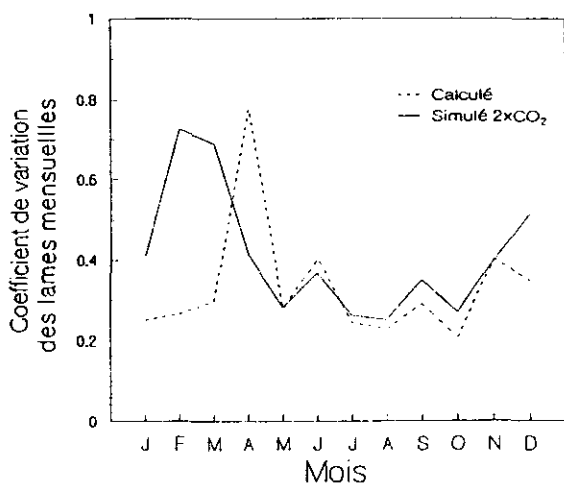


Figure 8 Coefficients de variations des lames mensuelles de la rivière Moisie calculées ($1 \times \text{CO}_2$) et simulées ($2 \times \text{CO}_2$) par le modèle CEQUEAU pour la période 1966 à 1989.

Variation coefficients of the monthly water depth of the Moisie river, calculated ($1 \times \text{CO}_2$) and simulated ($2 \times \text{CO}_2$) with the CEQUEAU model, for the 1966-1989 period.

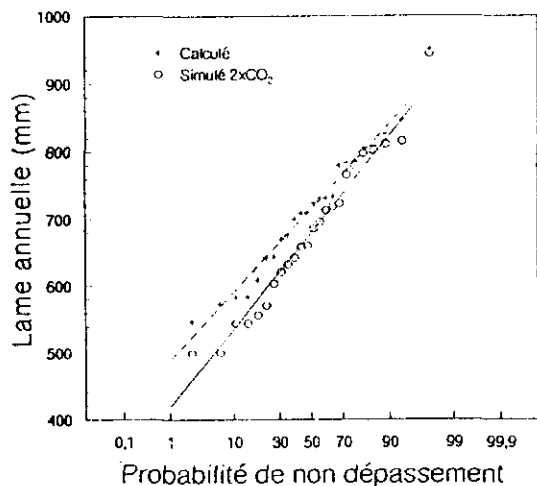


Figure 9 Probabilité de non dépassement des lames annuelles de la rivière Moisie calculées ($1 \times \text{CO}_2$) et simulées ($2 \times \text{CO}_2$) par le modèle CEQUEAU pour la période 1966 à 1989.

Cumulative probability of the annual runoff of the Moisie river, calculated ($1 \times \text{CO}_2$) and simulated ($2 \times \text{CO}_2$) with the CEQUEAU model, for the 1966-1989 period.

des années humides serait pratiquement inchangée alors que pour une lame de l'ordre de 600 mm, correspondant aux années les plus sèches enregistrées durant la période 1966-1989, la probabilité de non dépassement passerait de 0,12 à 0,28. Les débits annuels d'occurrence décennale diminueraient environ 10 %.

La figure 10 montre la distribution de probabilité pour les lames mensuelles du mois d'août. Dans ce cas on observe un phénomène inverse c'est-à-dire que les lames mensuelles élevées sont celles qui baisseraient le plus. Pour une probabilité de non dépassement de 0,90 la lame mensuelle d'août baisserait de 22 mm soit de 70 mm à 48 mm. Pour une probabilité de non dépassement de 0,1 la lame passerait de 38 mm à 24 mm pour une baisse de 14 mm. La diminution moins importante pour les lames faibles s'explique par le fait qu'en période de sécheresse, l'évapotranspiration n'augmente pas même s'il y a augmentation de la température de l'air.

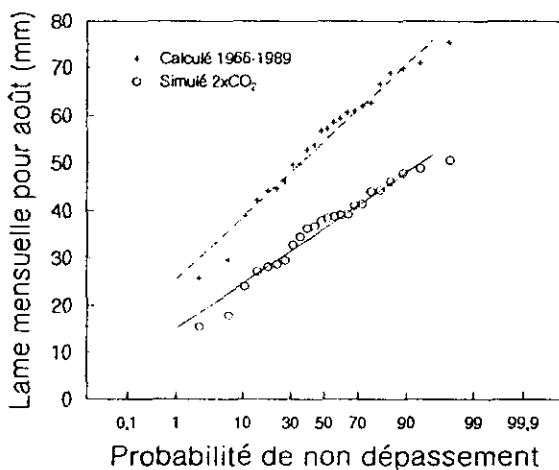


Figure 10 Probabilité de non dépassement des lames mensuelles du mois d'août de la rivière Moisie calculées ($1 \times \text{CO}_2$) et simulées ($2 \times \text{CO}_2$) par le modèle CEQUEAU pour la période 1966 à 1989.

Cumulative probability of the runoff of the Moisie river for the month of August, calculated ($1 \times \text{CO}_2$) and simulated ($2 \times \text{CO}_2$) with the CEQUEAU model, for the 1966-1989 period.

CONCLUSION

Les simulations montrent, qu'avec les conditions climatiques qui prévalent pour un scénario de $2 \times \text{CO}_2$, les débits de la rivière Moisie subissent des changements significatifs par rapport aux conditions actuelles. Même si la

baisse moyenne annuelle n'est que de 5 % on observe que la baisse va jusqu'à 10 % pour les années les plus faibles. Au niveau mensuel on observe une augmentation importante des lames écoulées durant les mois d'hiver et une diminution des écoulements durant les mois d'été. La crue de fonte de neige se produit plutôt au printemps mais reste du même ordre de grandeur que celle observée actuellement.

Les changements climatiques entraîneraient des modifications importantes de la distribution des écoulements dans l'année. Pour la période de fonte de neige (avril à juin) l'écoulement serait relativement peu modifié passant de 48 % à 49 %. Pour les mois d'hiver (novembre à mars) l'écoulement total passerait de 17 % à 24 % de la lame annuelle. Pour les mois d'été (juillet à octobre) la lame écoulee passerait de 35 % à 26 %.

Etant donné les variations régionales des changements climatiques, les modifications du régime hydrologique observées sur la rivière Moisie pour un scénario de $2 \times \text{CO}_2$ ne peuvent pas être transposées directement sur les rivières d'autres régions. Pour quantifier l'impact du réchauffement sur l'ensemble des rivières du Québec il serait nécessaire de faire la même étude sur quelques rivières choisies dans différentes régions où les caractéristiques climatiques et hydrologiques seraient différentes.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- CCC, 1990. *Application of the canadian climate center general circulation model output for regional climate impact studies – Guidelines for users*, Canadian Climate Center, Atmospheric Environment Service, Downsview, Canada.
- COHEN S.J., 1986. Impacts of CO_2 -induced climatic change on water resources in the Great Lakes Basin. *Climatic Change*, 8 : 135-153.
- COHEN S.J., 1987. Sensitivity of water resources in the Great Lakes region to changes in temperature, precipitation, humidity and wind speed, in *The influence of climate change and climatic variability on the hydrologic regime and water resources*, S.I. Solomon, M. Beran, and W. Hoggs, Eds, International Association of Hydrologic Sciences, Publication n° 168, p. 489-500, Wallingford, Berkshire, UK.
- CORPS OF ENGINEERS U.S. ARMY, 1960. *Runoff from snowmelt*. EM 1 110-2-1 406.
- CROLEY II, T.E., HARTMANN H.C., 1989. Effects of climate change on the Laurentian Great lakes levels, in *The potential effects of global climate change on the United States. Report to Congress*, J.B. Smith and D.A. Tirpak, Eds, U.S. Environmental Protection Agency, Appendix A : Water Resources, p. 4 : 1-34.
- CROLEY II, T.E., 1990. Laurentian Great Lakes Double- CO_2 climate change hydrological impacts. *Climatic Change*, 17 : 27-47.
- HARTMANN H.C., 1990. Climate change impacts on Laurentian Great Lakes levels. *Climatic Change*, 17 : 49-67.
- IPCC, 1990a. *Climate Change : The IPCC Scientific Assessment*, WMO/UNEP, Intergovernmental Panel on Climate Change, Cambridge University Press, Cambridge.
- IPCC, 1990b. *Incidences potentielles du changement climatique*, WMO/UNEP, Rapport du groupe de travail II au Groupe

- d'experts intergouvernemental pour l'étude du changement climatique, OMM, Genève.
- MORIN G., FORTIN J.-P., LARDEAU J.-P., SO-CHANSKA W., PAQUETTE S., 1981. *Modèle CEQUEAU : manuel d'utilisation*. INRS-Eau rapport scientifique n° 93, 449 p.
- MORIN G., COUILLARD D., 1990. Predicting River Temperatures with a Hydrological Model. *Encyclopedia of Fluid Mechanics Vol. 10 Surface and Groundwater Flow Phenomena*. Gulf Publishing Company, Houston, Texas.
- SAE, 1981a. *Normales climatiques du Canada, 1951-1980, Québec, Températures et précipitations*, Service de l'environnement atmosphérique, Downsview, Canada.
- SAE, 1981b. *Normales climatiques du Canada, 1951-1980, Provinces de l'Atlantique, Températures et précipitations*, Service de l'environnement atmosphérique, Downsview, Canada.
- WMO, 1986. *Intercomparison of models of snowmelt runoff*. Operational Hydrology Report n° 23, WMO, Publ. n° 646, WMO, Geneva, Switzerland.