

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC

MÉMOIRE PRÉSENTÉ À
L'UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À TROIS-RIVIÈRES

COMME EXIGENCE PARTIELLE
DE LA MAÎTRISE EN SCIENCES DE L'ENVIRONNEMENT

PAR
CATHERINE FORTIER

IMPACTS DU CHANGEMENT DE MODE DE GESTION DES BARRAGES
SUR LA VARIABILITÉ TEMPORELLE DES DÉBITS.
CAS DE LA RIVIÈRE MATAWIN

SEPTEMBRE 2010

Université du Québec à Trois-Rivières

Service de la bibliothèque

Avertissement

L'auteur de ce mémoire ou de cette thèse a autorisé l'Université du Québec à Trois-Rivières à diffuser, à des fins non lucratives, une copie de son mémoire ou de sa thèse.

Cette diffusion n'entraîne pas une renonciation de la part de l'auteur à ses droits de propriété intellectuelle, incluant le droit d'auteur, sur ce mémoire ou cette thèse. Notamment, la reproduction ou la publication de la totalité ou d'une partie importante de ce mémoire ou de cette thèse requiert son autorisation.

REMERCIEMENTS

Je voudrais particulièrement remercier mon directeur de recherche Monsieur Ali Assani pour son soutien pédagogique, ses nombreux conseils, sa présence, sa patience et pour le temps passé sur mon projet. Je suis honorée d'avoir fait partie de ce grand programme de recherche mis sur pied par Monsieur Assani et j'espère avoir contribué avec ce projet à comprendre une partie du grand système complexe que constitue la rivière Matawin et son bassin versant.

Je remercie les membres de mon comité d'orientation Monsieur Mhamed Mesfioui et Monsieur Jean-François Quessy de s'être impliqués à leur façon dans mon projet d'études.

Un merci également à mes collègues de maîtrise avec qui j'ai cheminé pendant les dernières années. Merci pour leur support, leurs commentaires toujours très appréciés et surtout pour leur amitié.

TABLE DES MATIÈRES

REMERCIEMENTS	ii
LISTE DES TABLEAUX.....	vi
LISTE DES FIGURES	vii
RÉSUMÉ DU PROJET	x
CHAPITRE I	
PRÉSENTATION DU PROJET D'ÉTUDE.....	1
1.1 INTRODUCTION	1
1.2 PROBLÉMATIQUE	2
1.3 MÉTHODOLOGIE.....	3
1.3.1 Justification du choix de la méthode d'analyse.....	3
1.3.2 Justification du choix du bassin versant de la rivière Matawin.....	4
1.3.3 Sources des données	5
1.3.4 Constitution des séries des caractéristiques des débits extrêmes	6
1.3.5 Variabilité de la magnitude des débits journaliers	7
1.3.6 Analyse statistique des données	8
1.4 RÉSULTATS	9
1.4.1 Comparaison de la variabilité interannuelle et interdécennale des caractéristiques des débits maximums saisonniers en amont et en aval du réservoir	9
1.4.2 Comparaison de la relation entre les caractéristiques des débits de fortes crues et les indices climatiques en amont et en aval du barrage	10
1.4.3 Variabilité temporelle des précipitations et des températures	10
1.4.4 Analyse des débits journaliers saisonniers	11

1.5 DISCUSSION ET CONCLUSION	12
BIBLIOGRAPHIE.....	18
CHAPITRE II	
COMPARISON OF THE INTERANNUAL AND INTERDECADAL VARIABILITY OF HEAVY FLOOD CHARACTERISTICS UPSTREAM AND DOWNSTREAM FROM MATAWIN DAM (QUÉBEC, CANADA) IN INVERSED HYDROLOGIC REGIME. CONTRIBUTION OF THE ECOLOGICAL CONCEPT OF “NATURAL FLOW REGIME”	21
RÉSUMÉ.....	22
ABSTRACT	23
2.1 INTRODUCTION	25
2.2 METHODOLOGY	27
2.2.1 Description of the Matawin River watershed and data sources	27
2.2.2 Constitution of the hydrologic series of seasonal heavy floods	30
2.2.3 Statistical data analysis.....	31
2.3 RESULTS	33
2.3.1 Comparison of interannual and interdecadal variability of seasonal heavy flood flows upstream and downstream from the Taureau Reservoir.....	33
2.3.2 Comparison of the relationship between heavy flood characteristics and climate indices upstream and downstream from the dam.....	34
2.3.3 Temporal variability of precipitation and temperature.....	35
2.4 DISCUSSION AND CONCLUSION	36
REFERENCES.....	40
CHAPITRE III	
EFFET DE L’INVERSION DES RÉGIMES HYDROLOGIQUES SUR LA MAGNITUDE ET L’AMPLITUDE DE VARIATION DES DÉBITS JOURNALIERS SAISONNIERS EN AVAL DES BARRAGES AU QUÉBEC	60
RÉSUMÉ.....	61

3.1 INTRODUCTION	62
3.2 MÉTHODOLOGIE	64
3.2.1 Description du bassin versant de la rivière Matawin et source des données	64
3.2.2 Analyse statistique de données	66
3.3 RÉSULTATS	67
3.4 DISCUSSION ET CONCLUSION	68
RÉFÉRENCES	73

LISTE DES TABLEAUX

Tableau	Page
1.1 The five climatic indexes.....	45
1.2 Rate of variation of the average values of heavy flood characteristics downstream from the Matawin Dam after 1964.....	46
1.3 Comparison of the values of the canonical coefficients of correlation (R^2) calculated between the fundamental characteristics of heavy floods and the winter climate indices upstream and downstream from the Matawin Dam	47
1.4 Canonical roots calculated between the characteristics of spring heavy floods and the winter climate indices upstream from the dam	48
1.5 Canonical roots calculated between the characteristics of winter heavy floods and the winter climate indices downstream from the dam	49
2.1 Comparaison des paramètres des droites de régression linéaire ajustées sur la variabilité interannuelle des CV et de CI en amont et en aval du barrage Matawin (1932-2008).....	77
2.2 Comparaison des valeurs moyennes de CV et de CI en amont et en aval du barrage Matawin (1931-2008).....	78
2.3 Comparaison des valeurs moyennes de CV et de CI en aval du barrage avant (1931-1962) et après (1964-2008) la nationalisation	79
2.4 Coefficients de corrélation calculés entre la magnitude et la variabilité de la magnitude des débits moyens journaliers en amont et en aval du barrage Matawin (1931-2008).....	80

LISTE DES FIGURES

Figure	Page
1.1 Location of the streamflow (triangle), precipitations (point) and temperature (rectangle) stations.....	50
1.2 Comparison of the monthly hydrologic regimes upstream (a) and downstream (b) from the Taureau Reservoir. This figure shows the inversion phenomenon downstream from the reservoir on the annual scale.....	51
1.3 Comparison of interannual variability of spring heavy floods characteristics (standardized values) upstream from the Matawin dam. a = magnitude; b = duration; c = frequency; d = variability (coefficient of variation)	52
1.4 Comparison of interannual variability of winter heavy floods characteristics (standardized values) downstream from the Matawin dam. a = magnitude; b = duration; c = frequency; d = variability (coefficient of variation)	53
1.5 Comparison of interdecadal variability of spring heavy floods characteristics (standardized and smoothed values) upstream from the Matawin dam. a = magnitude; b = duration; c = frequency; d = variability (coefficient of variation).....	54
1.6 Comparison of interdecadal variability winter heavy floods characteristics (standardized and smoothed values) downstream from the Matawin dam. a = magnitude; b = duration; c = frequency; d = variability (coefficient of variation).....	55
1.7 Comparison of interdecadal variability of heavy spring floods magnitude (standardized and smoothed values) upstream from the reservoir (a), heavy winter floods magnitude downstream from the reservoir (b) and the winter AMO index (c). Smoothed values were calculated over a 10-year period.....	56

1.8	Interannual (a) and interdecadal (b) variability of winter precipitation at the Joliette station	57
1.9	Temporal variability (1934-1982) of winter (January to March) daily temperature at Matawin dam Station. a = interannual variability of daily maximum temperature; b = interdecadal variability of daily maximum temperature; c = interannual variability of daily minimum temperature; d = interdecadal variability of daily minimum temperature. Smoothed values were calculated over a 10-year period	58
1.10	Temporal variability (1934-1994) of winter (January to March) daily temperature at Shawinigan Matawin Station. a = interannual variability of daily maximum temperature; b = interdecadal variability of daily maximum temperature; c = interannual variability of daily minimum temperature; d = interdecadal variability of daily minimum temperature. Smoothed values were calculated over a 10-year period	59
2.1	Localisation des stations en amont et en aval du barrage Matawin.....	81
2.2	Coefficients mensuels d'écoulement (%) en amont (barres noires) et en aval (barres grises) du barrage	82
2.3	Variabilité interannuelle de la magnitude des débits moyens journaliers (a), de CV (b) et de CI (c) en automne. Q_f = magnitude des débits journaliers automnaux; T_f = années	83
2.4	Variabilité interannuelle de la magnitude des débits moyens journaliers (a), de CV (b) et de CI (c) en hiver. Q_f = magnitude des débits journaliers automnaux; T_f = années	84
2.5	Variabilité interannuelle de la magnitude des débits moyens journaliers (a), de CV (b) et de CI (c) au printemps. Q_f = magnitude des débits journaliers automnaux; T_f = années	85

2.6	Variabilité interannuelle de la magnitude des débits moyens journaliers (a), de CV (b) et de CI (c) en été. Qf = magnitude des débits journaliers automnaux; Tf = années	86
-----	--	----

RÉSUMÉ DU PROJET

Érigé en 1930, le barrage Matawin a causé l'inversion du régime hydrologique de la rivière Matawin : l'eau de la fonte des neiges au printemps (avril à juin) est stockée dans le réservoir et ensuite relâchée en hiver (janvier à mars) pour alimenter les centrales hydroélectriques situées plus en aval sur la rivière Saint-Maurice. Conséquemment, les débits de fortes crues surviennent au printemps en amont, mais plutôt en hiver en aval. Les barrages en général provoquent également une perte de la biodiversité en réduisant la variation naturelle des débits en aval. L'ampleur de cette perte dépend principalement de deux facteurs : l'ampleur de la réduction de la variation des débits journaliers et la durée de cette réduction dans le temps. Cette étude couvrant la période 1931-2008 avait donc deux objectifs : (1) analyser l'effet d'inversion du cycle hydrologique annuel sur ces deux facteurs et (2) comparer la variabilité interannuelle et interdécennale des caractéristiques hydrologiques des débits de fortes crues en amont et en aval du barrage. Tout d'abord, cette comparaison a révélé que le principal changement observé en aval du barrage était une hausse importante de la durée (en nombre de jours). La durée moyenne des débits de fortes crues a quintuplé. Ce changement dans la durée est survenu vers le milieu des années soixante et est accompagné d'une baisse significative des autres caractéristiques hydrologiques soit la magnitude, la fréquence et la variabilité. En ce qui concerne la variation des débits moyens journaliers et son amplitude, on a démontré que ces deux variables ont significativement augmenté en aval durant les quatre saisons. Mais cette hausse est forte au printemps mais faible en hiver. Par conséquent, l'effet de l'inversion se traduit par une hausse significative de la variation de débits journaliers. Quant à la durée de ce changement dans le temps, on a démontré que la variation des débits journaliers a diminué significativement dans le temps. Dans les deux cas, les changements observés sont survenus vers le milieu des années soixante, coïncidant avec la nationalisation de l'énergie hydroélectrique effectuée au Québec par l'état vers 1962. À cette date, la plupart des compagnies privées possédant les centrales hydroélectriques ont été achetées par Hydro-Québec, propriété du gouvernement québécois. Ce changement de propriétaire a entraîné des modifications dans le mode de

gestion du barrage Matawin qui elles-mêmes sont responsables des changements hydrologiques observés en aval du barrage.

CHAPITRE I

PRÉSENTATION DU PROJET D'ÉTUDE

1.1 INTRODUCTION

Le secteur énergétique au Québec repose en très grande partie sur la production d'hydroélectricité rendue possible par l'installation de plusieurs barrages et centrales sur les grands cours d'eau de la province. Le développement de la ressource hydroélectrique dans le but d'alimenter la population et les industries québécoises en électricité ne date pas d'hier. En effet, les premiers ouvrages destinés à la production hydroélectrique ont été érigés vers le début des années 1900. Au fil du temps, les ouvrages se sont perfectionnés et sont devenus de plus en plus nombreux et imposants, permettant au Québec de se hisser parmi les trois plus grands producteurs d'hydroélectricité au niveau mondial. Ce développement hydroélectrique a aussi été observé dans de nombreux pays industrialisés et sous-développés durant le 20^{ème} siècle. Dans l'hémisphère nord, plus du tiers des cours d'eau sont plus ou moins profondément régularisés (Dynesius et Nilsson, 1994). De ce fait, durant le siècle passé, le nombre des grands barrages dont la hauteur d'ouvrage atteint ou dépasse 15 m est passé de 500, au début du siècle à 42000 après 1970 (Lopez-Moreno et *al.*, 2004).

Cette forme d'énergie ne produit ni émission de gaz à effet de serre ni déchet radioactif comparativement à d'autres sources énergétiques. Néanmoins, elle peut générer divers impacts environnementaux. Au cours des dernières années, différents travaux ont été consacrés particulièrement aux impacts morphologiques et biologiques induits par les barrages (e.g. Andrews et Pizzi, 2000; Peters et Prowse, 2001; Yang et al., 2004, 2008; Higgs et Petts, 1988; Magilligan et Nislow, 2001, 2005; Assani et Petit, 2004; Loizeau et Dominik, 2000; Klaver et al., 2007). Par contre, on compte encore peu d'études sur l'impact des barrages sur les débits des rivières. C'est dans le but de

combler cette lacune et de quantifier l'ampleur des changements hydrologiques provoqués par les barrages que le professeur Ali Assani a mis sur pied un programme de recherche. Ce programme poursuit 5 principaux objectifs :

- La quantification de l'ampleur des changements subis par les variables hydrologiques en aval des barrages.
- La sélection des variables hydrologiques les plus modifiées en aval.
- La détermination des facteurs qui influencent l'ampleur des changements subis par les variables hydrologiques en aval.
- Impacts du réchauffement climatique sur les débits en aval des barrages.
- La variation dans le temps de l'ampleur des changements subis par les variables hydrologiques en aval en relation avec la variabilité du climat.

1.2 PROBLÉMATIQUE

La présente étude s'insère dans ce programme de recherche et se limitera à l'analyse du dernier objectif. Celui-ci n'a jamais fait l'objet d'étude au Québec. La variabilité de l'ampleur des changements hydrologiques dans le temps est un aspect important qui permet de mesurer les effets des changements hydrologiques qui résultent de la construction d'un barrage sur la biodiversité et l'évolution morphologique des chenaux. La question à laquelle cette étude cherche à répondre est la suivante : la variabilité interannuelle des débits en aval des barrages au Québec permet-elle de mettre en évidence le changement de mode de gestion des barrages?

Il convient de rappeler qu'au Québec, la production de l'énergie hydroélectrique a été d'abord l'œuvre des sociétés privées à capitaux américains. Mais sous l'initiative de l'ancien ministre des ressources naturelles, Monsieur René Levesque, le gouvernement Lesage décréta la nationalisation du secteur énergétique en 1962. Cette expropriation a concédé le monopole de la production hydroélectrique à Hydro-Québec, qui était alors une petite société étatique sans grande envergure. Après cette nationalisation, le marché de l'énergie hydroélectrique s'est complètement modifié au Québec : l'électrification du

monde rural et des particuliers dans les petites villes ainsi que l'exportation de l'électricité aux États-Unis et à quelques provinces du Canada. Cette expansion du marché a entraîné un changement de mode de gestion des barrages dont les conséquences sur les débits en aval des barrages ne sont pas encore connues. Il était donc fort important de combler cette lacune.

1.3 MÉTHODOLOGIE

1.3.1 Justification du choix de la méthode d'analyse

Rappelons qu'il existe trois méthodes pour analyser les changements hydrologiques induits par un barrage (Assani et al., 2005, 2006, 2007).

- La méthode de « station témoin » qui consiste à comparer les données mesurées à la même station avant et après la construction d'un barrage (Richter et al., 1997).
- La méthode de « station contrôle » fondée sur la comparaison des débits mesurés en amont et en aval d'un barrage (Assani et al., 2002) ou sur la comparaison des débits mesurés sur une rivière non influencée par un barrage et en aval d'un barrage (Benn et Erskine, 1994).
- La méthode de simulation hydrologique qui consiste à comparer les débits naturels reconstitués au moyen d'un modèle hydrologique aux débits effectivement mesurés à une station influencée par un barrage (Peters et Prowse, 2001).

De ces trois méthodes, seule la méthode de station contrôle permet d'analyser la variabilité de l'ampleur des changements hydrologiques dans le temps en aval des barrages. Cette méthode est la seule qui permet de discerner les effets provoqués par le changement du mode de gestion des barrages de ceux provoqués par d'autres facteurs comme les changements climatiques ou les changements d'affectation des sols dans un bassin versant (agriculture, urbanisation, etc.)

1.3.2 Justification du choix du bassin versant de la rivière Matawin

La méthode de station contrôle requiert les mesures simultanées des données des débits en amont et en aval d'un barrage pendant une période relativement longue. Cette condition a été remplie seulement par la rivière Matawin. En effet, sur cette rivière, il existe deux stations des mesures de débits en amont (station de Saints-Michel-Des-Saints) et en aval du barrage depuis la construction de ce dernier en 1930. Il convient de mentionner que le barrage n'influence pas les mesures des débits à la station de Saints-Michel-Des-Saints. Ajoutons aussi le fait que les deux stations sont situées dans le même contexte climatique et lithologique. La rivière Matawin est le principal affluent de la rivière Saint-Maurice en rive nord ainsi qu'un sous-affluent du fleuve Saint-Laurent et draine un bassin versant de 5775 km². Celui-ci est entièrement circonscrit dans le Bouclier Canadien. Le climat y est du type subpolaire caractérisé par une lame d'eau annuelle d'environ 1000 mm et une température moyenne annuelle autour de 4 °C. Tout le bassin versant est couvert par la forêt de feuillus exploitée pour la production du bois alors que les activités agricoles sont quasi absentes.

Le barrage Matawin a été érigé en 1930 par la Shawinigan Water and Power Co dans le but d'alimenter en hiver les centrales hydroélectriques situées plus en aval sur la rivière Saint-Maurice comme la centrale de la Gabelle et la centrale de Grand-Mère. Il n'est donc doté d'aucune centrale hydroélectrique. Au printemps (de mi-avril au début mai), l'eau de la fonte des neiges est stockée dans le réservoir Taureau tandis que la vidange du réservoir est amorcée dès la mi-novembre et ce durant tout l'hiver. C'est ce mode de gestion qui a provoqué l'inversion du cycle naturel des débits de la rivière. Durant les saisons printanières et estivales, une quantité d'eau est néanmoins relâchée épisodiquement en aval pour assurer le maintien de certaines activités récréotouristiques comme le canotage (rafting). De plus, lorsque la capacité maximale du réservoir est atteinte au printemps, le surplus de l'eau apportée par les pluies estivales et automnales n'est évidemment plus stocké. Par conséquent, l'eau utilisée en hiver pour la production de l'énergie hydroélectrique provient exclusivement de celle apportée par la fonte de neige au printemps et stockée dans le réservoir. Ceci permet de comparer la variabilité

interannuelle des caractéristiques de fortes crues printanières entrant dans le réservoir à celles des fortes crues hivernales lâchées en aval du réservoir.

1.3.3 Sources des données

Les données de débits utilisées proviennent du site web d'Environnement Canada (http://www.wsc.ec.gc.ca/hydat/H2O/index_f_cfm?, consulté au mois de mars 2007). Celles-ci sont archivées par Environnement Canada jusqu'en 1994. Les données de débits des années manquantes ont été fournies par Hydro-Québec jusqu'en 2008. Afin de déterminer le rôle du climat sur la variabilité des caractéristiques de débits de la rivière Matawin, des données de précipitations et de températures ont aussi été analysées. Les données de précipitations proviennent de la station climatologique de Joliette (46° 01'N, 73° 43'W) située au sud du bassin versant de la Saint-Maurice puisqu'aucune station possédant des mesures de précipitations sur une longue période ne se situe à l'intérieur des limites du bassin versant. De plus, le choix de cette station est justifié par la corrélation existant entre ses données de précipitations et les débits observés à la station située en amont du barrage. Les données de températures, quant à elles, proviennent d'une station climatologique située près du barrage Matawin et de la station de Shawinigan. Ces deux stations permettent de comparer la variabilité temporelle de la température dans la partie inférieure du bassin versant de la rivière Saint-Maurice. Ces données climatiques (précipitations et températures) proviennent d'Environnement Canada.

Finalement, cinq indices climatiques ont été sélectionnés afin de déterminer leur influence sur les caractéristiques hydrologiques de la rivière Matawin dans un contexte d'inversion du régime; soit AMO, AO, NAO, SOI et PDO (Table 1.1). Ces indices ont été considérés par plusieurs auteurs comme ayant une influence sur les débits et les précipitations en Amérique du Nord et plus particulièrement au Québec (e.g. Anctil et Coulibaly, 2004; Coulibaly et Burn, 2005; Enfield et al., 2001; Gobena et Gan, 2006; Kingston et al., 2006; McCabe et al., 2004; Sutton et Hodson, 2005) ce qui explique leur sélection pour cette étude. Les données ont été prises sur les sites internet suivants :

- <http://www.cdc.noaa.gov/Climateindices/List> pour AMO, AO, SOI et PDO;
- <http://cgd.ucar.edu/cas/jhurrell/indices.data.html> pour NAO et
- <http://jisao.washington.edu/data/ao/> pour AO.

1.3.4 Constitution des séries des caractéristiques des débits extrêmes

Afin de prendre en considération le mode de gestion du barrage qui varie d'une saison à l'autre au cours d'une même année, les données de débits ont été analysées par saison. L'année a donc été subdivisée en quatre saisons de trois mois chacune : hiver (janvier à mars), printemps (avril à juin), été (juillet à septembre) et automne (octobre à décembre).

Dans la présente étude, le concept écologique des débits naturels a été utilisé pour constituer les séries hydrologiques des débits d'étiage et des débits de fortes crues. Selon ce concept, les débits d'un cours d'eau peuvent être définis par cinq caractéristiques fondamentales (Richter et al., 1996; Poff et al., 1997) : la magnitude, la durée, la période d'occurrence, la variabilité et la fréquence.

Afin de constituer les séries hydrologiques des débits maximums, trois étapes ont été appliquées sur les données de débits :

- 1- Constitution d'une série des débits maximums les plus élevés mesurés chaque année au cours de la période 1934-1994 durant chaque saison.
- 2- Pour chaque année la valeur la plus faible (Q_m) des débits maximums constitués à l'étape précédente a été retenue.
- 3- Pour chaque saison et chaque année, tous les débits journaliers $\geq Q_m$ ont été retenus.

Les cinq caractéristiques hydrologiques ont été calculées de la façon suivante pour les débits de crues :

- La magnitude est calculée en faisant la moyenne de tous les débits journaliers $\geq Q_m$ mesurés chaque année au printemps (en amont du barrage) et en hiver (en aval du barrage).
- La durée est le nombre moyen des jours où les débits journaliers ont atteint ou dépassé Q_m au printemps (en amont du barrage) et en hiver (en aval du barrage) chaque année.
- La fréquence est le nombre de fois que les débits journaliers ont atteint ou dépassé Q_m au printemps (en amont du barrage) et en hiver (en aval du barrage) chaque année. Cette fréquence représente aussi le nombre des phases de montées et de descentes de fortes crues chaque année.
- Le taux de variabilité des débits qui ont atteint ou dépassé Q_m est calculé au moyen du coefficient de variation (rapport entre la moyenne des débits $\geq Q_m$ et son écart type).
- La période d'occurrence n'est pas comparée dans cette étude puisqu'elle ne survient pas durant la même saison en amont (printemps) et en aval (hiver) du barrage.

1.3.5 Variabilité de la magnitude des débits journaliers

La variabilité de la magnitude des débits journaliers a également été analysée. Elle a été définie par deux variables hydrologiques soit le coefficient de variation (CV en %) et le coefficient d'immodération (CI). Le coefficient de variation est le rapport calculé entre la moyenne des débits journaliers mesurés durant la saison et son écart-type. Le coefficient d'immodération quant à lui est le rapport entre le débit journalier le plus élevé et le débit journalier le plus faible mesuré durant une saison. En cas de valeur nulle du débit le plus faible, celle-ci a été remplacée par la valeur 1.

Ces variables ont été retenues, car elles permettent mieux de mettre en évidence l'influence de changement de mode de gestion des barrages sur la variabilité de l'ampleur des changements hydrologiques dans le temps. En ce qui concerne les débits de fortes crues, nous nous sommes limités seulement à l'année 1994, car nous n'avons pas obtenu l'autorisation d'Hydro-Québec d'inclure ses données.

1.3.6 Analyse statistique des données

Les méthodes statistiques qui ont été appliquées sur les séries de données de débits maximums sont des méthodes relativement simples. La comparaison entre la variabilité des caractéristiques hydrologiques en amont et en aval du réservoir a été calculée à l'aide de régressions linéaires (Svensson et al., 2005) qui permettent de déterminer l'évolution des données sur une échelle temporelle. Cette dernière méthode a également été appliquée sur les données de précipitations et de températures afin de déterminer l'influence de ces variables climatiques sur les débits.

Pour comparer les successions des anomalies positives (débits supérieurs à la moyenne) et négatives (débits inférieurs à la moyenne) de la magnitude des débits nous avons utilisé la méthode de la moyenne mobile. Cette méthode qui consiste à lisser (lissage sur 11 termes) les valeurs standardisées des débits vise à déterminer si durant les décennies sèches, la magnitude des fortes crues diminue en aval du barrage et si, en revanche, elle augmente durant les décennies pluvieuses.

Nous nous sommes limités à ces deux méthodes puisque les résultats concluants obtenus grâce à celles-ci ne justifiaient pas l'utilisation de méthodes statistiques plus élaborées (test de Mann-Kendall, test de Pettitt, méthode Bayesian, etc.).

Par contre, différentes méthodes ont été utilisées pour analyser la variabilité de la magnitude des débits journaliers. En effet, afin de procéder à l'analyse de la variabilité interannuelle des coefficients de variation et d'immodération, la méthode de régression linéaire ainsi que le test non paramétrique de Mann Kendall (Kundzewicz et al., 2005)

ont été utilisés. Ce dernier test permet de vérifier ou de détecter s'il existe éventuellement une tendance dans une série chronologique de données. Le lien entre les débits en amont et en aval a été calculé avec des coefficients de corrélation alors que la comparaison des moyennes de variables hydrologiques a été faite au moyen du test t de Student. Enfin, la méthode d'analyse de variance a été appliquée sur les droites de régressions obtenues afin de tester leur significativité.

Finalement, afin de comparer si les caractéristiques de débits sont corrélées aux mêmes indices climatiques en amont et en aval du réservoir, nous avons utilisé l'analyse de corrélation canonique qui est une des seules méthodes permettant de corréler simultanément plusieurs variables dépendantes avec plusieurs variables indépendantes.

1.4 RÉSULTATS

1.4.1 Comparaison de la variabilité interannuelle et interdécennale des caractéristiques des débits maximums saisonniers en amont et en aval du réservoir

La comparaison des caractéristiques hydrologiques des débits de fortes crues a démontré que les tendances observées en amont du réservoir diffèrent de celles observées en aval. En effet, de façon générale, aucun changement significatif dans la variabilité interannuelle des débits de fortes crues ne se dégage des données en amont alors qu'en aval, toutes les caractéristiques de débits ont changé de façon significative (toutes les courbes de régression significatives au seuil de 5 %). La magnitude, la fréquence et le taux de variabilité diminuent dans le temps alors que la durée a plutôt connu une importante augmentation. Les caractéristiques tendent néanmoins à varier inversement en amont et en aval au fil du temps.

À l'échelle interdécennale, cette inversion devient plus évidente. Autant en amont qu'en aval, on distingue deux phases; soit une phase d'augmentation et une phase de diminution. On remarque que l'ordre de ces deux phases est cependant inversé. En amont, toutes les caractéristiques sauf la durée sont caractérisées par une période de

valeurs sous la normale suivie d'une période où les valeurs se retrouvent plutôt au-dessus de la normale. Par contre, en aval, la succession de ces deux périodes est inversée et le changement s'effectue environ au même moment, soit autour de 1964. Après cette année, chacune des quatre caractéristiques présente un changement marqué (durée multipliée par cinq, magnitude et fréquence diminutions 18 % et 74 % respectivement).

1.4.2 Comparaison de la relation entre les caractéristiques des débits de fortes crues et les indices climatiques en amont et en aval du barrage

L'influence des indices climatiques sur la variation des débits en rivières naturelles dans le temps a déjà été démontrée par plusieurs auteurs (Anctil et Coulibaly, 2004; Coulibaly et Burn, 2004, 2005). Il était donc intéressant de voir si cette influence allait être présente dans le cas d'une rivière harnachée par un barrage comme la rivière Matawin. Les indices climatiques ont été calculés pour chaque saison comme dans le cas des débits. La comparaison des résultats a révélé que les indices hivernaux étaient, de façon générale, les mieux corrélés autant en amont qu'en aval du barrage. Notre analyse s'est donc portée exclusivement sur ces indices. L'analyse des variables créées par la corrélation canonique associées aux caractéristiques de débits a révélé que les quatre caractéristiques étaient corrélées à la même variable canonique en aval (V1) alors qu'en amont, trois caractéristiques à l'exception de la durée étaient corrélées à cette même variable. Pour ce qui est des variables canoniques associées aux indices climatiques, AMO est l'indice le mieux corrélé à W1 autant en amont qu'en aval, mais cette corrélation est inversée. En effet, AMO est corrélé négativement à W1 en amont, mais devient corrélé positivement en aval.

1.4.3 Variabilité temporelle des précipitations et des températures

Afin de vérifier si les changements dans les régimes de températures et de précipitations induits par le réchauffement climatique étaient la cause des modifications observées en aval du barrage, nous avons analysé ces deux variables climatiques. Les données ont également été divisées par saison et notre analyse s'est portée plus

particulièrement sur l'hiver puisqu'autant pour la température que pour les précipitations cette saison a une influence sur la quantité d'eau relâchée en aval. L'analyse n'a démontré aucune tendance significative dans la variabilité interannuelle des précipitations hivernales alors que pour ce qui est de la température, celle-ci a diminué dans le temps à la station située près du barrage, mais a plutôt augmenté à la station de Shawinigan. Par contre, il faut mentionner que l'analyse de seulement deux stations climatiques ne peut nous permettre de tirer une conclusion à l'échelle du bassin versant de la rivière Saint-Maurice.

1.4.4 Analyse des débits journaliers saisonniers

L'analyse de la variabilité interannuelle des coefficients CV et CI a révélé une importante différence entre les saisons. Tout d'abord, en automne et en hiver, on remarque 2 périodes distinctes. Durant la première période, les valeurs de CV et de CI sont plus élevées en aval qu'en amont alors que durant la deuxième période, les valeurs tendent à devenir presque égales. Par contre lorsqu'on regarde en aval, on remarque que les deux variables ont diminué de façon significative dans le temps et ce à partir du début de la décennie 1960 ce qui n'est pas le cas en amont où les valeurs ont plutôt augmenté. Au printemps, de façon générale, autant les valeurs de CV que celles de CI sont plus élevées en aval qu'en amont, mais il n'y a que les valeurs de CV qui ont connu une diminution significative en aval. En amont, aucun changement significatif n'a été observé malgré une légère tendance à l'augmentation.

Enfin, finalement en été, tout comme les autres saisons, les valeurs de CV et de CI sont plus élevées en aval qu'en amont. Au fil du temps on remarque qu'elles augmentent en amont, mais diminuent en aval avant de les voir coïncider après la décennie 1990.

En comparant les deux variables hydrologiques en amont et en aval durant toute la période à l'étude avec le test t de Student, nous avons remarqué que les valeurs moyennes étaient significativement plus élevées en amont qu'en aval à l'exception de la

moyenne de CV en hiver. Ce test a également confirmé que CV et CI diminuaient en aval après la nationalisation, diminution qui s'avère être plus forte en hiver.

1.5 DISCUSSION ET CONCLUSION

La comparaison de la variabilité des débits maximums aux échelles interannuelles et interdécennales durant la période 1934-1994 a révélé des changements significatifs dans le mode de gestion du barrage pendant l'hiver en aval. En effet, les quatre caractéristiques hydrologiques étudiées ont subi d'importantes modifications au fil du temps. La moyenne de la durée a augmenté passant de 5 à 28 jours alors que la magnitude, la fréquence et la variabilité ont diminué de façon significative. De plus, ces changements surviennent tous autour de la même période soit vers la moitié de la décennie 1960, plus particulièrement vers 1964 et sont suivis par une inversion de la variabilité des débits en amont et en aval du barrage. On remarque que les caractéristiques hydrologiques ont tendance à augmenter en amont, mais plutôt à diminuer en aval.

Au niveau climatique, AMO s'avère être le seul indice climatique qui influence la variabilité interdécennale des débits maximums produits par la fonte des neiges printanières. Par contre, les changements de la durée ont eu un impact sur la relation entre les indices climatiques et deux caractéristiques hydrologiques soit la magnitude et la fréquence. Celles-ci sont corrélées négativement avec AMO en amont, mais positivement en aval.

Afin d'expliquer l'augmentation importante subie par la durée en aval après 1964, nous avons retenu deux facteurs possibles : la diminution de la température enregistrée à la station climatologique située près du barrage entre 1960 et 1980 ou un changement dans le mode de gestion du barrage dû à un changement de propriétaire.

Tout d'abord, concernant la température, le refroidissement observé depuis les années soixante aurait pu expliquer la hausse de la durée. Un refroidissement des

températures en hiver entraîne généralement une plus forte demande pour la production hydroélectrique pour le chauffage des foyers par exemple. Par contre, ce refroidissement n'est pas observé à l'échelle du bassin versant de la rivière Saint-Maurice en entier puisque les températures mesurées à la station de Shawinigan démontrent plutôt un réchauffement. Ce réchauffement ne peut pas vraiment être attribuable au phénomène d'îlots de chaleur provoqués souvent par des grandes villes puisque Shawinigan est une petite agglomération d'environ 60 000 habitants. De plus, ce réchauffement a également été observé à d'autres stations au Québec comme l'a démontré l'étude de Zhang et al. en 2000. Le refroidissement n'étant pas observé pour la totalité du bassin versant, la variabilité de la température ne peut être considérée comme une cause logique du changement dans le mode de gestion des débits de fortes crues.

La deuxième hypothèse et la plus probable est celle du changement de propriétaire suite à la nationalisation du secteur énergétique en 1963. Le barrage a été mis en place par la Shawinigan Water and Power Co vers les années 1900 tout comme plusieurs centrales hydroélectriques sur la rivière Saint-Maurice. Dès la formation de la compagnie et durant la majorité de son règne, celle-ci comptait principalement sur la ville de Montréal et sur les grandes industries énergivores (papetières, alumineries, manufactures, etc.) comme clientèle. L'eau en aval des barrages comme celui de la Matawin était relâchée selon les besoins de ses clients, c'est-à-dire de façon épisodique et ce même durant l'hiver. De plus, à plusieurs reprises lors de moments plus difficiles, la Shawinigan Water and Power Co achetait une quantité considérable d'énergie que d'autres compagnies telles qu'Hydro Québec (via la centrale de Beauharnois) avaient en surplus et ce à des prix très avantageux (Hogue et al., 1979). Cela permettait à la compagnie de Shawinigan de se procurer de l'énergie à bas prix et de maintenir ses niveaux d'eau en amont des barrages sur la Saint-Maurice.

Après la nationalisation en 1963, Hydro Québec est devenu le propriétaire du barrage Matawin ainsi que de tous les autres barrages et centrales appartenant à la Shawinigan Water and Power Co et n'a pas appliqué cette stratégie de stockage par la suite (Hogue et al., 1979). Cela pourrait donc expliquer en partie la hausse de la durée

que l'on a observée. De plus, au moment de la nationalisation, tous les réseaux de distribution privés qui existaient à l'époque tels que celui de la compagnie de Shawinigan ont été intégrés dans un vaste réseau de distribution destiné à fournir en énergie électrique un marché de niveau national en alimentant d'autres provinces canadiennes telles que l'Ontario et le Nouveau-Brunswick et même à l'échelle internationale en exportant de l'énergie aux États-Unis. Hydro Québec a donc commencé à relâcher de l'eau en aval des barrages durant tout l'hiver. Ce relâchement continu explique la hausse importante de la durée et la baisse des autres caractéristiques comme la magnitude, la fréquence et la variabilité. On relâche donc moins d'eau à la fois, moins souvent, mais pendant beaucoup plus longtemps pour alimenter la production hydroélectrique de façon quasi continue. De plus, la fermeture d'industries importantes dans la région de Shawinigan et des environs au fil des années aurait dû être perçue dans les mesures de débits en aval si le mode de gestion préconisé par la Shawinigan Water and Power Co avait été maintenu après la nationalisation, ce qui n'a pas été le cas.

La présente étude a également permis de vérifier l'impact du barrage Matawin sur la variation de la magnitude des débits moyens journaliers. Deux principaux résultats ont été obtenus :

- Une hausse importante de la variation des débits moyens journaliers et de son amplitude et ce durant les quatre saisons. Cette hausse observée est plutôt faible durant la saison hivernale, mais plus forte au printemps.
- Une diminution de l'ampleur de cette hausse dans le temps. Cette fois, la diminution observée s'avère être forte en hiver alors qu'au printemps la tendance observée tend plutôt vers une augmentation de l'amplitude de la variation dans le temps.

Encore une fois, plusieurs causes peuvent être à l'origine des changements de la variation des débits moyens journaliers et de son amplitude en aval du barrage; soit la variabilité et les changements climatiques, le changement d'affectation des sols dans le bassin versant, la déforestation ou encore le changement du mode de gestion du barrage.

Tout d'abord, l'hypothèse de la variabilité et des changements climatiques ne peut être retenue comme cause probable du changement puisqu'elle ne peut expliquer la hausse significative de la variation des débits moyens journaliers et de son amplitude en aval qui aurait dû être observée également en amont où la variabilité des débits est intimement liée à celle du climat. De plus, ce facteur ne peut expliquer la diminution de la variation des débits journaliers et de son amplitude dans le temps en aval puisqu'en amont on observe plutôt une augmentation dans le temps de ces deux variables.

Le changement d'affectation des sols dans le bassin versant ne peut être à l'origine des changements observés puisqu'aucune modification majeure ne fut observée entre 1930 et 2008 à l'intérieur des limites du bassin versant. Les activités agricoles n'ont pas connu de développement important alors que la population n'a pas connu de hausse significative à la suite de l'urbanisation.

La déforestation aurait pu expliquer les changements dans la variation des débits moyens journaliers et son amplitude. En effet, la coupe forestière est depuis longtemps présente dans le bassin versant de la rivière Matawin. Par contre, cette coupe plutôt concentrée en amont du barrage a fortement diminué au fil du temps due à la crise économique qui touche l'industrie du bois au Québec depuis maintenant quelques années. De plus, selon Muma (2008), la diminution de la couverture forestière dans un bassin versant n'affecte pas la variation de la magnitude des débits journaliers au Québec. Ce facteur ne peut donc pas être retenu comme cause probable des changements hydrologiques observés en aval du barrage.

Finalement, le changement du mode de gestion du barrage. Tout comme pour expliquer la hausse importante de la durée et la baisse des autres caractéristiques hydrologiques en aval après 1964, ce facteur a été retenu pour expliquer la diminution de l'ampleur de la hausse de la variation des débits moyens journaliers et de son amplitude dans le temps en aval. Encore une fois, le changement de propriétaire a eu un impact au niveau hydrologique sur la rivière Matawin. En effet, la transition de la méthode de relâchés épisodiques d'eau en aval du barrage sous la direction de la Shawinigan Water

and Power Co vers un relâchement d'eau de façon continue préconisé par Hydro Québec pour alimenter un plus vaste marché en électricité a eu un impact sur la variation des débits moyens journaliers. Celle-ci a diminué de façon significative et plus particulièrement pendant la période froide caractérisée par une plus forte demande en hydroélectricité pour le chauffage des résidences par exemple. Cette diminution est donc survenue juste après la nationalisation durant les saisons hivernales et automnales. Par contre, ce ne fut pas le cas au printemps et en été où le changement s'est plutôt fait sentir vers les décennies 1980 et 1990.

L'hypothèse la plus probable pour expliquer ce changement tardif est la hausse de l'évapotranspiration consécutive à celle de la température. Ces deux décennies sont parmi les plus chaudes enregistrées au Québec. La hausse de la température durant l'été amène également une hausse de l'évapotranspiration. Celle-ci provoque une perte d'eau dans le réservoir Taureau, ce qui aurait amené Hydro-Québec à modifier son mode de gestion afin de minimiser ces pertes. En effet, la compagnie d'État aurait tendance à stocker plus d'eau qu'à l'habitude ce qui explique la baisse significative des débits moyens journaliers en aval du barrage observée au printemps et en été durant les décennies 1980 et 1990. Par contre, il est impossible pour nous de valider cette hypothèse de façon définitive, puisqu'Hydro-Québec a refusé de nous fournir les données sur la variabilité de la quantité d'eau stockée dans le réservoir Taureau, données jugées confidentielles pour des raisons commerciales.

Le changement de propriétaire après la nationalisation de 1964 est donc à l'origine des changements hydrologiques que nous avons observés en aval du barrage situé sur la rivière Matawin. Dans la présente étude nous avons analysé chacune des quatre caractéristiques hydrologiques fondamentales plutôt que de nous limiter à la magnitude comme c'est souvent le cas. Cela nous a permis de déterminer la cause des changements observés en aval. Du point de vue morphologique, une augmentation de la durée des débits de fortes crues en hiver peut entraîner une érosion des berges, malgré une diminution de la magnitude, d'où l'importance de considérer chacune des caractéristiques hydrologiques afin d'en arriver à la meilleure interprétation possible.

Donc, dans un cours d'eau, chacune des composantes forme un fragile équilibre. Des changements au niveau hydrologique entraînent inévitablement des modifications aux niveaux morphologiques, sédimentologiques et écologiques. Les conséquences écologiques associées à une forte variabilité interannuelle des débits journaliers en aval des barrages sont encore méconnues puisqu'aucune étude n'a encore portée sur cet aspect. Cette étude ouvre donc plusieurs voies de recherche intéressantes afin d'évaluer les impacts de ces changements hydrologiques sur la rivière Matawin ainsi que sur sa faune et sa flore.

BIBLIOGRAPHIE

- ANCTIL, F., COULIBALY, P., 2004. *Wavelet analysis of the interannual variability in southern Quebec streamflow*. *Journal of Climate*, 17, 163-173.
- ANDREWS, E.D., PIZZI, L.A., 2000. *Origin of the Colorado River experimental flood in Grand Canyon*. *Hydrological Sciences Journal*, 45, 607-627.
- ASSANI, AA, BUFFIN-BÉLANGER, T., and ROY, AG. 2002. *Analyse des impacts d'un barrage sur le régime hydrologique de la rivière Matawin (Québec, Canada)*. *Revue des Sciences de l'Eau*, 15 : 557-574.
- ASSANI, A. A., PETIT, F., 2004. *Impact of hydroelectric power releases on the morphology and sedimentology of the bed of the Warche river (Belgium)*. *Earth Surface Processes and Landforms*, 29, 133-143.
- ASSANI, A.A. LAJOIE, F., LALIBERTÉ, C., 2007. *Impacts des barrages sur les caractéristiques des débits moyens annuels en fonction du mode de gestion et de la taille des bassins versants au Québec*. *Revue des Sciences de l'Eau*, 20, 127-146.
- ASSANI, A.A., GRAVEL, E., BUFFIN-BÉLANGER, T., ROY, A.G., 2005. *Impacts des barrages sur les débits annuels minimums en fonction des régimes hydrologiques artificialisés au Québec (Canada)*. *Revue des Sciences de l'Eau*, 18, 103-127.
- ASSANI, A.A., STICHELBOU, E., ROY, A.G., PETIT, F., 2006a. *Comparison of impacts of dams on the annual maximum flow characteristics in three regulated hydrological regimes in Quebec (Canada)*. *Hydrological Processes*, 20, 3485-3501.
- BENN, P.C., ERSKINE W.D., 1994. *Complex channel response to flow regulation : Cudgegong River below Windamere Dam, Australia*. *Applied Geography* 14, 153-168.
- COULIBALY, P., BURN, D.H., 2005. *Spatial and temporal Canadian seasonal streamflows*. *Journal of Climate*, 18, 191-210.
- DYNESIUS, M., NILSSON, C. 1994. *Fragmentation and flow regulation of river systems in the northern third of the world*. *Science*, 266, 753-762.
- ENFIELD, D.B., MESTAS-NUNEZ A.M., TRIMBLE P.J. 2001. *The Atlantic multidecadal oscillation and its relation to rainfall and river flows in continental US*. *Geophysical Research Letters*, 28, 2077-2080.
- GOBENA, A.K., GAN, T.Y., 2006. *Low frequency variability in southwestern Canadian stream-flow; links with large-scale climate anomalies*. *International Journal of Climatology*, 26, 1843-1869.

- HIGGS, G., PETTS, G. 1988. *Hydrological changes and river regulation in the UK*. Regulated rivers : Research and Management, 2, 349-368.
- HOGUE, C., BOLDUC, A., LAROUCHE, D., 1979. *Un siècle d'électricité*. Libre Expression, Montréal, 406 p.
- KINGSTON, D.G., LAWLER, D.M., MCGREGORE, G.R., 2006. *Linkages between atmospheric circulation , climate and streamflow in the northern North Atlantic: research prospects*. Progress in Physical Geography, 30, 143-174.
- KLAVER, G., VAN OS, B., NEGREL, P., PETELET-GIRAUD, E., 2007. *Influence of hydropower dams on the composition of the suspended and riverbank sediments in the Danube*. Environmental Pollution, 148, 718-728.
- KUNDZEWICK, Z.W., GRACZYK, D., MAUREER, T., PINSKWAR, I., RADZIEJEWSKI, M., SVENSSON, C., SZWED, M. 2005. *Trend detection in river flow series: 1. Annual maximum flow*. Hydrological Sciences Journal, 50, 797-810.
- LOIZEAU, J-L., DOMINIK, J., 2000. *Evolution of the upper Rhone river discharge and suspended load during the last 80 years and some implications for Lake Geneva*. Aquatic Sciences, 62, 54-67.
- LOPEZ-MORENO, J.I., BEGUERIA S, GARCIA-RUIZ, J.M. 2004. *The management of large Mediterranean Reservoir: storage regimes of the Yesa Reservoir, upper Aragon river basin, Central Spanish Pyrenees*. Environmental Management, 34, 508-515.
- MAGILLIGAN, F.J., NISLOW, K.H., 2001. *Long-term changes in regional hydrologic regime following impoundment in a humid-climate watershed*. Journal of the America Water Resources Association, 37, 1551-1569.
- MAGILLIGAN, F.J., NISLOW, K.H., 2005. *Changes in hydrologic regime by dams*. Geomorphology, 71, 61-78.
- MCCABE, G.J., PALECKI, M.A., BETANCOURT, J.L., 2004. *Pacific and Atlantic ocean influences on multidecadal drought frequency in the United-States*. Proceedings of the National Academy of Sciences of the USA, 101, 4136-4141.
- MUMA, M. 2008. *Impacts de l'utilisation des sols sur la variabilité spatio-temporelle des débits extrêmes au Québec méridional*. Mémoire de maîtrise en sciences de l'environnement, Université du Québec à Trois-Rivières, 96p+ annexes.
- PETERS, D.L., PROWSE, T., 2001. *Regulation effects on the lower Peace River, Canada*. Hydrological Process, 15, 3181-3194.

- POFF, N.L., ALLAN, J.D., BAIN, M.B., KARR, J.R., PRESTEGAARD, K.L., RICHTER, B.D., SPARKS, R.E., STROMBERG, J.C., 1997. *The natural flow regime. A paradigm for river conservation and restoration*. Bioscience, 47, 769-784.
- RICHTER, B.D., BAUMGARTNER, J.V., POWELL, J., BRAUN, D.P., 1996. *A method for assessing hydrologic alteration within ecosystems*. Conservation Biology, 10, 1163-1174.
- SUTTON, R.T, HODSON, D.L.R., 2005. *Atlantic ocean forcing of North American and European summer climate*. Science, 309, 115-118.
- SVENSSON, C., KUNDZEWICK, W.Z., MAURER, T., 2005. *Trend detection in river flow series: 2. Flow and low-flow index series*. Hydrological Sciences Journal, 50, 811-824.
- YANG, T., YE, B., SHIKLOMANOV, A., 2004. *Discharge characteristics and changes over the Ob River watershed in Siberia*. Journal of Hydrometeorology, 5, 595-610.
- YANG, T., ZHANG, Q., CHEN, Y.D., TAO, X., Xu, C.-Y., CHEN, X., 2008. *A Spatial assessment of hydrologic alteration caused by dam construction in the middle and lower Yellow River, China*. Hydrological Processes, 22, 3829-3843.
- ZHANG, X, VINCENT, LA, HOGG, WD, and NIITSOO, A. 2001. *Trends Temperature and precipitations trends in Canada during the 20th century*. Atmosphere-Ocean, 38: 395-429.

CHAPITRE II

COMPARISON OF THE INTERANNUAL AND INTERDECADAL VARIABILITY OF HEAVY FLOOD CHARACTERISTICS UPSTREAM AND DOWNSTREAM FROM MATAWIN DAM (QUÉBEC, CANADA) IN INVERSED HYDROLOGIC REGIME. CONTRIBUTION OF THE ECOLOGICAL CONCEPT OF “NATURAL FLOW REGIME”

Catherine Fortier¹, Ali A. ASSANI¹, and Andre G. Roy²

¹ Laboratoire d'hydro-climatologie et de géomorphologie fluviale
(Hydroclimatology and Fluvial Geomorphology Laboratory), Geography Section,
Pavillon Léon-Provencher, Université du Québec à Trois-Rivières, 3351
Boulevard des Forges, Trois-Rivières, Québec, G9A 5H7, Canada.

² Canada Research Chair in Fluvial Dynamics, Département de géographie
(Geography Department), Université de Montréal, P.O. Box 6128, Downtown
Station, Montréal, Québec, H3C 3J7, Canada.

Mailing address.

Ali A. ASSANI

Section de Géographie (Geography Section), Pavillon Léon-Provencher,
Université du Québec à Trois-Rivières, 3351 Boulevard Des Forges, Trois-
Rivières, Québec, G9A 5H7, Canada.

Tel.: (819) 376-5011; Fax: 376-5179; Email: Ali.Assani@uqtr.ca

RÉSUMÉ

Érigé en 1930, le barrage Matawin a causé l'inversion du régime hydrologique de la rivière Matawin : l'eau de la fonte des neiges au printemps (avril à juin) est stockée dans le réservoir et ensuite relâchée en hiver (janvier à mars) pour alimenter les centrales hydroélectriques situées plus en aval sur la rivière Saint-Maurice. Conséquemment, les débits de fortes crues surviennent au printemps en amont, mais plutôt en hiver en aval. Nous avons comparé la variabilité interannuelle et interdécennale des caractéristiques de débits maximums (magnitude, durée, fréquence et variabilité) en amont et en aval du barrage pour la période de 1934 à 1994. Cette comparaison a révélé que le principal changement observé en aval du barrage était une hausse importante de la durée (en nombre de jours). La durée moyenne des débits de fortes crues a quintuplé. Ce changement dans la durée est survenu vers le milieu des années soixante et est accompagné d'une baisse significative des autres caractéristiques hydrologiques soit la magnitude, la fréquence et la variabilité. Cela a également altéré la relation entre les indices climatiques et ces mêmes caractéristiques. En aval du barrage, la magnitude et la fréquence sont corrélées positivement avec l'Oscillation Atlantique Multidécennale (OAM) alors qu'en amont elles sont corrélées négativement avec ce même indice. De plus, OAM est négativement corrélé avec la durée en aval alors qu'en amont celle-ci ne présente aucune corrélation significative avec chacun des indices climatiques.

Deux facteurs ont été évoqués pour expliquer le changement observé en aval du barrage.

- Le refroidissement observé depuis les années soixante à la station climatologique située près du barrage. Par contre, ce refroidissement n'a pas été observé à la grandeur du bassin versant.
- L'augmentation de la production hydroélectrique dans le bassin versant après la nationalisation du secteur énergétique en 1962 au Québec. Cette augmentation pourrait être expliquée par l'expansion du marché de l'énergie hydroélectrique (marchés nationaux et internationaux) suite à la nationalisation alors qu'auparavant, l'énergie produite par les centrales hydroélectriques ne servait que pour les industries locales.

ABSTRACT

Erected in 1930, the Matawin Dam caused an inversion of the hydrologic regime of the Matawin River: snow melt water in spring (April to June) is stored in the reservoir and then released in winter (January to March) to feed the hydroelectric generating stations built downstream on the Saint-Maurice River. Thus, heavy floods occur upstream from the dam in spring but downstream in winter. We compared the interannual and interdecadal variability of the heavy flood characteristics (magnitude, duration, frequency and variability) both upstream (spring floods) and downstream (winter floods) from the dam during the 1934-1994 period. This comparison revealed that the principal change observed downstream from the dam translates into a strong increase in the duration (in days) of heavy floods. The average duration of these floods quintupled. This change in duration occurred around the mid-1960s and thus led to a significant decrease in the magnitude, frequency and variability of heavy floods. It also altered the relationship between the climate indices and these fundamental characteristics (magnitude, frequency and duration). Downstream from the dam, the magnitude and frequency are positively correlated to the Atlantic Multidecadal Oscillation (AMO), whereas upstream they are negatively correlated to the same index. However, the AMO index is negatively correlated to the duration downstream from the dam, whereas upstream this characteristic is no longer significantly correlated to any climatic index.

Two factors have been invoked to explain this change observed downstream from the dam.

- The cooling observed since the 1960s at the station located at the dam. However, this cooling was not observed on the scale of the entire watershed. This reduces its plausibility.
- The increase in hydroelectric power production in the watershed after nationalization of hydroelectric power in 1962. This increase would be explained by the expansion of the market for hydroelectric power (national and international markets). Before

nationalization, the hydroelectric power produced in the watershed was intended only for regional industries.

Key words: Reservoir, inversion, floods, Downstream effects, seasons, climate indices, Matawin River, Québec.

2.1 INTRODUCTION

In order to develop the hydrologic standards to restore and preserve the ecological integrity of regulated sections, the research on the hydrologic impacts downstream from dams pursues the following four main objectives:

- Quantification of the extent of the changes in the hydrologic variables downstream from dams. This objective has been the object of numerous studies to date (e.g., Andrews and Pizzi, 2000; Batalla et al., 2004; Leconte et al., 2001; Loizeau and Dominik, 2000; Magilligan and Nislow, 2003, 2005; Montaldo et al., 2004; Page et al., 2005; Pegg et al., 2003; Peters and Prowse, 2001; Piron and Neumann, 2008; Singer, 2007; Small et al., 2009; Yang et Shiklomanove, 2004; Ye et al., 2003). This quantification thus made possible to determine the length of the sections most affected by the dams (e.g. Galat and Lipkin, 2000).

- Selection of the most modified hydrologic variables downstream from dams. Very few studies have been published on this subject (e.g. Assani et al., 2009; Matteau et al., 2009).

- Determination of the factors that influence the extent of the changes to the hydrologic variables downstream from dams. Very few studies also have analyzed this objective (Assani et al., 2005; 2006; 2007; 2009; Batalla et al., 2001; Lajoie et al., 2007; Magilligan and Nislow, 2005).

- Finally, the influence of dams on the temporal variability of streamflows. The purpose of this objective is to show the changes in streamflow management mode downstream from the dams. These changes can result from many factors: the change of precipitation and/or temperature regimes, the increase or decrease in hydroelectric power production, particularly for economic reasons, the changes in runoff conditions after a change in land use in the watershed, construction of new dams in the watershed, etc. Hence, many studies have looked at the influence of dams on the temporal variability of certain

characteristics of streamflow (e.g. Magilligan and Nislow, 2001; 2005; Pegg et al., 2003; Peters and Prowse, 2001; Richter et al., 1996; 1997; 1998; Yang et al., 2008). All these studies were based on the monitoring station method, which compares the temporal variability of streamflows before and after construction of a dam.

However, this method presents several weaknesses. It does not allow clear differentiation of the effects of the dams from those induced by other factors, including climate, on streamflow variability after construction of a dam (Yang et al., 2008). For example, the temperature and precipitation regimes can change significantly several times after construction of a dam. It then becomes a fairly delicate operation to separate the effects of these climate changes easily from the effects induced by a dam on interannual streamflow variability after construction of this dam. Thus, in Québec and Canada, for example, several studies have shown multiple changes in the relationship between the climate indices and the streamflows of rivers in the past century, due to modifications of the temperature and precipitation regimes (Ancil and Coulibaly, 2004; Assani et al., 2008; Coulibaly and Burn, 2004; 2005). Consequently, in this context, the monitoring station method is no longer appropriate to analyze the effects of dams on the temporal variability of downstream flows. Finally, this method cannot detect very subtle management changes that may occur sooner or later after construction of a dam.

To mitigate these weaknesses, the control station method, based on comparison of streamflows upstream and downstream from a dam, seems to be the most appropriate for easy detection of the effects of a dam on the temporal variability of streamflows. Based on this method, this article seeks to answer the following five questions:

1. Has there been a change in the heavy flood management mode since construction of the Matawin Dam? Heavy floods are involved in the hydroelectric power production.
2. In what year did this change occur?
3. What are the nature and extent of this change?
4. What are the causes of this change?
5. What is the impact of this change on the relationship between the climate indices and the characteristics of heavy floods downstream from dam? In this regard, streamflow

downstream of the dams depends mainly on the socio-economic activities for which the dams were built. However, in temperate regions in particular, streamflow released downstream of hydroelectric dams may be directly or indirectly affected by climate variability, since climate indices, the North Atlantic Oscillation (NAO) in this case, may affect hydropower production and energy prices, as is observed in Scandinavia, for instance (Cherry et al., 2005). Thus, it is possible to predict hydroelectric energy production base on the phases of the climate indices. It is therefore useful to analyze the relationship between climate indices, which affect climate variability, and streamflow characteristics downstream of dams.

To answer these five questions, we compare the interannual and interdecadal variability of heavy floods upstream and downstream from the Matawin Dam constructed on the Matawin River. The selection of this river is justified by the fact that it is the only river in Québec that has long streamflow measurements upstream and downstream from the dam. Moreover, this dam induced inversion of the natural hydrologic cycle. It is interesting to analyze the effect of this inversion on the temporal variability of the streamflows.

2.2 METHODOLOGY

2.2.1 Description of the Matawin River watershed and data sources

The main tributary of the Saint-Maurice River located on the north shore and a subtributary of the St. Lawrence River, the Matawin River drains a watershed of 5775 km² (Fig.1.1). It nicks the Canadian Shield and bathes in a subpolar climate with an annual wave surge of about 1000 mm and an annual mean temperature of 4°C. The entire watershed is covered by hardwood forest. Little agriculture is practiced. In 1930, the Taureau Dam (26m high, 348,000,000 m³ capacity) was erected, with the main objective of supplying the hydroelectric generating stations built on the Saint-Maurice River to produce hydroelectric power in winter, because the reservoir does not have a hydroelectric generating station. The dam operating mode is characterized by water

storage from snow melt during the period from April to May or, sometimes, to early June. Since the Taureau Reservoir is an annual reservoir, all of the water stored in spring is released in winter (January to March) to feed the hydroelectric generating stations constructed downstream on the Saint-Maurice River. This management mode has caused the inversion of the natural streamflow cycle (Fig. 1.2): the highest streamflows are recorded in winter and the lowest in spring downstream from the reservoir (Assani et al., 2002). Since impoundment of the reservoir in 1931, there has been practically no change in this management mode. Finally, we should mention that when the reservoir's maximum capacity is reached in spring, the surplus water brought by summer and fall precipitation obviously is no longer stored. Therefore, the water used in winter for hydroelectric power production comes exclusively from spring snow melt stored in the reservoir in spring. This allows comparison of the interannual variability of the characteristics of the spring heavy floods entering the reservoir (inflow) with those of the winter heavy floods released downstream from the reservoir (outflow).

Since 1931, the daily streamflows have been measured simultaneously upstream from the dam at the Saint-Michel-Des-Saints station (1390 km²; 46°41'N; 73°54'W) and just downstream from the reservoir (4070 km²; 46°51'N; 73°38'W). We should specify immediately that the upstream station is not influenced by the reservoir. Indeed, it is part of the Canadian Reference Hydrometric Basin Network (Ouarda et al., 1999). Remember that the selection of these reference stations is based on very strict anthropic impact criteria. Among these criteria is the absence of urbanization or any other major transformation (such as deforestation or the presence of a dam). The two stations are located in the same climatic, lithologic and vegetation context. Streamflows measured at the station downstream from the reservoir are not influenced at all by the contributions of a natural tributary. The homogeneity of physiographic conditions upstream and downstream and the absence of influence of a tributary make it easy to compare interannual streamflow variability upstream and downstream from the dam (Fig. 1.1). The streamflow data for these two stations come from the Environment Canada website (http://www.wsc.ec.gc.ca/hydat/H2O/index_f.cfm?, consulted in March 2007). We should specify that the daily streamflow data downstream from the reservoir stop in

1994. After that date, the data are archived by Hydro-Québec, who did not authorize their publication. We did, however, analyze these data and the results are identical to those derived from the pre-1994 data. The dam was constructed by the Shawinigan Water and Power Company in 1930 and then transferred to Hydro-Québec in 1963 when the Québec provincial government nationalized hydroelectric power.

Given that the climate may be one of the causes of the change in the heavy flood management mode downstream from the dam, we also analyzed the precipitation and temperature data. The precipitation data come from the Joliette station (46°01'N, 73°43'W) located south of the watershed due to the fact that no long-term continuous precipitation measurements exist in the watershed analyzed. The selection of the Joliette station is justified by its proximity and the existence of a long series of precipitation data. Moreover, these data are better correlated to the streamflows measured at the natural station (Saint-Michel-Des-Saints) of two rivers. The temperature data come from the Matawin Dam station, located near the dam, and the Shawinigan station (Fig. 1.1). However, the temperature measurements at the first station stop in 1982 (1928 to 1982). The second station (Shawinigan station) is located near the hydroelectric generating stations, which are fed by the water passing through the turbines at the Matawin Dam to produce hydroelectric power in winter. These two stations will allow us to compare the temporal variability of the temperature in the lower watershed of the Saint-Maurice River.

However, it should be kept in mind that the climate data measured at only one station cannot account for the interannual variability of a watershed's streamflows. Indeed, contrary to streamflows, the precipitation and temperature data measured at a single station do not integrate all the climate conditions prevailing throughout the watershed. Thus, according to Mitosek (1992), river streamflows undoubtedly are variables better adapted to monitor climate changes than temperature and precipitation.

Finally, we selected the following five climate indices: Atlantic Multidecadal Oscillation (AMO), Arctic Oscillation (AO), NAO (North Atlantic Oscillation), Pacific

decadal Oscillation (PDO) and Southern Oscillation index (SOI). The indices are considered to be temporal variability factors for streamflow and precipitation in North America in general, in Québec in particular, (e.g., Anctil and Coulibaly, 2004; Coulibaly and Burn, 2004; 2005; Enfield et al., 2001; Kingston et al., 2006; McCabe et al., 2004; Sutton and Hodson, 2005). The data from these indices were taken from the following websites: <http://www.cdc.noaa.gov/ClimateIndices/List>. (AMO, SOI, NINO3.4 and PDO, 2006/08/10), <http://www.cgd.ucar.edu/cas/jhurrell/indices.data.html> (NAO, 2006/08/10) and <http://jisao.washington.edu/data/ao/> (AO, 2006/08/10). These indices are defined briefly in Table 1.1. For each index, we calculated the seasonal means (seasonal climate indices) for each of the four seasons: fall (October to December), winter (January to March), spring (April to June) and summer (July to September). These seasonal climate indices were correlated to the seasonal characteristics (magnitude, duration, frequency and variability) of heavy floods (spring heavy floods downstream and winter heavy floods).

2.2.2 Constitution of the hydrologic series of seasonal heavy floods

We applied the ecological concept of “natural flow regime” to constitute the hydrologic series of heavy floods. According to this concept, the streamflows of a watercourse can be defined by five fundamental characteristics (Richter et al., 1996; Poff et al., 1997): magnitude, duration, timing, variability and frequency. To define these five fundamental characteristics for each of two seasons, we used the method described in Assani et al. (2010c), which consists first in creating a series of the highest maximum streamflows measured during Spring (upstream from the dam) and during Winter (downstream from the dam) each year in the 1934-1994 period. This is the seasonal maximum streamflow series. Then we selected the lowest value (Q_m) of the maximum streamflows constituted in the first step. Finally, for each season and each year, we selected all the daily streamflows $\geq Q_m$. For this last series, we calculated the four fundamental characteristics in the following manner:

- The magnitude was calculated by taking the average of all the daily streamflows $\geq Q_m$ measured each year in spring (upstream from the dam) and in winter (downstream from

the dam). These latter streamflows are those actually released downstream of the dam in the winter, as opposed to the naturally reconstituted streamflows.

- The duration is the average number of days on which the daily streamflows reached or exceeded Q_m in spring (upstream from the dam) and in winter (downstream from the dam) each year.

- The frequency is the number of times the daily streamflows reached or exceeded Q_m in spring (upstream from the dam) and in winter (downstream from the dam) each year. This frequency also represents the number of rising limb and falling limb heavy flood phases each season and each year.

- The variability rate of streamflows that reached or exceeded Q_m was calculated by means of the coefficient of variation (CV, ratio between the average of the streamflows $\geq Q_m$ and its standard deviation). However, calculation of these coefficients of variation is only possible when the duration of streamflows $\geq Q_m$ is greater than two days during one season of a given year, which was the case both downstream and upstream of the dam. A CV value was therefore calculated for every year for flow upstream and downstream of the dam.

However, we did not compare the temporal variability of timing of the heavy floods because, although it plays an essential role in the life cycles development of aquatic organisms (Poff et al., 1997; Richter et al., 1996), this variability is of little interest to our study.

2.2.3 Statistical data analysis

The statistical analysis pursued the following objectives:

- Compare the trend of variability of the heavy flood characteristics upstream and downstream from the Taureau Reservoir. This trend was calculated by simple linear

regression and Mann-Kendall test (Svensson et al., 2005). Given the difference in size of the catchment at the two streamflow measurement stations, linear regression and the Mann-Kendall test were applied to standardized values. The use of this transformation is also justified by the fact that this study does not aim to compare the actual values of the flood characteristics, this being impossible given the difference in catchment size at the two stations (upstream and downstream of the dam). Finally, the Student t-test was used to quantify the shifts in the arithmetic mean of the hydrologic series. This test was applied directly on the actual values (neither standardized nor smoothed) of the four streamflow characteristics.

- Compare the succession of positive and negative anomalies of the magnitude of heavy floods. This succession was calculated by the simple moving average over a ten-year period. This period was selected to compare our results with those of other studies. The purpose of this method is to determine whether, during dry decades, the magnitude of heavy floods decreases downstream from the dam and whether, on the other hand, it increases during rainy decades.

- Compare whether the heavy flood characteristics are correlated to the same climate indices upstream and downstream from the dam. This correlation was calculated by canonical correlation analysis. This method was chosen because it allows calculation of the correlation between variables of two different groups, on one hand, and between variables of the same group, on the other hand, while maximizing correlation coefficients. As such, it provides the general theoretical framework for factorial discriminant analysis, multivariate regression and correspondence analysis techniques (Ouarda et al., 2001). In this study, the five climate indices are the independent variables and the four characteristics of heavy floods are the dependent variables. Canonical correlation analysis is performed first by extracting the canonical factors from both groups of variables. Canonical factors derived from the independent variables group (climate indices) are labeled W_q (W_1 , W_2 , W_3 and W_4) and those derived from the dependent variables group (heavy floods characteristics) are labeled V_p (V_1 , V_2 , V_3 and V_4). The point of the analysis is to maximize the correlation coefficients between the

canonical factors (W_q and V_p) for both groups. Note that W_q and V_p are linear combinations of originally independent and dependent variables. Thus, the correlation coefficients are calculated at two levels. First, correlation coefficients are calculated between the canonical factors V_p and W_q . These coefficients are called canonical correlation coefficients (CC1, CC2, CC3 and CC4). Second, simple correlation coefficients between canonical factors V_p and the original dependant variables on the one hand, and between canonical factors W_q and the original independent variables, on the other hand, are calculated. These simple correlation coefficients are called structure coefficients. The mathematical details of the canonical correlation analysis are described in Afifi and Clark (1996), among others. Canonical analysis was also applied to the standardized data at the annual scale, and to the smoothed data (smoothed over 10 years) at the decadal scale.

2.3 RESULTS

2.3.1 Comparison of interannual and interdecadal variability of seasonal heavy flood flows upstream and downstream from the Taureau Reservoir

Upstream from the reservoir, an overall upward trend is observed for streamflows for all heavy flood characteristics, except for the duration (Fig. 1.3). This last characteristic tends to decrease instead. But as shown by the coefficient of determination (R^2) values of the regression curves, no trend is statistically significant at the 5% threshold. This result was confirmed with the Mann-Kendall test. Consequently, there is no significant change in the interannual variability of heavy flood characteristics upstream from the dam. On the other hand, downstream from the dam, the changes that affect the interannual variability of all the fundamental characteristics of heavy floods are statistically significant. Indeed, all the regression lines are significant at the 5% threshold. Thus, downstream from the dam, the magnitude, frequency and variability rate of heavy floods decrease significantly over time (Fig. 1.4). However, their duration increases over time. It follows that the heavy flood characteristics vary inversely upstream and downstream from the Matawin Dam.

This inversion becomes clearer on the decadal scale (Fig. 1.5 and 1.6). Both upstream and downstream from the dam, the variability of these characteristics shows two distinct periods: a positive anomalies period and a negative anomalies period. However, the succession of these two phases is inverted over time. Thus, upstream from the dam, the magnitude, frequency and rate of variation (coefficient of variation) are characterized by a succession of a negative anomaly period (below-average values) followed by a positive anomaly period (values above the series average). However, the duration is not characterized by this succession. Instead it shows an irregular alternation of periods. Downstream from the dam, all four characteristics show a succession of only two periods. Moreover, contrary to upstream, the change from one period to the other occurred almost simultaneously, around 1964. Thus, after that date, the average duration of the heavy floods was multiplied by about 5 (Table 1.2). The other three characteristics showed decreases ranging from 18% (magnitude) to 74% (frequency).

2.3.2 Comparison of the relationship between heavy flood characteristics and climate indices upstream and downstream from the dam

One of the possible consequences of the change in the temporal variability of the characteristics downstream from the dam is the alteration of their relationship with the climate indices. We thus want to verify whether the change observed downstream from the dam altered the relationship between these heavy flood characteristics and the climate indices. Remember that several studies have shown that the relationship between the climate indices and the streamflows of natural rivers varied over time due to changes in the pluviometric and thermal regimes (Anctil and Coulibaly, 2004; Coulibaly and Burn, 2004; 2005). It is therefore interesting to verify whether dams can also alter this relationship downstream. Remember that the streamflow characteristics were correlated with the winter, spring, summer and fall climate indices. The comparison of the results revealed that the winter climate indices were the best correlated to the streamflow characteristics both upstream and downstream from the dam. Consequently, our analysis will be limited exclusively to these winter indices.

Concerning the degree of linkage between the streamflow characteristics and the climate indices, Table 1.3 shows that the value of the first canonical coefficient of correlation, which measures this relationship, is very high and almost equal upstream and downstream from the dam. Consequently, the change observed downstream from the dam does not affect the degree of linkage between the flood flow characteristics and the climate indices. The analysis of the canonical factor associated with the streamflow characteristics reveals that, downstream from the dam, all four streamflow characteristics are correlated to the canonical factor V1 (Table 1.5), whereas upstream, three characteristics (magnitude, frequency and variability) are correlated to V1 (Table 1.4). Thus, the duration is not correlated to these three characteristics upstream from the dam. It is correlated to canonical factor V3. As for the canonical factors associated with the climate indices, AMO is the climatic index best correlated to W1 both upstream and downstream from the dam. Thus, the negative anomaly period for this index corresponds to the positive anomaly period upstream of the dam (negative correlation) and to the positive anomaly period (positive correlation) downstream of the dam (Fig. 1.7). These results were also observed at the annual scale. Note that the results are presented at the decadal scale because the effect of AMO on streamflow, among others, is better defined at that scale than at the annual scale (McCabe et al., 2004). Finally, regardless of the scale of analysis, these results show that the relationship between heavy flood characteristics and climate indices shifts downstream of the dam. This shift affects the sign of the correlation between AMO and the flood characteristics, which is negative upstream of the dam and positive downstream.

2.3.3 Temporal variability of precipitation and temperature

One of the main hypotheses put forth to explain the change observed downstream of the dam is undoubtedly the change in precipitation and temperature regimes. To support this thesis, we analyzed the temporal variability of precipitation (Joliette station) and temperature (Matawin Dam and Shawinigan stations). Regarding precipitation, we limited our study to winter precipitation, which generates spring flood flows upstream and which can also influence the quantity of water released downstream from the dam in

winter. For temperature, we analyzed the winter temperature (daily maximum and minimum), which can significantly influence the quantity of water released in winter downstream from the dam. This analysis shows no significant trend at the 5% threshold in the interannual variability of winter precipitation (Fig. 1.8). As for temperature, it tends to decrease at the station located near the dam (Fig. 1.9), but to increase at the Shawinigan station (Fig. 1.10). However, it must be mentioned that the Shawinigan station is located in a more urbanized environment than the Matawin Dam station. Whatever the case may be, the temperature analysis at these two stations does not allow a definite conclusion of climate cooling or warming on the scale of the Saint-Maurice River watershed. We should note, however, that the study by Zhang et al. (2000) of temperature variability over the past century revealed warming in Quebec south of the 50th parallel North. This is partly confirmed by the Shawinigan station data.

2.4 DISCUSSION AND CONCLUSION

The comparison of interannual and interdecadal variability of heavy floods (in spring upstream and in winter downstream from the Matawin Dam) during the 1934-1994 period revealed a change in the heavy flood management mode in winter downstream from the dam. This change translates into a very significant increase in the duration of the heavy floods released downstream from the dam. Indeed, the duration (in days) of these heavy floods was multiplied by 5, increasing from 5 to 28 days on the average. This increase in the duration of heavy floods triggered a significant decrease in the other characteristics of heavy floods downstream from the dam, namely the magnitude, frequency and variability. When the duration of flood flows is extended, this decreases the average of their magnitude, frequency and variability. There is thus very great consistency in the temporal variability of these four fundamental characteristics downstream from the dam. Moreover, this change occurred simultaneously for these four characteristics, in the mid-1960s (1964). The change was followed by an inversion of the temporal variability of heavy flood characteristics upstream and downstream from the dam: the heavy flood characteristics tend to increase upstream but to decrease downstream from the dam.

From the climatic point of view, this change in duration of heavy floods also inverted the relationship between the climate indices and the two fundamental characteristics of flood flows (magnitude and frequency). Indeed, these two characteristics are correlated negatively to AMO upstream from the dam but positively downstream from the dam. In addition, upstream from the dam, the duration of heavy floods is not correlated significantly to any climatic index but becomes correlated to AMO downstream from the dam. It follows that in the Matawin River watershed, AMO is the only climatic index that influences the interdecadal variability of heavy floods produced by spring snow melt. Its influence has mainly been documented for summer precipitation and streamflows in North America (e.g. Curtis, 2008; McCabe et al., 2004; Sutton and Hodson, 2004). This study shows that AMO also influences streamflows produced by snow melt. In Quebec, this index only shows a significant correlation with streamflow in rivers located on the North shore of the St. Lawrence River (Assani et al., 2010a, 2010b).

After addressing many factors likely to explain the change in duration of flood flows after 1964, we retained two factors, namely the decrease in temperature observed between 1960 and 1980 at the station located near the Matawin Dam and the change of management mode due to the change in the owner of the dam.

Concerning the temperature, the cooling observed in winter since the 1960s could explain what the water releases are spread over many days to produce hydroelectric power. Since the same quantity of water is always stored during spring snow melt, the production of hydroelectric power over relatively long periods due to low temperatures in winter may justify this spreading of heavy floods. However, the cooling trend is not observed throughout the Saint-Maurice River watershed. The temperature measured at the Shawinigan station instead reveals a warming trend. This warming cannot be attributed to the “heat island” effect, because Shawinigan is a small agglomeration of approximately 60,000 inhabitants. As we have already mentioned, this warming was observed at many stations in Quebec (Zhang et al., 2000). It follows that the cooling observed in the Matawin River watershed did not affect the entire Saint-Maurice River

watershed. Consequently, temperature variability does not seem to be a cause of the change in strong flood flow management downstream from the Matawin Dam since the mid-1960s.

Regarding the change of owner, it must be remembered that the electric power sector was nationalized in Québec in 1963. Following this nationalization, the Shawinigan Water and Power Company, which had managed the Matawin Dam since its construction, was expropriated. Hydro-Québec, created in 1944, thus became the sole owner of the dams and reservoirs constructed in the Saint-Maurice River watershed, among others (Hogue et al., 1979). The main consequence of this nationalization was the integration of the hydroelectric power produced in the Saint-Maurice River watershed into a vaster distribution grid put in place by Hydro-Québec. The hydroelectric power produced by this grid is intended for consumption on the provincial and national scales (export to other Canadian provinces, such as Ontario, New Brunswick or Newfoundland) and at the international level (export to the United States). Consequently, the market for power produced in the Saint-Maurice River watershed was integrated into a distribution grid intended for a vaster market than the one served by the Shawinigan Water and Power Company. We should remember that before nationalization, this power was mainly intended to supply the manufacturing industries located in the watershed and the City of Montréal. This expansion of the market necessitated an increase in hydroelectric power production in the watershed, which thus could explain why heavy floods were spread out in winter to maintain production all winter long. In addition, apart from spreading out heavy floods, Hydro-Québec built and redeveloped other structures in the Saint-Maurice River watershed (Hydro-Québec, 2003). Such an investment could only be justified by this government-owned utility's intention to increase hydroelectric power production in the Saint-Maurice River watershed. However, we were not able to obtain data on hydroelectric power generation in the St. Maurice watershed, as these are deemed classified and not accessible to the public. The disappearance of many manufacturing industries since the 1980s in the Shawinigan and Trois-Rivières regions, which were the basis for construction of the dams and reservoirs in the watershed, should result instead in a decrease in hydroelectric

power production. Finally, the reservoir management mode also changed after nationalization in the Saint-Maurice River watershed. According to Hogue et al. (1979), citing a study by Nesbitt, Thomson and Company published in September 1960 and used by the Minister of Natural Resources, René Lévesque, in 1962 in response to the attacks of the Shawinigan Water and Power Company Group, a fierce opponent of the nationalization of hydroelectric power, “the Shawinigan Water and Power Company Group benefited from considerable purchases, at advantageous prices, of the surplus power produced by Hydro-Québec at Beauharnois during slack times, which allows it to retain the water in its own reservoirs upstream on the Saint-Maurice”. This water storage policy was not applied by Hydro-Québec after acquisition of the Saint-Maurice River dams and reservoirs. This could also explain the increase in the duration of floods after nationalization.

Whatever the case may be, this study shows the contribution of the natural flow regime concept to the analysis of the Matawin Dam’s influence on temporary streamflow variability. Indeed, simply analyzing streamflow magnitude, the only characteristic often analyzed, could never produce coherent explanations of the change of heavy flood management mode observed upstream from this dam. Finally, from the morphologic point of view, the increase in the duration of heavy floods downstream from the Matawin Dam in winter is likely to favour strong shoreline erosion, despite the decrease in magnitude. Consequently, even in morphologic terms, it is necessary to account for all the fundamental streamflow characteristics for a better interpretation of the morphologic changes downstream from the dams. There is still very little study of this aspect (Graf, 2006).

REFERENCES

- Afifi AA, and Clark V. 1996. Computer-aided multivariate analysis. Chapman and Hall, New York, 3rd edition, 505p.
- Andrews ED, and Pizzi LA. 2000. Origin of the Colorado River experimental flood in Grand Canyon. *Hydrological Sciences Journal* **45**: 607-627.
- Anctil F., and Coulibaly P. 2004. Wavelet analysis of the interannual variability in Southern Québec streamflow. *Journal of Climate* **17**: 163-173.
- Assani AA, Buffin-Bélanger T., and Roy AG. 2002. Analyse des impacts d'un barrage sur le régime hydrologique de la rivière Matawin (Québec, Canada). *Revue des Sciences de l'Eau* **15** : 557-574.
- Assani AA, Gravel E, Buffin-Bélanger T, and Roy AG. 2005. Impacts des barrages sur les débits annuels minimums en fonction des régimes hydrologiques artificialisés au Québec (Canada). *Revue des Sciences de l'Eau* **18** : 103-127.
- Assani AA, Stichelbout E, Roy AG, and Petit F. 2006. Comparison of impacts of dams on the annual maximum flow characteristics in the three regulated hydrological regimes in Québec. *Hydrological Processes* **20** : 3485-3501.
- Assani AA, Lajoie F, and Laliberté C. 2007. Impacts des barrages sur les caractéristiques des débits moyens annuels en fonction du mode de gestion et de la taille des bassins versants au Québec. *Revue des Sciences de l'Eau* **20** : 127-146.
- Assani AA, Lajoie F, Vadnais ME, and Beauchamp G. 2008. Analyse de l'influence de l'oscillation arctique sur la variabilité interannuelle des précipitations dans le bassin versant de la rivière Saint-François (Québec, Canada) au moyen de la méthode des corrélations canoniques. *Revue des Sciences de l'Eau* **21** : 21-33.
- Assani AA, Matteau M, Mesfioui M, and Campeau S. 2009. Analysis of factors influencing the extent of hydrological changes of annual maximum and minimum flow downstream from dams in Quebec. In Hayes P and Barnes MC (ed.): Dams: impacts, stability and design. Nova Sciences Publishers, Inc., New-York, 197-214.

- Assani AA, Landais D, Mesfioui M, and Matteau M. 2010b. Relationship between the Atlantic Multidecadal Oscillation index and variability of mean annual flows for catchments in the St. Lawrence watershed (Quebec, Canada) during the past century. *Hydrology Research* (in press).
- Assani AA, Charon S, Matteau M, Mesfioui M, and Quessy JF. 2010a. Temporal variability modes of floods for catchments in the St. Lawrence watershed (Quebec, Canada). *Journal of Hydrology* (in press).
- Assani AA, Quessy JF, Mesfioui M, and Matteau M. 2010c. An example application the ecological "Natural flow regime" paradigm in Hydroclimatology". *Advances In Water Resources* (accepted).
- Batalla RM, Gomez CM, and Kondolf GM. 2004. Reservoir-induced hydrological changes in the Ebro River basin (NE Spain). *Journal of Hydrology* **290**: 117-136.
- Cherry J, Cullens H, Visbeck M, Small A, and Uvo C. 2005. Impacts of the North Atlantic Oscillation on Scandinavian hydropower production and energy markets. *Water Resources Management* **19**: 673-691.
- Coulibaly P., and Burn DH. 2004. Wavelet analysis of variability in annual Canadian streamflows. *Water Resources Research* **40**: W03105, doi:10.1029/2003WR002667.
- Coulibaly P., and Burn DH. 2005. Spatial and temporal variability of Canadian seasonal streamflows. *Journal of Climate* **18**: 191-210.
- Curtis S. 2008. The Atlantic multidecadal oscillation and extreme daily precipitation over the US and Mexico during the hurricane season. *Climate Dynamics* **30**: 343-351.
- Enfield DB, Mestas-Nuñez AM., and Trimble PJ. 2001. The Atlantic multidecadal oscillation and its relation to rainfall and river flows in the continental U.S. *Geophysical Research Letters* **28**: 2077-2080.
- Galat DL, and Lipkin R. 2000. Restoring ecological integrity of great rivers: historical hydrographs aid in determining reference conditions for the Missouri River. *Hydrobiologia*, 422/423: 29-48.

- Graf WL. 2006. Downstream hydrologic and geomorphologic effects of large dams on American rivers. *Geomorphology* **79**: 336-360.
- Hogue C, Bolduc A, and Larouche D. 1979. *Québec. Un siècle d'électricité*. Libre Expression, Montréal, 406p.
- Hydro-Québec. 2003. *Sommaire du plan des mesures d'urgence en cas de bris de barrage pour le bassin versant Saint-Maurice*. Direction Barrages et Ouvrages de Génie civile, Shawinigan-Sud, Québec, 72p + annexes.
- Kingston DG, Lawler DM, and McGregor GR. 2006. Linkages between atmospheric circulation climate and streamflow in the northern North Atlantic: research prospects. *Progress in Physical Geography* **30**: 143-174.
- Lajoie F., Assani AA, Roy AG, and Mesfioui M. 2007. Impacts of dams on monthly flow characteristics. The influence of watershed size and seasons. *Journal of Hydrology* **334**: 423-439.
- Leconte R, Pietroniro A, Peters D, and Prowse TD. 2001. Effects of flow regulation on hydrologic patterns of large, inland Delta. *Regulated Rivers: Research & Management* **17**: 51-65.
- Loizeau J-L, and Dominik J. 2000. Evolution of upper Rhone River discharge and suspended sediment load during the last 80 years and some implications for Lake Geneva. *Aquatic Sciences* **62**: 54-67.
- McCabe GJ, Palecki MA, and Betancourt JL. 2004. Pacific and Atlantic Ocean influences on multidecadal drought frequency in the United States. *Proceedings of the National Academy of Science of the U.S.A.* **101**: 4136-4141.
- Magilligan FJ, and Nislow KH. 2001. Long-term changes in regional hydrologic regime following impoundment in a humid-climate watershed. *Journal of the American Water Resources Association* **37**: 1551-1569.
- Magilligan FJ, and Nislow KH. 2005. Changes in hydrologic regime by dams. *Geomorphology* **71**: 61-78.

- Matteau M, Assani AA, and Mesfioui M. 2009. Application of multivariate statistical analysis methods to the dam hydrologic impact studies. *Journal of Hydrology* 371: 120-128.
- Mitosek HT. 1992. Occurrence of climate variability and change within hydrological times series: A statistical approach. Report prepared for the Wold climate Programme – Projet A2, CP-92-05, IIASA, Laxenburg, Austria, 167pp.
- Montaldo N, Mancini M, and Rosso R. 2004. Flood hydrograph attenuation induced by a reservoir system: analysis with a distributed rainfall-runoff model. *Hydrological Processes* 18: 545-563.
- Ouarda TBMJ., Rasmussen PF., Cantin J-F, Bobée B, Laurence R, Hoang V.D, and Barabé G. 1999. Identification d'un réseau hydrométrique pour le suivi des modifications climatiques dans la province de Québec. *Revue des Sciences de l'Eau* 12 : 425-448.
- Ouarda TBMJ, Girard C, Cavadias GS, Bobée B (2001). Regional flood frequency estimation with canonical correlation analysis. *Journal of Hydrology* **254**: 157-173.
- Page K, Read A, Frazier P, Mount N. 2005. The effect of altered flow regime on the frequency and duration of bankfull discharge: Murrumbidgee River, Australia. *River Research and Applications* **21**: 567-578.
- Peggs MA, Pierce CL., and Roy A. 2003. Hydrological alteration along the Missouri River basin: a time series approach. *Aquatic Sciences* **65**: 63-72.
- Peters DL, and Prowse T. 2001. Regulation effects on the lower Peace River, Canada. *Hydrological Process* **15**: 3181-3194.
- Piron M, and Neumann K. 2008. Hydrologic alterations in the Wabash River watershed, USA. *River Research and Applications* 24: 1175-1184.
- Poff NL, Allan JD, Bain MB, Karr JR, Prestegard KL, Richter BD, Sparks RE, and Stromberg JC. 1997. The natural flow regime. A paradigm for river conservation and restoration. *BioScience* **47**: 769-784.

- Richter BD, Baumgartner JV, Powell J, and Braun DP.1996. A method for assessing hydrologic alteration within ecosystems. *Conservation Biology* **10**: 1163-1174.
- Singer MB. 2007. The influence of major dams on hydrology through the drainage network of the Sacramento River Basin, California. *River Research and Applications* **23**: 55-72.
- Small MF, Bonner TH, and Baccus JT. 2009. Hydrologic alteration of the Lower Rio Grande Terminus: a quantitative assessment. *River Research and Applications* **25**: 241-252.
- Sutton RT, and Hodson DLR. 2005. Atlantic Ocean forcing of North American and European summer climate. *Science* **309**: 115-118.
- Svensson C., Kundzewicz W.Z., and Maurer T. 2005. Trend detection in river flow series: 2. Flood and low-flow index series. *Hydrological Sciences Journal* **50**: 811-824.
- Yang D, Ye B, and Shiklomanov A. 2004. Discharge characteristics and changes over the Ob River watershed in Siberia. *Journal of Hydrometeorology* **5**: 595-610.
- Yang T, Zhang Q, Chen YD, Tao X, Xu C-Y, and Chen X. 2008. A spatial assessment of hydrologic alteration caused by dam construction in the middle and lower Yellow River, China. *Hydrological Processes*. **22**: 3829-3843.
- Ye B, Yang D, and Kane DL. 2003. Changes in Lena River streamflow hydrology: human impacts versus natural variations. *Water Resources Research* **39**: SWC81-SWC814.
- Zhang X, Vincent LA, Hogg WD, and Niitsoo A. 2001. Trends Temperature and precipitations trends in Canada during the 20th century. *Atmosphere-Ocean* **38**: 395-429.

Table 1.1 The five climatic indexes

Indices	Location of the Phenomenon	Index Calculation Mode
Atlantic Multi-Decadal Oscillations (AMO)	North Atlantic Ocean in the Northern Hemisphere	Mean SST north of the Equator in the North Atlantic Ocean, between 0°N-60°N and 75°W-7.5°W
Arctic Oscillation (AO)	Extratropical Northern Hemisphere	Difference in pressure between the North Pole and the 45°N parallel
North Atlantic Oscillation (NAO)	Extratropical North Atlantic zone	Difference in pressure between the north (Reykjavik, Iceland) and the (Ponta Delgada, Spain) of the North Atlantic Basin
Pacific Decadal Oscillation (PDO)	the North Pacific Ocean, poleward of 20N.	derived as the leading PC of monthly SST anomalies in the North Pacific Ocean, poleward of 20N.
Southern Oscillation Index (SOI)	Tropical Southern ocean	Difference in pressure between the South Pacific occidental (Darwin) and the Central South Pacific (Tahiti)

SST = Sea Surface Temperature; SLP = Sea Level Pressure.

Table 1.2 Rate of variation of the average values of heavy flood characteristics downstream from the Matawin Dam after 1964

Characteristics	1934-1964	1965-1994	Rate of variation (%)
Magnitude (m ³ /s)	161.4 (23.99)	131.7 (13.83)	-18
Duration (days)	5 (3.7)	28 (20.1)	+ 460
Frequency	10.4 (4.04)	2.7 (2.39)	-74
Variability (CV in %)	20.5(8.89)	11.9 (6.98)	-40

CV = coefficient of variation; () = standard deviation. These averages are significantly different from the 1% threshold (Student's t-test). - = decrease; + = increase.

Table 1.3 Comparison of the values of the canonical coefficients of correlation (R^2) calculated between the fundamental characteristics of heavy floods and the winter climate indices upstream and downstream from the Matawin Dam

	Upstream from dam			Downstream from dam		
	R^2	F	p>F	R^2	F	p>F
1	0.972	30.70	< 0.0001	0.983	30.47	<0.0001
2	0.874	16.78	< 0.0001	0.829	12.21	<0.0001
3	0.763	12.72	<0.0001	0.768	9.83	<0.0001
4	0.560	10.30	0.0002	0.353	3.21	0.0498

R = canonical correlation coefficient. Canonical correlation coefficient values for which $p < 0.05$ are statistically significant.

Table 1.4 Canonical roots calculated between the characteristics of spring heavy floods and the winter climate indices upstream from the dam

	V1	V2	V3	V4	W1	W2	W3	W4
Magnitude	-0.899	-0.340	0.249	0.118				
Duration	0.002	-0.076	0.972	-0.223				
Frequency	-0.827	0.203	-0.401	-0.339				
Variability	0.972	-0.027	0.234	0.003				
AMO					0.956	0.213	-0.102	0.027
AO					-0.068	-0.858	0.198	-0.085
NAO					-0.374	-0.850	0.260	0.129
PDO					-0.183	-0.156	0.389	0.784
SOI					0.124	0.387	0.290	-0.725
VE (%)	60.9	4	6.2	4.4	22.1	33.5	7	23.2

CV = coefficient of variation; VE = Explained variance. The larger significant correlation coefficients are shown in bold.

Table 1.5 Canonical roots calculated between the characteristics of winter heavy floods and the winter climate indices downstream from the dam

	V1	V2	V3	V4	W1	W2	W3	W4
Magnitude	0.941	-0.149	0.302	-0.028				
Duration	-0.969	-0.198	-0.150	0.002				
Frequency	0.997	-0.039	0.069	-0.015				
Variability	0.925	-0.224	0.240	-0.189				
AMO					0.959	0.233	-0.006	0.107
AO					-0.343	0.103	0.019	0.480
NAO					-0.619	-0.030	0.136	0.575
PDO					-0.532	0.548	-0.264	0.558
SOI					0.328	-0.039	0.673	-0.661
VE (%)	91.8	2.8	4.4	1	36.2	7.3	10.8	26.4

CV = coefficient of variation; VE = Explained variance.

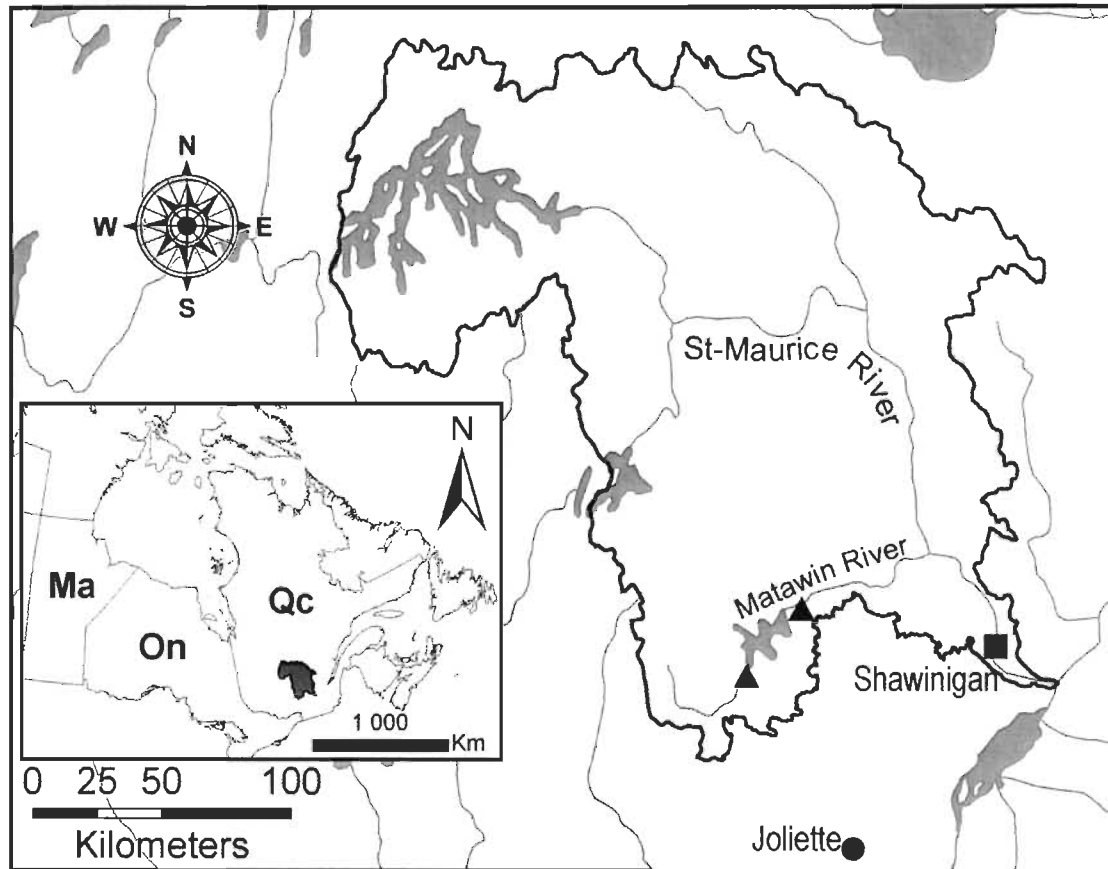


Figure 1.1 Location of the streamflow (triangle), precipitations (point) and temperature (rectangle) stations.

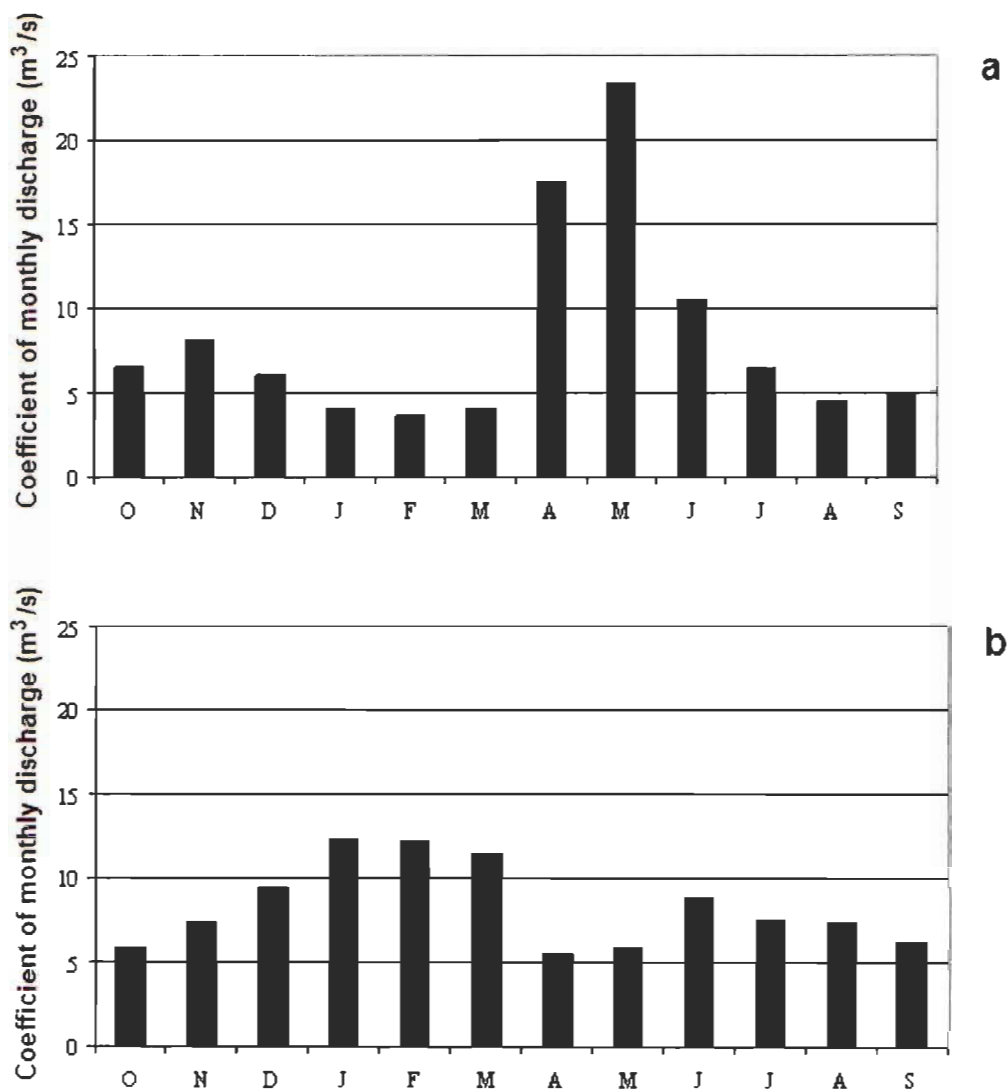


Figure 1.2 Comparison of the monthly hydrologic regimes upstream (a) and downstream (b) from the Taureau Reservoir. This figure shows the inversion phenomenon downstream from the reservoir on the annual scale.

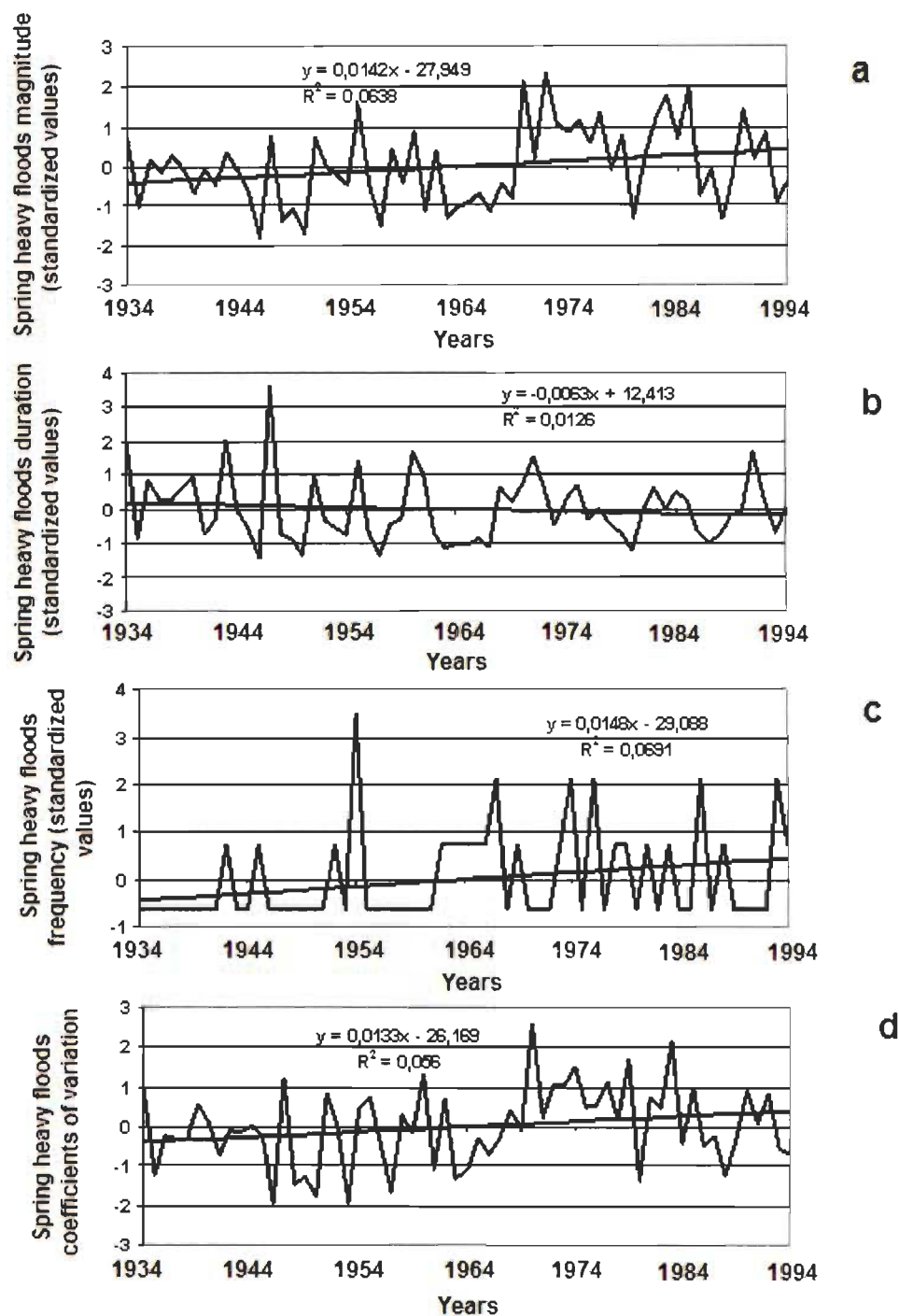


Figure 1.3 Comparison of interannual variability of spring heavy floods characteristics (standardized values) upstream from the Matawin dam. a = magnitude; b = duration; c = frequency; d = variability (coefficient of variation).

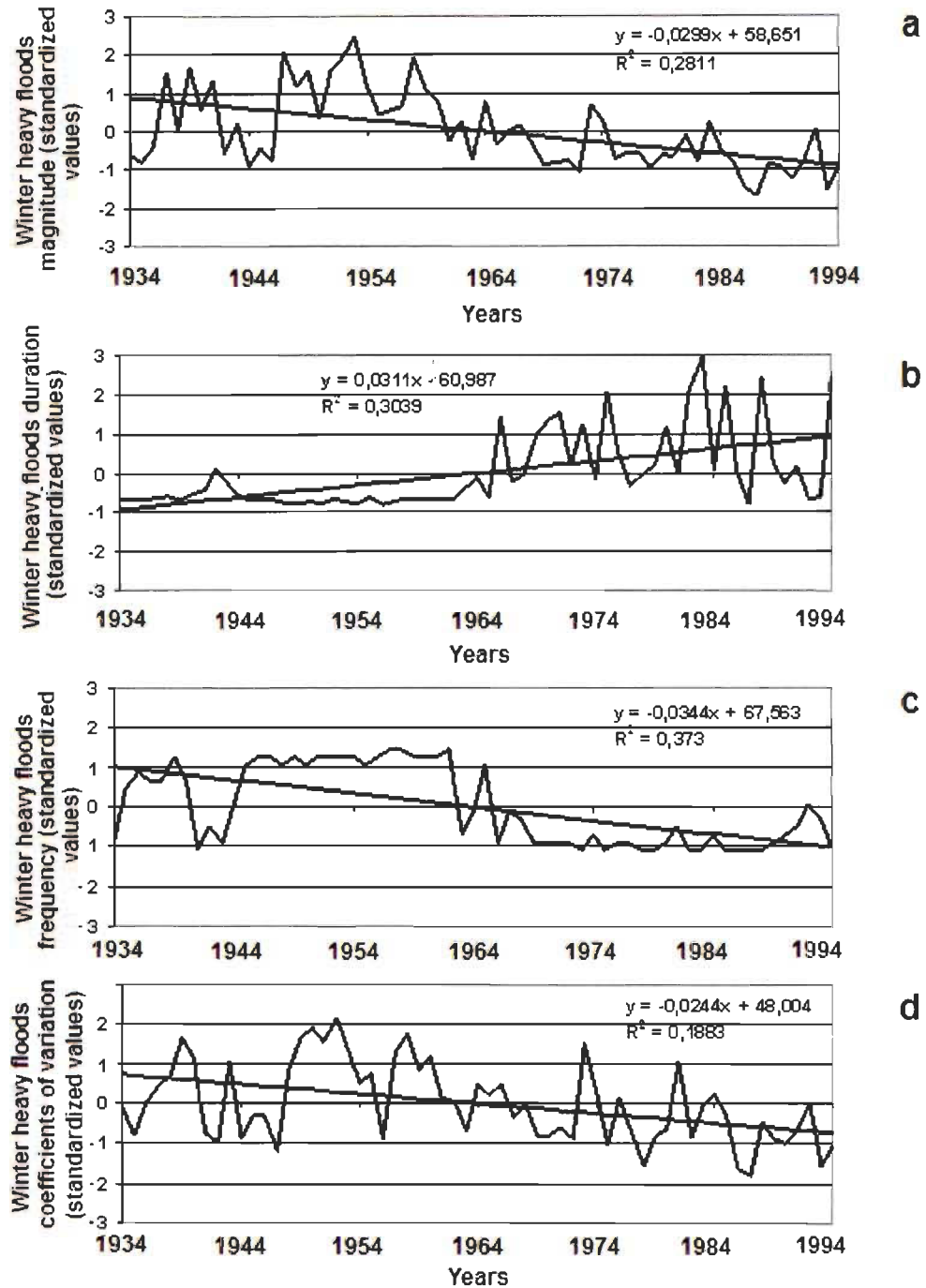


Figure 1.4 Comparison of interannual variability of winter heavy floods characteristics (standardized values) downstream from the Matawin dam. a = magnitude; b = duration; c = frequency; d = variability (coefficient of variation).

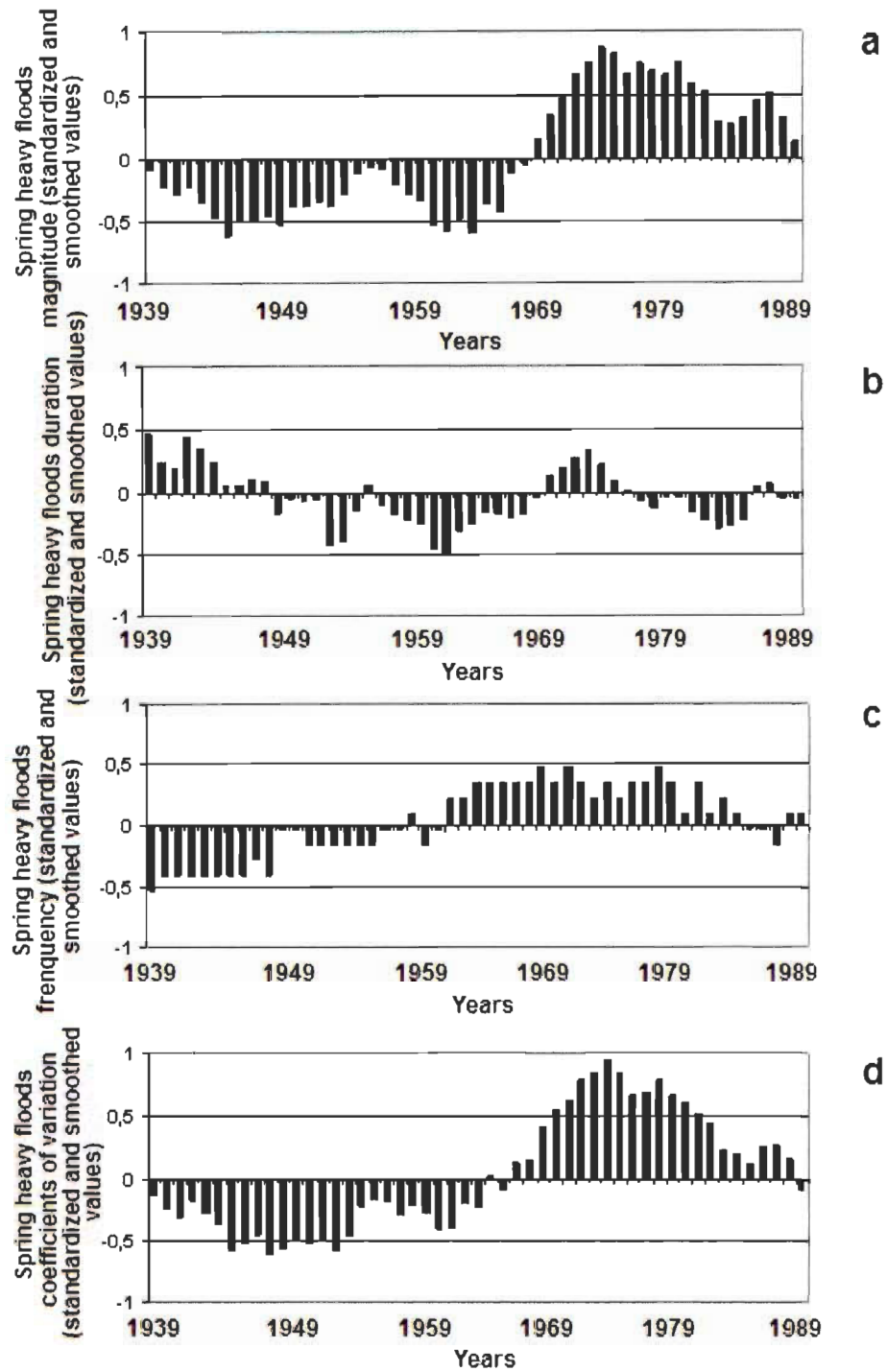


Figure 1.5 Comparison of interdecadal variability of spring heavy floods characteristics (standardized and smoothed values) upstream from the Matawin dam. a = magnitude; b = duration; c = frequency; d = variability (coefficient of variation).

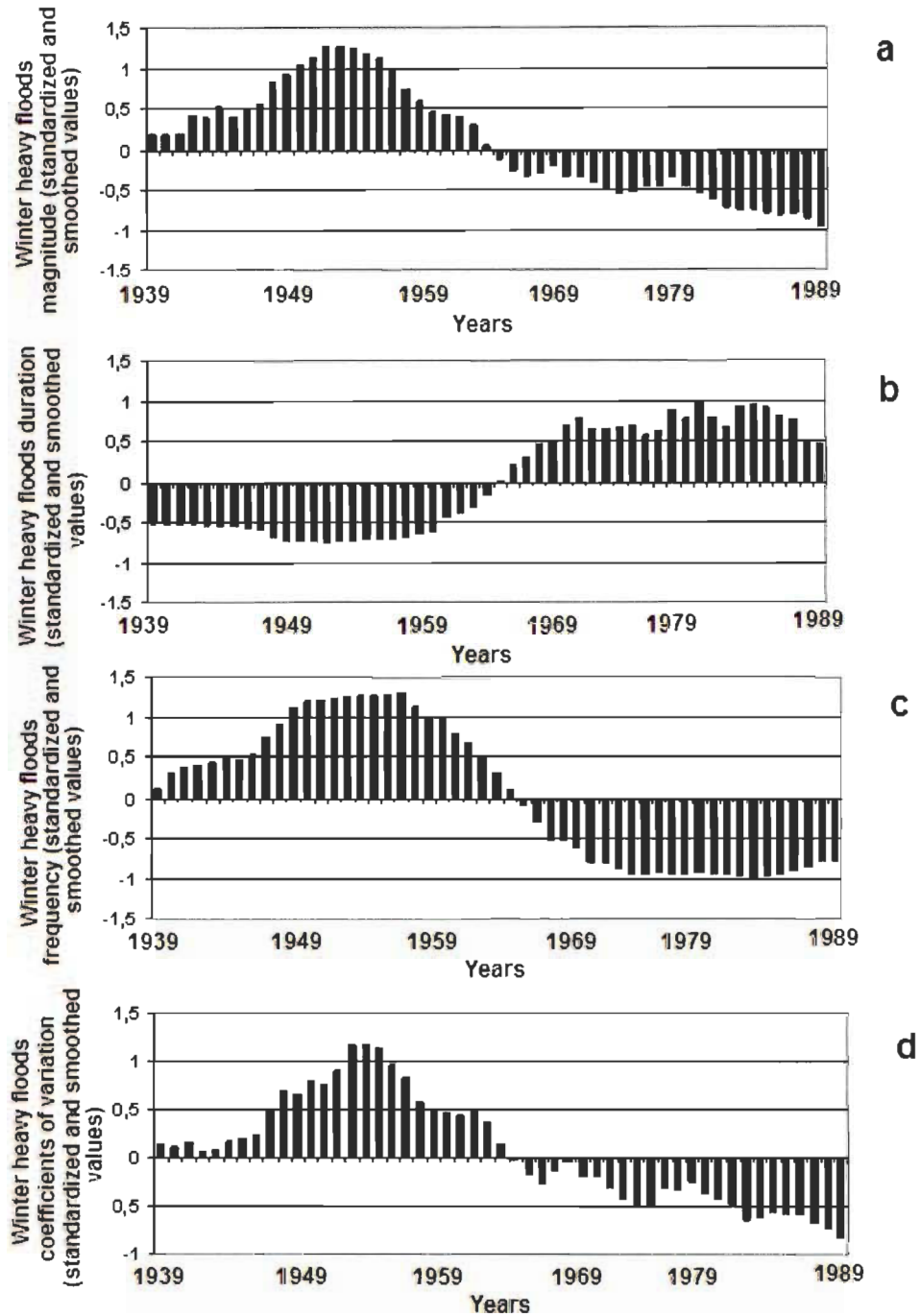


Figure 1.6 Comparison of interdecadal variability winter heavy floods characteristics (standardized and smoothed values) downstream from the Matawin dam. a = magnitude; b = duration; c = frequency; d = variability (coefficient of variation).

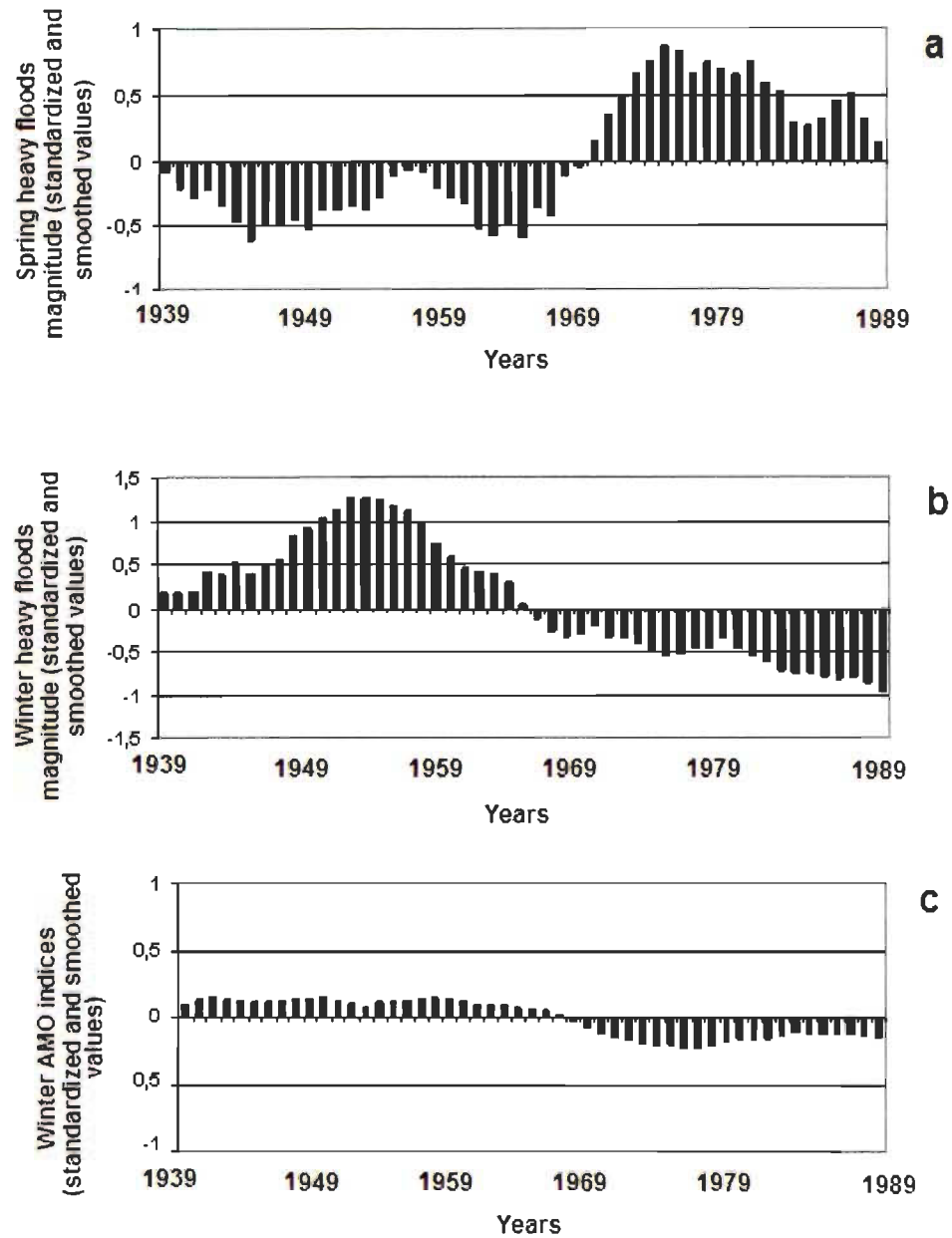


Figure 1.7 Comparison of interdecadal variability of heavy spring floods magnitude (standardized and smoothed values) upstream from the reservoir (a), heavy winter floods magnitude downstream from the reservoir (b) and the winter AMO index (c). Smoothed values were calculated over a 10-year period.

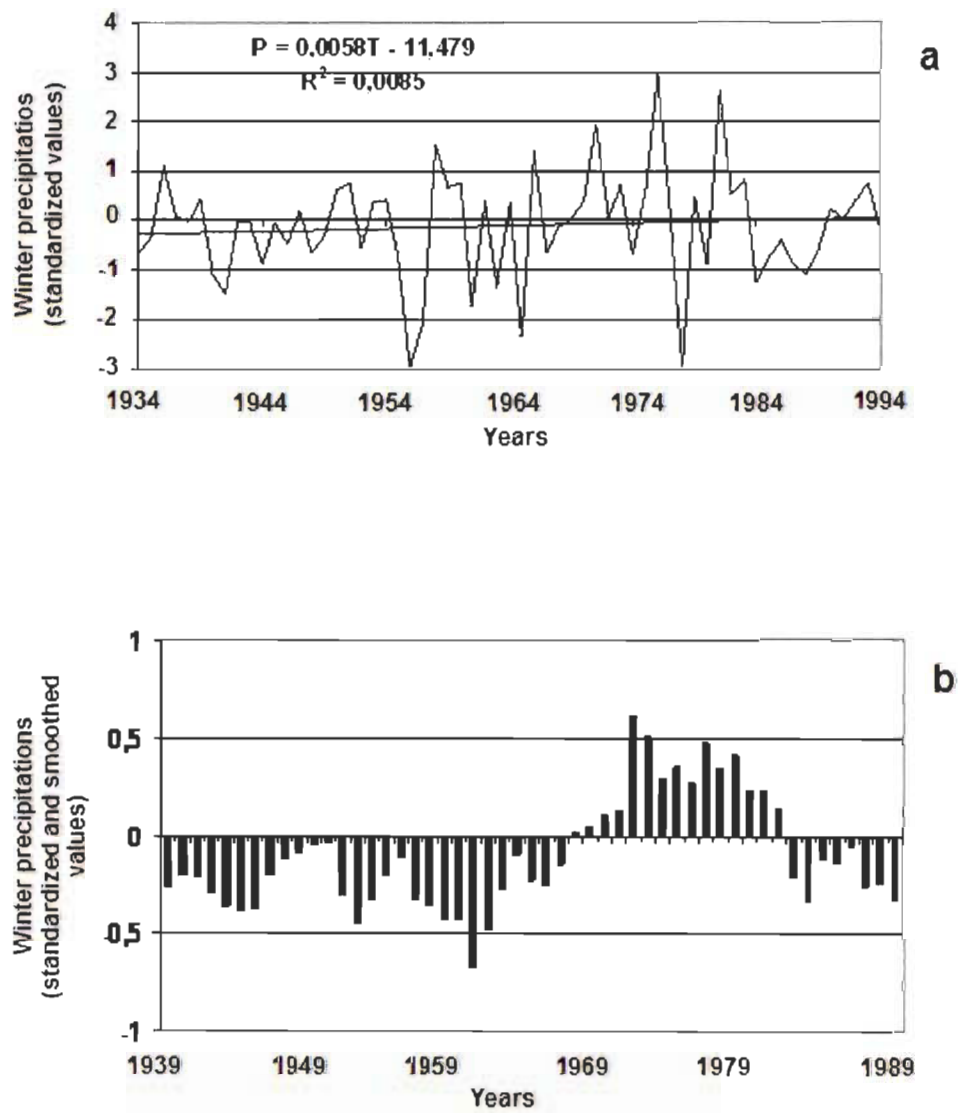


Figure 1.8 Interannual (a) and interdecadal (b) variability of winter precipitation at the Joliette station.

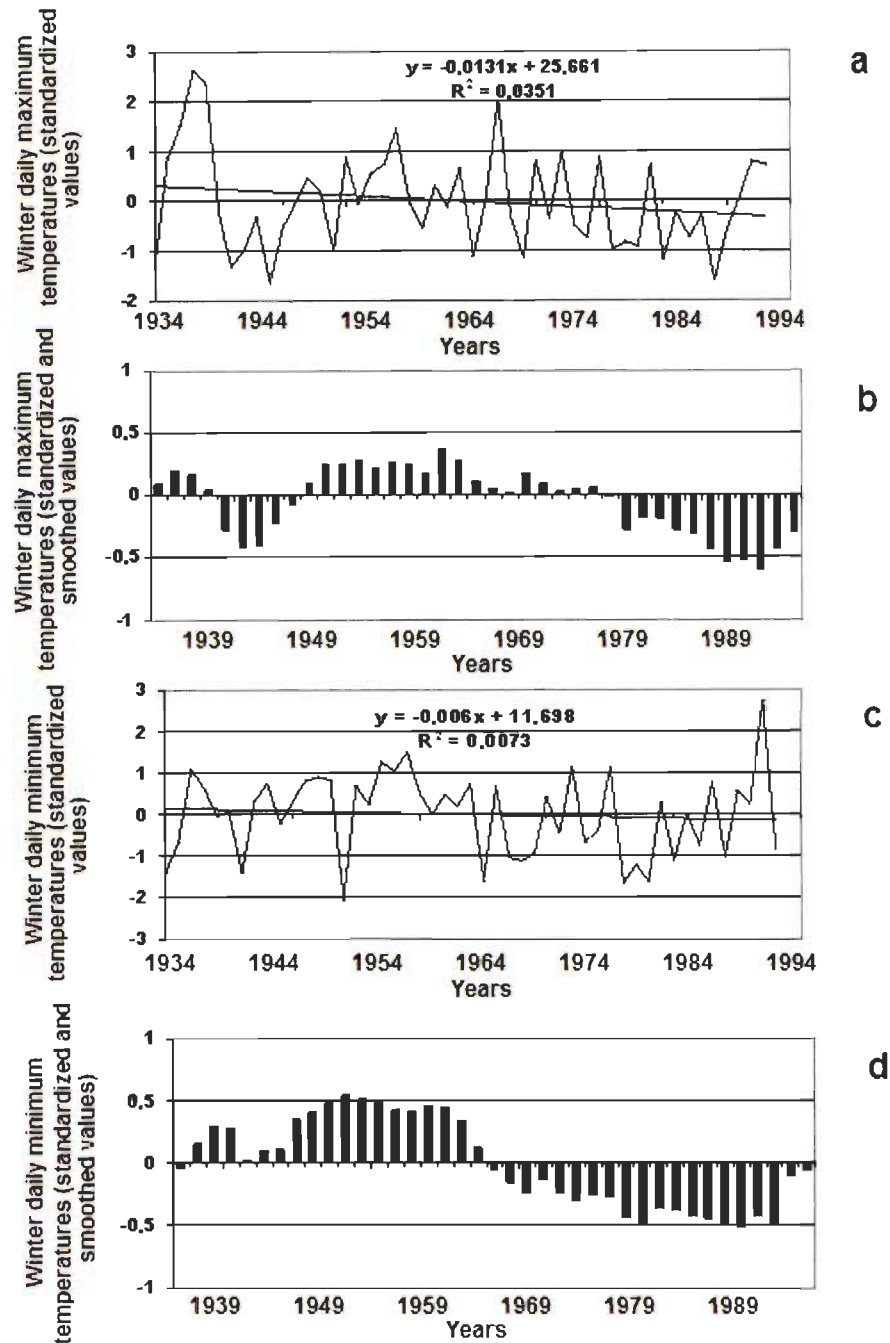


Figure 1.9 Temporal variability (1934-1982) of winter (January to March) daily temperature at Matawin dam Station. a=interannual variability of daily maximum temperature; b=interdecadal variability of daily maximum temperature; c=interannual variability of daily minimum temperature; d=interdecadal variability of daily minimum temperature. Smoothed values were calculated over a 10-year period.

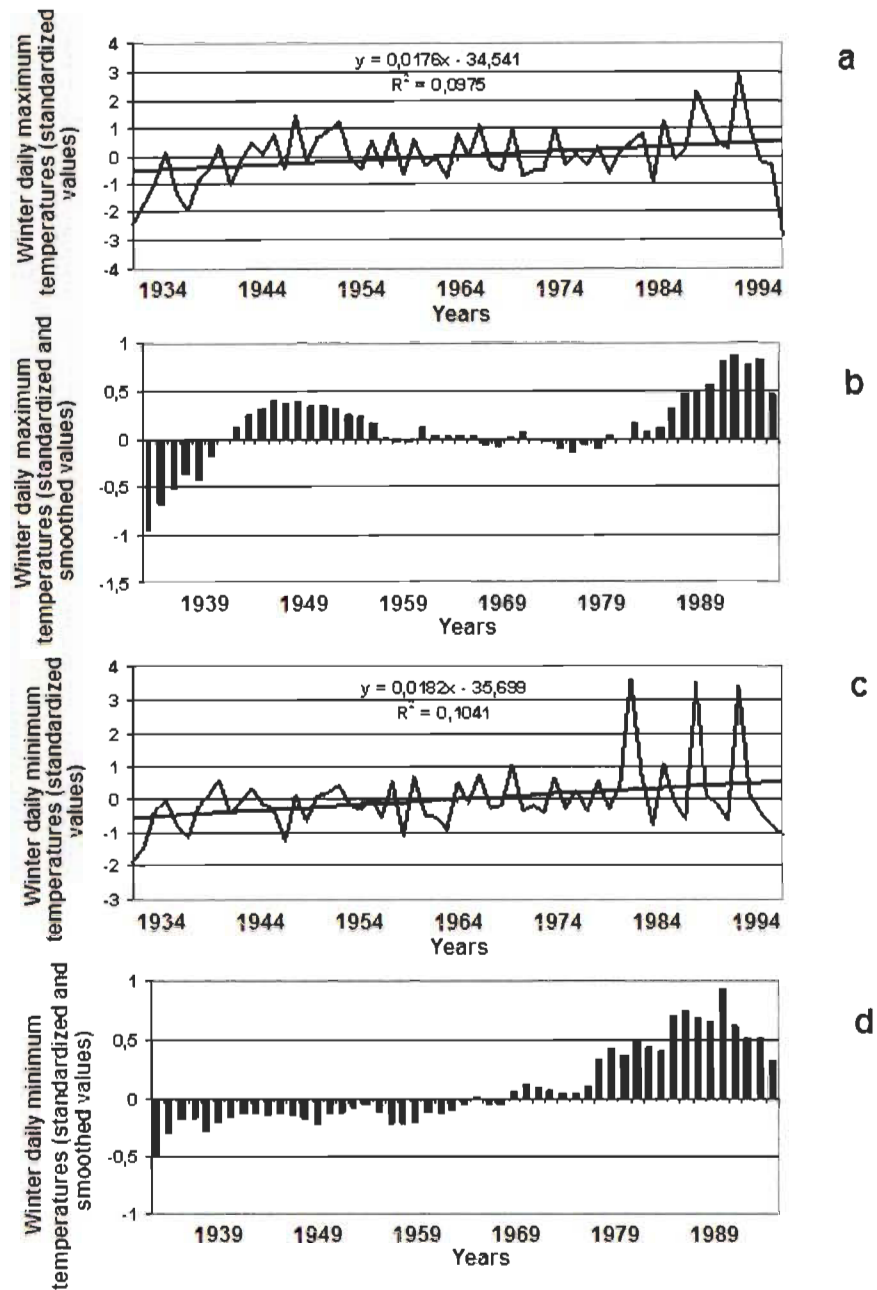


Figure 1.10 Temporal variability (1934-1994) of winter (January to March) daily temperature at Shawinigan Matawin Station. a = interannual variability of daily maximum temperature; b = interdecadal variability of daily maximum temperature; c = interannual variability of daily minimum temperature; d = interdecadal variability of daily minimum temperature. Smoothed values were calculated over a 10-year period.

CHAPITRE III

EFFET DE L'INVERSION DES RÉGIMES HYDROLOGIQUES SUR LA MAGNITUDE ET L'AMPLITUDE DE VARIATION DES DÉBITS JOURNALIERS SAISONNIERS EN AVAL DES BARRAGES AU QUÉBEC

Catherine Fortier* et Ali A. Assani*

* Laboratoire d'hydro-climatologie et de géomorphologie fluviale (Hydroclimatology and Fluvial Geomorphology Laboratory), Geography Section, Pavillon Léon-Provencher, Université du Québec à Trois-Rivières, 3351 Boulevard des Forges, Trois-Rivières, Québec, G9A 5H7, Canada.

Mailing address.

Ali A. ASSANI

Section de Géographie (Geography Section), Pavillon Léon-Provencher, Université du Québec à Trois-Rivières, 3351 Boulevard Des Forges, Trois-Rivières, Québec, G9A 5H7, Canada.

Tel.: 819-376-5011; Fax: 376-5179; Email: Ali.Assani@uqtr.ca

RÉSUMÉ

Les barrages provoquent une perte de la biodiversité en réduisant la variation naturelle des débits en aval. Mais l'ampleur de cette perte dépend de deux facteurs suivants : (1) l'ampleur de cette réduction de la variation des débits journaliers et (2) la durée de cette réduction dans le temps. L'objectif de cette étude était d'analyser l'effet de l'inversion des régimes hydrologiques sur ces deux facteurs. On a ainsi comparé la fluctuation interannuelle de la variabilité de la magnitude des débits moyens journaliers en amont et en aval du barrage Matawin (Québec) caractérisé par un régime de type inversion durant la période 1931-2008. Le degré de la variabilité de la magnitude des débits journaliers a été définie par le coefficient de variation (CV) et son amplitude par le coefficient d'immodération (CI qui est le rapport entre le débit le plus élevé et le débit le plus faible mesuré durant une saison d'une année donnée). En ce qui concerne la variation des débits moyens journaliers et son amplitude, on a démontré que ces deux variables ont significativement augmenté en aval durant les quatre saisons. Mais cette hausse est forte au printemps mais faible en hiver. Par conséquent, l'effet de l'inversion se traduit par une hausse significative de la variation de débits journaliers. Quant à la durée de ce changement dans le temps, on a démontré que la variation des débits journaliers a diminué significativement dans le temps. Cette diminution est survenue après la nationalisation de l'énergie hydroélectrique au Québec durant la décennie 1960. Après la nationalisation, le mode de gestion des débits journaliers a été modifié. Cette modification s'est traduite par des lâchers continus des débits en période froide (automne et hiver).

Mots clés : Coefficient de variation, Coefficient d'immodération, débits journaliers, inversion, barrage Matawin, Québec.

3.1 INTRODUCTION

La variation des débits joue un rôle majeur dans la structuration de la biodiversité des espèces en raison de son influence sur le volume d'habitats disponibles dans les lits mineurs et majeurs ainsi que dans les zones hyporhéïques (Richter et al., 1998). L'un des changements majeurs induits par les barrages est la diminution de cette variation hydrologique naturelle provoquant ainsi une homogénéisation progressive de l'écoulement. Cette homogénéisation résulte principalement de la diminution des pics de crues et de l'augmentation des débits minimums (Moyle and Mount, 2007; Poff et al., 2007). Sur le plan climatique, en raison de cette homogénéisation, la variabilité interannuelle des débits devient indépendante de celle du climat (Poff et al., 2007). L'écoulement devient ainsi quasi homogène à travers de nombreuses régions malgré leur diversité climatique. Sur le plan écologique, l'homogénéisation des débits en aval des barrages serait ainsi à l'origine d'une perte de la biodiversité en raison de l'extinction des espèces autochtones (native species) au détriment des espèces allochtones (alien species). Il en résulte aussi une homogénéisation de la faune et de la flore en aval des barrages.

Mais ces conséquences climatiques et écologiques de l'homogénéisation des débits en aval des barrages dépend de deux facteurs majeurs : (1) l'ampleur des changements qui affectent la variation hydrologique et (2) sa durée (persistance) dans le temps en aval des barrages. En effet, ces conséquences climatiques et écologiques seront d'autant plus importantes en aval d'un barrage que la variation interannuelle des débits est très faible (homogénéisation) et perdure dans le temps. Il existe déjà une littérature relativement abondante sur le premier facteur (e.g. Andrews and Pizzi, 2000; Batalla et al., 2004; Burke et al., 2009; Chen et al., 2008; Gailiusis et al., 2003; Gao et al., 2009; Graf, 2006; Harman and Stewardson, 2005; Hu et al., 2008; Leconte et al., 2001; Loizeau and Dominik, 2000; Magilligan and Nislow, 2001, 2005; Montaldo et al., 2004; Pegg et al., 2003; Pyron and Neumann, 2008; Small et al., 2009; Vuglinsky, 1997; Yang et al., 2004; 2008; Ye et al., 2003; Zimmerman et al., 2009). En revanche, à notre connaissance, le second facteur, c'est-à-dire la durée ou la persistance de l'ampleur de changement hydrologique dans le temps, n'a jamais fait l'objet d'aucune étude même si

quelques études ont déjà analysé la variabilité interannuelle des variables hydrologiques après la construction des barrages (e.g. Hu et al., 2008; Lopez-Moreno et al., 2009; Loizeau and Dominik, 2000; Mwamila et al., 2008; Pegg et al., 2003; Peters and Prowse, 2001; Richter et al., 1998; Shiau and Wu, 2004). De plus, toutes ces études sont basées sur la comparaison des caractéristiques des débits avant et après la construction d'un barrage. Cette méthode, appelée la méthode de station témoin (Assani et al., 2005, 2006), est très précise pour quantifier l'ampleur des changements de la variation des débits en aval d'un barrage. Mais, en revanche, elle n'est pas appropriée pour analyser la durée de cette ampleur dans le temps car elle n'est pas capable de détecter les changements de variation des débits, parfois subtils, qui surviennent après la construction d'un barrage et d'identifier de manière précise leurs causes. Parmi celles-ci, on peut citer la variabilité et le changement climatiques, le changement de modes de gestion du barrage pour diverses raisons, le changement de mode d'affectation des sols dans un bassin versant, la construction de nouveaux barrages sur les affluents, etc. La méthode la plus appropriée pour analyser la durée de l'ampleur des changements de variation des débits dans le temps est sans nul doute la méthode de station contrôle basée sur la comparaison des débits mesurés en amont (état naturel) et en aval d'un barrage sur une période relativement longue.

Au Québec, plusieurs travaux ont démontré que le changement hydrologique majeur induit par les barrages est sans nul doute l'inversion des cycles hydrologiques annuels de rivières (Assani et al., 2002, 2005, 2006, 2007, Lajoie et al., 2007; Matteau et al., 2009). Cette inversion se traduit par l'occurrence des débits maximums en hiver et des débits minimums au printemps au moment de la fonte de neiges. Ce changement des périodes d'occurrence des débits maximums et minimums s'est toujours maintenu dans le temps. En revanche, on ignore encore les effets de cette inversion sur la variation des débits journaliers et la durée de ce changement de la variation dans le temps. Pour analyser cette problématique, on a formulé deux hypothèses.

- L'inversion provoque une diminution significative de la variation des débits journaliers en aval des barrages. Mais l'ampleur de cette diminution dépend de la saison en raison même de l'inversion du cycle annuel des débits.

- Cette diminution de la variation des débits journaliers induite par l'inversion s'est maintenue dans le temps car elle est théoriquement peu influencée par la variabilité du climat et le changement de mode de gestion des barrages. Rappelons que ce phénomène d'inversion est dû au cycle climatique saisonnier stable caractérisé par un hiver très froid et sec nécessitant ainsi une production importante de l'énergie hydroélectrique à partir de l'eau stockée au printemps dans les réservoirs.

Ces deux hypothèses seront testées par l'analyse des débits journaliers de la rivière Matawin au Québec. Le choix de cette rivière se justifie principalement par l'existence de données des débits mesurés sur une période relativement longue en amont et en aval du barrage Matawin. De plus, on avait déjà démontré que l'ampleur des changements hydrologiques est comparable pour toutes les rivières ayant subi l'inversion de leur cycle hydrologique annuel au Québec (Assani et al., 2005, 2006, 2007; Lajoie et al., 2007; Matteau et al., 2009). Ainsi, la rivière Matawin peut être considérée comme un cas très représentatif de toutes les rivières à régime hydrologique inversé.

3.2 MÉTHODOLOGIE

3.2.1 Description du bassin versant de la rivière Matawin et source des données

Principal affluent de la rivière Saint-Maurice en rive nord et sous-affluent du fleuve Saint-Laurent, la Rivière Matawin draine un bassin versant de 5775 km². Celui-ci est entièrement circonscrit dans le Bouclier Canadien (Figure 2.1). Le climat y est du type subpolaire caractérisé par une lame d'eau annuelle d'environ 1000 mm et une température moyenne annuelle autour de 4°C. Tout le bassin versant est couvert par la forêt de feuillus exploitée pour la production du bois. Cependant, les activités agricoles sont quasi absentes.

Le barrage Matawin, haut de 26m, a été érigé en 1930 par la Shawinigan Power and Water Co dans le but d'alimenter en hiver les centrales hydroélectriques situées plus en aval sur la rivière Saint-Maurice comme la centrale de la Gabelle à Saint-Étienne-des-

Grès et la centrale de Grand-Mère. Il n'est doté d'aucune centrale hydroélectrique. Au printemps (de mi-avril au début mai), l'eau de la fonte des neiges est stockée dans le réservoir Taureau d'une capacité maximale de 38 000 000 m³ et la vidange du réservoir est amorcée dès la mi-novembre et ce durant tout l'hiver. C'est ce mode de gestion qui a provoqué l'inversion du cycle naturel des débits de la rivière; les débits les plus élevés étant observés en hiver et les plus bas au printemps en aval du réservoir (Assani et al., 2002). Durant les saisons printanières et estivales, une quantité d'eau est néanmoins relâchée épisodiquement en aval pour assurer le maintien de certaines activités récréotouristiques comme le canotage (rafting). De plus, lorsque la capacité maximale du réservoir est atteinte au printemps, le surplus de l'eau apportée par les pluies estivales et automnales n'est évidemment plus stocké. Par conséquent, l'eau utilisée en hiver pour la production de l'énergie hydroélectrique provient exclusivement de celle apportée par la fonte de neige au printemps et stockée dans le réservoir. Ceci permet de comparer la variabilité interannuelle des caractéristiques de fortes crues printanières entrant dans le réservoir à celles des fortes crues hivernales lâchées en aval du réservoir.

Depuis 1931, les mesures de débits journaliers sont effectuées simultanément en amont du barrage à la station de Saint-Michel-des-Saints (1390 km²; 46°41'N; 73°54'W) et juste en aval du réservoir (4070 km²; 46°51'N; 73°38'W) depuis 1931. La station en amont n'est pas influencée par le réservoir. Car, elle fait partie du Réseau National Canadien de Bassins Hydrométriques de Référence (Ourda et al., 1999). Le choix de ces stations de référence s'effectue selon certains critères très sévères en ce qui a trait aux impacts anthropiques comme l'absence d'urbanisation ou de toute autre transformation majeure (ex : déforestation ou présence d'un barrage) à proximité. La station située en aval, quant à elle, ne subit pas l'influence d'un affluent naturel susceptible d'altérer l'influence du barrage sur les débits en aval. Les deux stations sont situées dans le même contexte climatique, lithologique et végétal. Cette homogénéité des conditions naturelles permet de comparer facilement la variabilité interannuelle des débits en amont et en aval du barrage. Les données de débits utilisées proviennent du site web d'environnement Canada (http://www.wsc.ec.gc.ca/hydat/H2O/index_f_cfm?, consulté au mois de mars 2007). Celles-ci sont archivées par Environnement Canada

jusqu'en 1994. Les années manquantes nous ont été fournies par Hydro Québec, le propriétaire du barrage. Nous avons ainsi analysé les données des débits couvrant la période 1931 à 2008. Le barrage a été construit par la Shawinigan Water and Power Company (SWPC) en 1930 et transféré à Hydro-Québec en 1963 quand le gouvernement provincial de Québec a nationalisé l'hydroélectricité (Hogue et al., 1979).

3.2.2 Analyse statistique de données

Comme la gestion des débits au niveau du barrage varie d'une saison à une autre, nous avons donc analysé séparément les saisons. L'année a été subdivisée en quatre saisons : hiver (janvier à mars), printemps (avril à juin), été (juillet à septembre) et, enfin, automne (octobre à décembre). La variabilité de la magnitude des débits journaliers a été définie par deux variables hydrologiques.

- Le coefficient de variation (CV en %) qui est le rapport calculé entre la moyenne des débits journaliers mesurés durant la saison et son écart type. Cette variable mesure le degré de la variabilité des débits d'un jour à un autre durant la saison.

- Le coefficient d'immodération (CI) qui est le rapport entre le débit journalier le plus élevé (la plus grande valeur des débits journaliers moyens ou débit maximum) et le débit journalier le plus faible (la plus petite valeur des débits journaliers moyens ou débit minimum) mesurés durant une saison. Toutefois, en cas de valeur nulle du débit le plus faible, nous l'avons remplacée par la valeur 1. Ce remplacement se justifie par le fait que ce coefficient mesure l'amplitude de variation des débits extrêmes journaliers au cours d'une saison. Si le débit minimum est nul, on atteint ainsi l'amplitude maximale.

Les valeurs de ces deux coefficients ne dépendent pas de la taille des bassins versants. On peut ainsi les comparer pour les bassins versants de taille différente. L'analyse de la variabilité interannuelle de ces deux coefficients a été effectuée par la méthode de régression linéaire et par le test non paramétrique de Mann-Kendall (Kundzewicz et al., 2005). Enfin, le lien entre les débits en amont et en aval du barrage a

été calculé au moyen des coefficients de corrélation. Les droites de régression ont été testées par la méthode d'analyse de variance. La comparaison des moyennes de variables hydrologiques a été réalisée au moyen du test t de Student.

3.3 RÉSULTATS

La variabilité interannuelle des coefficients CV et CI est présentée aux figures 3, 4, 5 et 6. Les valeurs des paramètres de droites de régression linéaire ajustées sur les courbes sont consignées dans le Tableau 1. Les résultats révèlent une différence importante entre les saisons.

- En automne et en hiver, on distingue deux périodes (Figures 2.3 et 2.4). La première période est caractérisée par des valeurs de CV et CI plus élevées en aval qu'en amont du barrage. Quant à la seconde période, les valeurs de ces deux variables hydrologiques sont presque égales. Il s'ensuit qu'en aval du barrage, les deux variables hydrologiques ont significativement diminué dans le temps. Cette diminution est survenue durant la décennie 1960. En revanche en amont, ces deux variables augmentent significativement dans le temps hormis les valeurs de CV en hiver (Figure 2.4b).

- Au printemps, les valeurs de CV et CI sont plus élevées en aval qu'en amont du barrage (Figure 2.5). Mais seules les valeurs de CV diminuent significativement dans le temps en aval du barrage. En revanche, en amont, aucun changement significatif n'est observé bien que les valeurs de ces variables hydrologiques ont tendance à augmenter.

- En été, CV et CI sont aussi globalement plus élevés en aval qu'en amont du barrage (Figures 2.5a et 2.5b). De même, ces deux variables augmentent significativement dans le temps en amont du barrage mais diminuent en aval du barrage. On notera qu'après la décennie 1990, les valeurs de CV en amont et en aval du barrage tendent à coïncider. Ceci traduit en fait une hausse importante de cette variable hydrologique en amont associée à une baisse tout aussi importante en aval du barrage.

La comparaison de deux variables hydrologiques en amont et en aval du barrage durant toute la période d'étude au moyen du test t de Student révèle que leurs valeurs moyennes sont significativement plus élevées en amont qu'en aval du barrage (Tableau 2.2) hormis la moyenne de CV en hiver. Il convient de noter que l'amplitude de variation des débits moyens journaliers (CI) est devenue très forte en aval du barrage. Cependant, le tableau 2.3 confirme la diminution des CV et de CI en aval du barrage après la nationalisation, diminution particulièrement forte en hiver. En effet, toutes les valeurs de R sont négatives hormis celle de CI au printemps. Durant cette saison, l'amplitude de la variabilité des débits moyens journaliers a augmenté en aval du barrage.

Les coefficients de corrélation calculés entre l'amont et l'aval du barrage de ces deux variables hydrologiques sont présentés au tableau 2.4. Aucun coefficient n'est statistiquement significatif. Toutefois, il est intéressant de noter le signe négatif de ces coefficients. Ceci confirme l'opposition dans la variabilité interannuelle de ces deux variables hydrologiques en amont et en aval du barrage. Durant la période analysée, les deux variables augmentent en amont mais diminuent en aval. Il se produit donc une inversion de la variabilité temporelle de la variation de la magnitude des débits journaliers en aval du barrage.

3.4 DISCUSSION ET CONCLUSION

Dans cette étude, on a mis en évidence deux résultats originaux sur l'impact du barrage Matawin sur la variation de la magnitude des débits journaliers.

- Contrairement à de nombreux barrages, l'influence du barrage de Matawin se traduit par une hausse importante de la variation des débits moyens journaliers (CV) et de son amplitude (IC) durant les quatre saisons. Cette hausse est forte au printemps mais faible en hiver.

- Une diminution de l'ampleur de cette hausse de la variation des débits moyens journaliers et de son amplitude dans le temps. Cette diminution est forte en hiver mais faible au printemps. Durant cette dernière saison, on a observé même une tendance à la hausse de l'amplitude de variation dans le temps. En hiver, cette diminution a été observée après la nationalisation du barrage en 1963.

Plusieurs facteurs peuvent être invoqués pour expliquer les changements de la variation des débits moyens journaliers et de son amplitude observés en aval du barrage.

- La variabilité et les changements climatiques. Ce facteur doit être exclu car il ne peut pas expliquer la hausse significative de la variation des débits moyens journaliers et celle de son amplitude en aval du barrage. Une telle hausse devrait aussi être observée en amont du barrage où la variabilité des débits est exclusivement influencée par celle du climat. De même, le climat ne peut expliquer non plus la diminution de la variation et de son amplitude dans le temps en aval du barrage car ces deux variables ont plutôt augmenté dans le temps en amont du barrage.

- Le changement d'affectation des sols dans le bassin versant. Aucun changement significatif ne fut observé entre 1930 et 2008. En effet, ce bassin versant forestier n'a pas connu un développement important des activités agricoles ni une hausse significative de sa population à la suite de l'urbanisation. Par conséquent, ce facteur ne peut être retenu pour rendre compte des changements observés en aval du barrage.

- La déforestation. Bien même avant la construction du barrage, le bassin versant a été le siège d'une exploitation forestière qui se poursuit maintenant mais avec un certain essoufflement à cause de la crise que traverse depuis quelques années cette industrie de coupe de bois. Cependant, la diminution de la superficie forestière provoquée par cette activité ne peut expliquer non plus les changements hydrologiques observée en aval du barrage car Muma (2008) avait démontré que la diminution de la couverture forestière dans un bassin versant n'affectait pas la variation de la magnitude des débits journaliers au Québec. De plus, cette activité se pratique plus en amont qu'en aval du barrage.

- Enfin, le changement du mode de gestion du barrage. Rappelons que depuis sa construction jusqu'à sa nationalisation en 1963, le barrage était géré par la Shawinigan Water and Power Company (SWPC). L'énergie hydroélectrique produite par les centrales de Shawinigan et de La Gabelle qui sont alimentées en partie par l'eau turbinée au barrage Matawin était exclusivement vendue aux industries manufacturières et à la ville de Montréal. Après la nationalisation, cette énergie a été intégrée dans un réseau de distribution beaucoup plus vaste mis en place par Hydro-Québec. Ce réseau dessert non seulement les industries manufacturières mais presque toutes les villes et villages du Québec. De plus, une partie de cette énergie est exportée vers les provinces voisines (Ontario, Nouveau-Brunswick, etc.) et vers certains états des États-Unis. Cette intégration dans un réseau de distribution d'énergie beaucoup plus vaste aurait modifié le mode de gestion du barrage de Matawin notamment. En effet, la gestion de l'eau en aval des réservoirs avant la nationalisation était principalement caractérisée par des lâchers d'eau irréguliers même en plein hiver pour répondre spécifiquement aux besoins des clients de la SWPC. De plus, durant les heures et les jours creux (moins de consommation de l'énergie hydroélectrique), la SWPC achetait même de l'électricité aux autres compagnies comme Hydro-Québec afin de pouvoir stocker suffisamment de l'eau dans les réservoirs (Hogue et al., 1979). Ce type de gestion entraînait ainsi une forte variabilité des débits journaliers en aval des barrages gérés par la SWPC. Après la nationalisation survenue en 1963, cette pratique fut abandonnée car Hydro-Québec aurait modifié le mode de gestion de tous les réservoirs et barrages qui lui ont été attribués. Ce changement se justifiait par l'expansion et la diversité du marché de l'énergie hydroélectrique. Pour répondre à sa mission, Hydro-Québec devrait produire de manière continue l'énergie hydroélectrique pendant toute l'année et en particulier en hiver et en automne. Cette production continue de l'énergie hydroélectrique a nécessité un lâcher d'eau continu en aval des barrages et réservoirs. Il en résulta ainsi une diminution significative de la variation des débits moyens journaliers et de son amplitude. Cette diminution fut particulièrement importante pendant la période froide en raison d'une forte demande de l'énergie hydroélectrique en particulier pour le chauffage des habitations.

Toutefois, si cette diminution de la variation des débits moyens journaliers et de son amplitude est survenue après juste la nationalisation en hiver et en automne, en revanche, elle est survenue très tardivement (vers les décennies 1980 et 1990) au printemps et en été. Ce changement tardif survenu durant les deux saisons chaudes ne peut être corrélé directement à la production de l'énergie hydroélectrique en hiver. Deux hypothèses peuvent être formulées pour l'expliquer.

- Une hausse de la production de l'énergie hydroélectrique pour de raison de climatisation à la suite d'une hausse de la température observée durant les deux décennies. Mais cette hypothèse n'est étayée par aucun fait car Hydro-Québec n'a jamais augmenté sa production de l'énergie hydroélectrique en été et au printemps en raison de la hausse de la température.

- La hausse de l'évapotranspiration consécutive à celle de la température. Pour minimiser la perte d'eau stockée dans les réservoirs (au printemps) par l'évapotranspiration, Hydro-Québec aurait modifié son mode de gestion pendant la période chaude, en particulier en été. En effet, la figure 2.7 révèle que les débits lâchés en aval du barrage Matawin en été ont diminué significativement alors qu'en amont, aucun changement ne fut observé. En d'autres termes, Hydro-Québec aurait tendance à stocker plus d'eau dans les réservoirs même en été afin de pallier la perte d'eau provoquée par l'évapotranspiration en raison de la hausse de la température. Cette figure montre clairement que la baisse des débits moyens journaliers en aval du barrage est survenue durant les décennies 1980 et 1990 les plus chaudes enregistrées au Québec. Cependant, malgré notre demande, Hydro-Québec ne nous a pas fourni les données sur la variabilité de la quantité d'eau stockée dans le réservoir Matawin. Ces données ont été jugées confidentielles pour les raisons commerciales.

Du point de vue écologique, les conséquences écologiques provoquées par la diminution de la variation interannuelle des débits journaliers (homogénéisation) d'une part, et par une forte et brusque fluctuation des débits horaires à l'échelle journalière sont bien documentées (e.g. Bunn and Arthington, 2002; Mürle et al., 2003; Petts, 1984;

Poff et al., 1997). En revanche, les conséquences écologiques associées à une forte variabilité interannuelle des débits journaliers en aval des barrages ne sont pas encore étudiées. Par conséquent, cette étude ouvre une voie de recherche intéressante sur ce type de conséquence écologique. Afin, dans une perspective de gestion et d'aménagement du tronçon situé en aval du barrage Matawin, la gestion actuelle des débits journaliers en hiver et en automne par Hydro-Québec doit être encouragée en ce qui concerne la variabilité interannuelle des débits journaliers. Car cette gestion mime la variation naturelle des débits particulièrement en hiver même si les autres caractéristiques des débits comme la magnitude, la durée et la période d'occurrence sont fortement modifiées en aval du barrage Matawin (Assani et al., 2002).

RÉFÉRENCES

- Andrews, E.D., Pizzi, L.A. 2000. Origin of the Colorado River experimental flood in Grand Canyon. *Hydrological Sciences Journal*, 45, 607-627.
- Assani, A.A, Buffin-Bélanger, T., Roy, A.G. 2002. Analyse des impacts d'un barrage sur le régime hydrologique de la rivière Matawin (Québec, Canada). *Revue des Sciences de l'Eau*, 15, 557-574.
- Assani, A.A, Gravel E., Buffin-Bélanger, T., Roy, A.G. 2005. Impacts des barrages sur les débits annuels minimums en fonction des régimes hydrologiques artificialisés au Québec (Canada). *Revue des Sciences de l'Eau*, 18, 103-127.
- Assani, A.A, Stichelbout, E., Roy, A.G, Petit, F., 2006a. Comparison of impacts of dams on the annual maximum flow characteristics in three regulated hydrological regimes in Québec (Canada). *Hydrological Processes*, 20, 3485-3501.
- Assani, A.A., Lajoie, F., Laliberté, C., 2007. Impacts des barrages sur les caractéristiques des débits moyens annuels en fonction du mode de gestion et de la taille des bassins versants au Québec. *Revue des Sciences de l'Eau*, 20, 127-146.
- Batalla, R.M., Gomez, C.M, Kondolf, G.M., 2004. Reservoir-induced hydrological changes in the Ebro River basin (NE Spain). *Journal of Hydrology*, 290, 117-136.
- Bunn, SE, Arthington A.H. 2002. Basic principles and ecological consequences of altered flow regimes for aquatic biodiversity. *Environmental Management*, 30, 492-507.
- Burke, M., Jorde, K., Buffington, J.M. 2009. Application of a hierarchical framework for assessing environmental impacts of dam operation: changes in streamflow, bed mobility and recruitment of riparian trees in a western North America river. *Journal of Environmental Management*, 90, S224-S236.
- Chen, Y.D., Yang, T., Xu, C.-Y., Zhang, Q., Chen, X., Hao, Z.-C. 2008. Hydrologic alteration along the Middle and Upper East River (Dongjiang) basin, South China: a visually enhanced mining on the results of RVA method. *Stochastic environmental research and risk assessment*. (In press).

- Gailiusis, B., Kriauciuniene, J., Rimaviciute E. 2003. Modelling the effect of the hydroelectric pumped storage plant on hydrodynamic regime of the Kauna Reservoir in Lithuania. *Nordic Hydrology*, 34, 507-518.
- Gao, Y., Vogel, R.M., Kroll, C.N., Poff, N.L., Olden, J.D. 2009. Development of representative indicators of hydrologic alteration. *Journal of Hydrology*, 374, 136-147.
- Graf, W.L. 2006. Downstream hydrologic and geomorphic effects of large dams on America Rivers. *Geomorphology*, 79, 336-360.
- Harman, C., Stewardson, M. 2005. Optimizing dam release rules to meet environmental flow targets. *River Research and Applications*, 21, 113-129.
- Hu, W.-W., Wang, G.-X., Deng, W., Li, S.-N. 2008. The influence of dams on ecohydrological conditions in the Huaihe River basin, China. *Ecological Engineering*, 33, 233-241.
- Hogue, C., Bolduc, A., Larouche, D. 1979. Québec. Un siècle d'électricité. Libre Expression, Montréal, 406p.
- Kundzewicz, Z.W., Graczyk, D., Maureer, T., Pinskiwar, I., Radziejewski, M., Svensson, C., Szwed, M. 2005. Trend detection in river flow series: 1. Annual maximum flow. *Hydrological Sciences Journal*, 50, 797-810.
- Lajoie, F., Assani, A.A, Roy, A.G, Mesfioui, M., 2007. Impacts of dams on monthly flow characteristics. The influence of watershed size and seasons. *Journal of Hydrology*, 334, 423-439.
- Leconte, R., Pietroniro, A., Peters, D., Prowse T.D. 2001. Effects of flow regulation on hydrologic patterns of large, inland Delta. *Regulated Rivers: Research & Management*, 17, 51-65.
- López-Moreno, J.I., Vicente-Serrano, S.M., Begueria, S., Gracia-Ruiz, J.M., Portela, M.M., Almeida, A.B. 2009. Dam effects on droughts magnitude and duration in A TRANSBOUNDARY BASIN: The Lower River Tagus, Spain and Portugal. *Water Resources Research*, 45, W02405, doi: 10.1029/2008WR007198.

- Loizeau, J-L., Dominik, J. 2000. Evolution of upper Rhone River discharge and suspended sediment load during the last 80 years and some implications for Lake Geneva. *Aquatic Sciences*, 62, 54-67.
- Magilligan, F.J., Nislow, K.H. 2001. Long-term changes in regional hydrologic regime following impoundment in a humid-climate watershed. *Journal of the American Water Resources Association*, 37, 1551-1569.
- Magilligan, F.J., Nislow, K.H. 2005. Changes in hydrologic regime by dams. *Geomorphology*, 71, 61-78.
- Matteau, M., Assani, A.A., Mesfioui, M. 2009. Application of multivariate statistical analysis methods to the dam hydrologic impact studies. *Journal of Hydrology*, 371, 120-128.
- Montaldo N., Mancini M., Rosso R. 2004. Flood hydrograph attenuation induced by a reservoir system: analysis with a distributed rainfall-runoff model. *Hydrological Processes*, 18, 545-563.
- Moyle, P.B., Mount, J.F. 2007. Homogenous rivers, homogenous faunas. *Proceeding National Academy of Science of USA*, 104, 5711-5712.
- Mürle, U., Ortlepp, J., Zahner M. 2003. Effects of experimental flooding on riverine morphology, structure and riparian vegetation: The River Spöl, Swiss National Park. *Aquatic Sciences*, 65, 191-198.
- Mwamila, T.B., Kimwaga, R.J., Mtalo, F. 2008. Eco-hydrology of the Pangani River downstream of Nyumba ya Mungu reservoir, Tanzania. *Physics and Chemistry of the Earth*, 33, 695-700.
- Ouarda, T.B.M.J., Rasmussen, P.F., Cantin, J-F., Bobée, B., Laurence, R., Hoang, V.D., Barabé, G. 1999. Identification d'un réseau hydrométrique pour le suivi des modifications climatiques dans la province de Québec. *Revue des Sciences de l'Eau*, 12, 425-448.
- Peggs, M.A., Pierce, C.L., Roy, A. 2003. Hydrological alteration along the Missouri River basin : a time series approach. *Aquatic Sciences*, 65, 63-72.

- Peters, D.L., Prowse, T. 2001. Regulation effects on the lower Peace River, Canada. *Hydrological Process*, 15, 3181-3194.
- Poff, N.L., Olden, J.D., Merritt, D.M., Pepin, D.M. 2007. Homogenization of regional river dynamics by dams and global biodiversity implications. *Proceeding National Academy of Science of USA*, 104, 5732- 5737.
- Pyron, M., Neuman, K. 2008. Hydrologic alterations in the Wabash river watershed, USA. *River Research and Applications*, 24, 1175-1184.
- Small, M.F., Bonner, T.H., Baccus, J.T. 2009. Hydrologic alteration of the lower Rio Grande Terminus: a quantitative assessment. *River Research and Applications*, 25, 241-252.
- Yang, D., Ye, B., Shiklomanov A. 2004. Discharge characteristics and changes over the Ob River watershed in Siberia. *Journal of Hydrometeorology*, 5, 595-610.
- Yang, T., Zhang, Q., Chen, Y.D., Tao, X., Xu, C.-Y., Chen, X. 2008. A spatial assessment of hydrologic alteration caused by dam construction in the middle and lower Yellow River, China. *Hydrological Processes*, 22, 3829-3843.
- Ye, B., Yang, D., Kane, D.L. 2003. Changes in Lena River streamflow hydrology: human impacts versus natural variations. *Water Resources Research*, 39, SWC81-SWC814.
- Zimmerman J.K.L., Letcher, B.H., Nislow, K.H., Lutz, K.A., Magilligan, F.J. 2009. Determining the effects of dams on subdaily variation in river flows at a whole scale. *River Research and Applications*, doi: 10.1002/rra.1324.

Tableau 2.1. Comparaison des paramètres des droites de régression linéaire ajustées sur la variabilité interannuelle des CV et de CI en amont et en aval du barrage Matawin (1932-2008)

Saisons		CV			CI		
		a	b	R ²	a	b	R ²
Automne	Amont	0.15	-248.4	0.072	0.03	-62.9	0.113
	Aval	-1.13	2309.9	0.391	-1.33	2720	0.174
Hiver	Amont	0.14	-238.1	0.015	0.03	-50.5	0.037
	Aval	-0.83	1690	0.302	*	*	*
Printemps	Amont	0.03	-3.50	0.001	0.03	-49.4	0.009
	Aval	-0.77	1635.8	0.091	0.430	-683.3	0.002
Été	Amont	0.23	-396.9	0.094	0.06	-101.4	0.119
	Aval	-0.20	485.9	0.023	-1.60	3254.4	0.272

La forme de la droite de régression linéaire est $Y = ax + b$ ou $Y = a \log x + b$. $Y = CV$ ou CI et $x = \text{temps}$. $a =$ coefficient angulaire de la droite de régression linéaire; $b =$ ordonnée à l'origine de la droite. $R^2 =$ coefficient de détermination de la droite de régression linéaire. Les valeurs de ce coefficient statistiquement significatives pour $p < 0.005$ apparaissent en gras. * = la courbe n'est pas linéaire.

Tableau 2.2 Comparaison des valeurs moyennes de CV et de CI en amont et en aval du barrage Matawin (1931-2008)

Saisons	CV		CI	
	Amont	Aval	Amont	Aval
Automne	39.9 (12.43)	91.8 (40.83)*	5 (2.33)	111.7 (71.61)*
Hiver	32.6 (24.50)	47.1 (33.94)	3.5 (3.15)	50.9 (66.53)*
Printemps	61.9 (21.71)	127.3 (57.63)*	10.8 (7.41)	154.8 (235.1)*
Été	52.4 (16.97)	93.9 (29.59)*	7 (3.64)	98.8 (67.06)*

() = Écart type. * = moyenne significativement différente de celle calculée en amont ($p < 0.05$).

Tableau 2.3 Comparaison des valeurs moyennes de CV et de CI en aval du barrage avant (1931-1962) et après (1964-2008) la nationalisation

	CV			IC		
	Avant	Après	R (%)	Avant	Après	R (%)
Automne	121.8 (39.6)	69.3 (25.3)	-43*	132.1 (55.7)	93.5 (78.4)	-29
Hiver	76.7 (33.3)	27.8 (14.2)	-64*	96.7 (71.0)	20.4 (41.6)	-79*
Printemps	142.7 (62.4)	114.1 (51.9)	-20	144.6 (91.5)	165.5 (299.1)	+14
Été	99.1 (25.6)	89.6 (32.0)	-10	130.6 (65.2)	80.2 (66.2)	-39*

() : Écart type. Les moyennes ont été comparées par le test t de Student. Les valeurs de R (taux de variation) statistiquement significatives appariassent en gras.

Tableau 2.4 Coefficients de corrélation calculés entre la magnitude et la variabilité de la magnitude des débits moyens journaliers en amont et en aval du barrage Matawin (1931-2008)

Saisons	CV	CI
Hiver	-0.148	-0.063
Printemps	-0.092	-0.144
Été	-0.124	-0.124
Automne	-0.166	-0.165

Les valeurs des coefficients de corrélation significatives au seuil de 0.1 % apparaissent en gras.

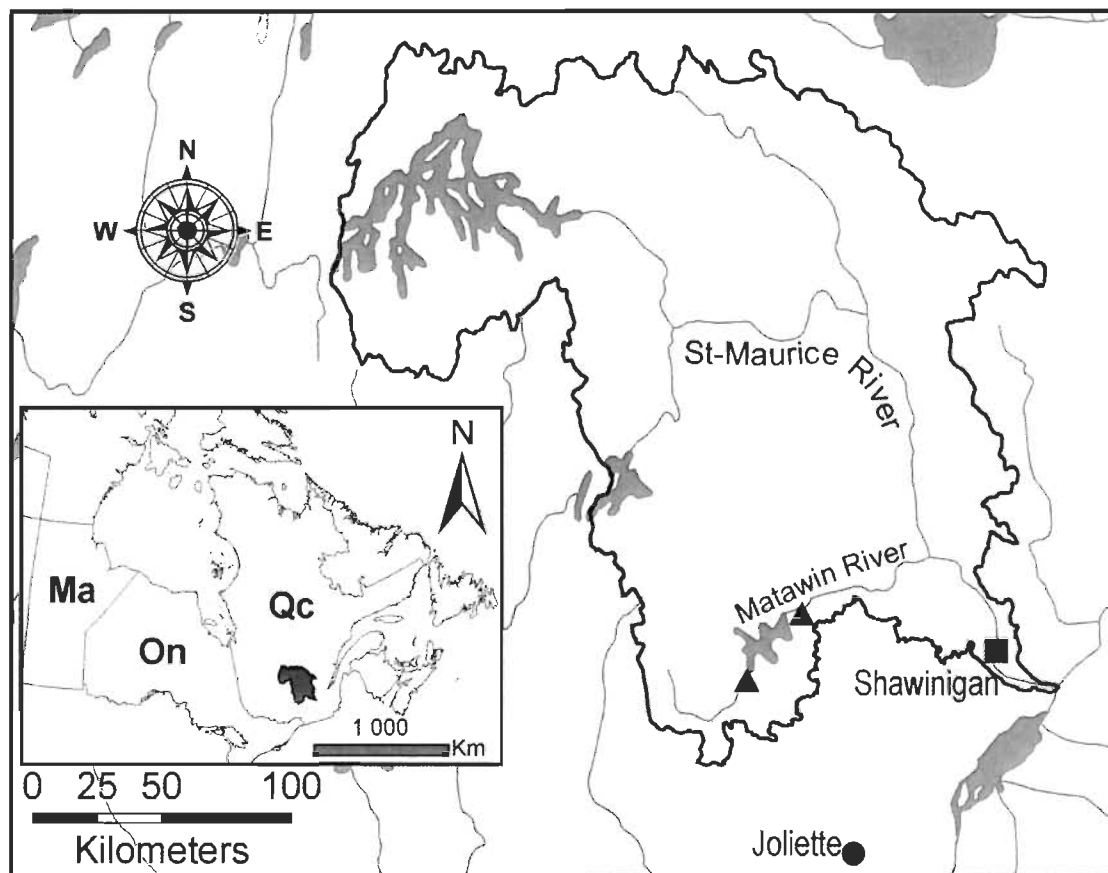


Figure 2.1 Localisation des stations en amont et en aval du barrage Matabin.

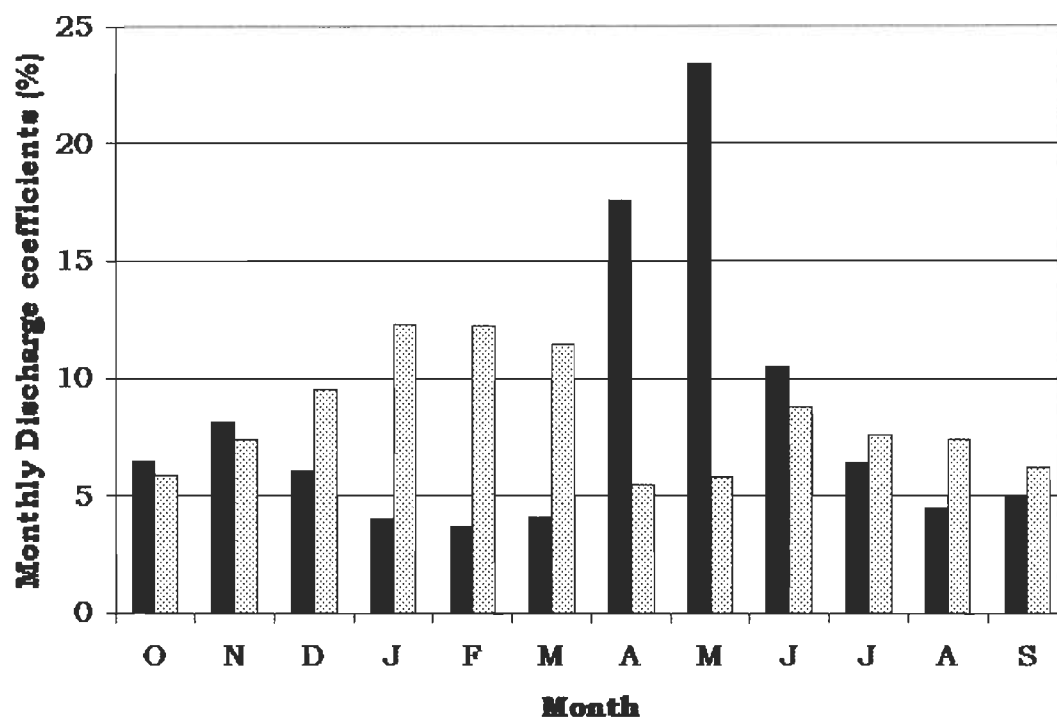


Figure 2.2 Coefficients mensuels d'écoulement (%) en amont (barres noires) et en aval (barres grises) du barrage.

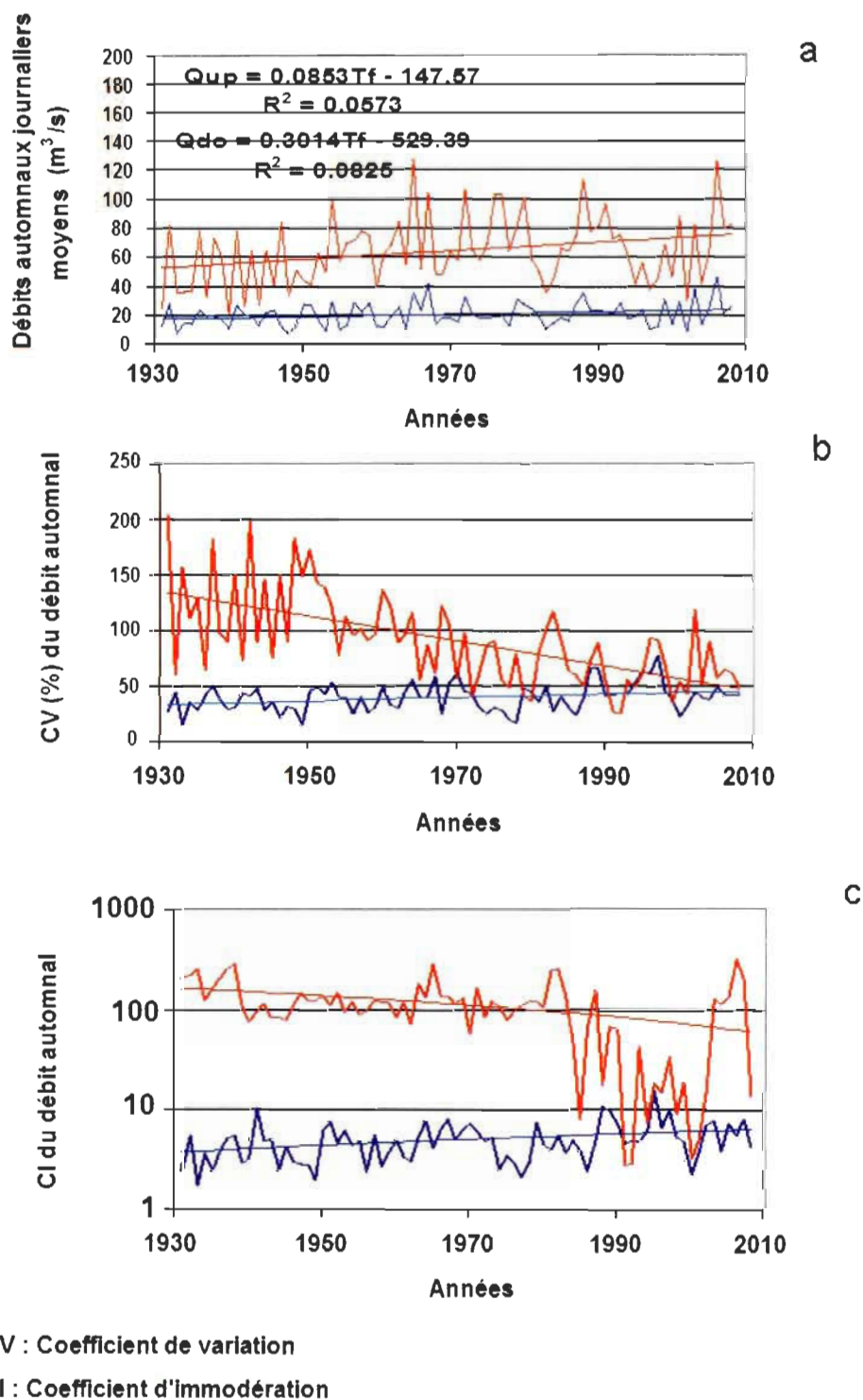


Figure 2.3. Variabilité interannuelle de la magnitude des débits moyens journaliers (a), de CV (b) et de CI (c) en automne. Q_f = magnitude des débits journaliers automnaux; T_f = années.

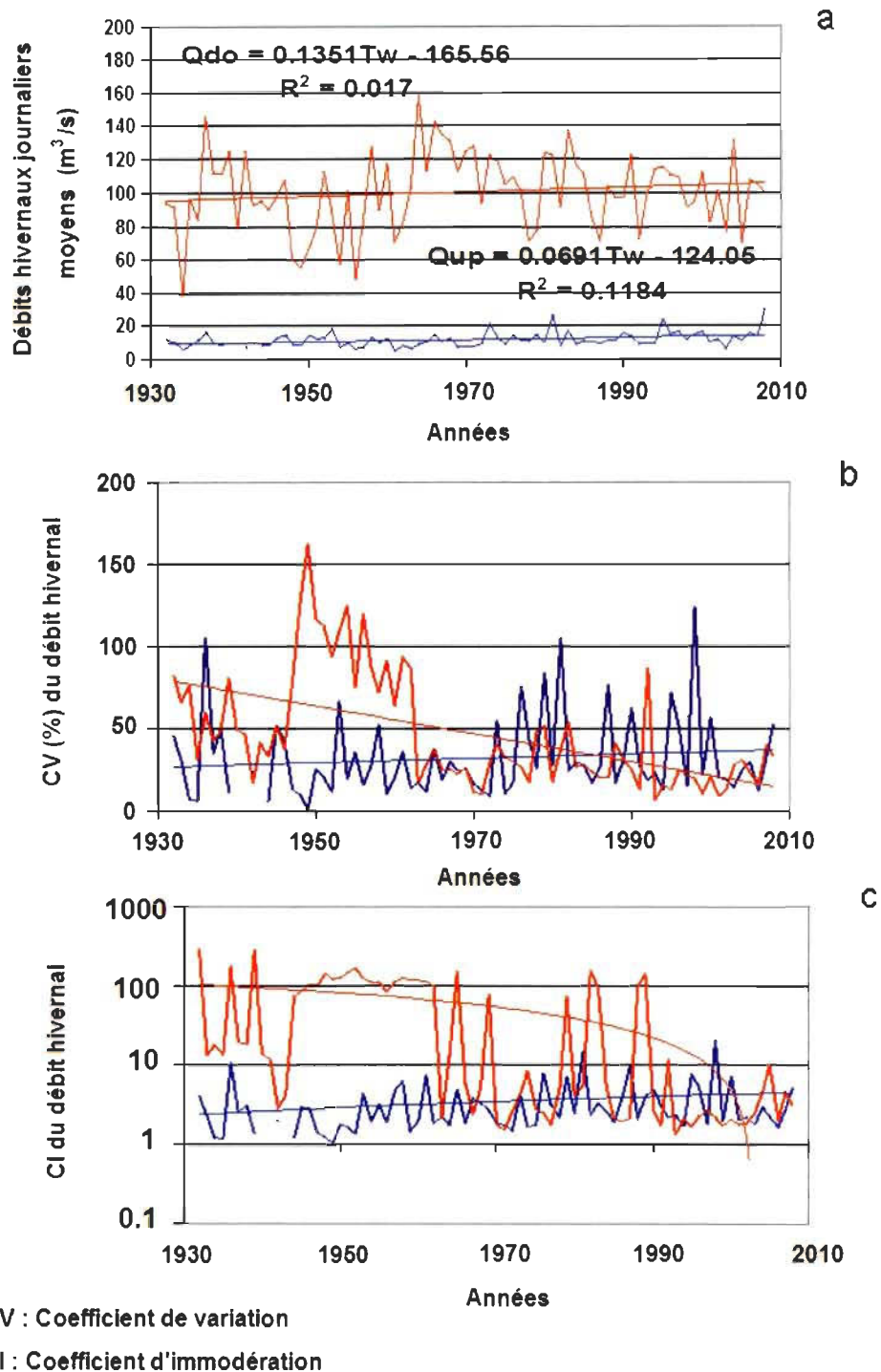


Figure 2.4 Variabilité interannuelle de la magnitude des débits moyens journaliers (a), de CV (b) et de CI (c) en hiver. Q_f = magnitude des débits journaliers automnaux; T_f = années.

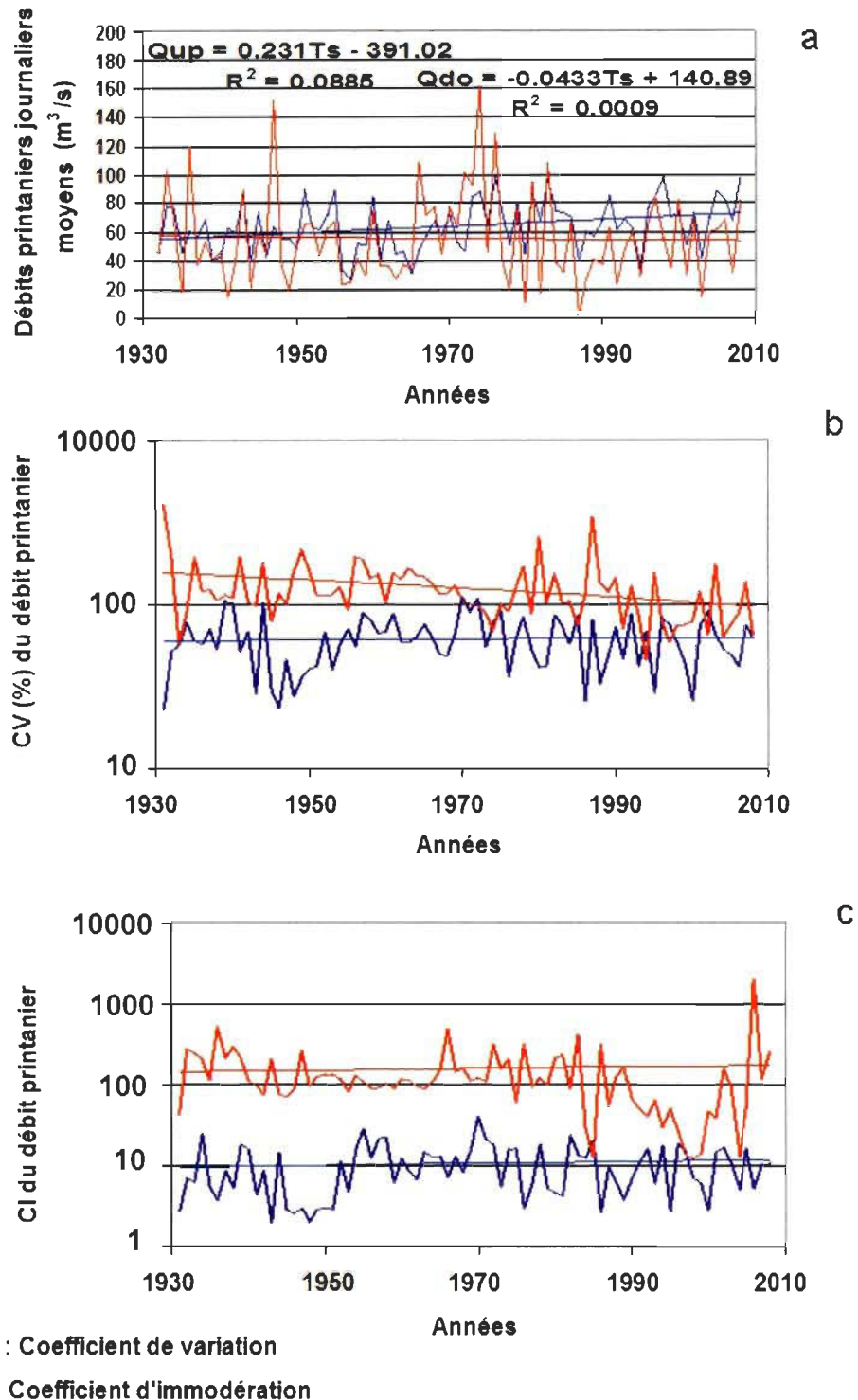


Figure 2.5 Variabilité interannuelle de la magnitude des débits moyens journaliers (a), de CV (b) et de CI (c) au printemps. Q_f = magnitude des débits journaliers automnaux; T_f = années.

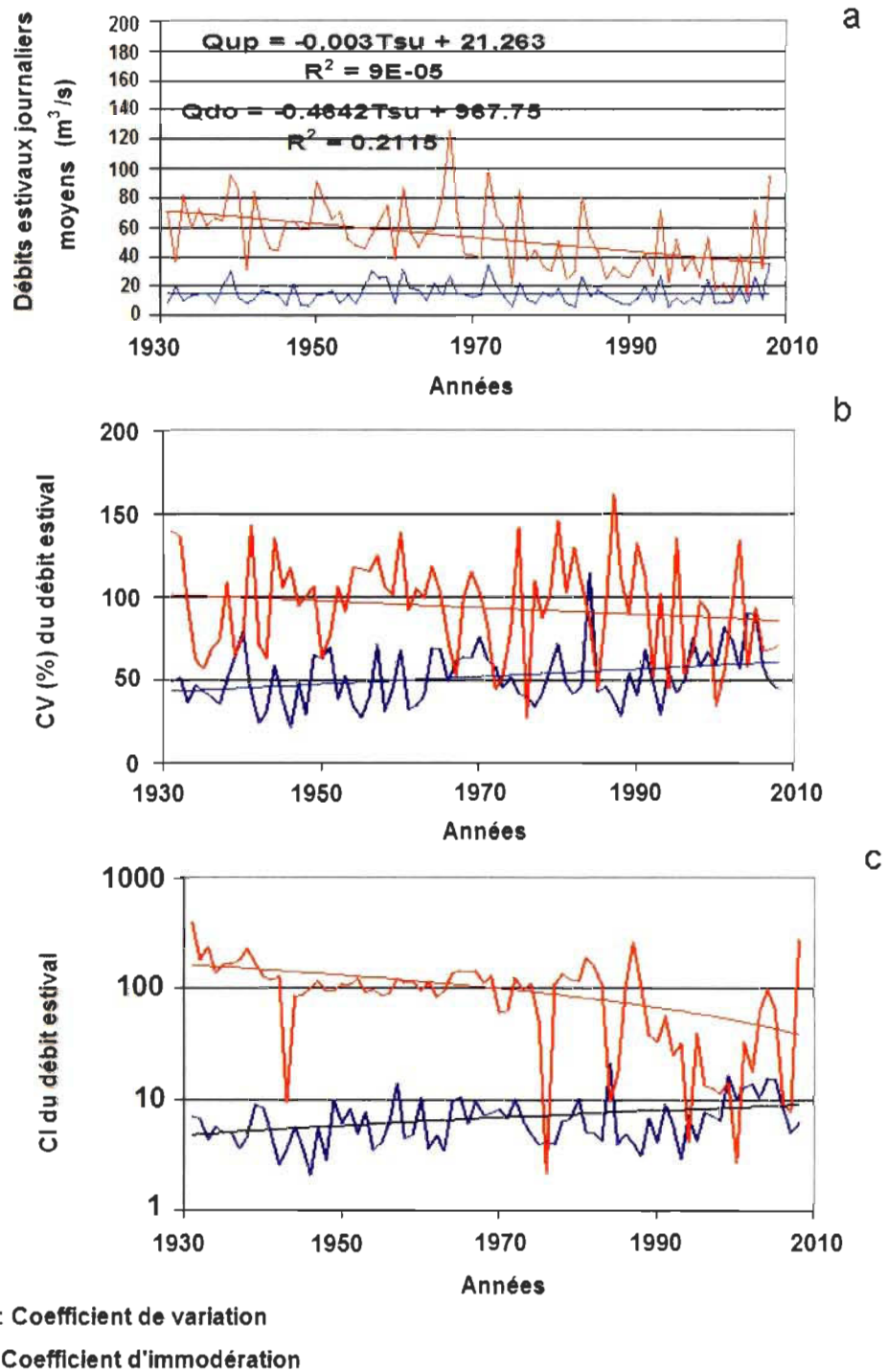


Figure 2.6 Variabilité interannuelle de la magnitude des débits moyens journaliers (a), de CV (b) et de CI (c) en été. Q_f = magnitude des débits journaliers automnaux; T_f = années.