

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
FRANCIS DELISLE

IMPACTS DES MODES DE GESTION DES BARRAGES SUR LES INDICES
SAISONNIERS DE LA VARIABILITÉ DE L'ÉCOULEMENT AU QUÉBEC

AVRIL 2018

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.

COMITÉ D'ÉVALUATION

Directeur de recherche

Ali A. Assani (Ph. D.)

Centre de recherche sur les interactions bassins versants-écosystèmes aquatiques (RIVE)

Membre régulier

Département des sciences de l'environnement

Université du Québec à Trois-Rivières

C.P. 500, Trois-Rivières (Québec)

G9A 5H7

Membres du comité d'évaluation

Christophe Kinnard (Ph. D.)

Centre de recherche sur les interactions bassins versants-écosystèmes aquatiques (RIVE)

Membre régulier

Département des sciences de l'environnement

Université du Québec à Trois-Rivières

C.P. 500, Trois-Rivières (Québec)

G9A 5H7

Jean-François Quessy (Ph. D.)

Professeur titulaire en statistique

Département de mathématiques et d'informatique

Université du Québec à Trois-Rivières

C.P. 500, Trois-Rivières (Québec)

G9A 5H7

REMERCIEMENTS

J'aimerais remercier mon directeur de maîtrise, le professeur Ali A. Assani, du Département des sciences de l'environnement de l'Université du Québec à Trois-Rivières de m'avoir donné la chance de poursuivre mes études aux cycles supérieurs. Il fut très gratifiant pour moi de faire partie de son équipe de recherche. J'aimerais aussi souligner sa grande disponibilité et son support tout au long de ce projet.

Je remercie également le professeur Christophe Kinnard, du Département des sciences de l'environnement de l'Université du Québec à Trois-Rivières d'abord pour son aide, mais surtout pour avoir répondu à plusieurs de mes questions depuis le début de mes analyses statistiques.

J'aimerais aussi remercier Jean-François Quessy qui contribue à l'évaluation de ce travail.

En terminant, je remercie tous mes collègues et amis(es) du Laboratoire interdisciplinaire d'application en géomatique environnementale (LIAGE) pour leur aide et conseils durant mes travaux.

RÉSUMÉ

De nombreuses études ont été déjà consacrées aux impacts des barrages-réservoirs et centrales hydroélectriques sur les régimes hydroélectriques des rivières au Québec. Cependant, il n'en existe encore aucune sur les impacts hydrologiques des barrages destinés à la dérivation des eaux malgré leur nombre relativement élevé en province. Pour renforcer la capacité des réservoirs érigés sur la rivière Péribonka dans la région du Saguenay-Lac-Saint-Jean, plusieurs barrages furent construits pour dériver les eaux de la rivière Manouane, principal affluent de la Péribonka, vers ces réservoirs. La première dérivation remonte au début de la décennie 1950 et la seconde a été effectuée récemment en 2003 par Hydro-Québec. L'objectif de cette étude est d'analyser les impacts des modes de gestion des barrages sur la variabilité des débits journaliers à l'échelle saisonnière en aval de trois barrages (Manouane, Rawdon et Matawin) au moyen de deux indices hydrologiques (les coefficients de variation et d'immodération) qui définissent la variabilité de l'écoulement. Les résultats révèlent que cette variabilité est beaucoup plus forte en aval du barrage Matawin (caractérisé par un mode de gestion de type inversion) qu'en aval des barrages Manouane (caractérisé par un mode de gestion de type dérivation) et Rawdon (caractérisé par un mode de gestion de type naturel). De plus, en aval du barrage Matawin, cette variabilité des débits journaliers augmente significativement dans le temps alors qu'elle diminue en aval des deux autres barrages et en rivières naturelles. Enfin, cette variabilité est mieux corrélée au climat en aval du barrage Rawdon qu'en aval des deux autres barrages. Elle est corrélée positivement aux températures en hiver et au printemps et aux pluies en été et en automne.

Mots clés : variabilité des débits journaliers, saisons, coefficient d'immodération, coefficient de variation, barrages, modes de gestion, Québec.

TABLE DES MATIÈRES

REMERCIEMENTS	iii
RÉSUMÉ.....	iv
LISTE DES TABLEAUX.....	vii
LISTE DES FIGURES	viii
CHAPITRE I	
INTRODUCTION.....	1
1.1 Mise en contexte.....	1
1.2 Problématique.....	6
1.3 Objectifs et hypothèses.....	8
CHAPITRE II	
MÉTHODOLOGIE	10
2.1 Définition des indices de variabilité de l'écoulement.....	10
2.2 Choix des bassins versants	11
2.3 Présentation des sites à l'étude	13
2.4 Source des données hydrologiques et climatiques	17
2.5 Analyse statistique des données	18
2.5.1 Constitution des séries statistiques hydroclimatiques.....	18
2.5.2 Tests de comparaison des moyennes	20
2.5.3 Analyse de la stationnarité des séries temporelles : test de Lombard.....	22
2.5.4 Corrélation entre les variables climatiques et les indices d'écoulement.....	24
CHAPITRE III	
RÉSULTATS ET DISCUSSION	26
3.1 Comparaison des valeurs moyennes des indices de variabilité de l'écoulement en rivières naturelles et en aval des barrages.....	26
3.2 Analyse de la variabilité temporelle des indices de la variabilité de l'écoulement	30

3.3	Analyse de la relation entre les indices d'écoulement et les variables climatiques.....	42
3.4	Discussion.....	47
CHAPITRE VI		
	CONCLUSION GÉNÉRALE	51
	BIBLIOGRAPHIE.....	53

LISTE DES TABLEAUX

Tableau	Page
3.1 Comparaison des coefficients d'immodération (CI) et de variation (CV) saisonniers avant (1980-2002) et après (2004-2014) la construction du barrage de dérivation sur la rivière Manouane au moyen des tests non paramétriques de Kruskal-Wallis et paramétriques de t de Student pendant la période 1980-2014.....	27
3.2 Comparaison des coefficients d'immodération (CI) et de variation (CV) saisonniers de la rivière l'Assomption (amont) et la rivière Ouareau (aval du barrage Rawdon) au moyen des tests non paramétriques de Kruskal-Wallis et paramétriques de t de Student pendant la période 1930-2010.....	28
3.3 Comparaison des coefficients d'immodération (CI) et de variation (CV) saisonniers en amont et en aval du barrage de la rivière Matawin au moyen des tests non paramétriques de Kruskal-Wallis et paramétriques de t de Student pendant la période 1930-2010.....	29
3.4 Comparaison des résultats du test de Lombard sur les indices de variabilité d'écoulement pour le mode de gestion de type naturel (rivières L'Assomption et Ouareau) à l'échelle saisonnière pour la période 1930-2010.....	32
3.5 Comparaison des résultats du test de Lombard sur les indices de variabilité d'écoulement pour le mode de gestion de type inversion (rivière Matawin) à l'échelle saisonnière pour la période 1930-2010	33
3.6 Comparaison des coefficients de corrélation calculés entre les variables climatiques et les indices de variabilité d'écoulement avant (1980-2002) et après (2004-2014) la construction du barrage sur la rivière Manouane	44
3.7 Comparaison des coefficients de corrélation du mode de gestion naturel calculés entre les variables climatiques et les indices de variabilité d'écoulement des rivières L'Assomption (amont) et Ouareau (aval du barrage Rawdon) pour la période 1930-2010	45
3.8 Comparaison des coefficients de corrélation du mode de gestion inversion calculés entre les variables climatiques et les indices de variabilité d'écoulement en amont et en aval du barrage de la rivière Matawin pour la période 1930-2010	46

LISTE DES FIGURES

Figure		Page
1.1	Régime de type naturel	3
1.2	Régime de type inversion.....	4
1.3	Régime de type homogénéisation	4
1.4	Principe de dérivation des eaux	6
2.1	Localisation des bassins versants à l'étude.....	12
2.2	Bassin versant de la rivière Manouane	13
2.3	Image satellite de la zone de dérivation (BAPE, 2001).....	15
2.4	Bassins versants des rivières L'Assomption, Ouareau et Matawin	17
3.1	Variabilité temporelle des coefficients d'immodération automnaux des rivières L'Assomption (courbe rouge) et Ouareau (courbe bleue)	34
3.2	Variabilité temporelle des coefficients de variation automnaux des rivières L'Assomption (courbe rouge) et Ouareau (courbe bleue)	34
3.3	Variabilité temporelle des coefficients d'immodération hivernaux des rivières L'Assomption (courbe rouge) et Ouareau (courbe bleue)	35
3.4	Variabilité temporelle des coefficients de variation hivernaux des rivières L'Assomption (courbe rouge) et Ouareau (courbe bleue)	35
3.5	Variabilité temporelle des coefficients d'immodération printaniers des rivières L'Assomption (courbe rouge) et Ouareau (courbe bleue)	36
3.6	Variabilité temporelle des coefficients de variation printaniers des rivières L'Assomption (courbe rouge) et Ouareau (courbe bleue)	36
3.7	Variabilité temporelle des coefficients d'immodération estivaux des rivières L'Assomption (courbe rouge) et Ouareau (courbe bleue)	37
3.8	Variabilité temporelle des coefficients de variation estivaux des rivières L'Assomption (courbe rouge) et Ouareau (courbe bleue)	37

3.9	Variabilité temporelle des coefficients d'immodération automnaux de la rivière Matawin en amont (courbe rouge) et en aval (courbe bleue) du barrage.....	38
3.10	Variabilité temporelle des coefficients de variation automnaux de la rivière Matawin en amont (courbe rouge) et en aval (courbe bleue) du barrage.....	38
3.11	Variabilité temporelle des coefficients d'immodération hivernaux de la rivière Matawin en amont (courbe rouge) et en aval (courbe bleue) du barrage.....	39
3.12	Variabilité temporelle des coefficients de variation hivernaux de la rivière Matawin en amont (courbe rouge) et en aval (courbe bleue) du barrage	39
3.13	Variabilité temporelle des coefficients d'immodération printaniers de la rivière Matawin en amont (courbe rouge) et en aval (courbe bleue) du barrage.....	40
3.14	Variabilité temporelle des coefficients de variation printaniers de la rivière Matawin en amont (courbe rouge) et en aval (courbe bleue) du barrage.....	40
3.15	Variabilité temporelle des coefficients d'immodération estivaux de la rivière Matawin en amont (courbe rouge) et en aval (courbe bleue) du barrage.....	41
3.16	Variabilité temporelle des coefficients de variation estivaux de la rivière Matawin en amont (courbe rouge) et en aval (courbe bleue) du barrage	41

CHAPITRE I

INTRODUCTION

1.1 Mise en contexte

Environ 21 % du territoire du Québec est drainés par des lacs et rivières. Ainsi, à elle seule, la province gère plus de 16 % des réserves mondiales d'eau douce (Astrade, 1998). En rive nord du fleuve Saint-Laurent, l'eau s'écoule dans des réseaux hydrographiques façonnés par les glaciers du Quaternaire en régime inverse au sens de la déglaciation, soit du nord vers le sud. Ces réseaux hydrographiques sont jalonnés par de nombreuses chutes et rapides, résultat d'une géomorphologie accidentée du Bouclier Canadien (Astrade, 1998). Du point de vue climatique, cette rive jouit d'un climat relativement humide. De fait, les précipitations sont abondantes autant sous forme de pluie que sous forme de neige, mais leur quantité diminue du sud au nord. Les variations saisonnières de la température sont fortes : les étés sont chauds alors que les hivers sont particulièrement froids. Ces conditions géologiques, climatiques et hydrographiques offrent ainsi un important potentiel hydroélectrique qui a été exploité pour la mise en valeur du territoire. De nombreuses retenues d'eau furent construites principalement pour la production de l'énergie hydroélectrique pour laquelle le Québec est devenu le troisième producteur au monde. En effet, on y dénombre près de 10 000 barrages et digues, ainsi qu'un peu plus de 225 réservoirs (Astrade, 1998).

Ces différentes retenues d'eau ont provoqué des impacts environnementaux à des degrés distincts. Sur le plan des impacts hydrologiques, ces retenues d'eau peuvent être classées en deux catégories. La première catégorie rassemble toutes les retenues dont les impacts sont circonscrits dans un seul bassin versant. La seconde catégorie regroupe toutes les retenues d'eau dont les impacts affectent plusieurs bassins versants (Assani *et al.*, 2015). Jusqu'à maintenant, toutes les études consacrées aux impacts hydrologiques des barrages et des réservoirs se sont limitées aux impacts hydrologiques induits par les

retenues d'eau de la première catégorie (Assani, 2004; Assani *et al.*, 2002, 2005, 2006, 2007, 2011, 2013; Fortier *et al.*, 2011; Lajoie *et al.*, 2006, 2007; Landry *et al.*, 2014; Matteau *et al.*, 2009; Sylvain *et al.*, 2015). Ces études ont mis en évidence trois types d'impacts hydrologiques correspondant chacun à un mode de gestion spécifique des barrages induisant ainsi trois types de régimes hydrologiques régularisés en aval des barrages : (i) le régime hydrologique régularisé de type naturel, (ii) le régime hydrologique régularisé de type inversion, (iii) le régime hydrologique régularisé de type homogénéisation. Rappelons que des synthèses sur les impacts hydrologiques ont été déjà effectuées par plusieurs étudiants dirigés par le professeur Ali Assani (p. ex., Gravel, 2005; Lajoie, 2006, Stichelbout, 2006; Matteau, 2009). Un bref résumé de ces études sera ainsi présenté.

Le régime hydrologique régularisé de type naturel (figure 1.1) se définit par le maintien du cycle naturel des débits. Il est le type de régime le moins bouleversé par les barrages. Ainsi, les débits maximums surviennent au printemps au moment de la fonte des neiges et les débits minimums, en hiver lorsque les précipitations tombent sous forme de neige. En aval de ces retenues d'eau, la magnitude des débits maximums ne change pas comparativement à celle observée en rivières naturelles. Par contre, il existe une légère augmentation des débits minimums (Lajoie, 2006). La variabilité des débits à l'échelle annuelle est comparable à celle observée en rivières naturelles. Ce régime est observé en aval des barrages construits au fil de l'eau, qui sont pourvus de centrales hydroélectriques pour la plupart d'entre eux (Assani *et al.*, 2006).

Le régime hydrologique régularisé de type inversion (figure 1.2) se définit par une inversion complète du cycle hydrologique naturel des débits. Il est le type de régime le plus affecté par les barrages jusqu'à maintenant, car toutes les caractéristiques des débits sont transformées. L'inversion est causée par le mode de gestion qui se résume à relâcher une grande quantité d'eau durant l'hiver en raison d'une demande hydroélectrique plus forte et à emmagasiner l'eau dans le réservoir au printemps au moment de la fonte des neiges. Les débits maximums apparaissent donc en hiver, alors que les débits minimums surviennent au printemps. Ce type de régime se caractérise par

une diminution des débits maximums et minimums en comparaison aux rivières naturelles. De plus, leur variabilité interannuelle est beaucoup plus forte qu'en rivières naturelles. Ce type de régime se rencontre exclusivement sur la rive nord du bassin du fleuve Saint-Laurent en aval des réservoirs afin d'alimenter les centrales hydroélectriques durant la période hivernale (Assani *et al.*, 2006).

Le régime hydrologique de type homogénéisation (figure 1.3) se définit par une uniformisation du cycle naturel des débits. De ce fait, les débits varient peu d'une saison à l'autre en aval de ces retenues d'eau. Ils restent ainsi quasi constants durant toute l'année. En ce qui concerne les impacts hydrologiques, ils se traduisent par une baisse des débits maximums et par une hausse significative des débits minimums par rapport au cycle hydrologique naturel. En revanche, leur variabilité interannuelle est beaucoup plus faible que celle observée dans les rivières naturelles. Ce type de régime est associé généralement aux grands bassins versants ($> 10\,000\text{ km}^2$) et se rencontre généralement sur la rive nord du fleuve Saint-Laurent (Assani *et al.*, 2006).

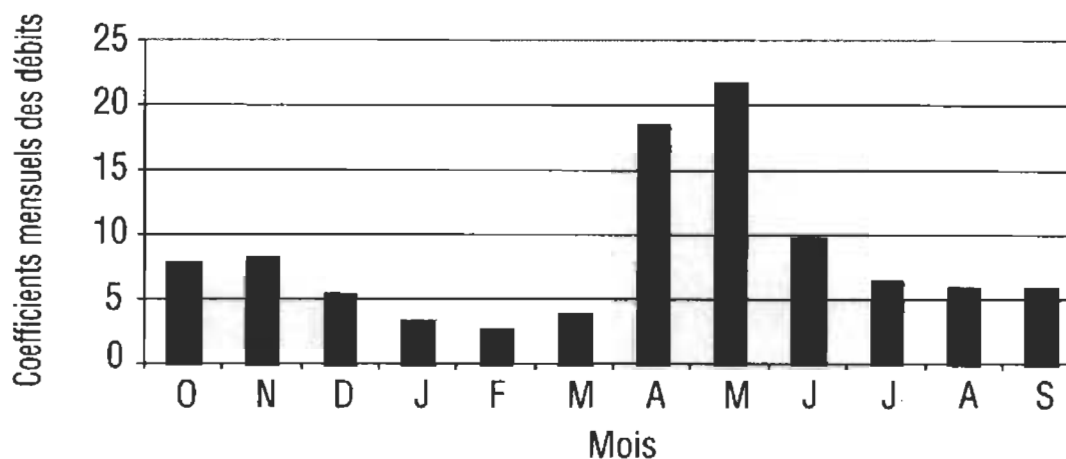


Figure 1.1 Hydrogramme annuel d'un barrage à mode de gestion de type naturel

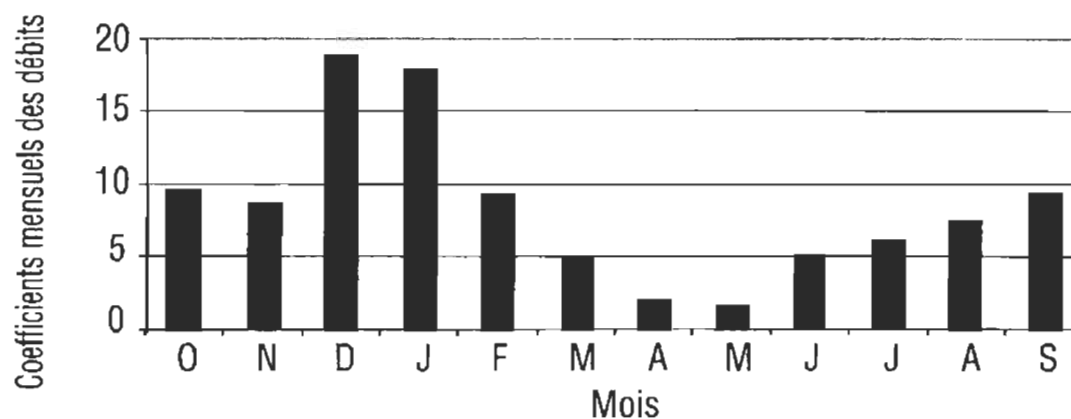


Figure 1.2 Hydrogramme annuel d'un barrage à mode de gestion de type inversion

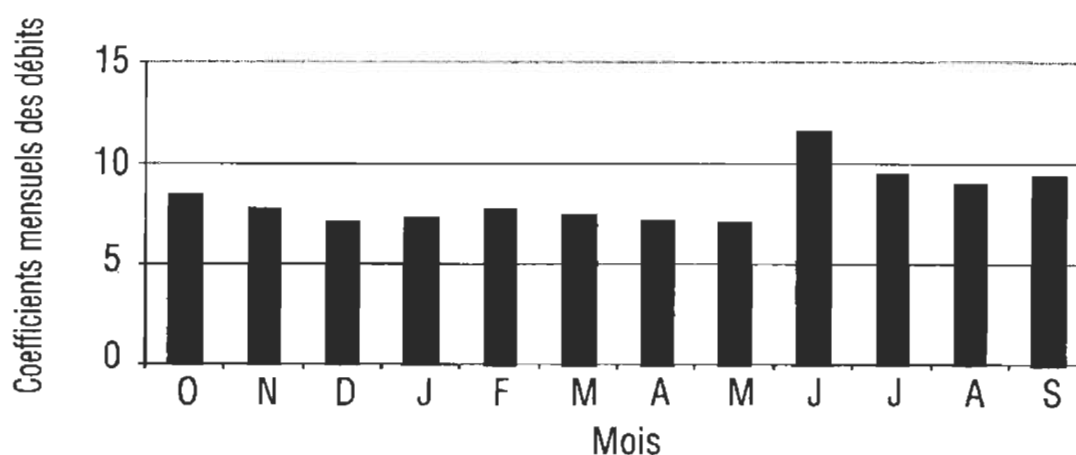


Figure 1.3 Hydrogramme annuel d'un barrage à mode de gestion de type homogénéisation

Pour les retenues d'eau de la seconde catégorie, à notre connaissance, il n'existe jusqu'à présent aucune étude sur leurs impacts hydrologiques. Cette catégorie regroupe toutes les retenues d'eau qui transfèrent l'eau d'un bassin versant à un autre. En règle générale, ce transfert d'eau implique trois bassins versants (figure 1.4). Le premier est le bassin hydrologique source ou détourné, c'est-à-dire celui dont les eaux sont détournées pour en alimenter un autre. Ce dernier est appelé le bassin hydrologique récepteur. Entre les bassins source et récepteur, l'eau détournée est acheminée à travers le bassin hydrologique de transfert. Dans ce système de dérivation, les barrages et réservoirs sont généralement dans les deux premiers bassins versants. Ainsi, dans le bassin source, le

barrage ou le réservoir sert à stocker de l'eau qui doit être transférée vers le bassin récepteur. L'eau détournée sert principalement à alimenter un barrage ou un réservoir existant afin de pouvoir renforcer la capacité de production des centrales hydroélectriques qui y sont construites. Il s'ensuit que les impacts hydrologiques induits par les retenues d'eau varient dans les trois types des bassins versants impliqués dans ce système de transfert d'eau (source, transfert et récepteur). On peut donc distinguer aussi trois types de régimes hydrologiques régularisés dans ce système. Le premier type est le régime hydrologique régularisé de dérivation qui survient en aval des barrages dans le bassin source. Le second type est le régime hydrologique régularisé de type transfert qui survient dans le bassin qui sert de transit pour l'eau détournée. Enfin, le dernier type est le régime hydrologique régularisé récepteur qui survient en aval du bassin récepteur. Il devient donc important de caractériser ces trois types de régimes et de les comparer aux trois types de régimes induits par les retenues d'eau de la première catégorie afin d'élaborer des normes de débits de gestion spécifiques à chaque type de régime hydrologique régularisé pour restaurer et conserver l'intégrité écologique des rivières en aval des barrages.

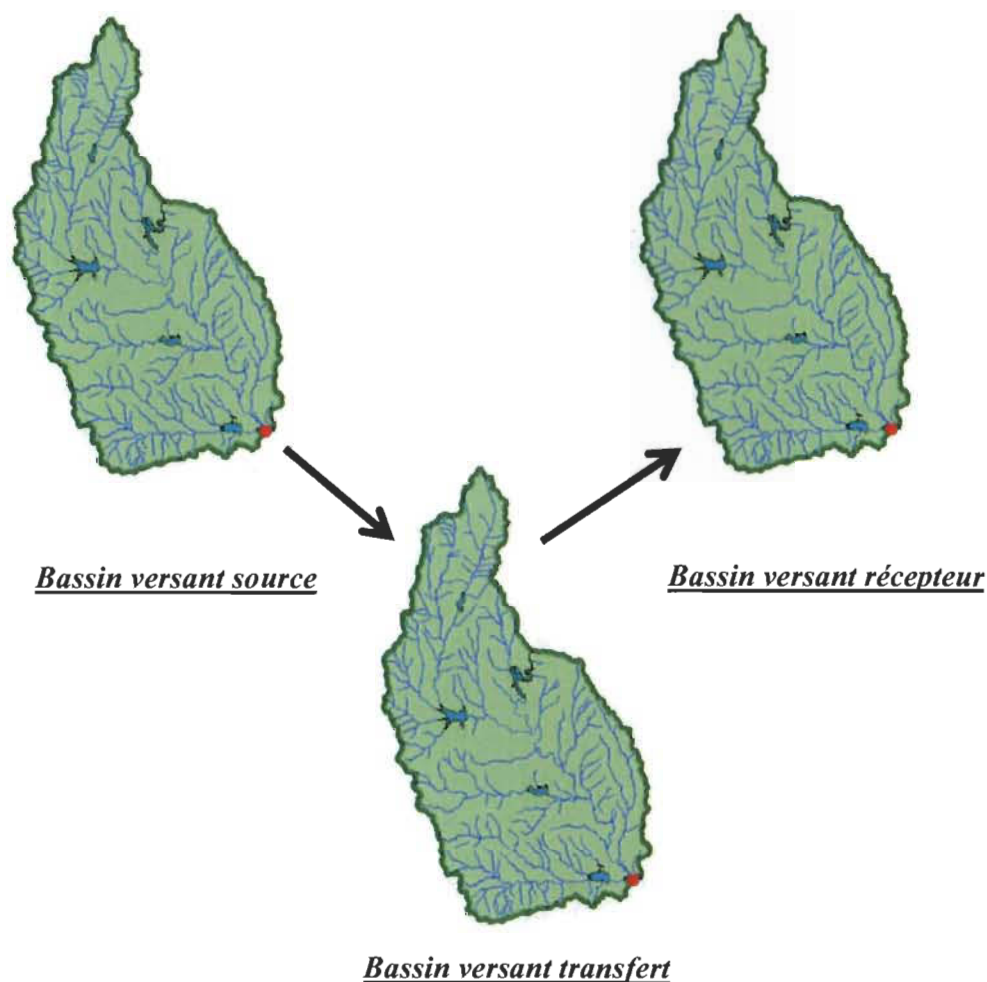


Figure 1.4 Principe de dérivation des eaux

1.2 Problématique

Selon le concept écologique des débits naturels (Richter *et al.*, 1996; Poff *et al.*, 1997), l'écoulement des rivières est constitué de cinq composantes fondamentales : la magnitude, la durée, la période d'occurrence, la fréquence et la variabilité. Cependant, dans la littérature scientifique, de nombreux travaux sur les impacts hydrologiques des barrages se sont limités aux quatre premières composantes. Pourtant, plusieurs études en écologie fluviale ont déjà démontré que la variabilité de l'écoulement a une influence sur la dynamique et l'évolution des organismes aquatiques et semi-aquatiques, autant en rivières naturelles qu'en rivières régularisées (Beche *et al.*, 2006; Enders *et al.*, 2009;

Hudon, 1997; Merritt *et al.*, 2010; Nilsson et Svedmark, 2002; Poff, 2002; Zimmerman, 2010). En effet, la variabilité d'écoulement influence la composition, la structure et l'abondance des macrophytes et de la végétation riparienne, les volumes d'habitats et de nourritures disponibles pour la faune aquatique et semi-aquatique, ainsi que les échanges entre le lit mineur et la plaine alluviale adjacente. En règle générale, les barrages réduisent la variabilité des débits à l'échelle annuelle mais, l'augmentent en revanche à l'échelle journalière. La principale conséquence écologique de la réduction des débits à l'échelle annuelle est la perte de la biodiversité à l'origine d'une tendance à l'homogénéisation de la faune notamment en aval des barrages (Bunn and Arthington, 2002; Moyle and Mount, 2007; Poff et al., 2007). Aussi, une étude de Richter et Richter (2000) explique que la variabilité d'écoulement influence la modification des berges et leur sensibilité à l'érosion ainsi que l'évolution des méandres et d'autres formes géomorphologiques. Celle-ci détermine aussi le caractère constant ou intermittent de l'écoulement des rivières (Assani *et al.*, 2014; Larned *et al.*, 2010).

La variabilité de l'écoulement est encore très peu étudiée, contrairement aux quatre autres composantes (Assani *et al.*, 2010; Mazouz *et al.*, 2012, 2013). Il existe encore plusieurs incertitudes quant aux facteurs climatiques, physiographiques et anthropiques des bassins versants qui influencent la variabilité spatio-temporelle de cette composante de l'écoulement. Au Québec, une étude récente menée par Assani *et al.* (2015) ont analysé les impacts de la déforestation et de l'agriculture sur la variabilité spatio-temporelle des indices de la variabilité de l'écoulement et sur la relation entre les variables climatiques et ces mêmes indices. Cette étude a montré que la variabilité des débits journaliers était plus forte dans un bassin versant agricole que dans un bassin versant forestier. Cependant, aucune étude n'a encore analysé les impacts de modes de gestion des barrages sur la variabilité de l'écoulement.

1.3 Objectifs et hypothèses

Compte tenu de ce qui précède, cette étude vise à analyser les impacts hydrologiques que peut engendrer un barrage de dérivation sur la variabilité de l'écoulement. Pour ce faire, ce projet de recherche abordera les objectifs suivants :

- Analyser les impacts de la dérivation des eaux de la rivière Manouane (bassin versant source) sur la variabilité de l'écoulement. Notre hypothèse est la suivante : la dérivation des eaux de la rivière Manouane a provoqué une diminution de la variabilité des débits. Bien que très peu d'études existent encore sur les impacts hydrologiques des barrages sur la variabilité des débits, il est couramment admis que ces impacts se traduisent généralement par une forte diminution de la variabilité des débits en aval des barrages en raison de la diminution des pics des crues d'une part, et de la hausse de la magnitude des débits d'étiage, d'autre part (Poff *et al.*, 2007; Moyle et Mount, 2007).
- Comparer les impacts hydrologiques induits par un barrage de dérivation sur la variabilité des débits à ceux induits par les barrages de type naturel et de type inversion. Cet objectif repose sur l'hypothèse suivante : la variabilité des débits en aval d'un barrage de dérivation est moins forte que celle observée en aval des barrages de type naturel et inversion.
- Analyser la relation entre les variables climatiques (températures et précipitations) et les indices de variabilité d'écoulement. L'hypothèse qui sous-tend cet objectif est la suivante : en aval des barrages de dérivation, la variabilité de l'écoulement est indépendante des facteurs climatiques. En d'autres termes, il n'existe aucune corrélation entre la variabilité des débits et les facteurs climatiques parce que le mode de gestion de type dérivation détruit le forçage climatique des débits.

Il est important de mentionner que cette étude s'inscrit dans le programme de recherche visant à élaborer une typologie d'impacts hydrologiques des barrages au Québec afin de pouvoir prédire ultérieurement les impacts morphologiques et écologiques associés aux différents types d'impacts hydrologiques. La finalité de ce programme de recherche est l'élaboration des normes de gestion des débits spécifiques à chaque type d'impacts hydrologique des barrages afin de pouvoir élaborer les normes des débits de gestion les plus adaptées à chaque type d'impacts hydrologiques pour restaurer l'intégrité écologique des rivières en aval des barrages au Québec.

CHAPITRE II

MÉTHODOLOGIE

2.1 Définition des indices de variabilité de l'écoulement

Pour caractériser la variabilité de l'écoulement, l'indice qui est habituellement utilisé dans la littérature est le nombre des phases de montée et de descente des débits (Richter *et al.*, 1996). Bien que cette approche soit précise, elle est laborieuse et relativement longue, car elle nécessite l'analyse détaillée des hydrogrammes des débits. Afin de rendre les opérations de traitement plus simples, nous proposons dans le cadre de ce travail deux indices qui permettent de caractériser la variabilité de l'écoulement.

Le premier indice est le coefficient d'immodération (CI), qui est en fait le rapport entre le débit journalier le plus élevé (débit journalier maximum) et le débit journalier le plus faible (débit journalier minimum) mesuré au cours d'une année hydrologique ou au cours d'une saison. Cet indice mesure l'amplitude maximale des fluctuations des débits aux échelles annuelles ou saisonnières. En d'autres mots, plus la valeur de CI est élevée, plus l'écart entre le débit journalier maximum et le débit journalier minimum est grand (Assani *et al.*, 2015).

Le deuxième indice est le coefficient de variation des débits (CV), qui est le rapport entre l'écart-type et la moyenne calculée sur une série des débits journaliers. Il est exprimé en pourcentage. Cet indice mesure les fluctuations interjournalières des débits aux échelles annuelles et saisonnières. Bref, plus la valeur de CV est élevée, plus les débits fluctuent fortement d'un jour à l'autre (Assani *et al.*, 2015).

2.2 Choix des bassins versants

Le choix des bassins versants à l'étude s'est fait en fonction de plusieurs critères :

- L'existence des données des débits avant et après la construction d'un barrage.
- L'existence des données continues des débits et des variables climatiques sur une période d'au moins 30 ans.
- La différence du mode de gestion des retenues d'eau entre les trois bassins versants.
- La similitude des caractéristiques géologiques, physiographique et climatiques des bassins versants, ce qui permet de mieux cerner les impacts hydrologiques des retenues d'eau sur les indices de la variabilité de l'écoulement.

Trois bassins versants ont satisfait à ces critères. Il s'agit des bassins versants des rivières Manouane, L'Assomption et Matawin (figure 2.1).

Dans le cas de la rivière Manouane, la méthode de « station témoin » a été utilisée. Celle-ci consiste à comparer les données mesurées à la même station avant et après la construction d'un barrage.

Dans le cas des rivières L'Assomption et Matawin, la méthode de « station de contrôle » a été utilisée. Celle-ci est fondée sur la comparaison des débits mesurés en amont et en aval d'un barrage (p. ex. 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.

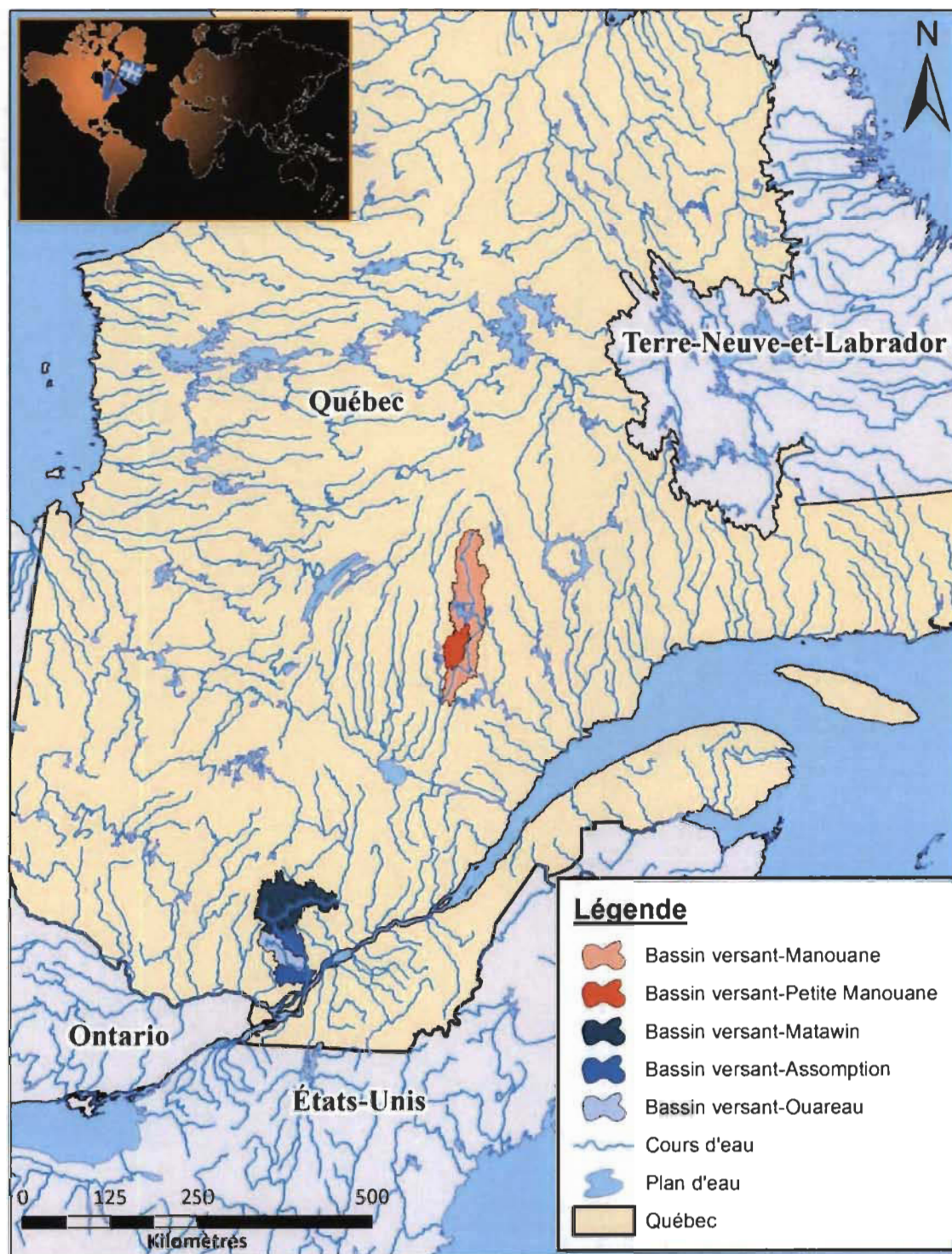


Figure 2.1 Localisation des bassins versants à l'étude

2.3 Présentation des sites à l'étude

La rivière Manouane prend sa source en aval du lac Manouane (figure 2.2), au point de restitution de l'évacuateur Manouane-Est. La rivière parcourt environ 250 km avant de rejoindre la rivière Péribonka, principal affluent du lac Saint-Jean. La superficie totale de son bassin versant est de 9483 km² et est totalement circonscrite dans le Bouclier canadien. La rivière Manouane a connu deux dérivations de ses eaux. La première dérivation a été réalisée en 1961 par la société Alcan afin d'alimenter le lac Péribonka. La seconde dérivation a été réalisée en 2003 par Hydro-Québec pour renforcer la capacité du réservoir Pipmuacan qui alimente les centrales hydroélectriques des Bersimis-1 et Bersimis-2 construites sur la rivière Betsiamites. Il s'agit du premier complexe hydroélectrique aménagé par Hydro-Québec (BAPE, 2001).

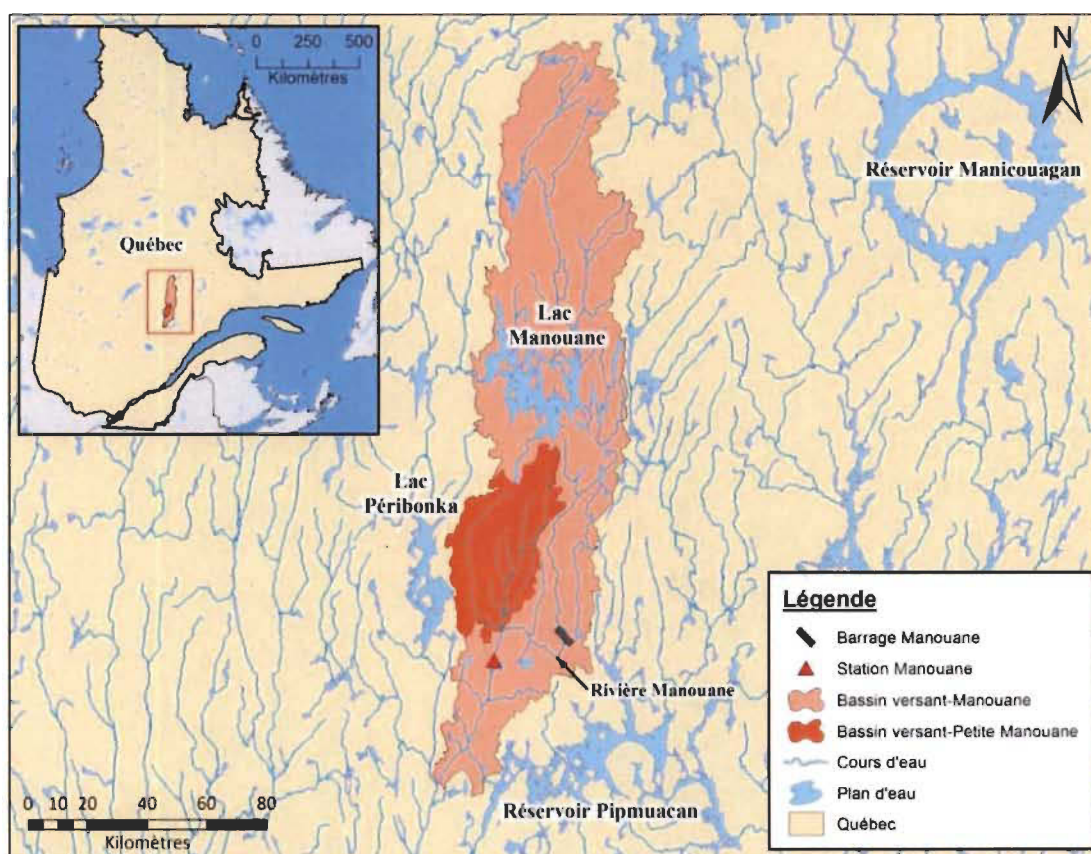


Figure 2.2 Bassin versant de la rivière Manouane

Le barrage de dérivation principal construit par Hydro-Québec sur la rivière Manouane (figure 2.3) mesure 9 m de hauteur sur 90 m de longueur et comporte une largeur en crête de 3,75 m. Deux conduites de 0,85 m de diamètre assurent le maintien d'un débit réservé minimal de 3 m³/s. Le réservoir associé à ce barrage (réservoir du Grand Détour) a une superficie maximale de 23 km². L'eau de la rivière Manouane dérivée vers la rivière Betsiamites passe d'abord à travers un canal de dérivation long de 7 km. Celui-ci relie le réservoir du Grand Détour au lac Patrick, en passant par deux petits lacs (Numéro Un et Numéro Deux), puis à travers la rivière aux Hirondelles, pour finalement se jeter dans le réservoir Pipmuacan. Le débit moyen dérivé est de 30 m³/s. Le débit maximum qui peut s'écouler dans le canal est de 80 m³/s. Au droit du barrage, la superficie du bassin versant de la rivière Manouane est de 1717 km² (BAPE, 2001).

De plus, Hydro-Québec a construit deux épis dans la rivière Manouane pour maintenir les niveaux d'eau. Le premier se situe à l'exutoire du lac Duhamel et le second, au kilomètre 83 (BAPE, 2001). Il faut aussi mentionner que la station de mesure des débits de la rivière Manouane est située en aval du barrage de dérivation, à la sortie du lac Duhamel, dans la municipalité de Mont-Valin au Saguenay-Lac-Saint-Jean. Entre la station et le barrage, la rivière reçoit son principal affluent, la rivière la Petite Manouane (1445 km²) et plusieurs petits affluents, si bien que la superficie totale du bassin versant à la station de mesure des débits est de 3686 km². Il faut garder à l'esprit que les effets du barrage de dérivation sur les débits mesurés à la station sont atténués par les apports de ces affluents naturels (Assani *et al.*, 2015).

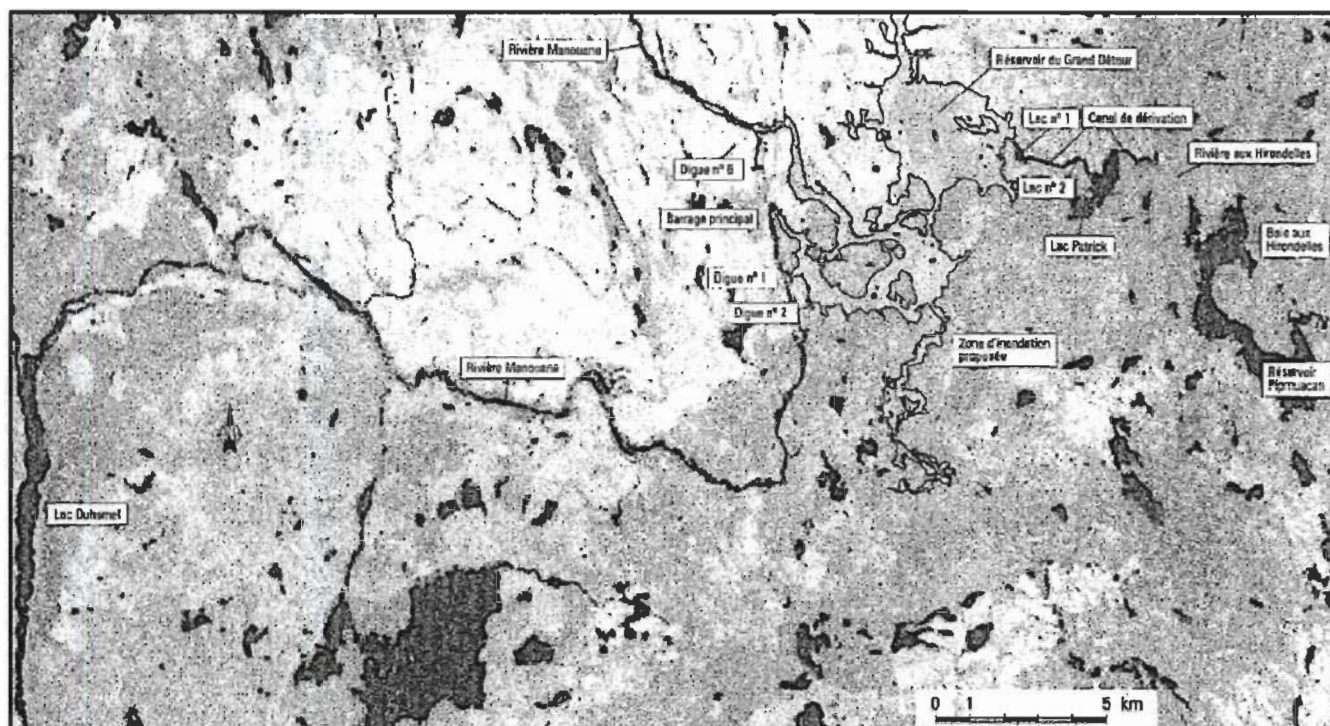


Figure 2.3 Image satellite de la zone de dérivation (BAPE, 2001).

En ce qui concerne la rivière L'Assomption et son principal affluent, la rivière Ouareau (figure 2.4), ils prennent leur source dans le Bouclier canadien. En effet, les deux tiers de leurs bassins hydrographiques respectifs sont situés dans le Bouclier canadien et le tiers restant, dans les basses terres du Saint-Laurent. L'utilisation des sols se traduit en grande partie par l'agriculture. La superficie totale des bassins versants de la rivière L'Assomption et de la rivière Ouareau sont respectivement de 4220 km² et de 1687 km². Deux barrages ont été construits sur la rivière Ouareau, essentiellement pour la production d'hydroélectricité. D'abord, le barrage de Rawdon, situé au pied du Bouclier canadien, fut construit en 1913. D'une hauteur de 15 m, la capacité de stockage d'eau du barrage est de 5 976 417 m³. La superficie du réservoir est de 194 ha. Ensuite, le barrage de Crabtree, situé dans les basses terres du Saint-Laurent, fut construit en 1917.

Il n'existe pas de station hydrologique en amont de ces deux barrages. C'est pourquoi la rivière L'Assomption sert de référence. Le choix de cette rivière se justifie par la similitude des caractéristiques géologiques et climatiques. Les débits de la rivière

L'Assomption sont mesurés en continu à la station Joliette depuis 1923. Au droit de cette station, la superficie du bassin versant de la rivière L'Assomption est de 1340 km². Pour la rivière Ouareau, les données de débit journalier sont mesurées en aval du barrage de Rawdon. En aval de cette centrale, la superficie du bassin versant est de 1260 km² (Landry *et al.*, 2014). Les deux superficies sont donc comparables afin de pouvoir comparer aisément les valeurs de CI et de CV. De plus, pour les deux rivières, leurs bassins versants sont couverts principalement par la forêt. Ainsi, les conditions de ruissellement en amont des stations hydrométriques sont aussi comparables.

Quant à la rivière Matawin (figure 2.4), elle est entièrement circonscrite dans le Bouclier canadien et draine un bassin versant d'une superficie de 5770 km². L'ensemble du territoire est situé dans la zone de végétation tempérée nord, immédiatement au sud de la zone boréale. Le climat régional est continental subpolaire, avec une profondeur de précipitation d'environ 1000 mm et une température moyenne annuelle de 4 °C. Quant à l'utilisation des terres, il y a peu d'activités agricoles dans le bassin versant de la rivière Matawin. L'activité humaine se limite à l'exploitation forestière commerciale (Landry *et al.*, 2014). En 1929, la Shawinigan Water and Power Company a construit le réservoir Taureau sur la rivière Matawin afin d'augmenter la capacité de stockage des eaux durant l'hiver pour alimenter les centrales hydroélectriques de Grand-Mère, de Shawinigan 2 et 3, et de La Gabelle, construite sur la rivière Saint-Maurice. D'une hauteur de 25 m, la capacité de stockage d'eau du barrage est de 946 000 000 m³. La superficie du réservoir est de 9505 ha. L'écoulement du réservoir commence généralement à la mi-novembre et se poursuit à travers l'hiver. La construction de ce réservoir allait aussi prévenir les inondations sur le Saint-Maurice et faciliter le transport du bois flottant en amont. De plus, le réservoir Taureau est un réservoir de type annuel, ce qui signifie qu'il est rempli chaque année au maximum de sa capacité avec l'eau provenant exclusivement de son bassin versant. En 1962, Hydro-Québec a pris le contrôle du réservoir à la suite de la nationalisation du secteur de l'énergie par le gouvernement du Québec (Landry *et al.*, 2014). Depuis 1931, la gestion du niveau d'eau dans le réservoir n'a pratiquement pas changé. De fait, les données de débit sont collectées depuis la construction du réservoir, en 1930, à la station Saint-Michel-des-Saints (1390 km²) située en amont du réservoir et

à un poste situé immédiatement en aval du réservoir. De cette manière, le débit mesuré à la station Saint-Michel-des-Saints n'est pas affecté par la présence du réservoir. Cette station fait même partie des références de la « National Network of Reference Hydrometric Basin of Canada » (Landry *et al.*, 2014).

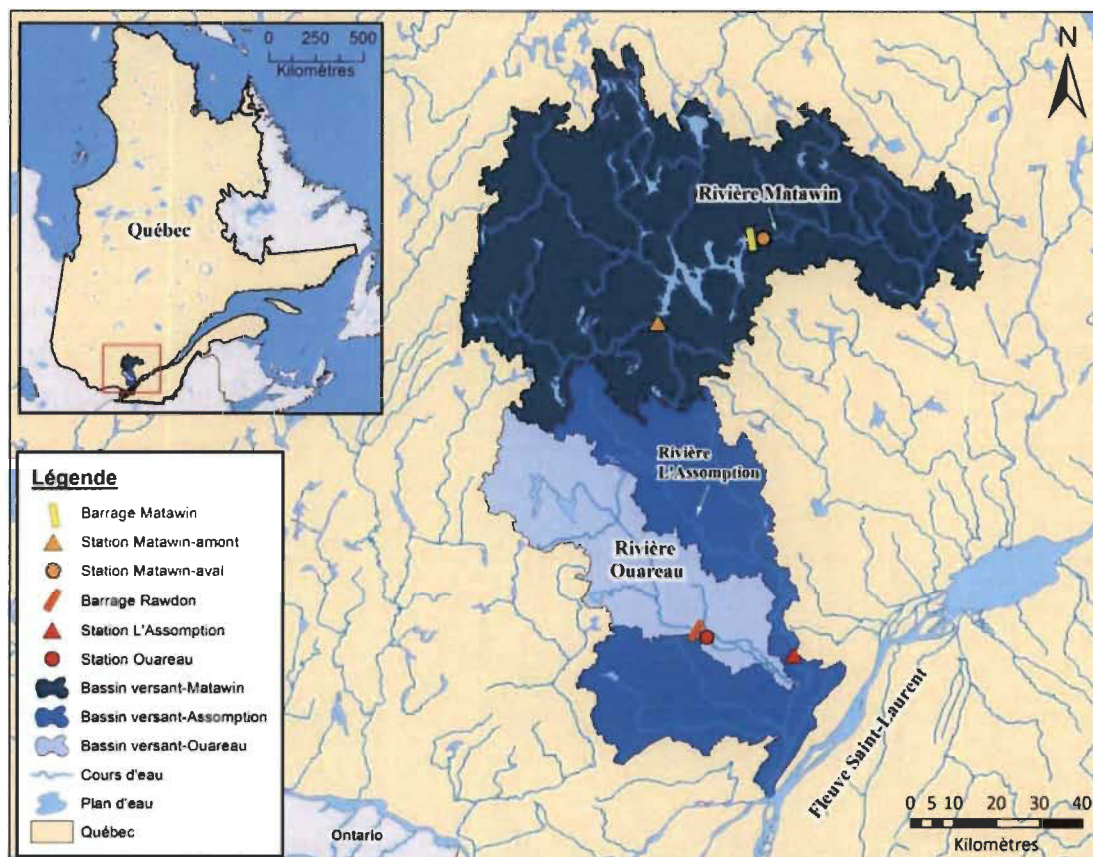


Figure 2.4 Bassins versants des rivières L'Assomption, Ouareau et Matawin

2.4 Source des données hydrologiques et climatiques

Pour la rivière Manouane, les mesures des débits ont débuté vers le mois d'avril de l'année 1979 et se poursuivent présentement sans interruption. Ces données ont été extraites du site du Centre d'expertise hydrique du ministère du Développement durable, de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques du Québec (<http://www.cehq.gouv.qc.ca/>). Dans le cadre de cette étude, les travaux se sont limités

seulement à l'analyse des impacts créés par la dernière dérivation, car les données des débits avant la première dérivation réalisée en 1961 ne sont pas disponibles.

Il se doit d'être mentionné qu'il n'existe pas de station de mesure des températures et des précipitations dans le bassin versant de la rivière Manouane. La station climatologique de référence pour cette zone est celle de l'aéroport militaire de Bagotville, située à 178 km au sud de la station de jaugeage.

Pour les rivières L'Assomption, Ouareau et Matawin, les données de débits ont été également extraites du site du Centre d'expertise hydrique du ministère du Développement durable, de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques du Québec (<http://www.cehq.gouv.qc.ca/>). Environnement Canada assure la saisie des données climatiques (<https://www.ec.gc.ca/>). En aval du barrage Matawin, Hydro-Québec a repris la gestion des mesures de débits depuis 1994 jusqu'à aujourd'hui.

2.5 Analyse statistique des données

2.5.1 Constitution des séries statistiques hydroclimatiques

La première étape fut d'abord d'obtenir les données de débits journaliers des différentes rivières à l'étude, soit les rivières Manouane, L'Assomption, Ouareau et Matawin afin d'avoir la plus longue série temporelle possible pour chacune d'elle. Les données de débits journaliers ont été classées en années hydrologiques, c'est-à-dire du premier octobre jusqu'au 30 septembre de l'année suivante. Puisque les analyses se font à l'échelle saisonnière, chaque année a été divisée en quatre saisons : automne (d'octobre à décembre), hiver (de janvier à mars), printemps (d'avril à juin) et été (de juillet à septembre). La totalité des analyses statistiques s'est faite à l'échelle saisonnière.

Comme seconde étape, il fut possible d'extraire les valeurs des débits maximums et minimums pour chaque série de débits journaliers de chaque saison. En divisant le débit maximum par le débit minimum, le premier indice de variabilité d'écoulement est obtenu, soit le coefficient d'immodération (CI) :

$$CI = Max/Min \quad (1)$$

Ensuite, il sera possible de calculer la moyenne et l'écart-type pour chaque série de débits journaliers de chaque saison. En divisant l'écart-type par la moyenne, multipliée par 100, le deuxième indice de variabilité d'écoulement est obtenu, soit le coefficient de variation (CV), révélé en pourcentage :

$$CV(\%) = \frac{\sigma}{\mu} * 100 \quad (2)$$

Il en résulte alors nos deux indices d'écoulement qui furent utilisés tout au long des analyses statistiques.

En troisième étape, une série de données pour chaque indice d'écoulement a été créée à l'échelle saisonnière. Les indices d'écoulement de chacune de ces séries furent analysés au moyen de tests de comparaison des moyennes, soit le test paramétrique (t) de Student et le test non paramétrique de Kruskal-Wallis (KW) avec le logiciel de statistique SYSTAT (Version 11).

Afin de vérifier notre dernière hypothèse, on a calculé une série de corrélations simples entre plusieurs variables climatiques (température et précipitation) et les deux indices (CI et CV) de variabilité d'écoulement. Les variables climatiques qui ont été corrélées aux indices de variabilité d'écoulement sont les suivantes :

- Les séries des températures moyennes journalières maximums (Tmax)
- Les séries des températures moyennes journalières minimums (Tmin)
- Les séries des températures moyennes journalières (Tmoy)
- Les séries de la quantité totale de pluie (Pluie)
- Les séries de la quantité totale de neige (Neige)
- Les séries de la quantité totale des précipitations (Ptot)

2.5.2 Tests de comparaison des moyennes

L'utilisation du test paramétrique (t) de Student se justifie par la distribution normale des données et la similitude des variances. La formule de (t) de Student est :

$$t_{\text{calculé}} = \frac{\bar{X}_1 - \bar{X}_2}{\sqrt{S_p^2 (1/n_1 + 1/n_2)}} \quad (3)$$

où \bar{X}_1 et \bar{X}_2 sont respectivement les moyennes arithmétiques de la première et de la seconde variable, S_p^2 est la variance commune aux deux variables, n_1 et n_2 sont le nombre de données de la première et de la seconde variable.

Advenant que la distribution des données était normale, mais que les variances étaient différentes, le test de t-corrigé a été utilisé :

$$t = \frac{\bar{x}_1 - \bar{x}_2}{\sqrt{\frac{s_1^2}{n_1} + \frac{s_2^2}{n_2}}} \quad (4)$$

S_1^2 et S_2^2 sont respectivement les variances de la première et de la seconde variable.

Dans le cas où il fut impossible de normaliser les données par leur transformation ou par l'augmentation de la taille de l'échantillon, le test non paramétrique de Kruskal-Wallis (KW) a été appliqué :

$$KW = (N-1) \frac{\sum_{i=1}^k n_i (\bar{r}_i - \bar{r})^2}{\sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^{n_i} (r_{ij} - \bar{r})^2} \quad (5)$$

où k est le nombre de groupe, n_i est la taille de l'échantillon i , N est le nombre total de toutes les observations dans les groupes de k , r_{ij} est le rang (parmi toutes les observations) de l'observation j du groupe i .

Aussi, l'absence d'autocorrélation (testée par la méthode de corrélogramme) dans les séries de CI et CV a été vérifiée dans les 3 bassins versants afin d'assurer l'indépendance des données entre elles. En d'autres mots, il fallait s'assurer qu'il n'y ait aucune dépendance entre les termes dans nos séries temporelles afin de respecter les conditions d'application des tests statistiques classiques.

L'application de ces tests de moyennes a servi à vérifier l'existence d'une différence significative des moyennes des séries d'indices de variabilité d'écoulement. Dans le cas de la rivière Manouane, soit le régime hydrologique de type dérivation, il est question d'une comparaison des séries CI et CV avant (1980-2002) et après (2004-2014) la construction du barrage Manouane en 2003. Pour les rivières L'Assomption/Ouareau, soit le régime hydrologique de type naturel, il s'agit d'une comparaison des séries CI et CV de la rivière L'Assomption (considérer comme l'amont) et de la rivière Ouareau (aval du barrage Rawdon) pour la période 1930 à 2010. Quant à la rivière Matawin, soit le régime hydrologique de type inversion, il est également question d'une comparaison amont/aval pour la période 1930 à 2010.

2.5.3 Analyse de la stationnarité des séries temporelles : test de Lombard

En complément aux analyses spatiales, la variabilité temporelle des deux indices de variabilité d'écoulement (CI et CV) a été comparée au moyen du test de Lombard (Lombard, 1987; Quessy *et al.*, 2011). À notre connaissance, c'est la seule méthode, disponible dans la littérature scientifique, qui permet de détecter les ruptures des moyennes et/ou des variances de nature abrupte ou progressive. Aussi, elle détermine la date de la rupture qui affecte la moyenne ou la variance dans une série statistique. Présignons une série d'observations, dans ce cas-ci, des séries de CI et de CV, dénotées X_1, \dots, X_n , où X_i est l'observation au temps $T=i$. Ces valeurs sont considérées indépendantes. Le test consiste à vérifier si la moyenne des séries a changé dans le temps. Si μ_i est la moyenne théorique de X_i , alors un scénario possible est donné par le « smooth-change model » de Lombard, c'est-à-dire :

$$\mu_i = \begin{cases} \theta_1, & \text{if } 1 \leq i \leq T_1; \\ \theta_1 + \frac{(i - T_1)(\theta_2 - \theta_1)}{T_2 - T_1}, & \text{if } T_1 < i \leq T_2; \\ \theta_2, & \text{if } T_2 < i \leq n. \end{cases} \quad (6)$$

Ainsi, la moyenne passe graduellement de θ_1 à θ_2 entre les temps T_1 et T_2 . Le cas distinctif est la rupture abrupte, lorsque $T_2 = T_1 + 1$. Pour vérifier formellement si la moyenne d'une série est stable ou suit le modèle (6), on peut utiliser la procédure

statistique de Lombard (1987). À cette fin, soit R_i , le rang de X_i parmi X_1, \dots, X_n . Prenons la fonction score de Wilcoxon, c'est-à-dire $\phi(u) = 2u - 1$, et définissons le score de X_i par :

$$Z_i = \frac{1}{\sigma_\phi} \left\{ \phi \left(\frac{R_i}{n+1} \right) - \bar{\phi} \right\}, \quad i \in \{1, \dots, n\}, \quad (7)$$

où

$$\phi = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \phi \left(\frac{i}{n+1} \right) \text{ et } \sigma_\phi^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left\{ \phi \frac{i}{n+1} - \bar{\phi} \right\}^2 \quad (8)$$

La statistique du test de Lombard est :

$$S_n = \frac{1}{n} \sum_{T_1=1}^{n-1} \sum_{T_2=T_1+1}^n L_{T_1 T_2}^2, \quad (9)$$

où

$$L_{T_1 T_2} = \sum_{j=T_1+1}^{T_2} \sum_{i=1}^j Z_i \quad (10)$$

La valeur critique au niveau au seuil de 5 % est 0,0403. Alors, au seuil de signification de 5 %, si S_n (valeur de la statistique du test ou score) $> 0,0403$, la conclusion est que la moyenne de la série a changé de façon significative selon un modèle de la forme (6). Il est à noter que le test est approprié pour détecter tous les types de changements induits par le modèle (6), incluant les changements abrupts. Une étude complète a été effectuée par Quessy *et al.* (2011) quant à la puissance et la robustesse de S_n et de cinq autres statistiques de test. Pour ce volet d'analyses temporelles, le test de Lombard a été appliqué sur les données des rivières L'Assomption/Ouareau (mode de gestion de type naturel) et la rivière Matawin (mode de gestion de type inversion) avec l'aide du logiciel statistique Matlab. Il fut donc possible de vérifier l'existence d'une rupture de la moyenne des séries CI et CV pour la période 1930-2010. Quant à la rivière Manouane, les séries de données n'étaient pas assez longues dans le temps pour appliquer le test sur celles-ci (1980-2014).

2.5.4 Corrélation entre les variables climatiques et les indices d'écoulement

Les corrélations entre les variables climatiques et les indices de variabilité des débits ont été calculées au moyen du logiciel de statistique R. Donc, les séries ont été constituées pour chaque saison (excepté la série de neige en été) pendant la période 1930-2010. Par ces analyses, il s'agissait de vérifier s'il existe une relation significative entre ces différentes variables. La formule du test de corrélation de Spearman est la suivante :

$$r'_s = 1 - \frac{6 \sum_{i=1}^N (R_x - R_y)^2}{N^3 - N} \quad (11)$$

où N est la taille de l'échantillon, R_x est le rang dans la distribution x , R_y est le rang de la distribution y .

La corrélation sera significative si :

$$r_s > r_{\text{table}} \quad (12)$$

r_s étant la valeur du coefficient de corrélation calculée entre les deux variables et r_{table} , la valeur critique du coefficient de corrélation à un seuil de probabilité donné lue dans la table de Spearman.

CHAPITRE III

RÉSULTATS ET DISCUSSION

3.1 Comparaison des valeurs moyennes des indices de variabilité de l'écoulement en rivières naturelles et en aval des barrages

La comparaison des indices de la variabilité d'écoulement en rivières naturelles et en aval des barrages durant les quatre saisons est présentée aux tableaux 3.1 (rivière Manouane), 3.2 (rivières L'Assomption et Ouareau) et 3.3 (rivière Matawin). En ce qui concerne la rivière Manouane, caractérisé par un régime hydrologique régularisé de type dérivation, aucun changement significatif ($p < 0.05$) des valeurs de deux indices de variabilité de l'écoulement n'a été observé en automne, au printemps et en été après la construction du barrage. En hiver, seul l'indice CI (coefficient d'immodération) a connu une hausse significative après la construction du barrage. Ainsi, l'écart entre les débits maximums et minimums en hiver a significativement augmenté après la construction du barrage. Quant aux rivières L'Assomption et Ouareau, cet écart a significativement augmenté en aval du barrage Rawdon sur la rivière Ouareau seulement au printemps (Tableau 3.2). En revanche, en aval du réservoir Taureau sur la rivière Matawin, les valeurs des deux indices de variabilité de l'écoulement ont significativement augmenté durant les quatre saisons par rapport à celles calculées en amont de ce réservoir. Cette augmentation est beaucoup plus importante pour le coefficient d'immodération que pour le coefficient de variation (Tableau 3.3). Ainsi, malgré l'augmentation de la taille du bassin versant en aval du réservoir, la variabilité des débits journaliers est plus importante en aval qu'en amont durant les quatre saisons.

Enfin, en ce qui concerne la variation saisonnière des moyennes de deux indices de variabilité de l'écoulement, la même tendance a été observée dans les trois bassins versants aussi bien en rivières naturelles qu'en aval des barrages. De fait, cette tendance se caractérise par des moyennes très élevées au printemps, mais très faibles en hiver. Ainsi, la variabilité des débits journaliers est beaucoup plus grande au printemps pendant

la crue, mais beaucoup plus faible en hiver. Durant cette dernière saison, les débits sont principalement influencés par les nappes aquifères.

Tableau 3.1

Comparaison des coefficients d'immodération (CI) et de variation (CV) saisonniers avant (1980-2002) et après (2004-2014) la construction du barrage de dérivation sur la rivière Manouane au moyen des tests non paramétriques de Kruskal-Wallis et paramétriques de t de Student pendant la période 1980-2014

Saisons	Variable hydrologique	1980-2002	2004-2014	p-valeur (KW)	p-valeur (t)	R (%)
		Moyenne	Moyenne			
Automne	CI	7,88 (4,13)	7,18 (2,92)	0,699	0,715	-
	CV	55,63 (16,62)	53,77 (14,39)	0,811	0,752	-
Hiver	CI	1,82 (0,70)	3,21 (3,87)	0,039	X	+76,37
	CV	16,64 (10,53)	28,64 (31,16)	0,056	0,050	-
Printemps	CI	29,75 (11,29)	33,61 (18,09)	0,429	0,450	-
	CV	82,52 (14,55)	94,30 (18,98)	0,068	0,054	-
Été	CI	6,04 (2,89)	6,97 (2,17)	0,156	0,205	-
	CV	47,32 (14,14)	51,32 (11,79)	0,246	0,423	-

(4,13) = écart type de la moyenne. Les valeurs en gras sont significatives au seuil de 5 %. KW = test de Kruskal-Wallis; t = test de t de Student; R = taux de variation (+ = hausse; - = baisse) pour les coefficients d'immodération et de variation. X = impossibilité de normaliser les données.

Tableau 3.2

Comparaison des coefficients d'immodération (CI) et de variation (CV) saisonniers de la rivière l'Assomption (amont) et la rivière Ouareau (aval du barrage Rawdon) au moyen des tests non paramétriques de Kruskal-Wallis et paramétriques de t de Student pendant la période 1930-2010

Saisons	Variable hydrologique	Assomption	Ouareau	p-valeur (KW)	p-valeur (t)	R (%)
		Moyenne	Moyenne			
Automne	CI	9,56 (7,03)	11,26 (15,88)	0,291	0,354	-
	CV	53,79 (21,25)	53,61 (18,54)	0,879	0,928	-
Hiver	CI	7,35 (8,73)	9,36 (14,66)	0,714	0,747	-
	CV	55,00 (42,89)	56,42 (47,25)	0,895	0,945	-
Printemps	CI	19,73 (9,32)	26,00 (14,96)	0,001	0,001	+31,78
	CV	81,84 (17,47)	85,16 (18,27)	0,213	0,239	-
Été	CI	9,45 (6,47)	15,84 (20,53)	0,168	X	-
	CV	57,36 (21,94)	59,64 (25,93)	0,915	0,661	-

(4,13) = écart type de la moyenne. Les valeurs en gras sont significatives au seuil de 5 %. KW = test de Kruskal-Wallis; t = test de t de Student; R = taux de variation (+ = hausse; - = baisse) pour les coefficients d'immodération et de variation. X = impossibilité de normaliser les données.

Tableau 3.3

Comparaison des coefficients d'immodération (CI) et de variation (CV) saisonniers en amont et en aval du barrage de la rivière Matawin au moyen des tests non paramétriques de Kruskal-Wallis et paramétriques de t de Student pendant la période 1930-2010

Échelle temporelle	Variable hydrologique	Amont	Aval	p-valeur (KW)	p-valeur (t)	R (%)
		Moyenne	Moyenne			
Automne	CI	5,02 (2,31)	111,72 (71,74)	0,000	X	+2125,5
	CV	40,05 (12,45)	90,85 (40,40)	0,000	0,000	+126,84
Hiver	CI	3,52 (3,10)	49,93 (66,37)	0,000	X	+1318,47
	CV	32,76 (24,02)	46,94 (33,40)	0,003	0,002	+43,28
Printemps	CI	13,61 (6,40)	134,56 (100,16)	0,000	X	+888,68
	CV	69,90 (17,20)	135,17 (105,88)	0,000	0,000	+93,38
Été	CI	7,22 (3,95)	93,09 (63,03)	0,000	X	+1189,34
	CV	52,93 (17,37)	94,03 (30,72)	0,000	0,000	+77,65

(4,13) = écart type de la moyenne. Les valeurs en gras sont significatives au seuil de 5 %. KW = test de Kruskal-Wallis; t = test de t de Student; R = taux de variation (+ = hausse; - = baisse) pour les coefficients d'immodération et de variation. X = impossibilité de normaliser les données.

3.2 Analyse de la variabilité temporelle des indices de la variabilité de l'écoulement

Les résultats d'analyse obtenus au moyen du test de Lombard sont présentés dans les tableaux 3.4 et par les figures 3.1 à 3.8 pour les rivières L'Assomption et Ouareau, et dans le tableau 3.5 et par les figures 3.9 à 3.16 pour la rivière Matawin. En ce qui concerne les deux premières rivières, la différence entre le régime régularisé influencé par le barrage (rivière Ouareau) et le régime naturel (Rivière L'Assomption) est observée au printemps seulement pour les deux indices. En effet, en aval du barrage de Rawdon sur la rivière Ouareau, la variabilité des débits n'a pas significativement changé dans le temps alors que pendant la même période, elle a significativement diminué à la station de Joliette sur la rivière L'Assomption. En hiver et en été, la variabilité des débits a significativement diminué dans le temps aussi en aval du barrage qu'en rivière naturelle. Le taux de cette diminution est comparable pour les deux rivières. Cependant, les dates de ruptures des moyennes ne sont pas synchrones, à l'exception de l'indice CV en hiver. La date de rupture de la moyenne de cet indice est survenue tôt en aval du barrage. En revanche, pour l'indice CI, cette date de rupture est survenue tôt en rivière naturelle. Enfin, ces ruptures des moyennes ont été toutes abruptes, à l'exception de celle de l'indice CI en été en aval du barrage de Rawdon, qui fut progressive. Toutes ces ruptures de moyennes sont survenues à partir de la décennie 1970, à l'exception de celle de l'indice CI survenue avant cette décennie en hiver et au printemps à la station de Joliette. En automne, aucun changement significatif des moyennes des séries de deux indices n'a été observé aussi bien en rivière naturelle qu'en aval du barrage.

Dans le bassin versant de la rivière Matawin dont le barrage est caractérisé par un mode de gestion de type inversion, il existe une différence très marquée de la variabilité temporelle des deux indices de variabilité de l'écoulement en amont et en aval du barrage. En amont, la variabilité temporelle est caractérisée par la diminution significative de la variabilité des débits dans le temps alors qu'en aval du barrage, elle l'est, en revanche, par la hausse significative dans le temps. Outre cette différence, aucun changement significatif des moyennes n'a été observé en amont du barrage au printemps pour l'indice CI et en hiver pour l'indice CV. En revanche en aval du barrage,

aucun changement des moyennes n'a été observé en été pour l'indice CV. Pour toutes les saisons, le taux d'augmentation des moyennes de deux indices en aval du barrage est plus élevé que le taux de diminution de ces indices en amont. De plus, les dates de ruptures des moyennes de ces deux indices ne furent pas synchrones en amont et en aval du barrage même si la plupart furent abruptes et sont survenues à partir de la décennie 1970.

Tableau 3.4

Comparaison des résultats du test de Lombard sur les indices de variabilité d'écoulement pour le mode de gestion de type naturel (rivières L'Assomption et Ouareau) à l'échelle saisonnière pour la période 1930-2010

Saisons	CI						CV					
	L'Assomption (amont)			Ouareau (aval)			L'Assomption (amont)			Ouareau (aval)		
	S_n	T_1, T_2	R (%)	S_n	T_1, T_2	R (%)	S_n	T_1, T_2	R (%)	S_n	T_1, T_2	R (%)
Automne	0,0099	-	-	0,0024	-	-	0,0045	-	-	0,0006	-	-
Hiver	0,0940	1951/52	-41,46	0,0569	1973/74	-2,27	0,0594	1971/72	-41,36	0,0745	1971/72	-42,01
Printemps	0,0535	1968/69	-27,08	0,0052	-	-	0,0498	1973/74	-13,04	0,0244	-	-
Été	0,0688	1994/95	-70,56	0,1410	1976/97	-78,50	0,1062	1994/95	-50,08	0,1420	1982/85	-52,84

S_n = valeur de la statistique du test ou score; T_1, T_2 = années du début et de la fin de la rupture de la moyenne; R (%) = taux de variation de la moyenne.

Tableau 3.5

Comparaison des résultats du test de Lombard sur les indices de variabilité d'écoulement pour le mode de gestion de type inversion (rivière Matawin) à l'échelle saisonnière pour la période 1930-2010

Saisons	CI						CV					
	Matawin (amont)			Matawin (aval)			Matawin (amont)			Matawin (aval)		
	S_n	T_1, T_2	R (%)	S_n	T_1, T_2	R (%)	S_n	T_1, T_2	R (%)	S_n	T_1, T_2	R (%)
Automne	0,0770	1961/62	-33,64	0,1173	1982/83	+48,30	0,0472	1986/87	-27,03	0,3150	1959/72	+46,21
Hiver	0,0819	1970/71	-52,44	0,3079	1958/68	+80,26	0,0316	-	-	0,3020	1960/61	+59,76
Printemps	0,0207	-	-	0,0886	1981/82	+37,00	0,0699	1963/64	-16,67	0,0546	1967/68	+0,32
Été	0,1009	1992/96	-82,82	0,2728	1986/87	+58,94	0,0894	1993/94	-31,83	0,0144	-	-

S_n = valeur de la statistique du test ou score; T_1, T_2 = années du début et de la fin de la rupture de la moyenne; $R (\%)$ = taux de variation de la moyenne score.

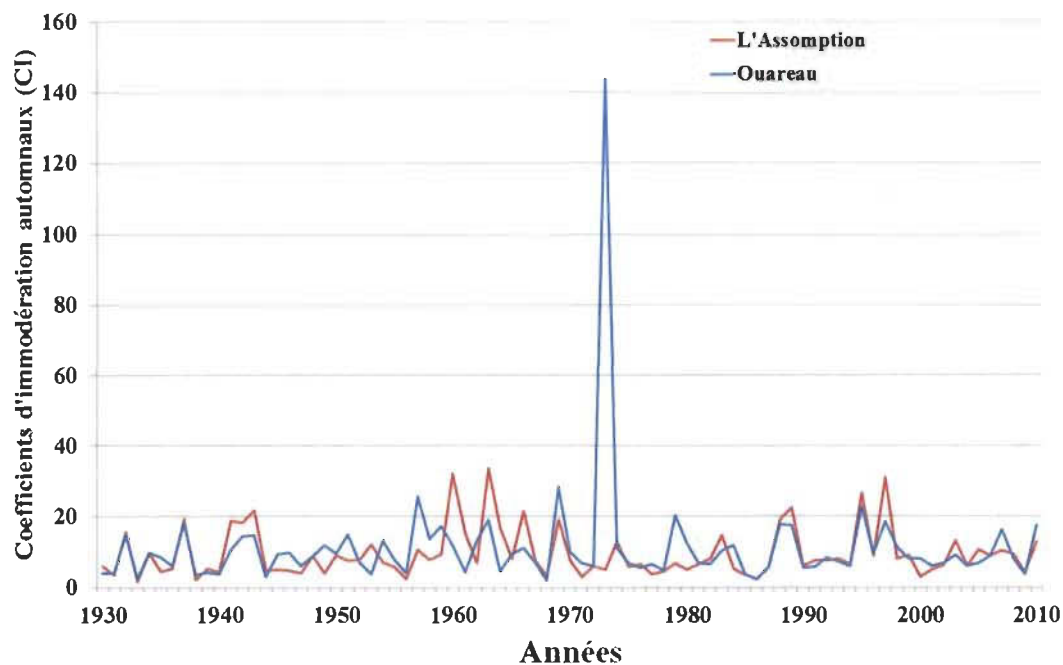


Figure 3.1 Variabilité temporelle des coefficients d'immodération automnaux des rivières L'Assomption (courbe rouge) et Ouareau (courbe bleue).

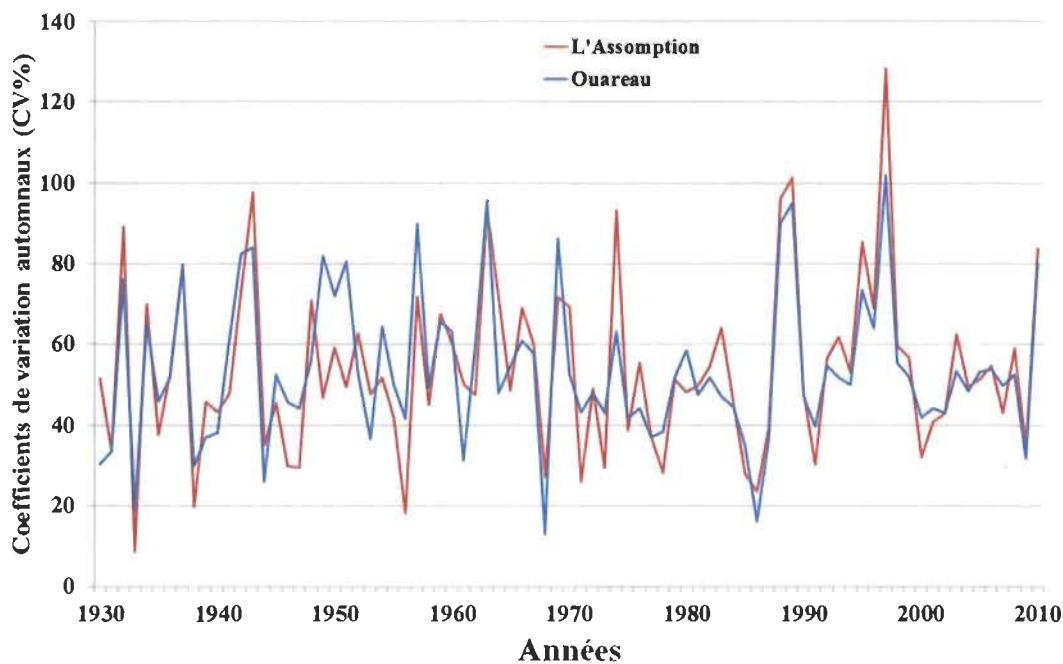


Figure 3.2 Variabilité temporelle des coefficients de variation automnaux des rivières L'Assomption (courbe rouge) et Ouareau (courbe bleue).

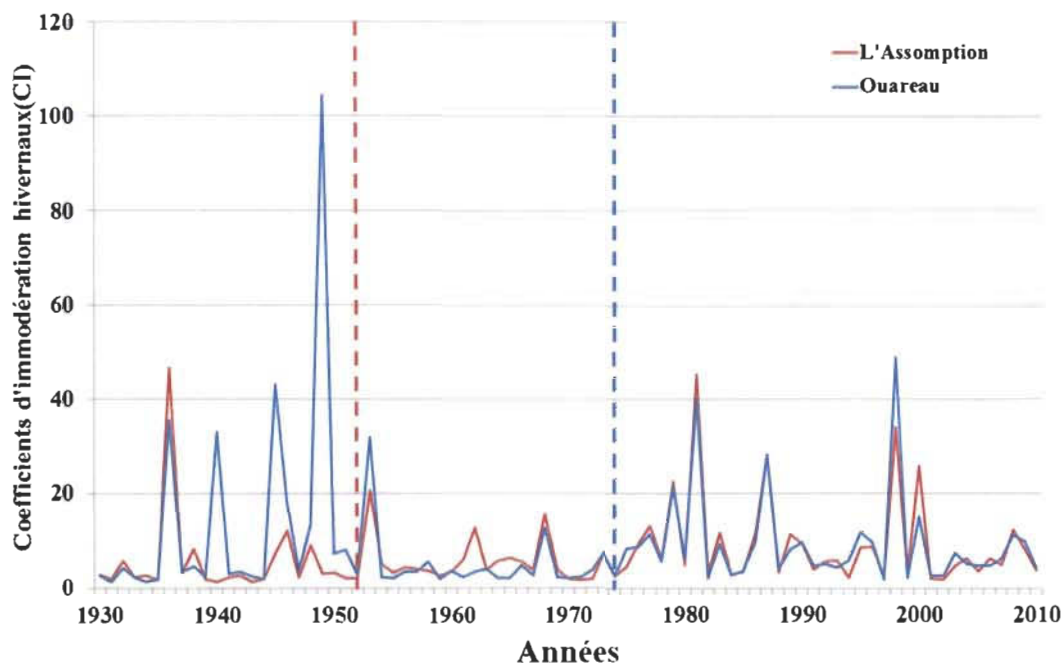


Figure 3.3 Variabilité temporelle des coefficients d'immodération hivernaux des rivières L'Assomption (courbe rouge) et Ouareau (courbe bleue). La ligne pointillée représente la rupture de la moyenne selon les couleurs respectives des rivières.

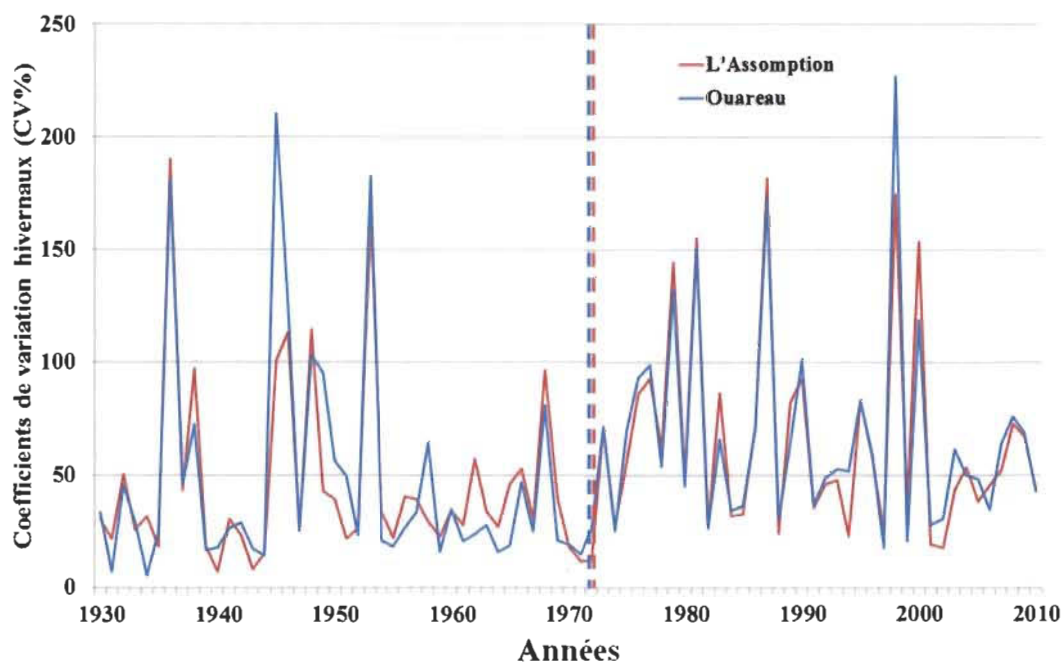


Figure 3.4 Variabilité temporelle des coefficients de variation hivernaux des rivières L'Assomption (courbe rouge) et Ouareau (courbe bleue). La ligne pointillée représente la rupture de la moyenne selon les couleurs respectives des rivières.

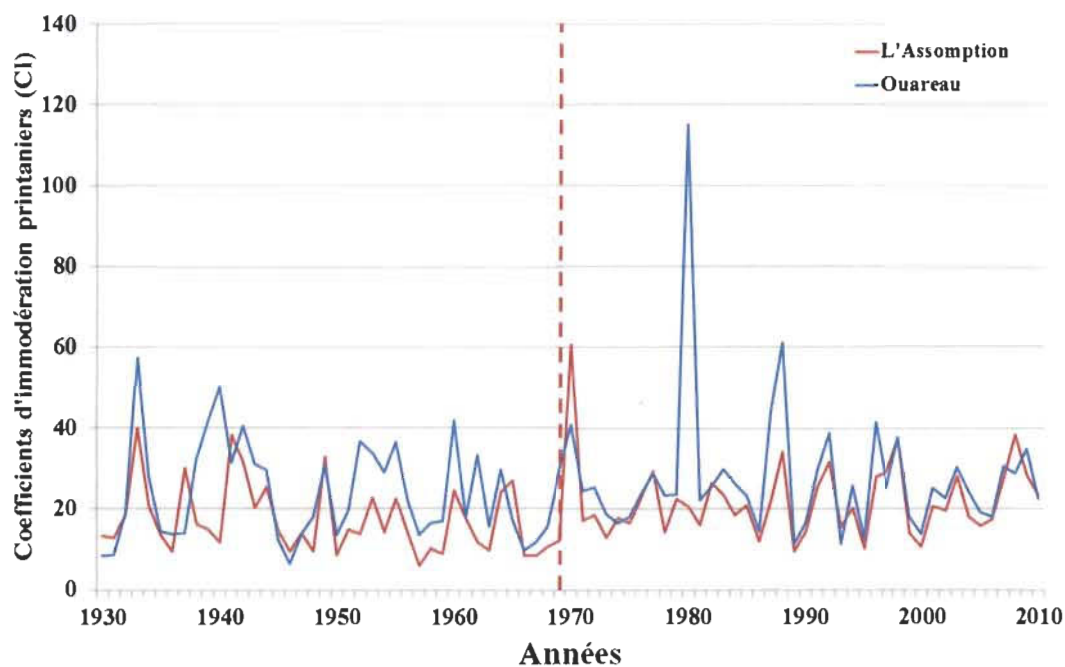


Figure 3.5 Variabilité temporelle des coefficients d'immodération printaniers des rivières L'Assomption (courbe rouge) et Ouareau (courbe bleue). La ligne pointillée représente la rupture de la moyenne selon les couleurs respectives des rivières.

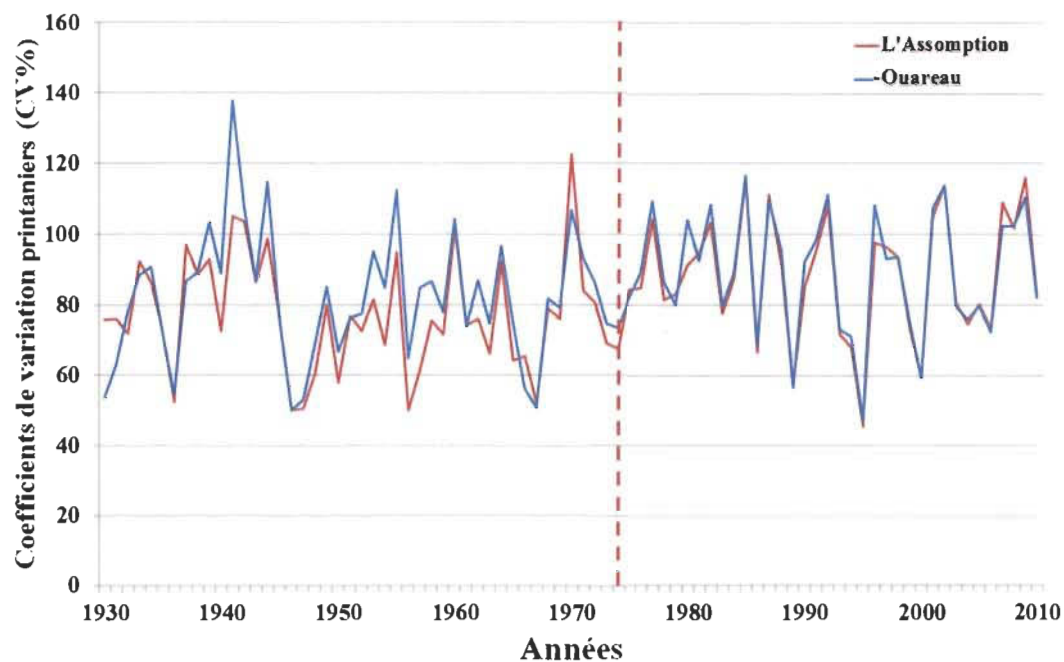


Figure 3.6 Variabilité temporelle des coefficients de variation printaniers des rivières L'Assomption (courbe rouge) et Ouareau (courbe bleue). La ligne pointillée représente la rupture de la moyenne selon les couleurs respectives des rivières.

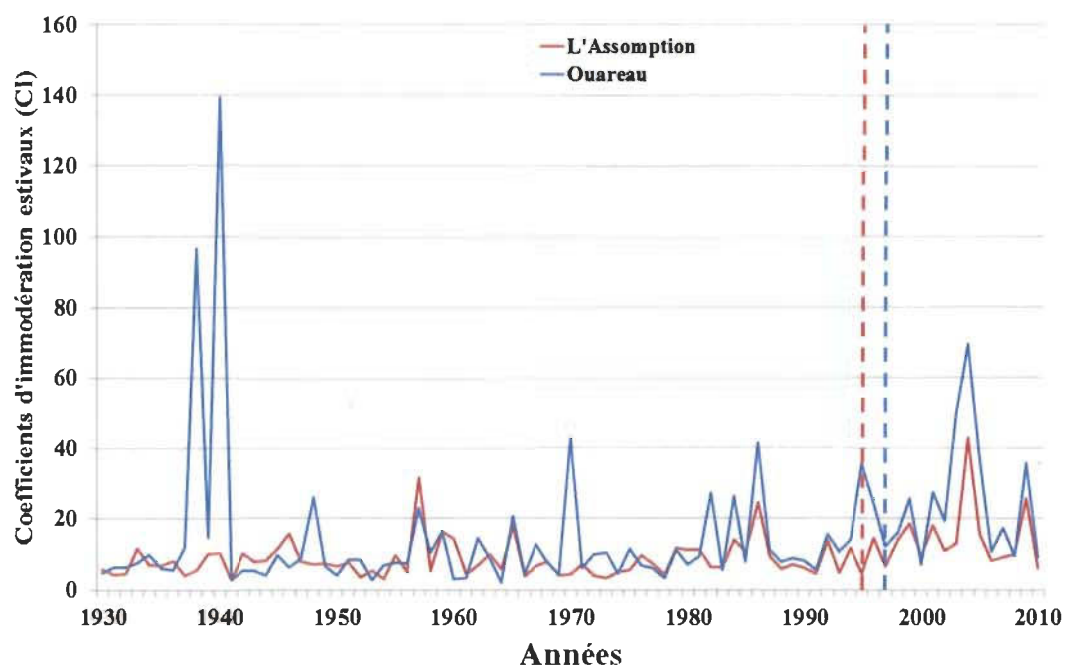


Figure 3.7 Variabilité temporelle des coefficients d'immodération estivaux des rivières L'Assomption (courbe rouge) et Ouareau (courbe bleue). La ligne pointillée représente la rupture de la moyenne selon les couleurs respectives des rivières.

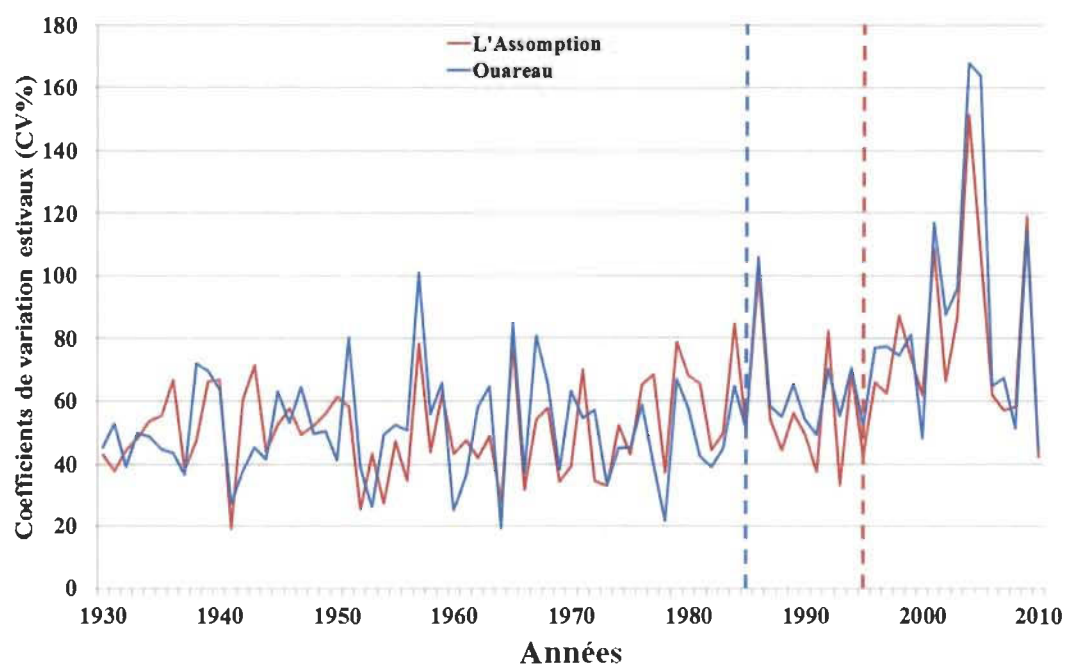


Figure 3.8 Variabilité temporelle des coefficients de variation estivaux des rivières L'Assomption (courbe rouge) et Ouareau (courbe bleue). La ligne pointillée représente la rupture de la moyenne selon les couleurs respectives des rivières.

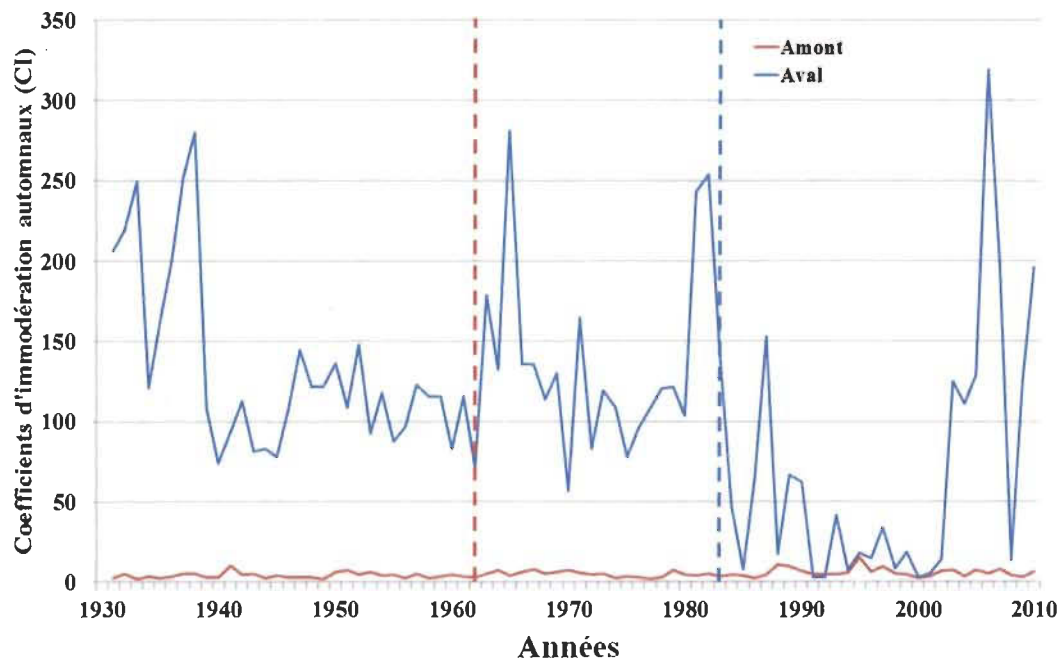


Figure 3.9 Variabilité temporelle des coefficients d'immodération automnaux de la rivière Matawin en amont (courbe rouge) et en aval (courbe bleue) du barrage. La ligne pointillée représente la rupture de la moyenne selon les couleurs respectives de l'amont et l'aval.

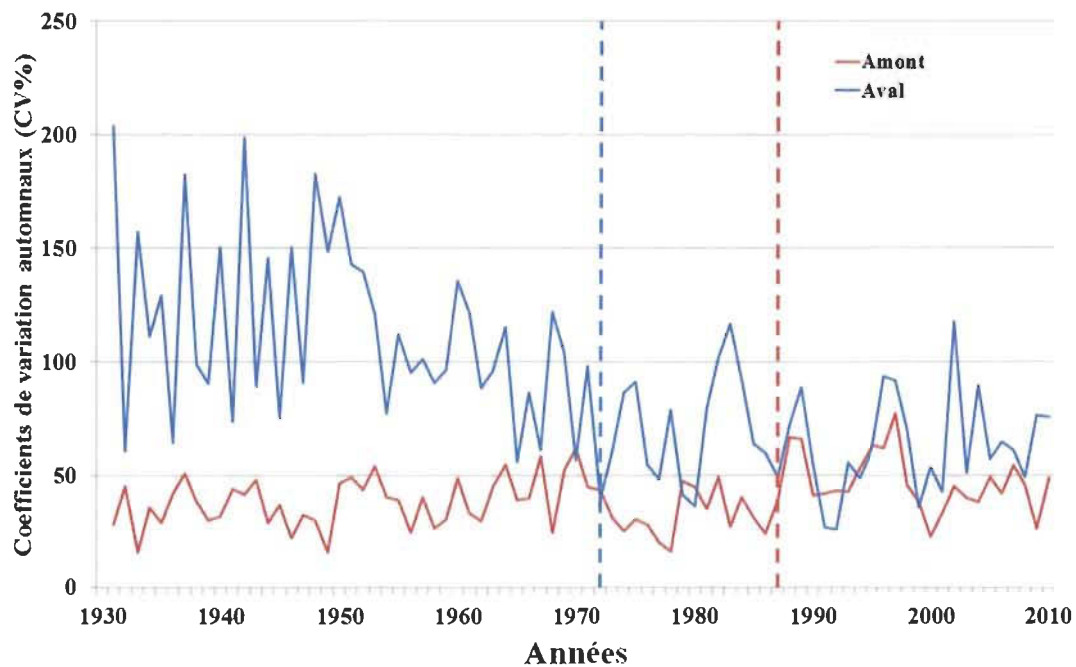


Figure 3.10 Variabilité temporelle des coefficients de variation automnaux de la rivière Matawin en amont (courbe rouge) et en aval (courbe bleue) du barrage. La ligne pointillée représente la rupture de la moyenne selon les couleurs respectives de l'amont et l'aval.

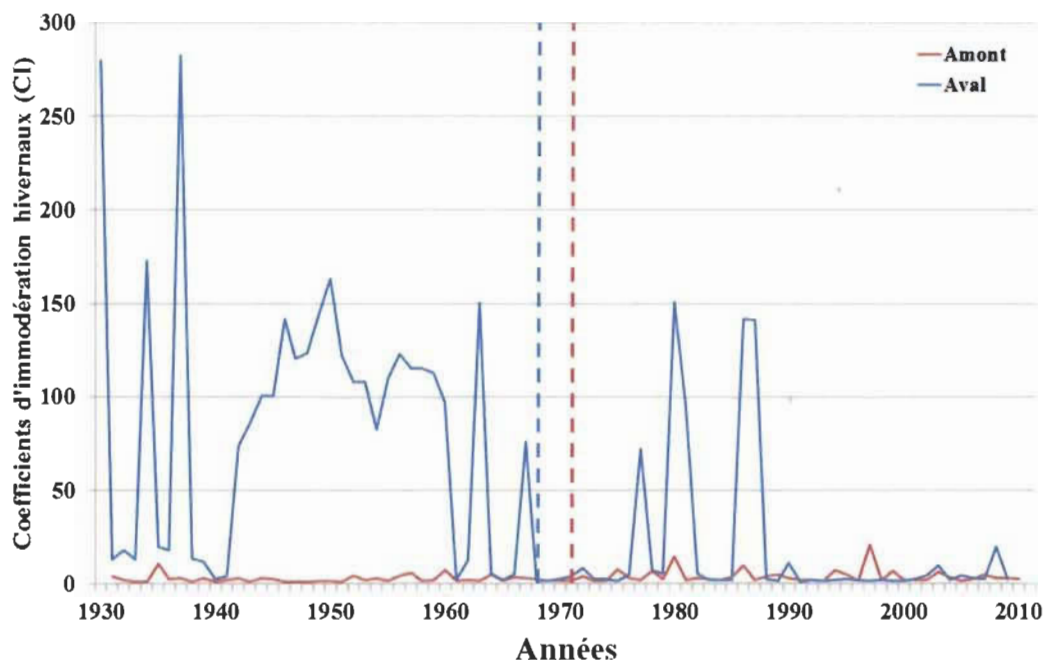


Figure 3.11 Variabilité temporelle des coefficients d'immodération hivernaux de la rivière Matawin en amont (courbe rouge) et en aval (courbe bleue) du barrage. La ligne pointillée représente la rupture de la moyenne selon les couleurs respectives de l'amont et l'aval.

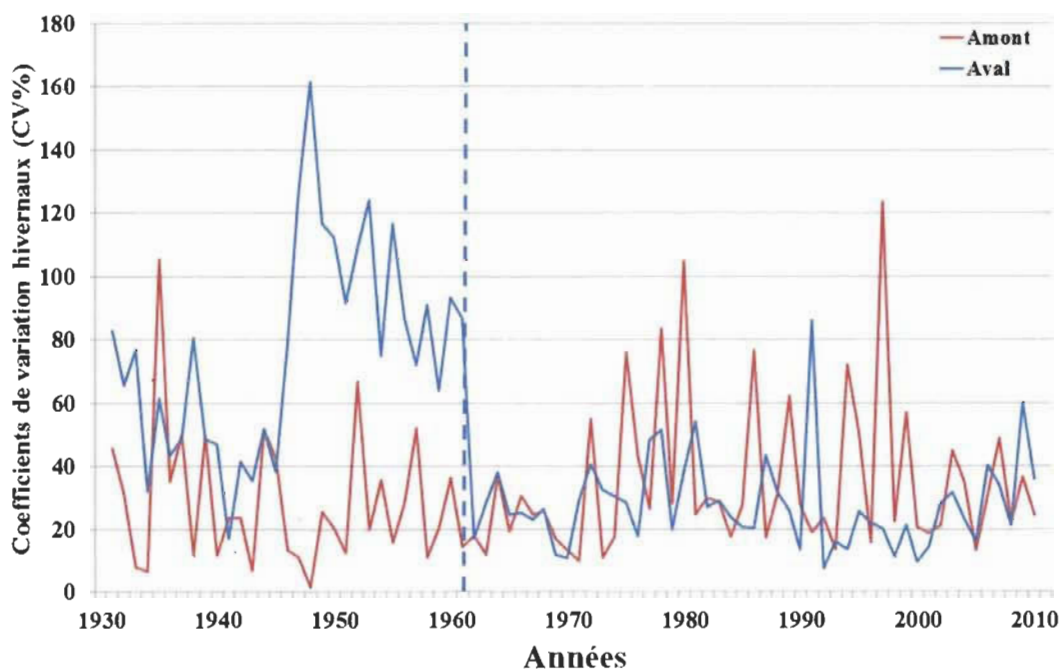


Figure 3.12 Variabilité temporelle des coefficients de variation hivernaux de la rivière Matawin en amont (courbe rouge) et en aval (courbe bleue) du barrage. La ligne pointillée représente la rupture de la moyenne selon les couleurs respectives de l'amont et l'aval.

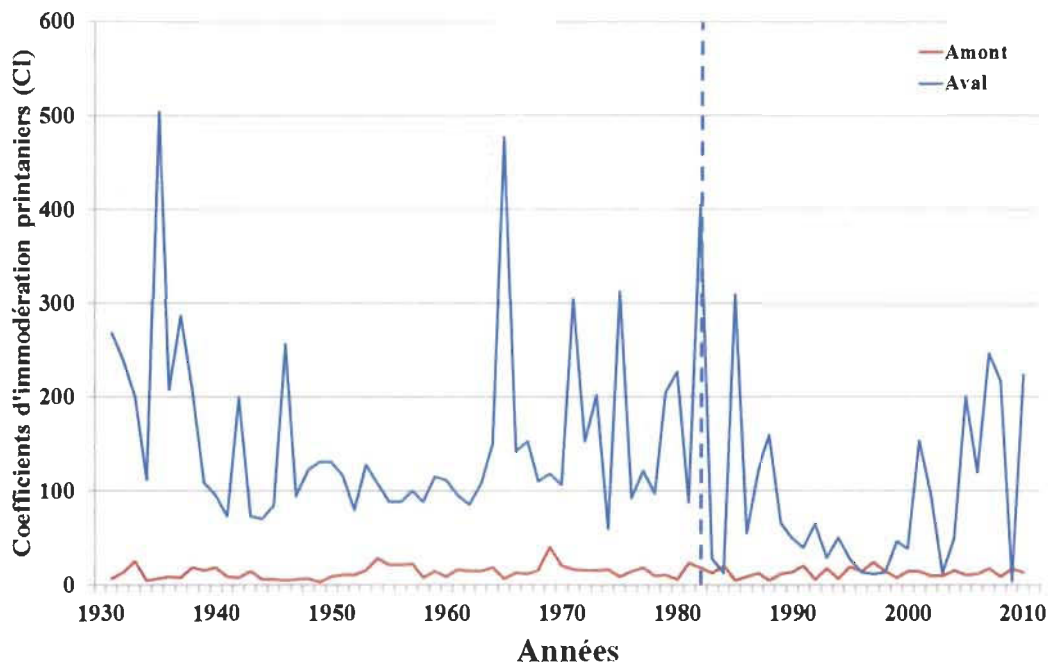


Figure 3.13 Variabilité temporelle des coefficients d'immodération printaniers de la rivière Matawin en amont (courbe rouge) et en aval (courbe bleue) du barrage. La ligne pointillée représente la rupture de la moyenne selon les couleurs respectives de l'amont et l'aval.

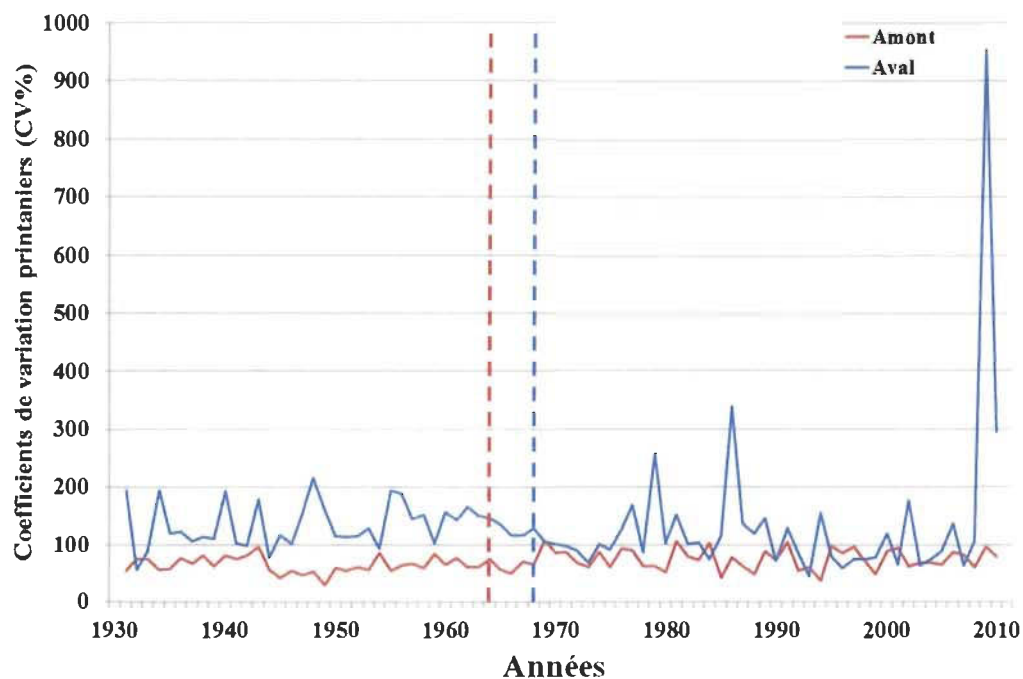


Figure 3.14 Variabilité temporelle des coefficients de variation printaniers de la rivière Matawin en amont (courbe rouge) et en aval (courbe bleue) du barrage. La ligne pointillée représente la rupture de la moyenne selon les couleurs respectives de l'amont et l'aval.

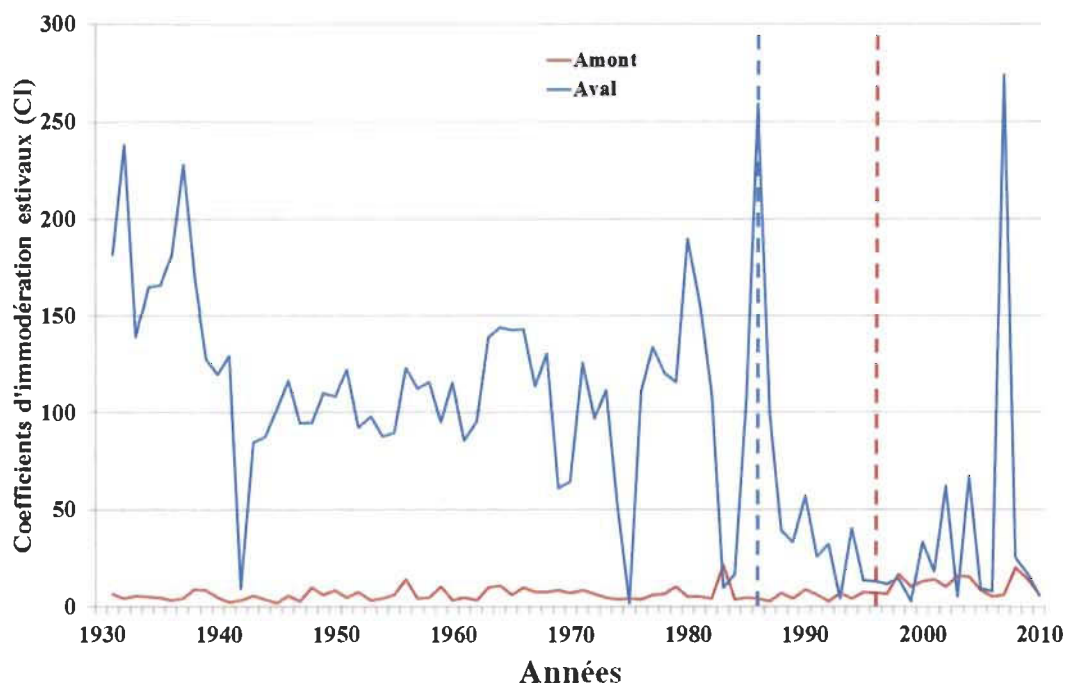


Figure 3.15 Variabilité temporelle des coefficients d'immodération estivaux de la rivière Matawin en amont (courbe rouge) et en aval (courbe bleue) du barrage. La ligne pointillée représente la rupture de la moyenne selon les couleurs respectives de l'amont et l'aval.

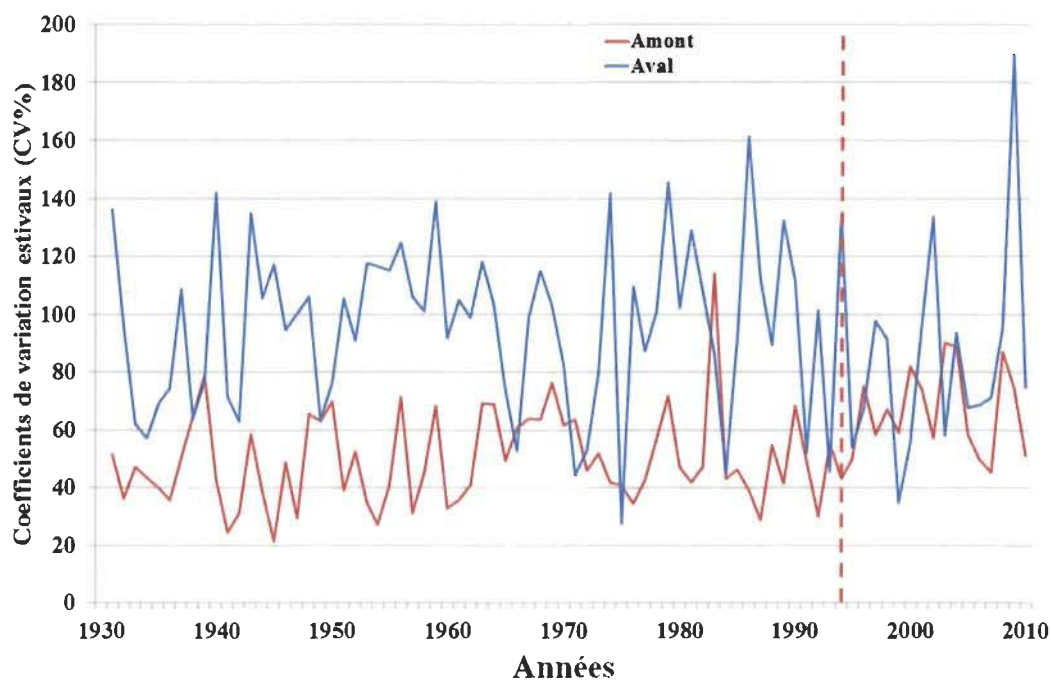


Figure 3.16 Variabilité temporelle des coefficients de variation estivaux de la rivière Matawin en amont (courbe rouge) et en aval (courbe bleue) du barrage. La ligne pointillée représente la rupture de la moyenne selon les couleurs respectives de l'amont et l'aval.

3.3 Analyse de la relation entre les indices d'écoulement et les variables climatiques

Les valeurs des coefficients de corrélation calculées entre les deux indices d'écoulement et les variables climatiques en rivières naturelles et en aval des barrages sont présentées aux tableaux 3.6 (rivière Manouane), 3.7 (rivières L'Assomption et Ouareau) et 3.8 (rivière Matawin).

En ce qui concerne la rivière Manouane, aucun coefficient de corrélation n'est statistiquement significatif au seuil de 5% avant et après la construction du barrage durant les quatre saisons. Dans le bassin versant de la rivière L'Assomption, les valeurs de coefficients de corrélation varient en fonction des saisons. En automne, les deux indices d'écoulement sont corrélés positivement à la quantité de pluies et à la quantité totale des précipitations (hormis l'indice CI à la station de Joliette sur la rivière L'Assomption qui n'est pas corrélée à cette dernière variable climatique) aux deux stations. En hiver, les deux indices d'écoulement sont corrélés positivement aux températures, à la quantité de pluies et à la quantité totale des précipitations aux deux stations. Toutefois, en aval du barrage Rawdon sur la rivière Ouareau, l'indice CI est corrélé négativement à la quantité totale de neige. Au printemps, les deux indices d'écoulement sont corrélés positivement aux températures, à l'exception de l'indice CI en aval du barrage Rawdon, qui n'est pas significativement corrélé aux températures moyennes et minimales journalières. Notons aussi qu'en aval de ce barrage, l'indice CV est corrélé négativement à la quantité totale de pluies. En été, les deux indices ne sont corrélés significativement à aucune variable climatique à la station de Joliette sur la rivière L'Assomption. En revanche, en aval du barrage Rawdon sur la rivière Ouareau, l'indice CI est positivement corrélé aux températures minimales et moyennes journalières ainsi qu'à la quantité totale de pluies. Quant à l'indice CV, il est corrélé seulement à cette dernière variable climatique.

Dans le bassin versant de la rivière Matawin, on observe aussi les mêmes différences saisonnières. En automne, l'indice CI est corrélé positivement à la quantité de pluie et à celle des précipitations totales en amont du barrage Matawin. Cette dernière variable l'est aussi à l'indice CV. En revanche, en aval du barrage, les deux indices ne sont corrélés significativement à aucune variable climatique. Il en est de même en hiver et

en été. En amont du barrage, en hiver, les deux indices sont corrélés négativement à la quantité de neige, mais positivement à la quantité de pluies pour l'indice CV. En été, seul l'indice CI est corrélé positivement aux températures maximales et moyennes journalières. Au printemps, en amont du barrage, l'indice CV est corrélé positivement à la quantité de pluies et à la quantité totale des précipitations alors qu'en aval du barrage, cette corrélation devient négative. Quant à l'indice CI, il est corrélé positivement à ces deux variables climatiques seulement en aval du barrage.

Tableau 3.6

Comparaison des coefficients de corrélation calculés entre les variables climatiques et les indices de variabilité d'écoulement avant (1980-2002) et après (2004-2014) la construction du barrage sur la rivière Manouane

Variables	Automne				Hiver				Printemps				Été			
	Avant		Après		Avant		Après		Avant		Après		Avant		Après	
	CI	CV	CI	CV	CI	CV	CI	CV	CI	CV	CI	CV	CI	CV	CI	CV
Tmax	-0,070	-0,177	0,241	0,219	0,000	-0,093	0,018	0,027	-0,026	0,229	-0,455	-0,482	0,038	0,225	-0,409	-0,282
Tmin	-0,169	-0,312	0,236	0,191	0,001	-0,074	-0,073	-0,027	-0,053	0,033	-0,200	-0,400	0,283	0,306	-0,132	-0,105
Tmoy	-0,070	-0,205	0,255	0,209	-0,036	-0,127	-0,018	0,027	-0,024	0,151	-0,355	-0,491	0,142	0,285	-0,282	-0,191
Pluie	-0,049	-0,148	0,136	0,182	-0,126	-0,112	0,291	0,345	0,033	-0,329	0,109	0,264	0,383	0,261	0,164	0,055
Neige	0,003	0,102	-0,464	-0,455	-0,113	-0,154	0,291	0,327	0,095	0,072	0,182	0,178	-	-	-	-
Ptot	-0,030	-0,084	0,064	0,100	-0,215	-0,164	0,164	0,200	0,049	-0,232	0,218	0,327	0,378	0,252	0,164	0,055

Aucun coefficient de corrélation n'est statistiquement significatif au seuil de 5 %

Tableau 3.7

Comparaison des coefficients de corrélation du mode de gestion naturel calculés entre les variables climatiques et les indices de variabilité d'écoulement des rivières L'Assomption (amont) et Ouareau (aval du barrage Rawdon) pour la période 1930-2010

Variables	Automne				Hiver				Printemps				Été			
	L'Assomption		Ouarneau		L'Assomption		Ouarneau		L'Assomption		Ouarneau		L'Assomption		Ouarneau	
	CI	CV	CI	CV	CI	CV	CI	CV	CI	CV	CI	CV	CI	CV	CI	CV
Tmax	0,063	0,031	0,088	0,032	0,251	0,305	0,280	0,318	0,401	0,415	0,230	0,366	0,107	0,103	0,076	0,035
Tmin	0,156	0,091	0,140	0,086	0,305	0,319	0,263	0,316	0,314	0,317	0,175	0,229	0,046	0,120	0,272	0,181
Tmoy	0,129	0,040	0,135	0,071	0,308	0,340	0,292	0,333	0,383	0,402	0,209	0,324	0,100	0,013	0,366	0,172
Pluie	0,502	0,425	0,388	0,408	0,586	0,645	0,447	0,532	-0,168	-0,175	-0,105	-0,231	0,134	0,124	0,238	0,266
Neige	-0,105	-0,196	-0,059	-0,198	-0,132	-0,201	-0,239	-0,207	0,163	0,076	0,086	0,000	-	-	-	-
Ptot	0,313	0,217	0,326	0,226	0,343	0,311	0,164	0,228	-0,118	-0,117	-0,074	-0,195	0,134	0,124	0,238	0,266

Les valeurs de coefficient de corrélation statistiquement significatives au seuil de 5 % sont indiquées en caractère gras et rouge.

Tableau 3.8

Comparaison des coefficients de corrélation du mode de gestion inversion calculés entre les variables climatiques et les indices de variabilité d'écoulement en amont et en aval du barrage de la rivière Matawin pour la période 1930-2010

Variables	Automne				Hiver				Printemps				Été			
	Amont		Aval		Amont		Aval		Amont		Aval		Amont		Aval	
	CI	CV	CI	CV	CI	CV	CI	CV	CI	CV	CI	CV	CI	CV	CI	CV
Tmax	-0,029	0,052	0,203	0,041	0,030	0,029	0,054	-0,060	-0,023	0,010	-0,206	0,092	0,242	0,193	-0,175	0,034
Tmin	0,013	0,012	0,101	0,203	0,066	0,126	0,184	0,080	-0,045	-0,019	-0,118	-0,118	0,131	0,142	-0,022	0,073
Tmoy	-0,012	0,030	0,177	0,118	0,035	0,073	0,129	0,022	-0,031	0,003	-0,150	-0,001	0,223	0,190	-0,109	0,056
Pluie	0,232	0,216	-0,210	0,009	0,211	0,280	-0,030	-0,020	0,142	0,281	0,317	-0,531	-0,161	-0,111	-0,046	-0,128
Neige	0,075	0,113	-0,065	-0,143	-0,275	-0,279	0,134	0,253	0,077	0,065	0,193	0,016	-	-	-	-
Ptot	0,271	0,272	-0,189	-0,040	-0,148	-0,125	0,124	0,234	0,165	0,299	0,343	-0,515	-0,163	-0,113	-0,046	-0,129

Les valeurs de coefficient de corrélation statistiquement significatives au seuil de 5 % sont indiquées en caractère gras et rouge.

3.4 Discussion

La comparaison de deux indices (coefficients d'immodération et de variation) de la variabilité de l'écoulement à l'échelle saisonnière en rivières naturelles et en aval de barrages dans trois bassins versants au Québec a permis de mettre en évidence l'influence de deux facteurs: les modes de gestion des barrages et les saisons. En ce qui concerne l'influence de ce dernier facteur, il a été démontré que la variabilité des débits journaliers est beaucoup plus forte au printemps que durant les trois autres saisons. Rappelons qu'au Québec, la crue annuelle la plus importante survient au printemps en raison de la fonte de neige. Ainsi, pendant cette saison, les débits augmentent rapidement pendant la phase de montée de la crue puis diminuent tout aussi rapidement pendant la phase de la décrue provoquant ainsi une variabilité relativement forte des débits journaliers. En revanche, la variabilité des débits est beaucoup plus faible en hiver que durant les autres saisons. En hiver, les précipitations sont stockées sous forme de neige sur les versants inhibant ainsi tout ruissellement. Les rivières sont alors alimentées quasi exclusivement par les nappes souterraines dont la vidange est beaucoup plus lente que la décrue. Il s'ensuit une très faible variabilité des débits d'un jour à l'autre.

Ce schéma général est observé aussi bien en rivières naturelles qu'en aval des barrages. Cependant, l'ampleur de cette variabilité des débits journaliers dépend des modes de gestion des barrages. En aval des barrages qui induisent un régime régularisé de type dérivation, la variabilité des débits journaliers est plus forte qu'en rivières naturelles en hiver et au printemps. La dérivation des eaux est effectuée quasi exclusivement en hiver, et dans une moindre mesure, au printemps. En hiver, la quantité d'eau dérivée n'est pas constante. Elle varie en fonction de la production de l'énergie hydroélectrique dans le bassin versant récepteur. C'est ainsi que lorsque les besoins en eau diminuent dans ce dernier bassin, une partie d'eau est lâchée en aval des barrages. Il en résulte ainsi une variabilité plus forte en aval des barrages qu'en rivières naturelles dont les débits proviennent exclusivement des nappes aquifères comme nous l'avons déjà mentionné. Au printemps, les fluctuations des débits journaliers augmentent en aval des barrages en comparaison aux rivières naturelles, du fait qu'on stocke une partie des eaux de crues avant de la relâcher ultérieurement. En aval des barrages caractérisés par

un régime hydrologique régularisé de type naturel, la différence avec les rivières naturelles est observée au printemps et en été en ce qui concerne seulement les écarts (coefficients d'immodération) entre les débits maximums et minimums. Cette augmentation des amplitudes de variation des débits extrêmes en aval des barrages s'explique par le fait que lors des fontes importantes de neige au printemps ou des orages violents en été, on peut lâcher des débits beaucoup plus importants que ceux observés en rivières naturelles provoquant ainsi un écart important entre les débits maximums et minimums. Enfin, en aval des barrages caractérisés par un régime hydrologique de type inversion, la variabilité des débits journaliers est beaucoup plus forte qu'en rivières naturelles durant les quatre saisons. La hausse des fluctuations des débits en aval de ces barrages est beaucoup plus importante qu'en aval de deux autres types de barrages. Le mode de gestion de type inversion est caractérisé par le stockage des eaux pendant la saison chaude (printemps et été) et leur déstockage pendant la saison froide (automne et hiver) (p. ex., Assani *et al.*, 2002, 2005; Fortier *et al.*, 2011; Lajoie *et al.*, 2007; Matteau *et al.*, 2009). Durant cette dernière saison, on lâche quotidiennement de l'eau pour alimenter les centrales hydroélectriques afin de produire l'énergie hydroélectrique. Mais la quantité d'eau lâchée peut fortement varier d'un jour à l'autre provoquant ainsi une très forte variabilité des débits en aval des barrages. Pendant la saison chaude, toute l'eau est d'abord stockée dans le réservoir au début de la crue printanière. Puis une fois les réservoirs remplis, on laisse passer progressivement la crue. Il en résulte ainsi une forte variabilité des débits vers la fin de la saison printanière. En été, lors des apports importants d'orages, on ne stocke plus d'eau, car les réservoirs sont déjà remplis par les eaux de la fonte de neige. De plus, en aval de la plupart de ces barrages, on pratique des activités récréotouristiques qui exigent des lâchers d'eau. Il s'ensuit ainsi une fluctuation des débits journaliers plus forte en aval de ces barrages qu'en rivières naturelles.

L'influence des modes de gestion des barrages affecte aussi la variabilité temporelle de deux indices de variabilité de l'écoulement saisonnier. En ce qui concerne le régime régularisé de type naturel, la différence entre la station située en rivière naturelle et celle située en aval d'un barrage a été observée seulement au printemps.

En effet, la diminution de la variabilité des débits journaliers survenue à la première station n'a pas été observée en aval du barrage. Quoi qu'il en soit, aussi bien en rivière naturelle qu'en aval du barrage, la variabilité des débits journaliers a significativement diminué dans le temps en hiver et en été. Rappelons que les deux stations sont situées dans un bassin versant agricole. Cette diminution de la variabilité des débits journaliers dans le temps suggère que le processus de ruissellement aurait significativement diminué dans le temps en raison des pratiques agricoles anti-érosives adoptées pour protéger davantage les sols contre l'érosion afin de pouvoir augmenter ainsi le rendement agricole depuis la décennie 1970. Parallèlement à l'adoption de ces pratiques, depuis la décennie 1960, on a assisté à un reboisement progressif des bassins versants agricoles au Québec (Assani et al., 2017). Ces deux facteurs peuvent donc expliquer la diminution de la variabilité des débits journaliers dans le temps dans le bassin agricole de L'Assomption en raison de la diminution du ruissellement. Dans le bassin versant de la rivière Matawin, la variabilité des débits journaliers a significativement diminué dans le temps en amont du barrage, à l'instar du bassin versant de la rivière L'Assomption qui lui est contigu. En revanche, en aval du barrage Matawin, cette variabilité a significativement augmenté sauf en été. Cette hausse de la variabilité ne peut être associée à un changement d'affectation du sol, car ni l'agriculture ni la déforestation n'ont jamais été pratiquées dans le bassin versant en aval du barrage. Elle résulte d'un changement dans le mode de gestion des débits journaliers. Cependant, nous n'avons trouvé aucun facteur susceptible d'expliquer cette hausse. Elle résulterait probablement de la conjonction de nombreux facteurs comme le développement des activités récréotouristiques, la lutte contre les inondations, l'accroissement de la demande en électricité, etc. (Fortier et al., 2011).

La variabilité temporelle des indices de la variabilité de l'écoulement saisonnier dépend aussi en partie du climat. Cette relation est aussi influencée par les modes de gestion des barrages. Dans le bassin versant de la rivière Manouane caractérisé par un régime hydrologique de type dérivation, aucune différence n'a été observée avant et après la construction du barrage : aucun des deux indices de variabilité de l'écoulement saisonnier n'est significativement corrélé ni la température ni aux précipitations.

En revanche, dans le bassin versant de la rivière L'Assomption caractérisé par un régime hydrologique régularisé de type naturel, les deux indices sont corrélés aux mêmes variables climatiques, à savoir les températures en hiver et au printemps, ainsi qu'aux pluies en automne et en été. Cette corrélation est positive avec ces deux variables climatiques durant les quatre saisons. En hiver et au printemps, le ruissellement, principal facteur de variabilité des débits journaliers dans les rivières, est fortement influencé par les températures en raison principalement de la fonte de neige. En revanche en automne et en été, ce ruissellement dépend quasi exclusivement de la quantité de pluies. Dans le bassin versant de la rivière Matawin, les deux indices hydrologiques ne sont plus quasiment corrélés aux mêmes variables climatiques. Toutefois, lorsqu'ils le sont comme c'est le cas au printemps, le signe de corrélation change de l'amont en aval du barrage. Ainsi, en amont du barrage, le coefficient de variation est corrélé positivement aux pluies, mais cette corrélation devient négative en aval du barrage en raison de l'inversion de la tendance à long terme en aval du barrage.

Enfin, dans les bassins versants de L'Assomption et de Matawin, la variabilité des débits journaliers est corrélée négativement à la quantité totale de neige en hiver ou au printemps. Cette corrélation négative s'explique par le fait que lorsque les précipitations tombent sous forme de neige, il n'y a plus d'apport d'eau sous forme liquide par le processus de ruissellement aux rivières. Ainsi, les débits journaliers varient peu, car ils sont exclusivement alimentés par les nappes aquifères.

CHAPITRE VI

CONCLUSION GÉNÉRALE

Une de cinq caractéristiques fondamentales de l'écoulement, la variabilité des débits, influence à des degrés divers le fonctionnement et l'évolution des écosystèmes fluviaux. En aval des barrages, il est généralement admis qu'à l'échelle annuelle, cette variabilité est très faible et provoque ainsi un appauvrissement de la biodiversité. En revanche, à l'échelle journalière, cette variabilité est très forte générant aussi de nombreux impacts écologiques. Aucune étude ne s'est jamais penchée sur la variabilité des débits à l'échelle saisonnière. Pour combler cette lacune, cette étude a comparé la variabilité des débits au moyen de deux indices hydrologiques en aval de trois barrages caractérisés par des modes de gestion différents. Il ressort de cette étude que cette variabilité augmente en aval de ces trois barrages. Mais l'ampleur de cette augmentation dépend des modes de gestion des barrages et des saisons. La variabilité des débits est plus élevée au printemps, pendant la crue nivale, qu'en hiver pendant l'étiage. Elle est plus forte en aval du barrage caractérisé par un mode de gestion de type inversion qu'en aval des deux autres types de barrages. En ce qui concerne la variabilité temporelle, le changement le plus important a été aussi observé en aval du barrage caractérisé par un mode de gestion de type inversion. Ce changement s'est traduit par une hausse significative de cette variabilité dans le temps en aval du barrage alors qu'en amont de ce barrage, cette variabilité a significativement diminué dans le temps. Cette étude a révélé aussi que le mode de gestion des barrages influence peu la relation entre les deux indices de la variabilité d'écoulement saisonnier et le climat. En aval des barrages caractérisés par les modes de gestion de type naturel et de dérivation, les barrages n'influencent pratiquement pas cette relation. En revanche, en aval du barrage caractérisé par le mode de gestion de type inversion, le signe de corrélation entre les deux types de variables est opposé en amont et en aval du barrage. Enfin, la variabilité des débits est mieux corrélée au climat durant les quatre saisons en aval du barrage caractérisé par un régime de type naturel qu'en aval de deux autres types de barrages.

De fait, elle est corrélée aux températures en hiver et au printemps et aux précipitations en été et en automne. Dans le cas du barrage de dérivation, aucune corrélation significative n'a été observée entre la variabilité des débits journaliers et le climat durant les quatre saisons.

Sur le plan écologique, les résultats de cette étude suggèrent qu'en aval des barrages, la hausse de la variabilité des débits à l'échelle saisonnière peut générer des impacts similaires à ceux provoqués par la hausse de la variabilité des débits à l'échelle journalière. Au Québec, ces impacts seront plus importants en aval des barrages caractérisés par le mode de gestion de type inversion qu'en aval des barrages caractérisés par les autres types de modes de gestion. Cet aspect doit être pris en compte dans le cadre de la politique de l'élaboration des normes de gestion des débits réservés pour restaurer l'intégrité écologique des rivières régularisées.

BIBLIOGRAPHIE

- Alibert M, Assani AA, Gratton D, Leroux D, Laurencelle M. 2011. Statistical analysis of the evolution of a semialluvial stream channel upstream from an inversion-type reservoir: The case of the Matawin River (Quebec, Canada). *Geomorphology* **131**: 28-34.
- Assani AA, Buffin-Bélanger T, Roy AG. 2002. Analyse d'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. 2004. Comparaison de la variabilité interannuelle des débits en fonction de régimes hydrologiques artificialisés dans un complexe de barrages sur la rivière Saint-Maurice (Québec, Canada). *Bulletin de la Société Géographique de Liège* **44**: 87-96.
- Assani AA, 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 AA, Gravel E, Buffin-Bélanger T, 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, Tardif S. 2005. Classification, caractérisation et facteurs de variabilité spatiale des régimes hydrologiques naturels au Québec (Canada), Approche éco-géographique. *Revue des sciences de l'eau* **18**: 247-266.
- Assani AA, Stichelbout E, Roy AG, Petit F. 2006. Comparison of impacts of dams on the annual maximum flow characteristics in three regulated hydrologic regimes in Québec (Canada). *Hydrological processes* **20**: 3485-3501.
- Assani AA, Petit F, Leclerc L. 2006. The relation between geomorphological features and species richness in the low flow channel of the Warche, downstream from the Bütgenbach dam (Ardennes, Belgium). *Aquatic Botany* **85**: 112-120.
- Assani AA, Lajoie F, Vadnais M-E, Benseghir S, Aubry L., Bureau C. 2006. Modes de variabilité temporelle des débits moyens annuels et leurs liens avec les indices climatiques au Québec (Canada). *Géographie Physique et Quaternaire* **60**: 215-224.

- Assani AA, 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 AA, Quessy J-F, Mesfioui M, Matteau M. 2010. An example of application: The ecological “natural flow regime” paradigm in hydroclimatology. *Advances in Water Resources* **33**: 537-545.
- Assani AA, Charron S, Matteau M, Mesfioui M, Quessy JF. 2010. Temporal variability modes of floods for catchments in the St, Lawrence watershed (Quebec, Canada). *Journal of Hydrology* **385**: 292-299.
- Assani AA, Landry R, Quessy J-F, Clément F. 2011. Temporal Variability of Rain-Induced Floods in Southern Quebec. In: *Climate Change - Geophysical Foundation and Ecological Effects*, J.A. Blanco and H. Kheradmand (eds.), Intech, p. 65-80.
- Assani AA, Landry R, Daigle J, Chalifour A. 2011. Reservoirs effects on the interannual variability of winter and spring streamflow in the St-Maurice River watershed (Quebec, Canada). *Water Resources Management* **25**: 3661-3675.
- Assani AA, Simard E, Gravel E, Ibrahim G, Campeau S. 2013. The impact of “Man-Made Hydrological Drought” on plant species abundance in the low-flow Channel Downstream from the Matawin Dam, Quebec. *Water* **5**: 875-892.
- Assani AA, Delisle F, Landry R. 2015. Effects of Land Use on Flow Rate Change Indices. *Forests* **6**: 4349-4359.
- Assani AA, Chauvette L, Campeau S. 2017. Analysis of the impacts of changes in streamflow and of reforestation on the morphological evolution of the Matambin River channel in the St, Lawrence Lowlands (Quebec, Canada). In: *Geomorphology*, D.P. Shukla (Ed), Intech, (in press).
- Astrade L. 1998). La gestion des barrages-réservoirs au Québec : exemples d'enjeux environnementaux. *Annales de Géographie* **107**: 590-609.
- Aubry L, Assani AA, Biron S, Gratton D. 2012. Comparison of the Hydromorphological Evolution of the L'assomption and Ouareau River Channels (Quebec, Canada). *River Research and Applications* **29**: 979-990.
- BAPE (Bureau d'Audience Publique en Environnement). 2001. *Projet de dérivation partielle de la rivière Manouane*. Rapport d'enquête et d'audience publique. 203 p.

- Beche LA, McElravy EP, Resh VH. 2006. Long-term seasonal variation in the biological traits of benthic-macroinvertebrates in two Mediterranean-climate streams in California, USA. *Freshwater Biology* **51**: 56-75.
- Enders EC, Scruton DA, Clarke KD. 2009. The 'natural flow paradigm' and Atlantic salmon-moving from concept to practice. *River Research and Applications* **25**: 2-15.
- Fortier C, Assani AA, Mesfioui M, Roy AG. 2011. Comparison of the interannual and interdecadal variability of heavy flood characteristics upstream and downstream from dams in inversed hydrologic regime: Case study of Matawin River (Québec, Canada). *River Research and Applications* **27**: 1277-1289.
- Hudon C. 1997. Impact of water level fluctuations on St, Lawrence River aquatic vegetation. *Canadian Journal of Fisheries and aquatic Sciences* **54**: 2853-2865.
- Lajoie F, Assani AA, Matteau M, Mesfioui M, Roy AG. 2006. Comparaison entre débits réservés écologiques et débits lâchés en aval des barrages au Québec : Influence du mode de gestion des barrages, de la taille des bassins versants et de la saison. *Water Quality Journal of Canada* **41**: 263-274.
- Lajoie F, Assani AA, Roy AG, Mesfioui M. 2007. Impacts of dams on monthly flow characteristics, the influence of watershed size and seasons. *Journal of Hydrology* **334**: 423-439.
- Landry R, Assani AA, Biron S, Quessy J-F. 2014. The Management Modes of Seasonal Floods and Their Impact on the Relationship between Climate and Streamflow Downstream from Dams in Quebec (Canada). *River Research and Applications* **30**: 287-298.
- Larned ST, Datry T, Arscott DB, Tockner K. 2010. Emerging concepts in temporary-river ecology. *Freshwater Biology* **55**: 717-738.
- Lombard F. 1987. Rank tests for change point problems. *Biometrika* **74**: 615-624.
- Matteau M, Assani AA, Mesfioui M. 2009. Application of multivariate statistical analysis methods to the dam hydrologic impact studies. *Journal of Hydrology* **371**: 120-128.
- Mazouz R, Assani AA, Quessy J-F, Légaré G. 2012. Comparison of the interannual variability of spring heavy floods characteristics of tributaries of the St, Lawrence River in Quebec (Canada). *Advances in Water Resources* **35**: 110-120.

- Mazouz R, Assani AA, Rodriguez M. 2013. Application of redundancy analysis to hydroclimatology: A case study of spring heavy floods in southern Québec (Canada). *Journal of Hydrology* **496**: 187-194.
- MDDEP (Ministère du développement durable, de l'environnement et des parcs). (2002), « Projet de dérivation partielle de la rivière Manouane », **Dossier 3211-03-06**: 50 p.
- Merritt DM, Scott ML, Poff NL, Auble GT, Lytle DA. 2010. Theory, methods and tools for determining environmental flows for riparian vegetation: riparian vegetation-flow response guilds. *Freshwater Biology* **55**: 206-225.
- Moyle PB, Mount JF. 2007. Homogenous rivers, homogenous faunas. *Proceeding of National Academic of Sciences, USA*, **104**: 5711-5712.
- Nilsson C, Svedmark M. 2002. Basic principles and ecological consequences of changing water regimes: riparian plant communities. *Environmental Management* **30** : 468-480.
- Pêches et Océans Canada. 2002. Dérivation partielle de la rivière Manouane. Loi canadienne sur l'Évaluation Environnementale. Rapport d'étude approfondie, 105 p.
- Poff NL, Allan JD, Bain MB, Karr JR, Prestegard KL, Richter BD, Sparks RE, Stromber JC. 1997. The natural flow regime: a paradigm for river conservation and restoration. *Bioscience* **47**: 769-784.
- Poff NL. 2002. Ecological Response to and Management of Increased Flooding Caused by Climate Change. *Transactions of the Royal Society of London, Series A* **360**: 1497-1510.
- Poff NL, Olden JD, Merritt DM, Pepin DM. 2007. Homogenization of regional river dynamics by dams and global biodiversity implications, *Proceeding of National Academic of Sciences, USA*, **104**: 5732-5737.
- Poff NL, Zimmerman KH. 2010. Ecological responses to altered flow regimes: a literature review to inform the science and management of environmental flows, *Freshwater Biology* **55**: 194-205.
- Quessy J-F, Favre A-C, Saïd M, Champagne M. 2011. Statistical inference in Lombard's smooth-change model. *Environmetrics* **22**: 882-893.
- Richter B, Baumgartner JV, Powell J, Braun DP. 1996. A method for assessing hydrologic alteration within ecosystems, *Conservation Biology* **10**: 1163-1174.

Richter BD, Richter HE. 2000. Prescribing flood regimes to sustain riparian ecosystems along meandering rivers. *Conservation Biology* **14**: 1467-1478.

Sylvain J-M, Assani AA, Landry R, Quessy J-F, Kinnard C. 2015. Comparison of the Spatio-Temporal Variability of Annual Minimum Daily Extreme Flow Characteristics as a Function of Land Use and Dam Management Mode in Quebec, Canada. *Water* **7**: 1232-1245.

Synergie (2004), « La dérivation partielle de la rivière Manouane est réalisée grâce à des ouvrages en BCR », 3 No,1: 6.

Vadnais M-È, Assani AA, Landry R, Leroux D, Gratton D. 2012. Analysis of the effects of human activities on the hydromorphological evolution channel of the Saint-Maurice River downstream from La Gabelle dam (Quebec, Canada). *Geomorphology* **175-176**: 199-208.