

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
OUASSILA AZOUAOUI

ANALYSE DE L'ÉCOULEMENT TEMPORAIRE EN AVAL DES BARRAGES
DE TYPE INVERSION AU QUÉBEC

AVRIL 2017

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.)

Laboratoire d'Hydroclimatologie et de Géomorphologie fluviale et Centre de recherche sur les interactions bassins versants-écosystèmes aquatiques (RIVE)
Département des sciences de l'environnement, section géographie
Université du Québec à Trois-Rivières
C.P. 500, Trois-Rivières (Québec)
G9A 5H7

Membres du comité d'évaluation

Christophe Kinnard (Ph. D.)

Département des sciences de l'environnement, section géographie
Université du Québec à Trois-Rivières
C.P. 500, Trois-Rivières (Québec)
G9A 5H7

Jean-François Quessy (Ph. D.)

Département de mathématiques et d'informatique
Université du Québec à Trois-Rivières
C.P. 500, Trois-Rivières (Québec)
G9A 5H7

AVANT-PROPOS

La présente étude entre dans le cadre du programme de recherche élaboré par le professeur Ali Assani de l'Université du Québec à Trois-Rivières sur les impacts hydrologiques des barrages et réservoirs au Québec. Ce document, rédigé sous sa direction conformément au *Règlement des études de cycles supérieurs*, est présenté sous forme de mémoire permettant d'exposer les résultats obtenus dans le cadre d'une maîtrise de recherche en sciences de l'environnement.

Ce mémoire est divisé en quatre chapitres. Le premier étant l'introduction correspondant à une rétrospective de la littérature, le second explique les méthodes utilisées, le troisième discute des résultats et le dernier, clôture par une conclusion générale. En complément, l'Annexe B présente ce même projet de recherche sous forme d'un article scientifique, où je suis première auteure, traduit et soumis à la revue *Water Ressources Management* sous le titre : « **Analysis of the characteristics of temporary flow downstream from reservoirs in Quebec (Canada)** ».

Conception des idées de recherche : Ali Assani, Quassila Azouaoui

Formulation des objectifs et hypothèses : OA

Analyse des données : OA

Résultats et discussion : OA, AA

Écriture de l'article : OA, AA

REMERCIEMENTS

Ci-exprimés, mes sincères remerciements aux personnes sans lesquelles la rédaction de ce mémoire n'aurait pas été possible.

Je tiens avant tout à remercier mon directeur de recherche, le professeur Ali Assani, de m'avoir accompagnée et prodiguée de précieux conseils pendant tout le long de ma maîtrise, me permettant ainsi de réaliser ce modeste travail.

Un grand merci également aux professeurs Christophe Kinnard et Jean-François Quessy d'avoir accepté de porter des jugements et corrections à ce travail.

Merci à ma famille, grâce à qui je suis parvenue jusqu'au cycle supérieur dans mes études, notamment à mon regretté grand-père.

Et enfin, j'adresse un merci particulier à mon mari Wally, pour ses encouragements, sa compréhension et sa confiance pendant ces trois années de ma maîtrise.

RÉSUMÉ

L'écoulement intermittent est un phénomène hydrologique qui est observé à toutes les latitudes. Au Québec, malgré son climat humide, l'écoulement intermittent survient en aval des réservoirs construits à la tête des bassins versants. Ces réservoirs stockent de l'eau au printemps (d'avril à septembre) et en été et la turbinent en hiver pour alimenter les centrales hydroélectriques construites en aval. Pendant la période de stockage d'eau, il se produit fréquemment un écoulement intermittent (les débits deviennent $< 1 \text{ l/s/km}^2$). L'objectif de cette étude est d'analyser les caractéristiques (magnitude, fréquence et durée) de cet écoulement en aval de trois réservoirs construits dans le bassin versant de la rivière Saint-Maurice pendant la période 1930-2010. En aval, l'apport de l'écoulement intermittent (magnitude) est inférieur à 2 % par rapport à celui de l'écoulement total. En ce qui concerne la fréquence, elle varie en moyenne entre 24 et 65 jours par année en aval de ces trois réservoirs. Quant à la durée, l'écoulement temporaire persiste en moyenne entre 40 et 128 jours consécutifs. Aucune corrélation significative n'a été observée entre les caractéristiques de l'écoulement intermittent et les caractéristiques des réservoirs en raison probablement de la faible taille de l'échantillon analysé. Enfin, l'analyse canonique des corrélations a révélé que la fréquence de l'écoulement temporaire est corrélée à l'Oscillation Nord-Atlantique (ONA) et sa magnitude l'est aussi négativement à l'Oscillation australe (OAU). Ce phénomène de l'écoulement intermittent doit être pris en compte dans la gestion de ces réservoirs pour préserver l'intégrité écologique des tronçons situés en aval.

Mots clés : écoulement intermittent, réservoirs, magnitude, fréquence, durée, indices climatiques, Québec.

TABLE DES MATIÈRES

AVANT-PROPOS	iii
RÉSUMÉ.....	v
LISTE DES TABLEAUX.....	ix
LISTE DES FIGURES	xi
LISTE DES ABRÉVIATIONS	xii
CHAPITRE I	
INTRODUCTION.....	1
1.1 Contexte et revue de littérature.....	1
1.2 Définitions de l'écoulement temporaire	2
1.3 Causes de l'écoulement temporaire	4
1.3.1 Les facteurs naturels	4
1.3.2 Facteurs anthropiques de l'écoulement temporaire	6
1.4 Les impacts de l'écoulement temporaire	7
1.4.1 Impacts écologiques.....	7
1.4.2 Impacts biogéochimiques	9
1.4.3 Impacts morphologiques.....	10
1.5 Problématique, objectifs et hypothèse du travail.....	13
1.5.1 Études hydrologiques de l'écoulement temporaire.....	13
1.5.2 Les études sur l'écoulement temporaire au Canada.....	15
1.5.2.1 Répartition spatiale des cours d'eau temporaires au Canada....	15
1.5.2.2 Études hydrologiques sur l'écoulement au Canada	16
1.5.2.3 Études hydrologiques sur l'écoulement temporaire au Québec	16
CHAPITRE II	
MÉTHODOLOGIE	19
2.1 Définition et caractérisation de l'écoulement intermittent	19
2.1.1 Définition générale de l'écoulement intermittent	19
2.1.2 Caractéristiques de l'écoulement intermittent	20

2.2	Choix des stations d'études	22
2.3	Sources de données.....	27
2.4	Analyses statistiques.....	29
2.4.1	Séries statistiques et variables analysées	29
2.4.1.1	Séries des caractéristiques de l'écoulement intermittent.....	29
2.4.2	Méthodes d'analyses statistiques	31
2.4.2.1	Analyse de la variabilité spatiale des caractéristiques de l'écoulement intermittent.....	31
2.4.2.2	Analyse de la variabilité temporelle des caractéristiques de l'écoulement intermittent.....	31
2.4.2.3	Analyse de corrélation	33
CHAPITRE III		
RÉSULTATS, DISCUSSION ET CONCLUSION		35
3.1	Comparaison des caractéristiques de l'écoulement temporaire en aval des trois barrages.....	35
3.1.1	Analyse de la variabilité spatio-temporelle de la magnitude de l'écoulement intermittent en aval des réservoirs	35
3.1.1.1	Analyse de la variabilité spatiale	35
3.1.1.2	Comparaison de la variabilité temporelle de la magnitude de l'écoulement intermittent en aval de trois réservoirs.....	36
3.1.2	Analyse de la variabilité spatio-temporelle de la fréquence de l'écoulement intermittent en aval des réservoirs	38
3.1.2.1	Analyse de la variabilité spatiale	38
3.1.2.2	Analyse de la variabilité temporelle	39
3.1.3	Analyse de la variabilité spatiale de la durée de l'écoulement intermittent en aval des réservoirs	41
3.2	Relation entre la fréquence de l'écoulement intermittent et les débits moyens journaliers pendant la période végétative en aval de trois réservoirs.	43
3.3	Analyse des facteurs qui influencent la variabilité spatio-temporelle des caractéristiques d'écoulement intermittent en aval de trois réservoirs	44
3.3.1	Analyse des facteurs de la variabilité spatiale	44
3.3.2	Analyse des facteurs de variabilité temporelle	45
3.3.2.1	Analyse de la relation entre les variables climatiques et les caractéristiques de l'écoulement intermittent	45

3.3.2.2 Analyse de la relation entre les indices climatiques et les caractéristiques de l'écoulement intermittent	46
3.4 Discussion et conclusion	47
CHAPITRE IV	
CONCLUSION GÉNÉRALE	53
BIBLIOGRAPHIE.....	56
ANNEXE A	
RÉSULTATS DE L'ANALYSE CANONIQUE DES CORRÉLATIONS	60
ANNEXE B	
ARTICLE SCIENTIFIQUE	61

LISTE DES TABLEAUX

Tableau		Page
2.1 Quelques caractéristiques des trois réservoirs analysés dans le bassin versant de la rivière Saint-Maurice	24	
2.2 Les indices climatiques analysés	28	
2.3 Séries des variables climatiques dans le bassin versant de la rivière Matawin	30	
3.1 Comparaison des moyennes de la magnitude de l'écoulement temporaire en aval de trois réservoirs (1930-2010)	35	
3.2 Valeurs de p-values obtenues avec le test de Kruskal-Wallis.....	36	
3.3 Résultats du test de Mann-Kendall appliqué à l'analyse de la variabilité temporelle de la magnitude de l'écoulement intermittent en aval de trois réservoirs (1930-2010).....	36	
3.4 Résultats de la méthode de Lombard appliquée à l'analyse de la variabilité temporelle de la magnitude de l'écoulement intermittent en aval de trois réservoirs (1930-2010).....	37	
3.5 Comparaison des valeurs moyennes de la fréquence de l'écoulement intermittent en aval des trois réservoirs (1930-2010)	38	
3.6 Résultats des tests t de Student et Kruskal-Wallis	39	
3.7 Résultats du test de Mann-Kendall	39	
3.8 Résultats du test de Lombard appliqué à la variabilité temporelle de la fréquence de l'écoulement intermittent en aval de trois réservoirs (1930-2010).....	40	
3.9 Valeurs des moyennes de la durée de l'écoulement intermittent en aval des réservoirs (1930-2010).....	41	
3.10 Comparaison des durées moyennes de l'écoulement intermittent en aval de trois réservoirs. Résultats du test Khi-2	42	
3.11 Coefficients de corrélation calculés entre les caractéristiques de l'écoulement temporaire et les caractéristiques de trois réservoirs	45	

3.12	Corrélation entre les caractéristiques de l'écoulement temporaire avec les précipitations en aval du réservoir Taureau (1930-2010)	46
3.13	Coefficients canoniques de structure calculés entre les caractéristiques de l'écoulement temporaire (magnitude et fréquence) et les indices climatiques (d'avril à septembre) en aval de trois réservoirs pendant la période 1930-2010	47

LISTE DES FIGURES

Figure		Page
1.1	Exemple d'une rivière pérenne	3
1.2	Exemple d'un tronçon du cours d'eau intermittent en aval du barrage de Matawin en juin	3
1.3	Exemple d'un cours d'eau éphémère	4
1.4	Exemple d'un tronçon d'une rivière en tresses.....	12
1.5	Exemple d'un cours d'eau en anastomoses	13
2.1	Localisation des stations d'études.....	23
2.2	Vue aérienne du réservoir Gouin sur la rivière Saint-Maurice	24
2.3	Vue aérienne du réservoir Châteauvert sur la rivière Manouane.....	24
2.4	Vue aérienne du réservoir Taureau sur la rivière Matawin.....	25
2.5	Coefficients d'écoulement mensuel (%) en aval des réservoirs (1934-2008)	26
2.6	Écoulement intermittent en aval du barrage Matawin en juin 2003 dans un tronçon caillouteux.....	26
3.1	Variabilité interannuelle de la magnitude de l'écoulement intermittent en aval des réservoirs.....	37
3.2	Variabilité interannuelle de la magnitude de l'écoulement intermittent en aval des réservoirs.....	40
3.3	Fréquences absolues des durées de l'écoulement intermittent en aval de trois réservoirs (1930-2010).....	42
3.4	Relation entre la fréquence de l'écoulement intermittent et les débits moyens journaliers pendant la période végétative en aval de trois réservoirs (1930-2010).....	43

LISTE DES ABRÉVIATIONS

Neige tot	Quantité de neige totale
Pluies tot	Quantité de pluies totales
Temp moy	Température moyenne journalière
Temp moy max	Température moyenne maximale journalière
Temp moy min	Température moyenne minimale journalière
Q min moy jour	Débit minimum moyen journalier
Print/été	Période printemps-été (période végétative)
Aut/hiv	Période automno-hivernale (automne de l'année précédente avec l'hiver de l'année suivante)

CHAPITRE I

INTRODUCTION

1.1 Contexte et revue de littérature

Dans les régions réputées humides, les recherches sur les écosystèmes fluviaux se concentrent principalement sur les rivières pérennes. Cependant, malgré ces conditions d'humidité, l'écoulement dans les réseaux fluviaux n'est pas toujours permanent. Ainsi, durant certaines saisons ou durant certaines années plus ou moins sèches, cet écoulement peut s'estomper et générer ainsi un écoulement temporaire. Selon Nadeau et Rains (2007a), outre les régions à climat aride, ce phénomène d'écoulement temporaire, contrairement à ce que l'on pourrait penser, existe dans la plupart des régions comprises entre les latitudes 84°N et 84°S. Les cours d'eau temporaires représentent le tiers des cours d'eau dans le monde en nombre, en longueur et en débits (Poff, 1992; Tooth, 2000). Aux États-Unis par exemple, au moins 60 % de la longueur totale des rivières ont un écoulement temporaire. Cette proportion représente au moins 43 % en Grèce (Tzoraki & Nikolaidis, 2007) et presque 50 % des 2700 km de long de la rivière Tagliamento en Italie (Doering *et al.*, 2007).

Les rivières temporaires représentent un élément clé dans le cycle de l'eau. En effet, celles-ci constituent un lien important entre l'eau contenue dans le sol, les aquifères, les glaciers, la végétation et l'atmosphère. Dans les régions semi-arides, l'eau souterraine est en très grande partie rechargeée par infiltration à partir des rivières temporaires (Shentsis & Rosenthal, 2003; Izbicki, 2007). Dans les régions alpine, polaire, et boréale; l'eau issue de la fonte de glace et de neige rejoint les lacs et rivières permanentes en ruisselant à travers les rivières temporaires (McKnight *et al.*, 1999; Malard, Tockne & Ward, 2000; Robinson & Matthaei, 2007 *in* Larned *et al.*, 2014). Dans ces régions, l'ampleur du réseau hydrique temporaire est à son maximum lors de la fonte des neiges avant de diminuer avec le retour du gel. Quant aux régions arides et

tempérées, le réseau dépend principalement du ruissellement des précipitations (Stanley *et al.*, 1997; Tockner *et al.*, 2000). En plus de ce rôle dans le cycle de l'eau, les rivières temporaires ont été utilisées pendant 30 siècles comme source d'irrigation (Sandor *et al.*, 2007) ou encore tel un système de prévention des inondations (Foody, *et al.*, 2004 *in Larned et al.*, 2014). Dans les régions humides, les cours d'eau temporaires sont généralement localisés à la tête des bassins versants (Buttle *et al.*, 2012). Ainsi, ils drainent généralement des bassins versants des superficies relativement faibles ($< 1000 \text{ km}^2$).

Malgré leur présence dans toutes les régions climatiques du globe, les cours d'eau temporaires sont généralement étudiés dans les régions arides et très arides (Buttle *et al.*, 2012; Tooth, 2000). Cependant, depuis deux décennies, de plus en plus des travaux s'intéressent à ce phénomène d'intermittence dans les régions humides (Buttle *et al.*, 2012). La plupart de ces travaux sont focalisés sur les impacts de l'écoulement temporaire sur l'écologie des écosystèmes fluviaux et sur la morphologie des chenaux. Il existe ainsi encore très peu d'études sur l'hydrologie des cours d'eau temporaires dans les régions humides. Dans les lignes qui suivent, on présentera une synthèse des connaissances sur les impacts écologiques, biogéochimiques et morphologiques. Cette synthèse sera précédée par la définition de l'écoulement temporaire ainsi que les causes qui le génèrent.

1.2 Définitions de l'écoulement temporaire

Deux critères sont utilisés pour définir le caractère permanent ou temporaire d'un écoulement : la durée (aspect temporel) et la continuité (aspect spatial) d'un écoulement dans un chenal (Buttle *et al.*, 2012; Svec *et al.*, 2005). En fonction de ces deux critères, on distingue trois types de cours d'eau ou d'écoulement fluvial.

Un cours d'eau ou un tronçon de cours d'eau pérenne est un cours d'eau caractérisé par un écoulement qui dure toute l'année (continuité dans le temps) et qui ne

s'estompe pas vers l'aval (continuité dans l'espace). Il n'y a pas de discontinuité de l'écoulement dans le temps ni dans l'espace (Figure 1.1).



Figure 1.1 Exemple d'une rivière pérenne.

L'écoulement est permanent dans le temps et continu dans l'espace.

Un cours d'eau ou un tronçon d'un cours d'eau est intermittent lorsque l'eau est présente dans certaines parties du chenal pendant toute l'année ou une période de l'année (Figure 1.2). La discontinuité de l'écoulement est surtout plus spatiale que temporelle.

De fait, pendant la période d'intermittence, l'eau demeure souvent sous forme des flaques dans le chenal ou se concentre seulement dans les zones les plus profondes du chenal.



Figure 1.2 Exemple d'un tronçon du cours d'eau intermittent en aval du barrage de Matawin en juin.

L'écoulement devient discontinu dans l'espace.

Un cours d'eau ou un tronçon d'un cours d'eau est éphémère lorsque l'écoulement dans le chenal est épisodique (Figure 1.3). En d'autres termes, l'écoulement se produit juste après un épisode très pluvieux. En dehors de ces épisodes, le chenal reste totalement à sec presque de manière permanente. Ainsi, la discontinuité de l'écoulement est beaucoup plus temporelle que spatiale.



Figure 1.3 Exemple d'un cours d'eau éphémère.

Le chenal reste totalement à sec en l'absence d'un épisode pluvieux important.

Les cours d'eau intermittents et éphémères forment les cours d'eau temporaires.

1.3 Causes de l'écoulement temporaire

Le principal élément déterminant l'occurrence de l'écoulement temporaire est l'équilibre entre la quantité d'eau entrante et sortante dans le système (Buttle *et al.*, 2013). Selon les régions et leurs climats respectifs, la discontinuité spatio-temporelle de l'écoulement dans les chenaux peut être causée par des facteurs naturels et anthropiques (Larned *et al.*, 2010).

1.3.1 Les facteurs naturels

Le climat. Le climat influence la quantité des précipitations qui génèrent l'écoulement dans les chenaux. La quantité et la période d'occurrence des précipitations influencent la durée et la continuité spatiale de l'écoulement dans les chenaux. En règle générale, lorsque la quantité des précipitations est suffisamment supérieure à celle de

l'évapotranspiration, il se produit un écoulement permanent (rivières pérennes). En revanche, lorsque cette quantité devient inférieure à celle de l'évapotranspiration, l'infiltration et le ruissellement de surface, qui alimentent l'écoulement dans les chenaux, deviennent négligeables ou nuls. Par conséquent, le transfert de l'eau des précipitations vers les chenaux est estompé provoquant ainsi un écoulement intermittent ou éphémère selon la durée de ce déséquilibre entre les précipitations et l'évapotranspiration.

La nature géologique et hydrogéologique des roches dans le bassin versant.

Rappelons que l'écoulement dans le chenal provient des eaux infiltrées dans les nappes (périodes d'étiage) et celles qui ruissent en surface (période de crues). Si la perméabilité des roches est très forte, les eaux auront tendance à s'infiltrer plus tôt qu'à ruisseler. Cette forte infiltration (comme dans les roches calcaires ou les sédiments sableux) peut entraîner une disparition des eaux en surface dans le chenal provoquant ainsi un écoulement intermittent (discontinuité spatiale). En revanche, la présence des puissantes nappes aquifères stockant de grandes réserves d'eau favorise l'écoulement pendant la période d'absence des précipitations (période d'étiage). Lorsque le bassin versant est constitué par des roches imperméables, le ruissellement devient important pendant les épisodes pluvieux. L'infiltration diminue significativement. Pendant, les périodes de grande sécheresse, les réserves des nappes d'eau s'estompent rapidement. Il en résulte une interruption partielle ou totale de l'écoulement dans le chenal provoquant ainsi un écoulement temporaire.

La tectonique. La présence des réseaux de fissures (failles, diaclases, etc.) dans les roches peut entraîner une déviation des eaux dans un bassin versant provoquant ainsi une discontinuité spatiale de l'écoulement dans certains chenaux.

La nature physique des précipitations. Dans les régions tempérées froides comme le Québec, les précipitations tombent sous forme solide (neige) en hiver. Pendant cette saison froide, les rivières ne sont plus alimentées par les eaux de ruissellement de surface. L'écoulement dans les chenaux provient exclusivement des nappes aquifères.

Dans de petits bassins versants ayant de faibles réserves d'eau dans les nappes aquifères, celles-ci peuvent s'épuiser rapidement interrompant ainsi l'écoulement dans les chenaux. Les cours d'eau deviennent ainsi intermittents ou éphémères.

Le réseau de drainage et la topographie. Dans un bassin versant, les petits cours d'eau situés à la tête sont généralement de modeste taille et leurs pentes sont relativement fortes. Ces deux facteurs limitent l'infiltration de l'eau, mais favorisent le ruissellement de surface. Pendant les saisons sans précipitations suffisantes pour générer le ruissellement en surface, il se produit une interruption de l'écoulement dans les chenaux.

1.3.2 Facteurs anthropiques de l'écoulement temporaire

L'urbanisation et la déforestation. Ces deux facteurs favorisent en principe le ruissellement de surface au détriment de l'infiltration (alimentation des nappes aquifères). Ceci peut provoquer une interruption de l'écoulement dans les chenaux pendant les saisons sans précipitations. Ce phénomène est souvent observé dans les petits bassins versants ayant des nappes aquifères relativement modestes pour compenser les effets de l'aggravation de ruissellement de surface provoqué par les deux facteurs.

Les barrages hydroélectriques. En stockant ou/ou en dérivant de l'eau, les barrages et les réservoirs peuvent provoquer une diminution très significative de l'écoulement générant ainsi de l'écoulement intermittent dans certains biefs du tronçon situé en aval.

Le drainage. Dans des bassins versants où certains cours d'eau sont alimentés par des milieux humides, le drainage de ceux-ci peut provoquer un assèchement des chenaux pendant les périodes de grande sécheresse. Il en résulte ainsi un écoulement temporaire dans ces chenaux.

1.4 Les impacts de l'écoulement temporaire

1.4.1 Impacts écologiques

La variabilité de l'écoulement est l'un des paramètres les plus importants pour les processus écologiques dans les rivières (Power *et al.*, 1995; Richter *et al.*, 2003), et l'intermittence qui se trouve être une forme extrême de cette variabilité exerce alors un effet prépondérant sur l'écologie du milieu. L'avancée et le recul de l'eau, ainsi que le matériel transporté affectent le comportement, le développement et la distribution des biotes aquatiques et terrestres, la migration de poissons et invertébrés aquatiques et terrestres, et même l'hydrochorie des plantes (Adis & Junk, 2002 *in* Larned *et al.*, 2010). Ces réponses écosystémiques dépendent également de la vitesse du retrait et du retour de l'eau.

La composition ainsi que la configuration des différentes parcelles de l'habitat peuvent être modifiées en réponse à un épisode de présence de l'écoulement ou de son absence. Selon Drummond *et al.* (2015), pendant la période sèche, la composition de la communauté est déterminée à la fois par la mortalité des organismes et par leur capacité de migration. De ce fait, l'écosystème, maintenu après assèchement complet, est constitué d'organismes dotés d'une physiologie, morphologie et comportement qui confèrent une résistance à la dessiccation.

De plus, les étiages prolongés et l'absence d'apport en sédiments, conjugués aux modifications des paramètres physicochimiques, ont provoqué l'apparition d'une importante biomasse de périphyton, la prolifération d'algues vertes et l'augmentation du nombre d'espèces d'algues périphitiques en aval des barrages (Smolar-Žvanut *et al.*, 2013).

Dans le cas de certaines rivières intermittentes, les taux d'extinction locale sont équilibrés après une recolonisation à partir de rivières pérennes qui constituent des refuges biologiques pendant la période d'assèchement et source de recolonisation au retour de l'eau (Magoullick & Kobza, 2003). Néanmoins, les perturbations fréquentes de

l'écoulement empêchent la stabilisation des métapopulations (Larned *et al.*, 2010). Selon Skoulidakis *et al.* (2011), le rétablissement de l'écoulement permet la recolonisation partielle par les poissons, cependant l'intégrité structurelle de leur communauté demeure sévèrement affectée contrairement aux communautés d'invertébrés qui se rétablissent rapidement avec le retour de l'eau.

En se fondant sur les nombreux travaux déjà consacrés sur les impacts écologiques, Larned *et al.* (2010) ont proposé trois modèles conceptuels de fonctionnement de l'écologie des rivières temporaires.

Le premier modèle conceptuel concerne la connectivité entre les habitats isolés. Ce modèle repose sur le principe suivant : les concepts de métacommunautés et de métapopulations, développés en rivières pérennes, peuvent s'appliquer aussi en rivières temporaires. Sur la base de ce concept, on peut prédire que l'agrégation des communautés locales dans des zones (flaques) d'eau isolées des rivières temporaires fonctionne comme des métacommunautés. Celles-ci peuvent devenir longitudinalement (spatialement) emboitées en raison des différences interspécifiques dans la dispersion et dans la mortalité. Cependant, contrairement au concept de métacommunautés, le concept de métapopulations ne peut s'appliquer à certains cours d'eau temporaires. Dans une métapopulation stable, le taux d'extinction local est compensé par la recolonisation. Cependant, l'extinction et la recolonisation des espèces dans de nombreuses rivières temporaires sont découplées par des perturbations fréquentes. Ainsi les populations de ces espèces sont toujours en expansion ou en contraction.

Le second modèle conceptuel prédit que la biodiversité à grande échelle varie en fonction de la dynamique des habitats aquatiques et terrestres d'une part, et de la variation des niveaux d'eau, d'autre part. Les mosaïques d'habitats dans les rivières temporaires changent en composition et en configuration en réponse aux cycles d'inondations et de sécheresse qui dictent des réponses biotiques très variables.

Le troisième modèle conceptuel représente les rivières temporaires comme des réacteurs longitudinaux et biogéochimiques. L'avancée longitudinale de l'eau transporte des solutés et des particules des matières organiques et sa récession (son interruption longitudinale) pendant la période de sécheresse permet le dépôt des matières transportées en réserves dans les mouilles et les sommets de bancs. Le mouvement des matières est rapide pendant les périodes de crues, mais lent pendant les périodes d'étiages.

1.4.2 Impacts biogéochimiques

Les rivières temporaires sont de véritables réacteurs biogéochimiques. En effet, après le retour de l'eau, la concentration de sédiments et nutriments y est souvent plus élevée que dans les rivières permanentes. Ceci est dû à la dissolution des précipités ainsi qu'au charriage des particules à partir de chenaux et de lits des sections desséchées (Obermann *et al.*, 2007 *in* Larned *et al.*, 2010). Une comparaison réalisée entre une section intermittente et une autre pérenne de la rivière Tagliamento en Italie a révélé que l'ampleur de la différence en termes de solide en suspension, phosphore et la concentration du carbone organique était de l'ordre de 1 à 3 fois plus élevé dans la section à intermittence (K. Tockner, unpublished data *in* Larned *et al.*, 2010).

Il est à noter qu'en l'absence de l'eau, la matière organique déposée sur le lit asséché de la rivière connaît une décomposition, ingestion et minéralisation très lentes. Néanmoins, le rythme s'accélère avec la réhydratation du milieu. De plus, lors des épisodes secs, l'écoulement se transforme en petites mares d'eau isolées subissant un choc thermique et chimique dû aux fluctuations diurnes de température, ainsi qu'à l'augmentation de l'oxygène dissous et le pH, engendrées par l'abondance des algues macrophytes.

1.4.4 Impacts morphologiques

Lors du retour de l'écoulement, l'eau charrie des particules organiques et des solutés vers l'aval. Inversement, l'interruption de l'écoulement se traduit en une déposition du matériel transporté (Larned *et al.*, 2010).

Au fur et à mesure que l'écoulement revient dans les parcelles asséchées, la perte d'eau par infiltration progressive réduit le pouvoir érosif de l'écoulement (Tooth, 2000). De ce fait, la sédimentation gagne du terrain au détriment de l'érosion notamment en l'absence de flux importants provenant des tributaires.

Maren *et al.* (2014) ont identifié de potentiels impacts géomorphologiques de la variabilité de l'écoulement sur le lit majeur des rivières. Ces impacts sont notamment liés aux changements des niveaux des berges, des limites de sédimentation, des méandres, mais encore à la fréquence des changements dans la végétation. Des changements qui provoquent à leur tour d'autres impacts tels que la durée d'immersion et la distribution des berges.

Les traits morphologiques caractéristiques des rivières temporaires ont été étudiés presque exclusivement dans les régions arides et semi-arides de l'Australie, des États-Unis et de certaines régions méditerranéennes de l'Europe (Espagne, Italie, Portugal) et de l'Afrique septentrionale et australe. Trois traits morphologiques des rivières temporaires suivants sont souvent largement observés dans ces régions. Rappelons d'abord les cinq facteurs naturels qui influencent la morphologie du chenal d'un cours d'eau : les débits qui sont fonction du climat; la quantité et la nature lithologique des sédiments transportés par les rivières et qui dépendent de la nature pétrographique des roches, la végétation qui dépend du climat et, enfin, la pente générale qui dépend de la topographie et des mouvements tectoniques. Dans le cas des cours d'eau temporaires des régions arides et semi-arides, il y a un déséquilibre entre les débits liquides (écoulement) et les débits solides transportés par les rivières. De fait, les rivières de ces régions transportent beaucoup plus des sédiments (surtout en suspension) - lors de rares crues - malgré que les débits soient généralement faibles en raison de la quantité

des précipitations limitées. Ainsi, leur capacité totale de transport est beaucoup plus faible que celle des rivières pérennes. Quant à la nature lithologique des sédiments, la plupart des bassins versants drainent des sols constitués par des particules fines. L'érosion de ces particules fines est favorisée par l'absence de la végétation et l'agressivité érosive des eaux de ruissellement. Il en résulte ainsi un transfert important de ces particules fines des versants vers les chenaux avec comme conséquence un transport important des sédiments en suspension lors des crues éclairées. Dans d'autres régions, la quantité des particules fines est limitée. Ainsi, les rivières peuvent transporter des particules grossières sous forme de charriage. Quant à l'absence de la végétation, elle influence le façonnement du chenal de deux façons : elle favorise l'érosion des sols provoquant une hausse de la charge en suspension d'une part, et elle réduit la rugosité du chenal favorisant ainsi l'érosion des berges, d'autre part. Enfin, en ce qui concerne la pente, les cours d'eau situés sur les flancs des montagnes ou des plateaux sont caractérisés par des pentes très fortes leur conférant une capacité érosive très élevée. En revanche, les cours d'eau qui drainent les plaines et les piedmonts ont des pentes très faibles qui réduisent leur capacité érosive. En se fondant sur ces facteurs, les rivières temporaires des régions arides et semi-arides présentent trois traits morphologiques caractéristiques suivants :

1. Les rivières à chenaux multiples en tresses

Dans ces rivières, l'écoulement est fragmenté en petits chenaux par la présence des bancs et îlots. Il s'agit d'une discontinuité spatiale de l'écoulement. Ce sont des rivières les plus couramment observées dans les régions arides et semi-arides en raison d'un transport très important des sédiments associé à de faibles débits. Ce type de rivière traduit en fait une prédominance du processus de dépôt sur celui d'érosion (Figure 1.4).

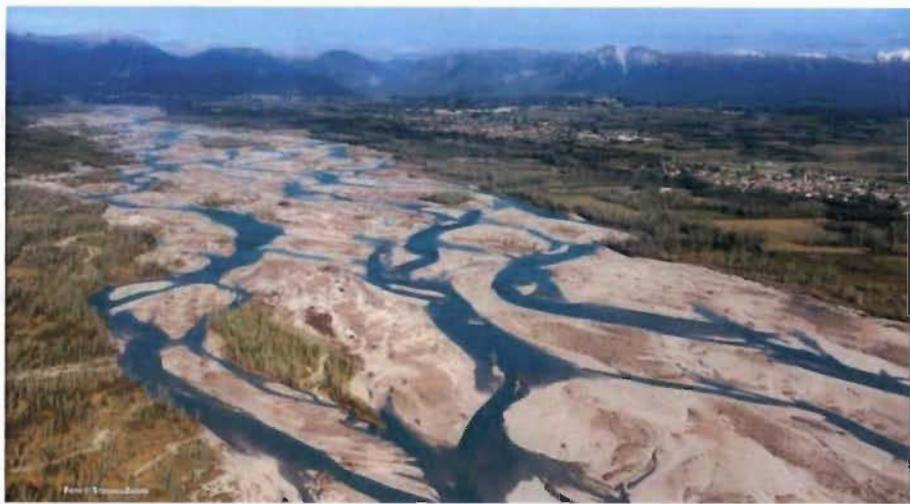


Figure 1.4 Exemple d'un tronçon d'une rivière en tresses.

L'écoulement est fragmenté dans de petits chenaux. Cette fragmentation entraîne une discontinuité spatiale de l'écoulement.

2. Les rivières à chenal unique rectiligne

L'écoulement se fait dans un seul chenal contrairement aux rivières précédentes. Contrairement aux chenaux des rivières pérennes, les chenaux des rivières temporaires des régions arides et semi-arides sont caractérisés par leur grande largeur et leur faible profondeur. Il en résulte ainsi un rapport faible de la largeur et de la profondeur. De plus, la sinuosité du chenal est beaucoup plus faible que celle des rivières pérennes. Ce type de morphologie résulte aussi d'une faible capacité de transport. Les débits ne sont pas suffisamment puissants pour évacuer tous les sédiments transportés par les rivières.

3. Les rivières à chenaux multiples en anastomoses

L'écoulement s'effectue dans plusieurs chenaux, mais leur longueur et leur largeur sont beaucoup plus grandes que celles des chenaux tressés (Figure 1.5). De plus, ces chenaux sont beaucoup plus stables dans le temps que les chenaux des rivières tressées même si les facteurs de leur genèse sont similaires pour les cours d'eau temporaires des régions arides et semi-arides.



Figure 1.5 Exemple d'un cours d'eau en anastomoses.
L'écoulement s'effectue dans plusieurs chenaux.

1.5 Problématique, objectifs et hypothèse du travail

1.5.1 Études hydrologiques de l'écoulement temporaire

Presque toutes les études portant sur l'hydrologie des cours d'eau temporaires ont été effectuées dans les régions arides et semi-arides. Ces études ont surtout mis l'accent sur les deux aspects qui suivent :

1. La typologie des crues et leurs caractéristiques

En ce qui concerne la typologie de crues, Graf (1988) a distingué quatre types de crues dans les rivières temporaires suivants :

- a) Les crues éclaires. Ce sont des crues qui naissent très rapidement à la suite d'un épisode orageux très intense. Leur vitesse de propagation est très forte.
- b) Les crues avec un seul pic. Ce sont des crues associées à un seul épisode pluvieux ou une fonte de neige et/ou de glace. Dans les régions arides et

semi-arides, la récession de ce type de crue est plus rapide que dans les régions humides, car le ruissellement des eaux ne dure pas longtemps.

- c) Les crues avec des pics multiples. Ce sont des crues qui sont générées par de nombreux épisodes pluvieux associés ou non à la fonte de neige et/ou de glace.
- d) Les crues saisonnières. Ce sont des crues qui sont générées par la fonte de neige et/ou de la glace.

Quant aux caractéristiques des histogrammes des crues, Tooth (2000) avait mentionné que les cours d'eau temporaires sont caractérisés par un rapport très élevé entre les fortes crues et les faibles crues. Ceci confère ainsi aux hydrogrammes des crues une très forte asymétrie en raison de la relation non linéaire entre les précipitations et le ruissellement.

2. Les régimes hydrologiques des cours d'eau temporaires

Une des caractéristiques majeures des régimes hydrologiques des cours d'eau temporaires est leur forte variabilité intra et interannuelle des débits. Ainsi, les coefficients d'immodération (rapport entre les débits maximums et les débits minimums annuels et saisonniers) et de variation sont très élevés en raison de la discontinuité de l'écoulement dans le temps.

Par ailleurs, selon les observations faites aux États-Unis, le taux d'augmentation des débits moyens annuels par rapport à la superficie des bassins versants est beaucoup plus faible pour les rivières temporaires que pour les rivières pérennes. Ceci est dû aussi à la discontinuité spatiale de l'écoulement dans les premières rivières.

1.5.2 Les études sur l'écoulement temporaire au Canada

1.5.2.1 Répartition spatiale des cours d'eau temporaires au Canada

En grande partie, les travaux antérieurs sur les cours d'eau temporaires ont mis l'accent sur les paysages arides et semi-arides où le bilan hydrique est déficitaire (Buttle *et al.*, 2013). Cependant, comme mentionné précédemment, ces cours d'eau temporaires peuvent également être présents dans des climats subhumides et humides (Buttle *et al.*, 2013) que l'on rencontre au Canada.

Des zones sèches et subhumides s'étendent des États-Unis vers l'Alberta, Saskatchewan et l'ouest de Manitoba tandis que les conditions semi-arides s'étendent au sud de l'Alberta et Saskatchewan ainsi qu'une partie au sud de la Colombie-Britannique. En revanche, les rivières intermittentes au Canada peuvent également survenir hors de ces régions sèches telles que l'écoulement arctique qui s'estompe en hiver (Young et Roulet, 1998 *in* Buttle *et al.*, 2013).

Certains aspects hydrologiques des rivières temporaires sont relativement exclusifs au paysage canadien, tels que le rôle que jouent la fonte des neiges et le pergélisol couvrant plus de la moitié du Canada (Brown, 1970), dans le contrôle de l'écoulement.

Un autre facteur vient également contribuer à la formation d'écoulement intermittent, à savoir la fonte des glaciers. Cependant, cette contribution à l'alimentation des cours d'eau temporaires n'a pas été encore directement quantifiée (Buttle *et al.*, 2013).

Il est à noter que la majorité des études consacrées aux rivières temporaires sont réalisées dans les cours d'eau où l'intermittence est un phénomène naturel. Cependant, l'écoulement intermittent d'origine anthropique est un problème environnemental imminent et le besoin d'atténuer ses effets devient urgent (Larned *et al.*, 2010). Spence et Woo, 2006 (*in* Buttle *et al.*, 2013) ont illustré que dans le Bouclier canadien, près de Yellowknife, l'écoulement devient fréquemment intermittent, car l'eau ruisselant

à partir de l'amont transite d'abord par des infrastructures de stockage d'eau qui doivent être remplies. Ces régimes anthropiques sont généralement caractérisés par des changements abrupts à partir d'un système permanent vers un système intermittent.

1.5.2.2 Études hydrologiques sur l'écoulement au Canada

Plusieurs études ont été déjà réalisées sur l'hydrologie des rivières temporaires au Canada (p. ex. Todd *et al.*, 2006; Tooth, 2000; Young et Woo, 2000; Spence et Woo, 2006; Fang *et al.*, 2010; Quinton et Roulet, 1998; Levick *et al.*, 2008; Buttle *et al.*, 2004; Uys et O'Keeffe, 1997). Ces études ont analysé plusieurs aspects suivants : les causes de l'écoulement temporaire, les caractéristiques des crues, la problématique des mesures des débits, la modélisation et la prédition des débits des rivières temporaires, les effets des changements climatiques et les impacts des activités anthropiques sur les débits. Une synthèse quasi exhaustive sur ces différents aspects a été publiée par Buttle *et al.* (2012).

1.5.2.3 Études hydrologiques sur l'écoulement temporaire au Québec

Malgré son climat humide, il existe des cours d'eau temporaires au Québec. En effet, les observations de terrain ont démontré que pendant la période estivale, les chenaux des petits cours d'eau peuvent s'assécher totalement ou partiellement générant ainsi un écoulement temporaire. Ce phénomène est surtout observé dans les basses plaines de Saint-Laurent et sur le Bouclier Canadien où les réserves des nappes aquifères sont relativement peu abondantes pour soutenir les débits des rivières pendant la période d'étiage. En effet, en été, au Québec, les précipitations sont généralement inférieures à l'évapotranspiration. Il s'ensuit que l'écoulement dans les chenaux n'est pas suffisamment alimenté par les pluies, à l'exception des épisodes de grosses averses orageuses.

Cependant malgré la présence des cours d'eau temporaires au Québec, à notre connaissance, il n'existe encore aucune étude sur ce phénomène. Ceci peut s'expliquer

par les deux raisons suivantes : 1) l'absence des mesures des débits sur les cours d'eau temporaires et 2) la faible taille de leurs bassins versants. De fait, la plupart de ces cours d'eau temporaires ont des superficies des bassins versants $< 50 \text{ km}^2$. Ces petits bassins versants ne représentent aucun intérêt majeur dans la gestion des eaux au Québec.

Outre ce phénomène d'intermittence naturelle, il existe aussi de l'intermittence d'origine anthropique. Celle-ci survient en aval de certains réservoirs construits sur des rivières de taille relativement grande ($> 1000 \text{ km}^2$). Cependant, malgré que cette intermittence se produise dans des bassins versants de taille relativement grande, il n'existe aucune étude hydrologique sur ce phénomène.

En l'absence de toute étude hydrologique sur ce phénomène d'intermittence en aval de certains réservoirs, pour combler cette lacune, on s'est fixé les objectifs suivants :

- **Quantifier** le phénomène de l'écoulement temporaire observé en aval de certains réservoirs. Cette quantification consiste à analyser les caractéristiques hydrologiques de l'écoulement temporaire suivantes : la magnitude, la durée et la fréquence de l'écoulement intermittent. L'hypothèse qui soutient cet objectif est la suivante : l'ampleur du phénomène de l'écoulement intermittent dépend de la taille du réservoir. Cette ampleur diminue avec l'augmentation de la taille du réservoir.
- **Analyser** la variabilité temporelle des caractéristiques de l'écoulement intermittent. Ce second objectif est divisé en deux sous-objectifs :
 - Analyser la relation entre l'écoulement intermittent et les indices climatiques régissant le climat nord-américain. L'hypothèse associée à ce cas est que l'écoulement temporaire est significativement corrélé à l'Oscillation Nord-Atlantique (ONA) qui est le principal facteur de la sécheresse hydrologique dans le bassin versant des Grands Lacs nord-américains (Biron *et al.*, 2014). Car il est vrai que l'écoulement intermittent dépend principalement du mode de gestion des barrages,

en revanche, la quantité d'eau lâchée en aval de ceux-ci dépend surtout de la demande en énergie hydroélectrique qui elle-même est liée aux variations de température. De plus, il a été établi par Assani *et al.* (2011) que l'écoulement pendant la période printanière présente une corrélation avec les variables climatiques (précipitations et températures).

- Analyser l'ampleur de l'écoulement intermittent en rapport avec les précipitations. L'hypothèse retenue pour cet objectif est la suivante : l'ampleur de l'écoulement intermittent dépend de la quantité des précipitations tombées en hiver et survient lors des années très sèches (Sylvain *et al.*, 2015). En effet, lors des années à fortes précipitations hivernales, l'écoulement intermittent se produirait moins fréquemment pendant la période végétative suivante et durerait moins longtemps lorsqu'il se produirait, car le seuil fixé du débit spécifique se trouverait souvent dépassé.

CHAPITRE II

MÉTHODOLOGIE

2.1 Définition et caractérisation de l'écoulement intermittent

2.1.1 Définition générale de l'écoulement intermittent

Rappelons que Buttle *et al.* (2012) ont défini trois types d'écoulement temporaire. Du point de vue hydrologique, ces définitions sont purement qualitatives. En effet, elles sont basées sur l'interruption totale ou partielle de l'écoulement dans un chenal. Dans de grands cours d'eau (bassins versants de taille $> 1000 \text{ km}^2$), une telle interruption ne peut être observée que dans les régions arides ou semi-arides pendant une période plus ou moins longue de l'année. Dans les régions humides comme le Québec, une telle interruption est difficile à observer même en hiver (l'eau est tout simplement gelée). Dans ces conditions, il était nécessaire d'utiliser un critère qui permet de rendre compte de la réduction significative des débits lâchés en aval des barrages. Cette réduction peut ainsi provoquer, dans certaines circonstances, une interruption totale ou presque totale de l'écoulement en aval des barrages. Dans le cas de cette étude, l'écoulement en aval d'un barrage est considéré intermittent lorsque le débit spécifique devient inférieur à 1 l/s/km^2 (fixé à partir des observations sur le terrain) pour les bassins versants dont la superficie est supérieure à 1000 km^2 (Assani *et al.*, 2015). Ceci correspond à des situations pendant lesquelles presque toute l'eau qui entre dans un réservoir est retenue. Dans ces conditions de sécheresse extrême, plus de 70 % de la superficie du lit mineur devient exondée. De plus, ce débit de 1 l/s/km^2 n'a jamais été atteint en rivières naturelles même lors des conditions extrêmes de sécheresse dans les bassins versants de taille $> 1000 \text{ km}^2$. Il convient de noter que l'utilisation du débit spécifique permet de comparer le caractère intermittent de l'écoulement de nombreux cours d'eau indépendamment de la taille de leurs bassins versants.

2.1.2 Caractéristiques de l'écoulement intermittent

Pour définir les caractéristiques de l'écoulement intermittent, le concept écologique du régime des débits naturels a été appliqué (Richter *et al.*, 1996; Poff *et al.*, 1997). Selon ce concept, l'écoulement peut être défini par les cinq caractéristiques fondamentales suivantes : la magnitude, la durée, la fréquence, la période d'occurrence et la variabilité.

- La magnitude de l'écoulement intermittent a été définie comme la quantité d'eau $< 1 \text{ l/s/km}^2$ s'écoulant dans le chenal en aval d'un réservoir à une période donnée.
- La fréquence est le nombre de fois qu'un écoulement $< 1 \text{ l/s/km}^2$ a été observé pendant un mois ou une saison.
- La période d'occurrence d'un écoulement intermittent correspond aux dates pendant lesquelles un écoulement $< 1 \text{ l/s/km}^2$ a été observé.
- La durée de l'écoulement intermittent a été définie comme le nombre total de jours consécutifs avec un débit spécifique $< 1 \text{ l/s/km}^2$ observé en aval d'un barrage au cours d'une période donnée.

Ces caractéristiques ainsi que leurs méthodes de calcul sont illustrées sur les figures 2.1 et 2.2 basées sur des données fictives.

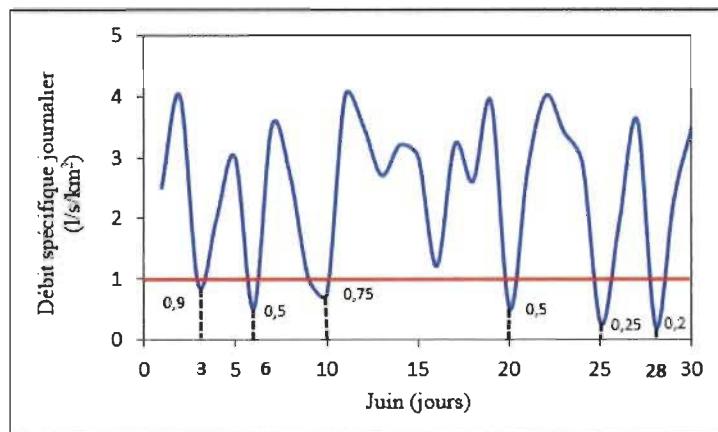


Figure 2.1 Illustration des caractéristiques de l'écoulement temporaire.

La magnitude (l/s/km^2) est calculée comme suit : $0,9+0,5+0,75+0,5+0,25+0,2$. La fréquence dans ce cas est de 6 fois. Les périodes d'occurrence sont : les 3, 6, 10, 20, 25 et 28 juin.

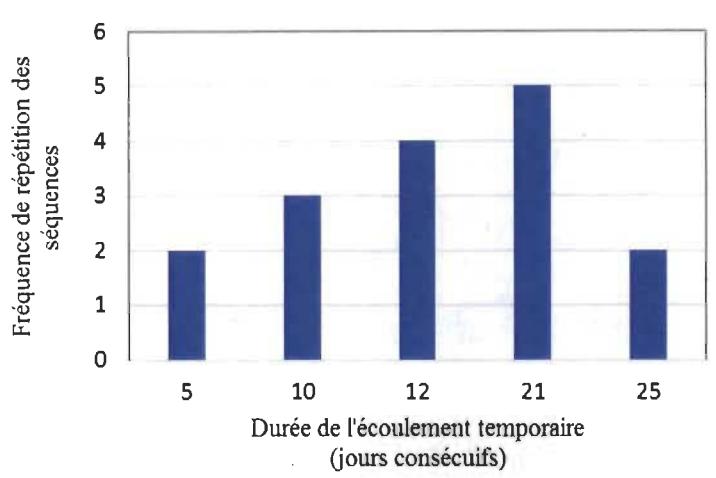


Figure 2.2 Illustration de la caractéristique de la durée de l'écoulement temporaire.

La durée est calculée de la manière suivante : au cours de l'année, on a observé 2 fois un épisode d'écoulement temporaire durant 5 jours secs consécutifs, 3 fois un épisode durant 10 jours consécutifs, 4 fois un épisode durant 12 jours consécutifs et 2 fois un épisode de 25 jours consécutifs. Il est à remarquer que la durée est indépendante des différentes dates de l'année, mais se calcule sur l'ensemble d'une période donnée.

Dans le cas de cette étude, la caractéristique période d'occurrence ne sera pas analysée, car seule la période végétative a été considérée, celle-ci s'étale du mois d'avril au mois de septembre.

Le choix de cette période s'est basé sur sa correspondance à la période où les impacts écologiques induits par l'écoulement intermittent deviennent significatifs. De plus, pour éviter des coupures artificielles des séquences des jours avec écoulement intermittent, il a été jugé plus pertinent d'analyser une période continue et longue.

La variabilité de l'écoulement intermittent mesure le degré de fluctuation des magnitudes de cet écoulement pendant une période donnée.

Il est à noter que dans cette étude, seules les trois premières caractéristiques nommées ci-dessus sont analysées.

2.2 Choix des stations d'études

Le choix des stations d'analyse a été dicté par les impératifs suivants :

- L'existence de plusieurs réservoirs qui induisent l'inversion du cycle hydrologique naturel des débits en aval.
- L'existence des données des débits journaliers mesurés de manière continue sur une période relativement longue (plus de 50 ans) en aval des barrages.
- L'occurrence d'un écoulement intermittent (observé) pendant plusieurs jours en aval des barrages.
- La disponibilité de données climatiques locales (températures et précipitations) sur une période relativement longue.
- Une certaine uniformité des caractéristiques physiographiques et climatiques des bassins versants à analyser.

L'ensemble de ces critères a été rencontré seulement dans le bassin versant de la rivière Saint-Maurice dans lequel de nombreux barrages et réservoirs ont été construits au siècle dernier. La rivière Saint-Maurice qui draine un territoire d'une superficie approximative de 43 000 km² est l'un des principaux tributaires du fleuve Saint-Laurent situé en rive nord. D'un point de vue lithologique, les deux tiers du bassin versant sont circonscrits dans le Bouclier Canadien (province de Greenville) et l'autre tiers dans les Basses Terres du Saint-Laurent.

Sur la base de ces critères mentionnés ci-haut, trois réservoirs ont été retenus pour analyser le phénomène de l'écoulement intermittent. Il s'agit des réservoirs Gouin (9480 km^2) sur la rivière Saint-Maurice, Taureau (4070 km^2) sur la rivière Matawin et Châteauvert (3060 km^2) sur la rivière Manouane. La localisation de ces trois réservoirs est présentée sur la figure 2.3.

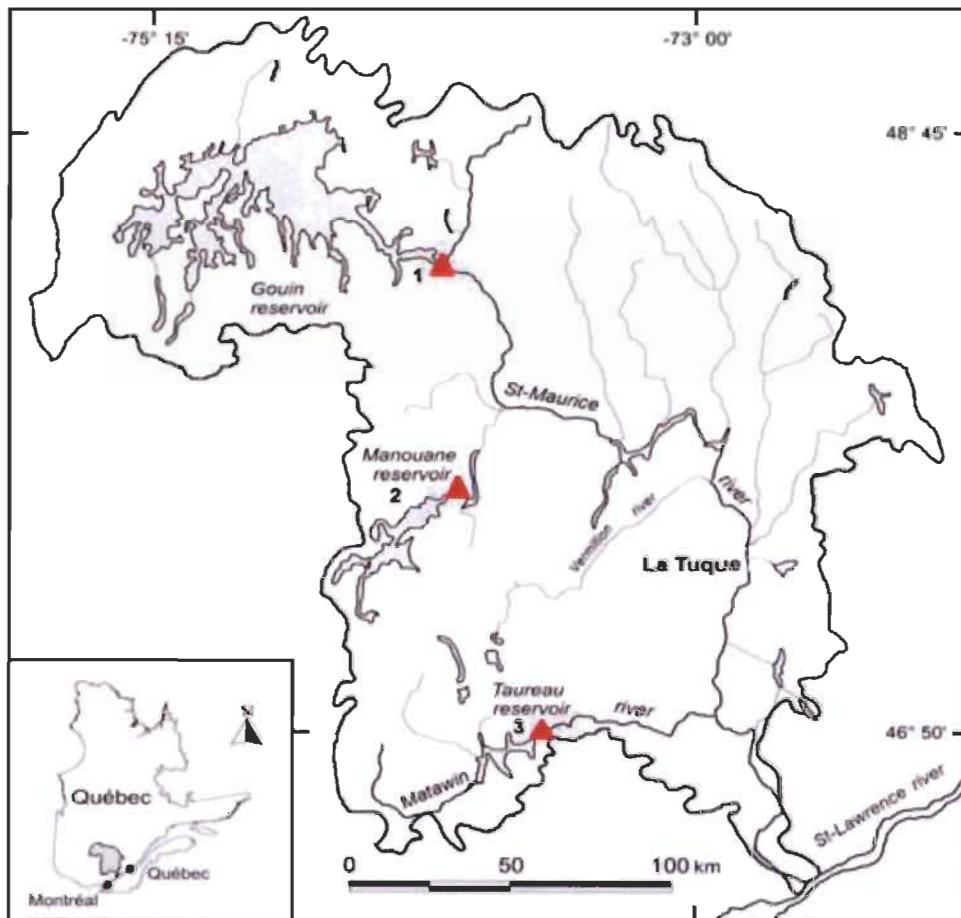


Figure 2.3 Localisation des stations d'études

Certaines des caractéristiques de ces trois barrages sont consignées dans le tableau 2.1 et leurs vues aériennes sont présentées aux figures 2.4, 2.5 et 2.6.

Tableau 2.1

Quelques caractéristiques des trois réservoirs analysés dans le bassin versant de la rivière Saint-Maurice

Réservoirs	ID	Latitude (N)	Longitude (W)	Surface drainée (km ²)	Hauteur réservoir (m)	Capacité totale ($\times 10^6$ m ³)
Gouin	02NA001	48°20'10''	74°03'31''	9473	24,2	8570
Châteauvert	02NB001	47°45'31''	73°53'37''	3060	15	270
Taureau	02NF005	46°51'53''	73°38'59''	4070	25	31



Figure 2.4 Vue aérienne du réservoir Gouin sur la rivière Saint-Maurice.



Figure 2.5 Vue aérienne du réservoir Châteauvert sur la rivière Manouane.



Figure 2.6 Vue aérienne du réservoir Taureau sur la rivière Matawin.

Il convient de souligner que malgré la différence de leurs tailles, les trois réservoirs induisent tous l'inversion du cycle hydrologique naturel des débits. En effet, ces réservoirs ont été construits à la tête des bassins versants dans le but d'alimenter en eau les centrales hydroélectriques situées en aval. On y stocke ainsi l'eau provenant de la fonte des neiges au printemps pour la relâcher pendant la saison hivernale (saison de froid et besoin énergétique). Ce phénomène se traduit alors par une inversion totale du cycle naturel des débits. On observe des débits minimums pendant le printemps tandis que les débits maximums surviennent en hiver (Figure 2.7).

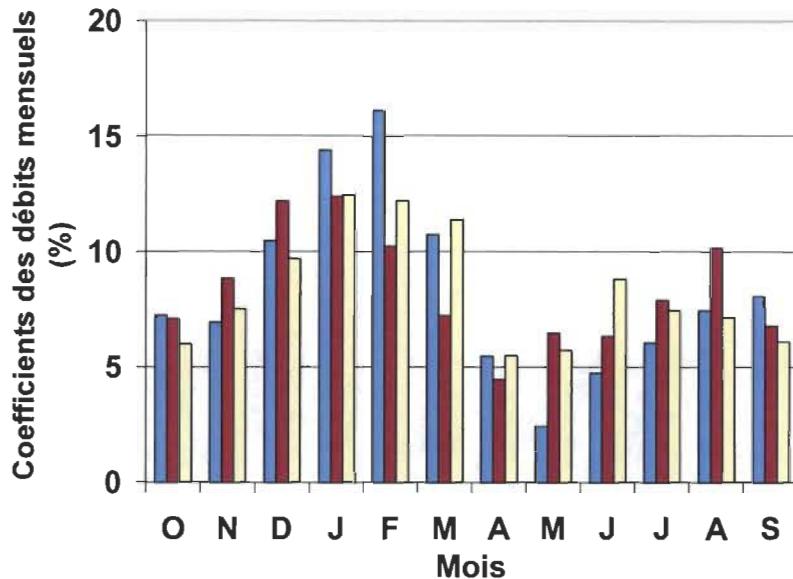


Figure 2.7 Coefficients d'écoulement mensuel (%) en aval des réservoirs (1934-2008).
Bleu = Gouin; rouge = Manouane; jaune = Matawin.

En aval des réservoirs, l'écoulement temporaire engendré par ce système hydrologique inversé correspond à l'exondation de plus de 70 % de la superficie du lit mineur de la rivière, cette exondation est représentée sur la figure 2.8.



Figure 2.8 Écoulement intermittent en aval du barrage Matawin en juin 2003 dans un tronçon caillouteux.

2.3 Sources de données

Les données des débits mesurés avant 1994 ont été extraites du CD-ROM (2004) d'Environnement Canada et celles mesurées après cette année ont été aimablement communiquées par Hydro-Québec. Afin de mieux comparer les données de ces trois réservoirs, les données mesurées sur une période commune (1930 à 2010) ont été analysées. Il est à noter qu'en rivières naturelles, cette période inclut à la fois une phase de mesures manuelles (jusqu'aux années 1960) où les débits étaient estimés à partir d'une échelle de correspondance journalière avec les niveaux d'eau, et une phase de mesures automatiques après l'installation de capteurs. Outre les données hydrologiques, des données climatiques sont également disponibles dans le cas du bassin versant de la rivière Matawin, des données mesurées à la station de jaugeage de Saint-Michel-Des-Saints, située à environ 5 km en amont du barrage. Ces mesures hydrologiques ont débuté depuis la construction du réservoir Taureau en 1930. Concernant les données climatiques (température et précipitations), elles ont été extraites du site Web d'Environnement Canada (http://climat.meteo.gc.ca/advanceSearch/searchHistoricData_f.html, consulté en mars 2014). Quant aux données des indices climatiques, elles ont été extraites du site web de la NOAA (<http://www.esrl.noaa.gov/psd/data/climateindices/list/>), consulté en octobre 2012. Cinq indices climatiques, dont l'influence sur les variables hydroclimatiques a été déjà démontrée au Québec et au Canada, ont été retenus pour cette étude (Tableau 2.2).

Tableau 2.2
Les indices climatiques analysés

Indice climatique	Localisation du phénomène	Mode de calcul de l'indice
Oscillation atlantique multi-décennale (OAM)	Océan Atlantique Nord	Variabilité interannuelle des indices de température de surface de l'océan Atlantique Nord
Oscillation arctique (OA)	Hémisphère Nord extratropicale	Différence des pressions d'une année à l'autre entre le pôle Nord et le parallèle de 45°N
Oscillation Nord-Atlantique (ONA)	Zone nord-atlantique extratropicale	Différence des pressions entre le sud (péninsule ibérique) et le nord (Islande) du bassin nord-atlantique
Oscillation pacifique décennale (OPD)	Océan Pacifique Nord (au 20°N)	Variation interannuelle des indices de température de surface de l'océan Atlantique Nord
Oscillation austral (OAU)	Océan Austral tropical	Variation mensuelle de la différence de pressions entre le Pacifique Austral occidental Darwin (Australie), et le Pacifique Austral central (Tahiti)
Oscillation pacifique nord-atlantique (OPNA)	Pacifique Nord-Atlantique	Mesure de la réponse atmosphérique à une anomalie de température de surface de mer chaude dans la partie centrale du Pacifique équatorial

2.4 Analyses statistiques

2.4.1 Séries statistiques et variables analysées

2.4.1.1 Séries des caractéristiques de l'écoulement intermittent

Analyse spatiale

Les caractéristiques de l'écoulement intermittent sur lesquelles une analyse spatiale est appliquée sont les suivantes :

- **La magnitude :** représentée par la moyenne saisonnière du débit de l'écoulement intermittent pendant la période végétative de 1930 à 2010 (l/s/km^2).
- **La fréquence :** représentée par la moyenne saisonnière du nombre de jours avec écoulement intermittent pendant la période végétative de 1930 à 2010.
- **La durée :** correspond à la moyenne du nombre de jours successifs avec écoulement intermittent sur la période 1930-2010.

Analyse temporelle

Les séries statistiques des caractéristiques de l'écoulement intermittent retenues pour une analyse temporelle ont été constituées comme suit :

Pour chaque réservoir, pendant la période végétative s'étalant du premier avril au 31 septembre, et de 1930-2010, les pourcentages de chaque caractéristique ont été calculés :

- **La magnitude (%)** correspond à la somme des données journalières de débits apportés par l'écoulement intermittent par rapport au volume d'eau total, exprimée en pourcentage ($\text{Volume É.I total/volume total} \times 100$).
- **La fréquence (%)** correspond à la somme des données journalières du nombre total de jours avec écoulement intermittent par rapport au nombre total de jours

de la période végétative, exprimée en pourcentage (Nombre de jours É.I/nombre total de jours) × 100.

Cette transformation en pourcentage était nécessaire pour pouvoir appliquer le test de Lombard qui, précisons-le, peut présenter certaines limites dues à la nature discrète des variables.

Séries des variables climatiques (Réservoir Taureau)

Concernant les séries des variables climatiques (températures et précipitations journalières) qui, rappelons-le, sont seulement disponibles dans les cas du réservoir Taureau, deux types de séries ont été constitués :

- Le type de séries composées des données climatiques de la saison printemps-été (d'avril à septembre) de la même année que celle des données des débits.
- Le type de séries constituées des données climatiques d'hiver et l'automne de l'année précédente que celle des données des débits.

Pour chaque type de séries (automne/hiver et printemps/été), et pour chaque variable climatique (températures et précipitations), trois séries ont été obtenues. Elles sont résumées dans le tableau 2.3.

Tableau 2.3

Séries des variables climatiques dans le bassin versant de la rivière Matawin

Températures journalières °C (1930-2010)	Précipitations journalières mm (1930-2010)
Températures moyennes	Pluie totale
Températures maximales moyennes	Neige totale
Températures minimales moyennes	Précipitations totales

Séries des indices climatiques 1931-2008

Quant aux cinq indices climatiques définis précédemment (OAM, OA, ONA, OPD, OAU), trois séries ont été constituées, à savoir :

- octobre-septembre (l'ensemble de l'année hydrologique)
- avril-septembre (la période végétative)
- octobre-mars (le reste de l'année hydrologique)

2.4.2 Méthodes d'analyses statistiques

2.4.2.1 Analyse de la variabilité spatiale des caractéristiques de l'écoulement intermittent

Pour déterminer l'influence de la taille des bassins versants ainsi que la taille des réservoirs sur les caractéristiques de l'écoulement intermittent, la comparaison des moyennes des caractéristiques de l'écoulement intermittent observé pendant la période 1930-2010 de ces trois réservoirs a été réalisée au moyen du test paramétrique ANOVA et le test non paramétrique de Kruskal-Wallis, et ce, dans le cas des deux caractéristiques : magnitude et fréquence. Il convient de noter que ce dernier test (Kruskal-Wallis) intervient aussitôt que le réservoir Taureau est concerné, et ce, en raison de l'absence de normalité dans le cas de ses données. Pour la caractéristique « durée », c'est le test de Khi-carré qui a été appliqué. Il permet de comparer les fréquences de durée de l'écoulement intermittent en aval de l'ensemble des réservoirs.

2.4.2.2 Analyse de la variabilité temporelle des caractéristiques de l'écoulement intermittent

Tendance à long terme (test de Mann-Kendall)

Cette méthode permet de décrire la tendance significative à long terme d'une série temporelle (augmentation/diminution). Dans notre cas, le test bilatéral est utilisé pour comparer la tendance à long terme des deux caractéristiques de l'écoulement

temporaire : magnitude et fréquence. L'hypothèse nulle H_0 envisage l'absence de toute tendance significative, contrairement à l'hypothèse alternative H_1 qui, elle, stipule une augmentation ou diminution significative dans le temps.

Par ailleurs, après vérification avec le test ACF dans Systat (Auto Correlation Function), ces deux caractéristiques ne présentent aucune autocorrélation en aval de trois réservoirs. Le test de Mann-Kendall a été détaillé dans Timo *et al.* (2002).

Variabilité interannuelle (test de Lombard)

Pour procéder à l'analyse de la variabilité interannuelle des caractéristiques de l'écoulement intermittent, le test de Lombard a été utilisé. Le choix de cette méthode s'explique par le fait que contrairement aux autres méthodes telles que la régression linéaire et le test de Mann-Kendall, le test de Lombard permet de déterminer la nature abrupte ou progressive du changement de la moyenne ou de la variance. Cette méthode a été décrite notamment par Lombard (1987) et ses applications en hydrologie et en géomorphologie peuvent être lues dans Assani *et al.* (2011) ainsi que Quessy *et al.* (2012).

Au niveau de signification de 5 %, si $S_n > 0,0403$, la moyenne de la série a changé de façon significative. S_n étant la valeur statistique théorique définissant le seuil critique de significativité de 5 % correspondant à la valeur 0,0403 du test de Lombard. À noter que le test est adéquat pour détecter tous les types de changements induits par le modèle, incluant les changements abrupts. Une étude complète sur la puissance et la robustesse de S_n et de cinq autres tests de statistiques a été effectuée par Quessy *et al.* (2011). Au niveau 5 % de signification, on conclut que la moyenne des séries change significativement à chaque fois que $S_n > 0,0403$ (Assani *et al.*, 2011). La finalité est de comparer la stationnarité des caractéristiques de l'écoulement intermittent des trois réservoirs. Il est à préciser que les séries de données sur lesquelles le test de Lombard a été appliqué dans cette étude sont celles de la magnitude et de la fréquence de l'écoulement intermittent.

2.4.2.3 Analyse de corrélation

Analyse de la corrélation simple entre les caractéristiques des réservoirs et les caractéristiques de l'écoulement intermittent

Pour déterminer les facteurs qui influencent la variabilité spatiale des caractéristiques de l'écoulement intermittent (magnitude, fréquence et durée moyenne) en aval des réservoirs, ces caractéristiques ont été corrélées à celles des réservoirs (hauteur du barrage, superficie du bassin versant drainé par le barrage, la capacité totale de la retenue et la superficie du réservoir) au moyen de la méthode du coefficient de corrélation linéaire simple (coefficient de Pearson). Celle-ci mesure l'intensité du degré de liaison (linéaire) entre deux variables quantitatives.

Analyse de la corrélation simple entre les variables climatiques et les caractéristiques de l'écoulement intermittent (Taureau)

Pour déterminer l'influence des variables climatiques (précipitations, températures) sur la variabilité temporelle des caractéristiques de l'écoulement intermittent (magnitude et fréquence), on a corrélé ces caractéristiques aux variables climatiques au moyen de la même méthode précédente. Celle-ci a été appliquée aux types des séries de variables climatiques définies précédemment : printemps/été et automne/hiver dans le cas des températures et précipitations d'un côté, et la magnitude et fréquence pendant la période végétative de l'autre. Il est à rappeler que seules les données du réservoir Taureau sont disponibles pour cette analyse, et celle-ci est effectuée après normalisation des données.

Analyse de la corrélation canonique entre les indices climatiques et les caractéristiques de l'écoulement intermittent

Pour déterminer l'influence des indices climatiques sur la variabilité temporelle de la magnitude et de la fréquence de l'écoulement intermittent, une analyse canonique entre ces deux caractéristiques de l'écoulement et les cinq indices climatiques a été effectuée. Il est à mentionner que l'utilisation des indices climatiques pour vérifier

l'influence du climat se justifie par l'absence des données de températures et précipitations pour l'ensemble des réservoirs.

L'analyse des corrélations canoniques consiste à créer des paires de combinaisons linéaires entre chaque groupe de variables : variables dépendantes et variables indépendantes appelées variables canoniques, de manière à ce que la corrélation entre les variables d'une même paire soit maximisée et que la corrélation entre les variables de deux paires différentes soit nulle. Les analyses sont effectuées à partir du logiciel SAS.

Dans le cas de la présente étude, les trois barrages sont analysés simultanément. Les variables dépendantes concernées sont la magnitude (en %) et la fréquence (en %) de l'écoulement intermittent le long de la période végétative (avril à septembre) de 1930 à 2010. Quant aux variables indépendantes, ce sont les séries de données des cinq indices climatiques régissant le climat nord-américain (AMO, AO, PDO, NAO, SOI), relevées de 1930 à 2010 pendant la période végétative.

CHAPITRE III

RÉSULTATS ET DISCUSSION

3.1 Comparaison des caractéristiques de l'écoulement temporaire en aval des trois barrages

3.1.1 Analyse de la variabilité spatio-temporelle de la magnitude de l'écoulement intermittent en aval des réservoirs

3.1.1.1 *Analyse de la variabilité spatiale*

Au moyen du test de Kruskal-Wallis, une comparaison des valeurs moyennes de la magnitude en aval des réservoirs a été réalisée. L'ensemble de ces valeurs est consigné dans le tableau 3.1. Après cette première comparaison entre les trois barrages, une différence significative a été révélée, ce qui a été suivi d'une comparaison multiple au moyen des tests *t* de Student et de Mann-Witney. Les valeurs de p-values obtenus avec les différents tests sont consignées dans le tableau 3.2.

Tableau 3.1

Comparaison des moyennes de la magnitude de l'écoulement temporaire en aval de trois réservoirs (1930-2010)

Barrages	Magnitude moyenne (l/s/km ²)	Écart-type
Gouin	141,2	175,32
Châteauvert	9,6	13,49
Taureau	110,4	79,96

L'ensemble des tests appliqués a démontré qu'il existe une différence significative entre les valeurs moyennes de la magnitude en aval des trois réservoirs au seuil de signification de 5 % (Tableau 3.2). Ainsi, la magnitude moyenne la plus élevée (141 l/s/km²) est observée en aval du plus grand réservoir à savoir le barrage Gouin, suivie par celle du réservoir Taureau avec une magnitude moyenne de 110 l/s/km², et

enfin celle du réservoir Châteauvert qui enregistre la plus faible magnitude moyenne de 9 l/s/km².

Tableau 3.2

Résultats des tests de comparaison spatiale de la magnitude

Barrages	Test	p-value
Entre les trois barrages	Kruskal-Wallis	0,000
Gouin-Châteauvert	Student	0,009
Gouin-Taureau	Mann-Wintney	0,000
Châteauvert-Taureau	Mann-Wintney	0,000

Toutes les valeurs de p-values sont statistiquement significatives au seuil de 0,1 %.

3.1.1.2 Comparaison de la variabilité temporelle de la magnitude de l'écoulement intermittent en aval de trois réservoirs

Analyse de la tendance à long terme au moyen du test de Mann-Kendall

Les résultats d'analyse de la tendance à long terme au moyen de la méthode de Mann-Kendall sont représentés dans le tableau 3.3.

Tableau 3.3

Résultats du test de Mann-Kendall appliqué à l'analyse de la variabilité temporelle de la magnitude de l'écoulement intermittent en aval de trois réservoirs (1930-2010)

Résultats	Z	p-value
Gouin	4,21	0,00003
Châteauvert	1,17	0,2434
Taureau	-0,58	0,5608

Les valeurs de Z statistiquement significatives au seuil de 5% apparaissent en gras.

D'après les résultats consignés dans le tableau 3.3, seul le réservoir Gouin présente une tendance à long terme positive statistiquement significative de la magnitude. Ainsi, les apports de l'écoulement intermittent en aval de ce réservoir ont significativement augmenté dans le temps.

Stationnarité (Lombard)

Le test de Lombard a été appliqué pour détecter la nature et les dates de rupture des moyennes. Les résultats obtenus sont représentés dans le tableau 3.4 et à la figure 3.1.

Tableau 3.4

Résultats du test de Lombard appliquée à l'analyse de la variabilité temporelle de la magnitude de l'écoulement intermittent en aval de trois réservoirs (1930-2010)

Résultats	S_n	t1-t2
Gouin	0,2434	1989-1990
Châteauvert	0,0076	-
Taureau	0,0418 (var)	1986-1987

S_n est la valeur statistique du test de Lombard. Les valeurs de S_n statistiquement significatives au seuil de 5 % apparaissent en gras. t1-t2 représentent respectivement l'année où la rupture de la moyenne s'amorce et celle où elle finit. (var) est inscrit pour indiquer une rupture dans la variance de la série statistique du réservoir Taureau.

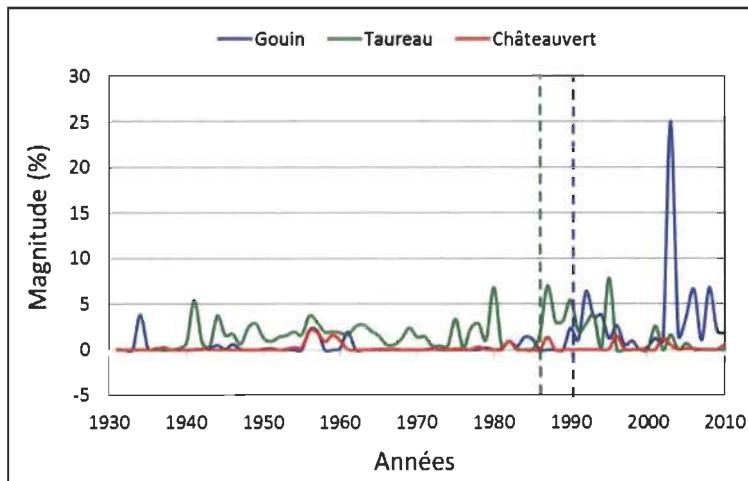


Figure 3.1 Variabilité interannuelle de la magnitude de l'écoulement intermittent en aval des réservoirs.

Les barres verticales pointillées correspondent aux dates de changement (t2) des moyennes.

Au seuil de signification de 5 %, ces résultats révèlent qu'un changement abrupt est enregistré à la fois en aval du barrage Gouin et du réservoir Taureau. Ces changements sont survenus respectivement en 1990 et 1987. Il est à constater également que dans le cas du réservoir Châteauvert, aucune rupture de la moyenne ne fut détectée.

3.1.2 Analyse de la variabilité spatio-temporelle de la fréquence de l'écoulement intermittent en aval des réservoirs

3.1.2.1 Analyse de la variabilité spatiale

Comme pour la magnitude, une comparaison a été réalisée entre les valeurs moyennes de la fréquence en aval des trois réservoirs au moyen du test de Kruskal-Wallis à la suite de quoi les tests t de Student et de Mann-Witney sont utilisés pour une comparaison multiple. Les valeurs moyennes sont présentées dans le tableau 3.5.

Tableau 3.5

Comparaison des valeurs moyennes de la fréquence de l'écoulement intermittent en aval des trois réservoirs (1930-2010)

Barrages	Nombre moyen de jours	Écart-type
Gouin	24,1	36,73
Châteauvert	58,4	42,95
Taureau	65,3	37,96

Les résultats des tests appliqués (Tableau 3.6) indiquent qu'au seuil de signification de 5 %, une différence significative existe entre les fréquences moyennes. En effet, le réservoir Taureau enregistre le nombre moyen des jours avec écoulement intermittent le plus élevé (65 jours) au cours de la période végétative comparativement à 58 et 24 jours respectivement en aval des réservoirs Châteauvert et Gouin.

Tableau 3.6

Résultats des tests de comparaison spatiale de la fréquence

Barrages	Test	p-value
Entre les trois barrages	Kruskal-Wallis	0,000
Gouin-Châteauvert	Student	0,000
Gouin-Taureau	Mann-Wintney	0,000
Châteauvert-Taureau	Mann-Wintney	0,000

Toutes les valeurs de p-values sont statistiquement significatives au seuil de 0,1 %.

3.1.2.2 Analyse de la variabilité temporelle

Analyse de la tendance à long terme de la fréquence de l'écoulement intermittent en aval de trois réservoirs au moyen de la méthode de Mann-Kendall (1930-2010)

Les résultats obtenus après l'application du test de Mann-Kendall (Tableau 3.7) révèlent une tendance positive significative de la fréquence en aval du barrage Gouin. En revanche, pour le réservoir Taureau, une tendance significative opposée (négative) a été détectée. Cette tendance négative traduit une diminution significative du nombre de jours avec écoulement temporaire en aval de ce barrage de 1930 2010. Enfin, aucune tendance à long terme significative n'a été observée en aval du réservoir Châteauvert.

Tableau 3.7

Résultats du test de Mann-Kendall

Résultats	Z	p-value
Gouin	4,36	$1,30 \times 10^{-5}$
Châteauvert	1,72	0,0845
Taureau	-3,27	0,0011

Les valeurs de Z sont statistiquement significatives au seuil de 5 % apparaissent en gras.

Analyse des ruptures des moyennes de la fréquence de l'écoulement intermittent en aval de trois réservoirs au moyen du test de Lombard (1930-2010)

Selon les résultats du test de Lombard (Tableau 3.8), les trois réservoirs ont connu des ruptures abruptes des moyennes de la fréquence de l'écoulement intermittent au cours de la période 1930-2010.

Tableau 3.8

Résultats du test de Lombard appliqué à la variabilité temporelle de la fréquence de l'écoulement intermittent en aval de trois réservoirs (1930-2010)

Résultats	S_n	t1-t2
Gouin	0,3006	1980-1982
Châteauvert	0,0451	1954-1955
Taureau	0,1316	1995-1996

S_n est la valeur critique (score) calculée sur les séries analysées. Les valeurs de S_n statistiquement significatives au seuil de 5 % apparaissent en gras. t1-t2 représentent respectivement l'année où la rupture de la moyenne s'amorce et celle où elle finit.

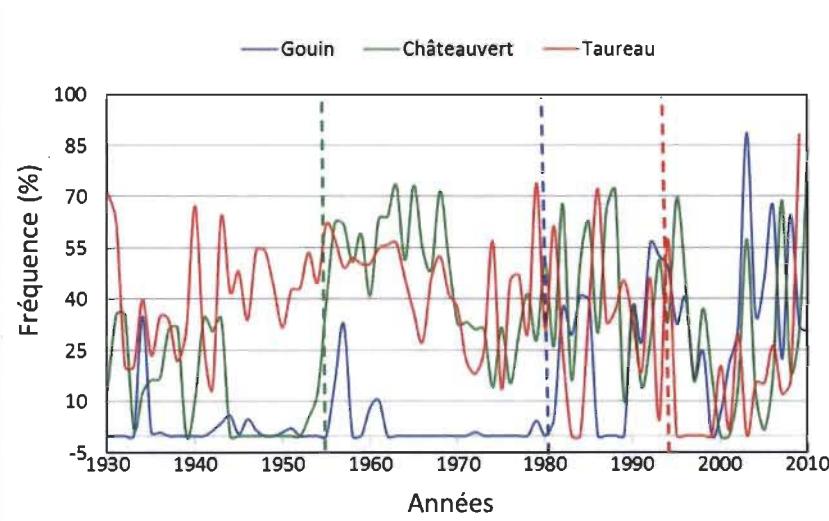


Figure 3.2 Variabilité interannuelle de la magnitude de l'écoulement intermittent en aval des réservoirs.

Les barres verticales pointillées correspondent aux dates de changement (t2) des moyennes.

Quoique toutes les trois ruptures soient abruptes, elles sont cependant asynchrones. En effet, la rupture de la moyenne est survenue en 1982 en aval du barrage Gouin, en 1955 en aval de Châteauvert et en 1996 en aval du réservoir Taureau. Il est à noter que le nombre total maximal des jours avec écoulement intermittent est 154 jours en aval du réservoir Châteauvert, 161 jours en aval du réservoir Taureau et, enfin, 162 jours en aval du réservoir Gouin.

3.1.3 Analyse de la variabilité spatiale de la durée de l'écoulement intermittent en aval des réservoirs

Une comparaison spatiale des valeurs moyennes des séquences (jours consécutifs) de l'écoulement intermittent a été effectuée au moyen du test Khi-carré. Les valeurs moyennes des durées de l'écoulement intermittent sont présentées au tableau 3.9 et leurs fréquences par durée sont présentées aux figures 3.3a, 3.3b et 3.3c. Il convient d'expliquer que les pics correspondant aux épisodes d'écoulement temporaire pendant plus de 35 jours consécutifs représentent la somme de fois que ces 35 jours sont dépassés depuis 1930 à 2010. Le résultat du test Khi-2, présenté dans le tableau 3.10, montre que les trois valeurs moyennes des séquences de nombre de jours consécutifs avec écoulement intermittent sont significativement différentes en aval de trois réservoirs au seuil de signification de 5 %. Il est à noter que la séquence maximale du nombre de jours consécutifs avec écoulement intermittent correspond à 158 jours en aval du barrage Gouin, à 155 jours en aval du barrage Taureau et enfin à 152 jours dans le cas du réservoir Châteauvert.

Tableau 3.9

Valeurs des moyennes de la durée de l'écoulement intermittent en aval des réservoirs (1930-2010)

Barrages	Durée moyenne (jours consécutifs)	Écart-type
Gouin	40,2	111,63
Châteauvert	97,8	232,02
Taureau	128,4	244,04

Tableau 3.10

Comparaison des durées moyennes de l'écoulement intermittent en aval de trois réservoirs. Résultats du test Khi-2

ddl	Khi-2	Seuil critique
34	1066	48,60

ddl = degré de liberté. Valeur de Khi-carré statistiquement significative au seuil de 1%.

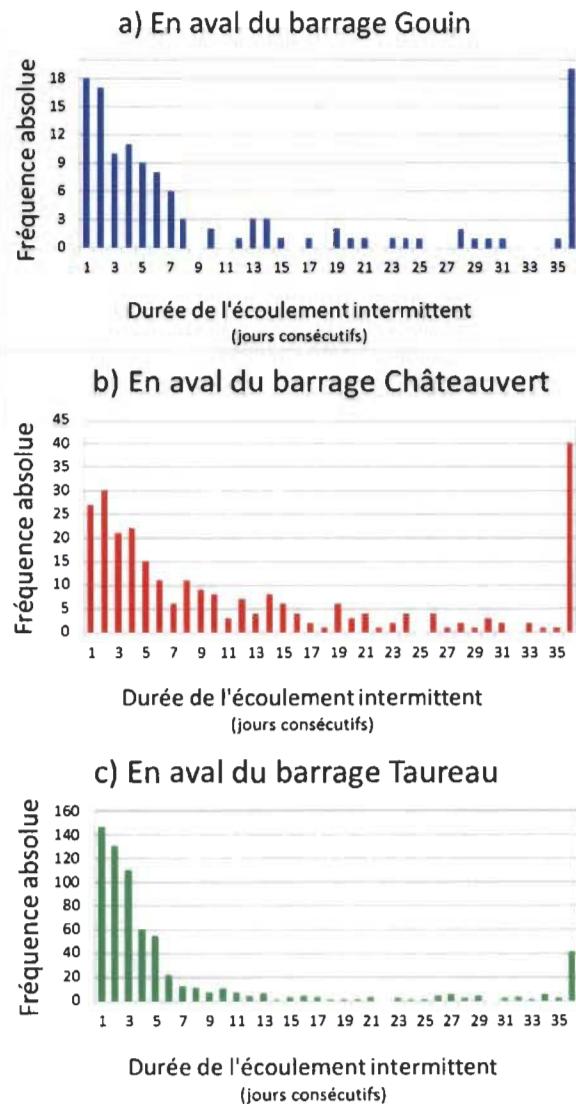


Figure 3.3 Fréquences absolues des durées de l'écoulement intermittent en aval de trois réservoirs (1930-2010).

3.2 Relation entre la fréquence de l'écoulement intermittent et les débits moyens journaliers pendant la période végétative en aval de trois réservoirs

Afin de déterminer l'impact de la fréquence de l'écoulement intermittent sur les débits moyens journaliers de la période végétative en aval de trois réservoirs, on a calculé une corrélation entre les deux variables. Les résultats sont présentés sous forme des droites de régression aux figures 3.4a, 3.4b et 3.4c.

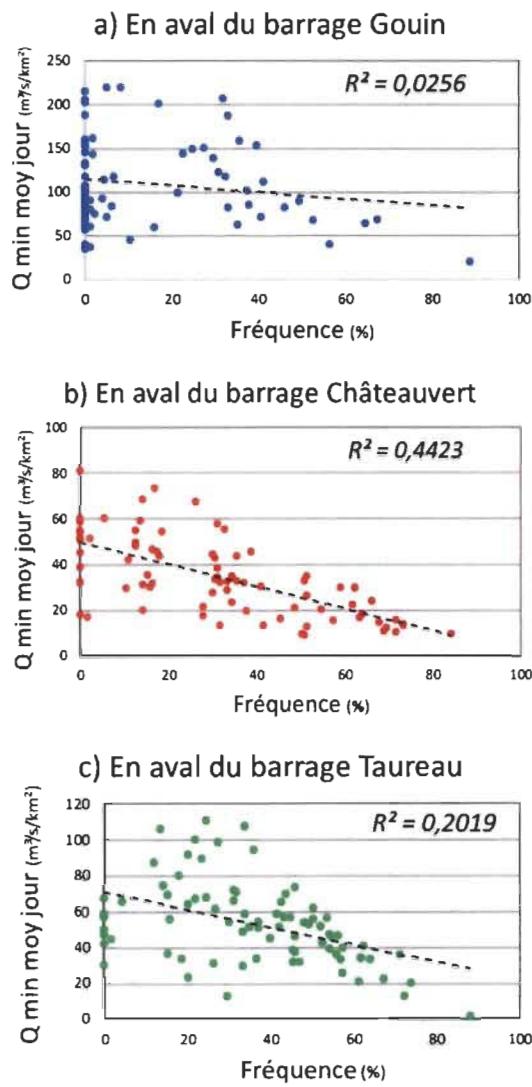


Figure 3.4 Relation entre la fréquence de l'écoulement intermittent et les débits moyens journaliers pendant la période végétative en aval de trois réservoirs (1930-2010).

Étant donné que le coefficient de corrélation équivaut à la racine carrée du coefficient de détermination (R^2), il s'ensuit que les coefficients de corrélation sont statistiquement significatifs en aval des réservoirs Châteauvert ($r = -0,6651$) et Taureau ($r = -0,4493$) au seuil de 5 %. Ces coefficients sont tous négatifs. Ainsi, l'augmentation de la fréquence de l'écoulement intermittent provoque une diminution des débits moyens journaliers en aval de ces deux réservoirs comme le démontrent clairement les droites de régression dont les pentes sont négatives. En aval du réservoir Gouin, cette influence de la fréquence de l'écoulement intermittent n'est pas statistiquement significative.

3.3 Analyse des facteurs qui influencent la variabilité spatio-temporelle des caractéristiques d'écoulement intermittent en aval de trois réservoirs

3.3.1 Analyse des facteurs de la variabilité spatiale

On a calculé les coefficients de corrélation entre les trois caractéristiques de l'écoulement intermittent (magnitude, fréquence et durée) et les caractéristiques de trois réservoirs. Les valeurs de ces coefficients de corrélation sont présentées au tableau 3.11. Il ressort de ce tableau qu'aucun coefficient de corrélation n'est statistiquement significatif même au seuil de 10 % malgré des valeurs de coefficients de corrélation parfois $> 0,900$. Même en utilisant des méthodes statistiques non paramétriques (tau de Kendall et coefficient de rang de Spearman), aucun coefficient de corrélation n'est statistiquement significatif. Cette absence de corrélation serait due à la faible taille d'échantillon (trois réservoirs seulement).

Tableau 3.11

Coefficients de corrélation calculés entre les caractéristiques de l’écoulement temporaire et les caractéristiques de trois réservoirs

Caractéristiques	Hauteur du barrage (H) en m	Superficie du bassin versant en km ²	Capacité de retenue (m)	Superficie du réservoir en ha
Magnitude	0,9283	0,5844	0,5415	0,4824
Fréquence	-0,4246	-0,8438	0,8081	0,8467
Durée	-0,2540	-0,7329	0,9012	0,9289

Aucun coefficient de corrélation n'est statistiquement significatif au seuil de 10 % (n = 3).

3.3.2 Analyse des facteurs de variabilité temporelle

3.3.2.1 *Analyse de la relation entre les variables climatiques et les caractéristiques de l’écoulement intermittent*

Rappelons que cette analyse se limite seulement en aval du réservoir Taureau pour les raisons qu'on a déjà exposées dans la partie méthodologique. Les températures et les précipitations ont été corrélées à la magnitude et à la fréquence de l’écoulement intermittent en aval de ce réservoir. Les valeurs des coefficients de corrélation sont présentées au tableau 3.12. Il ressort de ce tableau qu'il existe une relation négative significative entre la magnitude et les précipitations totales automno-hivernales. Plus les précipitations augmentent, la quantité totale des débits < 1 l/s/km² diminue, car les débits supérieurs à ce seuil augmentent. Par ailleurs, la caractéristique fréquence est négativement corrélée à la fois aux pluies totales de la période printemps-été et aux précipitations totales des deux périodes couvrant l'ensemble de l'année hydrologique.

Quant à la variable climatique température journalière, qu'elle soit moyenne, minimale ou maximale, aucune corrélation n'a été trouvée avec les deux caractéristiques de l’écoulement intermittent, et ce, aussi bien pendant la période végétative que la saison automno-hivernale.

Tableau 3.12

Corrélation entre les caractéristiques de l'écoulement temporaire avec les précipitations en aval du réservoir Taureau (1930-2010)

Variables	Magnitude		Fréquence	
	Aut-1/Hiv	Print/Été	Aut-1/Hiv	Print/Été
Pluies tot	-0,0297	-0,1976	+0,1177	-0,3095
Neiges tot	0,0638	2,1741	-0,1552	+0,0141
Précipitations tot	-0,2441	-0,2040	-0,2397	-0,3023
Temp Moy	-0,0626	0,0715	-0,0812	-0,0173
Temp Moy Max	-0,0904	0,0198	-0,1148	-0,1077
Temp Moy Min	0,0435	0,0086	+0,064	-0,0282

Les valeurs des coefficients de corrélation statistiquement significatives au seuil de 5 % sont surlignées en gras.

3.3.2.2 Analyse de la relation entre les indices climatiques et les caractéristiques de l'écoulement intermittent

Dans le but d'analyser la relation entre le climat et les caractéristiques de l'écoulement temporaire (magnitude et fréquence), l'analyse canonique des corrélations a été réalisée. Rappelons que trois périodes ont été choisies pour cette analyse : avril-septembre, octobre-mars et octobre-septembre. Les détails des résultats obtenus sont présentés dans les tableaux (Annexe A). Il est à préciser que la période qui présente la plus forte corrélation entre les variables indépendantes (indices climatiques) et les variables dépendantes (magnitude et fréquence) est celle correspondant à la période végétative (avril à septembre) (Tableau 3.13). Néanmoins, les trois périodes analysées présentent les mêmes corrélations à l'exception de la période « octobre-mars » qui présente une corrélation positive en plus, entre la magnitude et l'indice AMO. Il ressort du tableau 3.13 que V1 est corrélé à W1 et V2 l'est à W2. Sur la base de ces considérations, la fréquence de l'écoulement temporaire est fortement corrélée négativement à V1 et la magnitude l'est aussi à V2. Quant aux indices climatiques, NAO est fortement corrélé positivement à W1 et SOI, à W2. Il s'ensuit que la fréquence est corrélée négativement à NAO et la magnitude l'est à SOI.

Tableau 3.13

Coefficients canoniques de structure calculés entre les caractéristiques de l’écoulement temporaire (magnitude et fréquence) et les indices climatiques (d’avril à septembre) en aval de trois réservoirs pendant la période 1930-2010

Variables	V1	V2	W1	W2
Magnitude	0,4038	-0,9149		
Fréquence	-0,9940	-0,1097		
AMO			-0,0331	0,1840
AO			0,6983	0,1646
NAO			0,9268	0,2094
PDO			-0,0066	0,6017
SOI			-0,1390	0,6970
VE				

VE = variance expliquée (%).

Les valeurs des coefficients de structure statistiquement significatives les plus élevées apparaissent en gras.

3.4 Discussion

L’analyse de l’ampleur de l’écoulement temporaire au Québec s’est basée sur l’analyse des variabilités spatiale et temporelle de trois caractéristiques de cet écoulement; à savoir : magnitude, fréquence et durée, et ce, en aval de trois réservoirs : Gouin, Taureau et Châteauvert.

L’analyse de la variabilité spatiale de la caractéristique magnitude représentée par l’apport de l’écoulement temporaire à l’écoulement total pendant la période végétative (avril-septembre) a révélé une différence significative entre l’ensemble des barrages analysés. En effet, le taux de contribution de l’écoulement temporaire varie entre 0,20 et 1,53 % en aval des trois réservoirs. Ces faibles pourcentages pourraient être expliqués par le fait que la période végétative correspond à une période de stockage d’importantes quantités d’eau issues de la fonte des neiges au printemps et des pluies en été dans les réservoirs. Rappelons que ce stockage s’explique par l’absence de ruissellement des

eaux en hiver, saison pendant laquelle la production de l'énergie hydroélectrique est très importante.

Quant à la deuxième caractéristique fréquence, définie comme le rapport entre le nombre de jours avec écoulement intermittent avec le nombre total de jours, elle varie significativement entre 24 (Gouin) et 65 jours (Taureau) correspondant respectivement à 13 et 36 % des jours de la période végétative. Ce nombre de jours relativement élevé, conjugué à une magnitude faible (< 2 %), nous renseigne sur des débits minimums quasi inexistantes pendant plusieurs jours. En effet, les débits en aval de ces réservoirs se rapprocheraient plus de 0 l/s/km² que du seuil fixé de 1 l/s/km² durant les journées concernées.

Pour la troisième caractéristique de l'écoulement intermittent, la durée correspondant aux périodes de persistance de celui-ci, fluctue en moyenne entre 40 jours en aval du réservoir Gouin, 97 jours pour le barrage Châteauvert et 128 jours consécutifs en aval de Taureau. Il est à noter que pendant les années particulièrement sèches, la période connaissant des journées avec débit spécifique inférieur à 1 l/s/km², peuvent se prolonger jusqu'à dépasser les 150 jours successifs soit cinq mois. Or, pendant la période végétative, les débits sont généralement les plus élevés, surtout au printemps au moment de la fonte des neiges, dans les rivières naturelles. Il convient alors de souligner l'ensemble des impacts probables non seulement sur le plan écologique touchant les communautés ripariennes, aquatiques et semi-aquatiques, mais aussi sur les plans hydrologique, géochimique et morphologique.

Par ailleurs, les facteurs influençant la variabilité spatiale de l'écoulement temporel et son ampleur sont d'ordre naturel, mais aussi anthropique. Outre le mode de gestion qui conditionne directement la quantité d'eau en aval des réservoirs, plus important encore, l'empreinte de l'homme s'exerce sur la taille de ces derniers. Cependant, hormis l'importance de cette variable (taille des réservoirs), son influence n'a pas été mise en évidence statistiquement dans cette étude et il en va de même pour la superficie des bassins versants, et ce, malgré que les coefficients de corrélations avec les

caractéristiques de l'écoulement temporaire soient élevés (0,9), ce qui s'expliquerait par la faible taille de l'échantillon analysé.

Concernant l'analyse de la variabilité temporelle de la magnitude et de la fréquence de l'écoulement intermittent, elle s'est révélée hétérogène et asynchrone en aval des trois réservoirs. La variabilité temporelle de la magnitude a révélé une hausse significative en aval du réservoir Gouin. Cette hausse est survenue en 1990, mais aucune autre rupture de la moyenne n'a été détectée en aval des réservoirs Taureau et Châteauvert. Dans le cas du réservoir Gouin, la hausse survenue à partir de la décennie 90 coïncide avec la fin de la période du transport du bois par flottage connu sous le nom de « drave ». En effet, avant cette date, le bois était surtout transporté dans les rivières, et ce, dans le but d'alimenter les industries, principalement papetières, construites aux abords de la confluence de la rivière Saint-Maurice avec le fleuve Saint-Laurent. Par ailleurs, d'autres activités ont vu le jour en aval du barrage Gouin pendant cette même décennie, notamment les activités récréotouristiques telles que la voile et le rafting pratiqués pendant la période chaude. Dans le but de fournir les volumes d'eau, relativement élevés, nécessaires pour ces activités, vers la fin des années 1980 et le début des années 1990, Hydro-Québec a mis au point un système de gestion permettant l'augmentation des niveaux d'eau de la rivière Saint-Maurice pendant cette période d'achalandage touristique correspondant surtout aux fins de semaines.

Par ailleurs, la fréquence a enregistré une tendance significative en aval de trois réservoirs. En effet, une hausse significative est observée en aval des réservoirs Gouin et Châteauvert respectivement en 1982 et 1955, tandis qu'une baisse significative a été détectée en 1996 en aval du réservoir Taureau. Bien que les causes exactes des hausses enregistrées demeurent inconnues, on pourrait supposer dans le cas du réservoir Gouin que celle-ci serait probablement due à la diminution des quantités de neige pendant la décennie 80 (Guerfi *et al.*, 2015 et Brown *et al.*, 2010). Quant à celle enregistrée en aval du réservoir Châteauvert en 1955, elle est difficile à l'associer à un facteur naturel précis. Outre ces deux hypothèses, le changement dans la politique du mode de gestion des réservoirs pourrait également être à l'origine de ces hausses.

Concernant la baisse en aval du réservoir Taureau, elle serait due non pas à l'atténuation du phénomène d'écoulement intermittent, mais à l'absence de changement du débit printanier en aval, et cela en dépit de son augmentation en amont à partir des années 70 (Assani *et al.*, 2011).

Outre le mode de gestion des barrages qui s'ajuste à travers le temps, la variabilité temporelle est principalement due à des facteurs climatiques. En effet, l'influence des variables climatiques (température et précipitation) sur les caractéristiques de l'écoulement temporaire a été testée en aval du réservoir Taureau seulement en raison de l'absence de données en aval ou en amont de deux autres réservoirs. Dans le cas des précipitations, une corrélation significative à tendance négative a été détectée. Pour la magnitude de l'écoulement intermittent, seules les précipitations totales de la période automno-hivernale présentent une corrélation significative. Effectivement, quand les précipitations totales augmentent pendant cette période, la magnitude de l'écoulement intermittent diminue au cours de la période végétative, car à cause des précipitations importantes, la quantité d'eau devient beaucoup trop élevée une fois les saisons printemps et été arrivées. Ainsi, en aval des réservoirs, on lâchera des débits supérieurs au débit spécifique 1 l/s/km^2 , ce qui diminuera l'apport de l'écoulement intermittent par rapport à l'écoulement total (magnitude). En ce qui concerne la fréquence, elle est corrélée négativement à la fois aux précipitations totales des deux périodes automne/hiver et printemps-été, mais aussi aux quantités de pluies totales pendant la période végétative. En effet, lors des années très sèches, la quantité d'eau lâchée en aval du barrage diminue, entraînant ainsi une augmentation de la fréquence de jours présentant des débits spécifiques inférieurs à 1 l/s/km^2 . En revanche, lorsque la quantité de précipitations totales augmente pendant la période automno-hivernale, les débits supérieurs à 1 l/s/km^2 sont maintenus pendant de nombreux jours, réduisant ainsi le nombre de jours avec écoulement intermittent. Quant aux pluies de la période végétative, la corrélation existante s'explique par le fait que lors des épisodes à fortes pluies, on ne stocke pas l'eau, maintenant ainsi l'écoulement et réduisant la fréquence de l'écoulement temporaire. Il est important de noter que pendant la période végétative, l'eau n'est pas stockée dans les réservoirs, car la production de l'énergie hydroélectrique

se base exclusivement sur les précipitations pendant les deux saisons automne et hiver. Il est également à souligner que d'après les mêmes résultats, la variable température n'exerce aucune influence sur la magnitude et la fréquence de l'écoulement intermittent.

À plus grande échelle, ce sont les indices climatiques qui régissent le climat. Leur corrélation avec les caractéristiques de l'écoulement temporaire a été alors analysée au moyen de l'analyse canonique des corrélations. Par ailleurs, tel qu'il est mentionné précédemment, les températures n'exercent aucune influence sur l'écoulement temporaire, alors l'emprise des indices climatiques s'exercera sans doute via les précipitations. Les résultats de l'analyse canonique montrent que la caractéristique magnitude de l'écoulement intermittent est corrélée négativement aux indices climatiques OPD et OAU liés à l'océan Pacifique, mais aussi positivement à l'indice OAM de l'océan Atlantique. Pendant sa phase positive, l'indice OPD induit une augmentation des précipitations, notamment sous forme de pluies à cause des températures élevées, ce qui se traduit par une absence d'écoulement temporaire et donc diminution de l'apport de l'écoulement temporaire à l'écoulement total (magnitude). D'autre part, la corrélation positive de la magnitude avec l'indice OAM est due à une diminution dans les précipitations engendrées par une activité cyclonique et une diminution de la vapeur d'eau dans l'atmosphère (Guerfi *et al.*, 2015). Dans le cas de la fréquence, une corrélation négative s'est révélée avec l'indice ONA et, dans une moindre mesure, avec OA. Ces deux indices sont liés entre eux même et leur influence sur les précipitations au Québec a été documentée à plusieurs reprises dans la littérature scientifique (p. ex. Beauchamp *et al.*, 2015; Brown, 2010). En effet, dans sa phase positive, l'indice ONA engendre un hiver froid et sec au Canada (moins de précipitations). Par conséquent, le rapport entre le nombre de jours avec écoulement intermittent ($< 1 \text{ l/s/km}^2$) par rapport au nombre total de jours de la période végétative (180 jours) augmente.

L'écoulement intermittent est un phénomène hydrologique qui survient à toutes les latitudes. Cependant, dans les régions dotées de conditions climatiques humides telles que le Québec, ce phénomène ne survient jamais dans les bassins versants naturels dont

la superficie dépasse les 1000 km², et ce, même pendant les années les plus sèches. Malgré ce climat humide, certains modes de gestion de barrages créent des conditions d'écoulement semblables à celles observées en régions arides et semi-arides. En effet, en aval de ce type d'ouvrages, un écoulement temporaire ($< 1 \text{ l/s/km}^2$) peut être observé induisant à des périodes d'étiage suffisamment longues pour exposer l'ensemble des écosystèmes établis à d'importants dégâts. Par ailleurs, l'ampleur de cet écoulement temporaire en termes de magnitude, fréquence et même de la durée, mise en évidence dans cette étude, suggère un degré d'impact élevé menaçant l'intégrité écologique des écosystèmes situés en aval des réservoirs de type inversion (hydroélectrique). Il serait alors aussi judicieux qu'important de réduire significativement la fréquence et la durée de l'écoulement temporaire, mais surtout d'imposer un débit de gestion de barrages toujours supérieur ou égal aux débits réservés écologiques permettant de maintenir des écosystèmes aquatiques, semi-aquatiques et ripariens, toujours en santé.

CHAPITRE IV

CONCLUSION GÉNÉRALE

La présente étude a permis d'analyser les caractéristiques de l'écoulement intermittent en termes de magnitude, fréquence et durée pendant la période végétative, et ce, en aval de trois réservoirs de type inversion au Québec, à savoir : les réservoirs Gouin, Taureau et Châteauvert.

Afin d'analyser la variabilité spatiale de ces trois caractéristiques de l'écoulement intermittent, deux tests statistiques ont été utilisés; le test t de Student et celui de Kruskal-Wallis, et ce, dépendamment de la normalité des données. Les résultats de cette analyse ont révélé que l'ensemble des caractéristiques de l'écoulement temporaire varie significativement en aval des trois réservoirs considérés. Concernant les deux caractéristiques fréquence et durée, elles enregistrent leur ampleur maximale en aval du plus petit réservoir (Taureau). Cependant, l'analyse de corrélation entre les caractéristiques de l'écoulement et la taille de ces ouvrages n'a pas été concluante en raison de la faible taille de l'échantillon analysé.

Pour analyser la variabilité temporelle de la magnitude et de la fréquence, deux méthodes statistiques ont été appliquées. D'une part, le test de Mann-Kendall permettant de décrire la tendance à long terme d'une série temporelle, et de l'autre, le test de Lombard qui, lui, est destiné à la détection des ruptures de sa moyenne. Ces méthodes ont démontré que dans le cas de la caractéristique magnitude, celle-ci a significativement augmenté dans le temps seulement en aval du réservoir Gouin. Cette hausse est survenue en 1990. Quant à la caractéristique fréquence, les trois barrages analysés présentent une tendance significative dans le temps. Celle-ci s'est révélée positive (hausse dans le temps) en aval des réservoirs Gouin et Châteauvert, mais négative (baisse dans le temps) en aval du réservoir Taureau. Il est à préciser que

ces tendances ont été accompagnées de ruptures des moyennes des séries. Mais ces ruptures ne sont pas survenues la même année en aval de trois réservoirs.

La variabilité spatio-temporelle des caractéristiques de l'écoulement intermittent en aval de ces trois réservoirs est influencée à la fois par des facteurs anthropiques et climatiques. En ce qui concerne les facteurs anthropiques, la différence des moyennes des trois caractéristiques de l'écoulement intermittent observée en aval de ces trois réservoirs pourrait être due aux pratiques de lâchers d'eau spécifiques à chaque réservoir. De plus, la hausse significative de magnitude de l'écoulement intermittent en aval du réservoir Gouin pourrait être associée à l'accroissement des activités récréotouristiques depuis la fin de la décennie 1980 sur la rivière Saint-Maurice. La fin de cette décennie coïncide aussi à celle de la pratique de drave (transport du bois) qui fut une activité florissante depuis le 19e siècle en Mauricie. Quant aux facteurs climatiques, on a mis en évidence une corrélation négative entre la magnitude et la fréquence avec les précipitations en aval du réservoir Taureau. À l'échelle globale, l'impact du climat sur les caractéristiques de l'écoulement est régi par les indices climatiques. Leur influence a été vérifiée au moyen de l'analyse canonique des corrélations. Il ressort de cette analyse que la magnitude de l'écoulement temporaire est corrélée négativement aux indices des Oscillations pacifiques décennales (OPD) et australes (OAU). Quant à la fréquence, elle est corrélée négativement aux indices des Oscillations Atlantique-Nord (ONA) et arctiques (OA).

La contribution majeure de cette étude est de démontrer l'existence même de l'écoulement intermittent en aval des réservoirs malgré le climat humide du Québec d'une part, et caractériser cet écoulement tout en déterminant le facteur qui influence sa variabilité spatio-temporelle, d'autre part. D'un point de vue hydroécologique, il sera intéressant de déterminer les impacts écologiques de cet écoulement intermittent afin de pouvoir d'élaborer les normes des débits qui serviront à restaurer et à préserver l'intégrité écologique des tronçons qui sont affectés par cet écoulement intermittent en aval des réservoirs au Québec. Enfin, du point de vue hydroclimatique, il sera intéressant de déterminer les impacts potentiels du réchauffement climatique sur les caractéristiques

de cet écoulement intermittent au Québec. Ces impacts pourraient être intégrés dans les pratiques de gestion quotidienne des débits lâchés en aval des réservoirs.

BIBLIOGRAPHIE

- Afifi AA, Clark V (1995) Computer-aided multivariate analysis, third ed. Chapman and Hall, New-York, 505 p.
- Assani AA (2003) 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 Royale Belge de Géographie 44: 87-96.
- 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) Review Science Eau 18: 103-127.
- Assani AA, Landry R, Daigle J, Chalifour A (2011) Reservoir effects on the interannual variability of winter and spring streamflow in the St-Maurice River watershed (Quebec, Canada). Water Resources Management 25: 3661-3675.
- Beauchamp M, Assani AA, Landry R, Massicotte P (2015) Temporal variability of the magnitude and timing of winter maximum daily flows in southern Quebec (Canada). Journal of Hydrology 529: 410-417.
- Belzile L, Bérubé P, Hoang VD, Leclerc M, (1997) Méthode écohydrologique de détermination des débits réservés pour la protection des habitats du poisson dans les rivières du Québec. Report submitted by INRS-Eau and Groupe-conseil Génivar inc. to the Ministère de l'Environnement et de la Faune and Fisheries and Oceans Canada: 83 pp. + 8 annexes.
- Brown RD (2010) Analysis of snow cover variability and change in Quebec, 1948-2005. Hydrology Processes 24: 1929-1954.
- Buttle JM, Boon S, Peres DL, Spence C, Van Meerveld HJ, Whitfield PH (2012) An overview of temporary stream hydrology in Canada. Canadian Water Resources Journal 37: 279-310.
- Doering M, Uehlinger U, Rotach A, Schlaepfer DR, Tockner, K (2007) Multi-scale Characterization and Evolution of Channel Forms in Gravel-bed Rivers Earth Surface Processes and Landforms 32: 1693-1704.
- Drummond LR, McIntosh AR, Larned ST (2015) Invertebrate community dynamics and insect emergence in response to pool drying in a temporary river. Freshwater Biology 60: 1596-1612.

- Gallart F, Prat N, Gracia-Roger EM, Latron J, Rieradevali M, Llorens P, Barbera GG, Brito (2012) A novel approach to analysing the regime of temporary streams in relation to their controls on the composition and structure of aquatic biota. *Hydrology and Earth System Sciences* 16: 3165-3182.
- Graf WL (1988) Fluvial processes in Dryland rivers, Springer Series in Physical Environment 346 pp., 1988.
- Graf WL (2006) Downstream hydrologic and geomorphic effects of large dams on American rivers. *Geomorphology* 79: 336-360.
- Guerfi N, Assani AA, Mesfioui, M., Kinnard C (2015) Comparison of the temporal variability of winter daily extreme temperatures and precipitations in southern Quebec (Canada) using the Lombard and copula methods. *International Journal of Climatology*.
- Kingston DG, Lawler DW, McGregor CR (2006) Linkage between atmospheric circulation, climate and streamflow in the northern North Atlantic: research prospects. *Progress in Physical Geography Journal* 30: 143-174.
- 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 impacts 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. *Fresh Water Biology* 55: 717-738.
- Lombard F (1987) Rank tests for changepoint problems. *Biometrics* 74: 615-624.
- Marren PM, Grove JR, Webb JA, Stewardson MJ (2014) The potential for dams to impact lowland meandering river floodplain geomorphology. *Scientific World Journal* 2014: 309673.
- Matteau M, Assani AA, Mesfioui M (2009) Application of multivariate statistical analysis methods to the dam hydrologic impacts studies. *Journal of Hydrology* 371: 120-128.

- Mazouz R, Assani AA, Quessy J-F (2012) Comparison of the interannual variability of spring heavy floods characteristics of tributaries of the St. Lawrence in Quebec (Canada). *Advances Water Resources* 35: 110-120.
- Ritcher BD, Baumgartner JV, Braun DP (1997). How much water does a river need? *Freshwater Biology* 37: 231-249.
- Richter BD, Mathews R, Harrison DL, Wigington R (2003). Ecologically sustainable water management: managing river flows for ecological integrity. *Ecological Applications* 13: 206-224.
- Poff NL (1992) Regional stream hydrology: climate change and ecological implications. *Global climate change and freshwater ecosystems*. Springer-Verlag, New York. pp. 88-115.
- Power ME, Sun A, Parker G, Dietrich WE, Wooten T (1995) Hydraulic Food-Chain Models. An approach to the study of food-web dynamics in large rivers. Wootton Laboratory at The University of Chicago.
- Quessy J-F, Saïd M, Favre A-C (2012) Multivariate Kendall tau for change-point detection in copulas. *Canadian Journal of Statistics* 40: 1-18.
- Sandor JA, Norton JB, Homburg JA, Muenchrrath, DA, White CS, Williams SE, Havener CI, Stahl PD (2007) Biogeochemical studies of a Native American runoff agroecosystem. *Geoarchaeology* 22: 359-386.
- Shabbar A (2006) The impact of El Niño-Southern Oscillation on the Canadian climate. *Advances in Geosciences* 6: 149-153.
- Shentsis I, Rosenthal A (2003) Recharge of aquifers by flood events in an arid region. *Hydrological Processes* 17: 695-883.
- Skoulikidis NT, Vardakas L, Karaouzas I, Economou AN, Dimitriou E, Zogaris S (2011) Assessing water stress in Mediterranean lotic systems: insights from an artificially intermittent river in Greece. *Aquatic Sciences* 73: 581-597.
- Smolar-Žvanut N, Mikoš M (2014) The impact of flow regulation by hydropower dams on the periphyton community in the Soča River, Slovenia. *Hydrological Sciences Journal* 59: 1032-1045.
- Spence C, Woo M-K (2006) Hydrology of subarctic Canadian Shield: heterogeneous headwater basins. *Journal of Hydrology* 317: 138-154.

- Stanley EH, Fisher SG, Grimm ANB (1997) Ecosystem Expansion and Contraction in Streams. BioScience Journal 47: 427-435.
- Sylvain JM, Assani A, Landry R., Quessy, JF, 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.
- Svec JR, Kolka RK, Stringer JW (2005) Defining perennial, intermittent and ephemeral channels in Eastern Kentucky: Application to forestry best management practices. Forest Ecology and Management 214: 170-182.
- Timo S, Anu M, Pia A, Tuija RA, Toni A (2002) Detecting Trends Of Annual Values Of Atmospheric Pollutants By The Mann-Kendall Test And Sen's Slope Estimates - The Excel Template Application Makesens. Finnish Meteorological Institute 31: 1-35.
- Tockner K, Malard F, Ward JV (2000). An extension of the flood pulse concept. Hydrological Processes 14: 2861-2883.
- Tooth S (2000) Process, form and change in dryland rivers: a review of recent research. Earth-Science Reviews 51: 67-107
- Vadnais ME, 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.

ANNEXE A

RÉSULTATS DE L'ANALYSE CANONIQUE DES CORRÉLATIONS

a) Période « octobre-mars »

	V1	V2	W1	W2
Magnitude	0,6484	0,7613		
Fréquence	-0,9211	0,3892		
AMO			0,2171	0,6459
AO			0,5462	-0,0983
NAO			0,6482	-0,6443
PDO			-0,3813	-0,1493
SOI			-0,2308	-0,4469

b) Période « octobre-septembre »

	V1	V2	W1	W2
Magnitude	0,2864	0,9581		
Fréquence	-0,9999	-0,0152		
AMO			0,3544	0,2220
AO			0,6586	-0,5434
NAO			0,6203	-0,1486
PDO			-0,1284	-0,1559
SOI			-0,2611	-0,6970

ANNEXE B

ARTICLE SCIENTIFIQUE

Analysis of the characteristics of temporary flow downstream from reservoirs in Quebec (Canada)

Ouassila **Azouaoui** and Ali Arkamose **Assani***

Department of Environmental Sciences, University of Quebec at Trois-Rivières,
3351 Boulevard des Forges, Trois-Rivières, Québec, G9A 5H7, Canada.

* Corresponding author: Ali.Assani@uqtr.ca; Tel. + 819-376-5011

Abstract

Intermittent flow is a hydrological phenomenon observed at all latitudes. In Quebec, even though the climate is humid, intermittent flow occurs downstream from headwater reservoirs. These reservoirs store water during spring and summer (from April to September) and release it in winter to supply hydroelectric power plants located downstream. During the water storage period, intermittent flow is common (discharges falling to $< 1 \text{ l/s/km}^2$). The goal of the study is to analyze the characteristics (magnitude, frequency, and duration) of this flow downstream from three reservoirs built in the Saint-Maurice River watershed, during the period from 1930 to 2010. Downstream, the contribution (magnitude) of intermittent flow to total flow is less than 2%. Intermittent flow frequency ranges from 24 to 65 days per year downstream from the three reservoirs. And as far as duration is concerned, intermittent flow persists on average from 40 to 128 consecutive days. No significant correlation was observed between these intermittent flow characteristics and reservoir characteristics, likely as a result of the small size of the sample analyzed. Canonical correlation analysis revealed that the frequency of temporary flow is correlated with the North Atlantic Oscillation (NAO) and its magnitude, and negatively correlated with the Southern Oscillation (SOI). The intermittent flow phenomenon must be taken into account in the management of these reservoirs to preserve the ecological integrity of downstream reaches.

Keywords: Intermittent flow, reservoirs, magnitude, frequency, duration, climate indices, Quebec.

Introduction

Temporary flow is a hydrological phenomenon found at all latitudes that produces intermittent or temporary streams. As pointed out by Buttle et al. (2012), many intermittent streams are found in the headwaters of watersheds in general, even in regions known for their humid climate. Although these streams have been the focus of many studies in aquatic ecology (e.g., Larned et al., 2010; Gallart et al., 2012) and geomorphology (e.g., Buttle et al., 2012; Tooth, 2000), very few studies have focused on the hydrology of such streams under natural conditions (e.g., Buttle et al., 2012) and downstream from dams (e.g., Spence and Woo, 2006).

The temperate climate of southern Quebec, characterized by a nearly uniform distribution of precipitation throughout the year, leads flow being maintained in streams even in winter. To produce hydroelectric power in the absence of significant runoff during the cold winter season, however, reservoirs were built in the headwaters of many watersheds. These reservoirs are designed to supply water in winter to hydroelectric power plants located downstream. Storage of water from springtime snowmelt and summer rainfall in these reservoirs leads to an inversion of the annual cycle of streamflow downstream from them, with maximum flows occurring in winter and minimum flows, in spring and summer (e.g., Assani et al., 2005; 2011; Lajoie et al., 2007; Matteau et al., 2008). The extent of water storage in the reservoirs in spring and summer may be such as to essentially shut down flow in affected streams. This interruption or significant decrease of flows produces intermittent flow in reaches located downstream from reservoirs, upstream from significant inputs from tributaries. Despite obvious ecological impacts of such flow interruptions, this temporary flow phenomenon has never been studied in detail. To address this, the following two goals were defined for the present study:

1. To quantify the extent of this temporary flow phenomenon observed downstream from reservoirs in Quebec. The underlying hypothesis is that the extent of this phenomenon depends on the size of the reservoir. For instance,

Lajoie et al. (2007) showed that the extent of dam impacts on streamflow depends mainly on the size of watersheds in Quebec.

2. To analyze the link between climate and the extent of temporary flow, the underlying hypothesis being that downstream from reservoirs that produce an inversion of the natural annual cycle of streamflow, the extent of temporary flow is independent of climate variability. This hypothesis is based on the fact that in a recent study, Landry et al. (2013) showed that, contrary to other types of reservoirs, there is no significant correlation between streamflow and climate variables (rainfall and temperature) downstream from such inversion-type reservoirs.

Methods

Study sites

The choice of study sites was based on four criteria:

- The availability of daily flow data measured over a relatively long period of time downstream from a dam or reservoir;
- The occurrence of temporary flow over many days of a given year downstream from a dam or reservoir;
- The availability of temperature and/or precipitation data measured over a relatively long period of time in the watershed;
- A watershed surface area downstream from the dam or reservoir that exceeds 1000 km².

Three reservoirs or dams met these four criteria. They are all located within the Saint-Maurice River watershed (Fig. 1). This watershed and the three reservoirs have been described in detail in previous studies (Assani, 2003; Assani et al., 2011; Vadnais et al., 2013), to which the reader is referred. To develop natural resources in the area,

many reservoirs and hydroelectric power plants were built in the Saint-Maurice River watershed in the first half of the 20th century by the Shawinigan Power Company. The three main reservoirs are the Gouin reservoir (drainage area: 9480 km²; height of dam: 26 m; total capacity: 8,570,000,000 m³) in the headwaters of the Saint-Maurice River watershed, the Taureau reservoir (drainage area: 4070 km²; height of dam: 25 m; total capacity: 31,000,000 m³), on the Matawin River, and the Châteauvert reservoir (drainage area: 3060 km²; height of dam: 15 m; total capacity: 270,000,000 m³), on the Manouane River (Fig. 1). As mentioned in the Introduction, these three reservoirs induced an inversion of the natural cycle of flows downstream from them, such that maximum flows occur in winter and minimum flows occur in springtime, during snowmelt. This inversion is due to the fact that the reservoirs are used to store snowmelt-derived water in springtime, which is released in winter to supply hydroelectric power plants located downstream. Most of the streamflow data analyzed were taken from the EnvironmentCanada CD-ROM (2004) and from the Centre d'expertise hydrique du Québec (<https://www.cehq.gouv.qc.ca/>, accessed on 2015-05-20), an agency of the Ministère du Développement durable, de l'Environnement et des Parcs of the province of Quebec. However, flow data for the three reservoirs measured after 1994 were provided by Hydro-Québec. There is a water gauging station (the Saint-Michel-des-Saints station, 1390 km²) upstream from the Taureau reservoir on the Matawin River, where flows are not affected by the reservoir. This station is used as a reference station for flows measured under natural conditions (not affected by the presence of the dams). Temperature and precipitation are also measured at this station. These hydroclimate parameters have been measured since 1930, when the Taureau reservoir was built.

Definition and characteristics of temporary flow

There is no quantitative definition of temporary flow in hydrology. There is, however, general agreement on the fact that temporary flow is a total or partial interruption of flow in time and space in a stream, due to a variety of causes (natural or human). In other words, temporary flow refers to a discontinuity in flow in time (seasons

or years) and/or space (downstream). Temporary flow includes both intermittent flow (when flow stops but water remains in the channel) and ephemeral flow (when water is also absent from the channel) (e.g., Buttle et al., 2012; Svec et al., 2005). In Quebec, because of the humid climate, partial or total flow interruption is never observed in streams with watersheds $\geq 1000 \text{ km}^2$. Even in times of major drought, discharges $< 1 \text{ l/s/km}^2$ are never observed in such watersheds. This threshold may therefore be used to objectively and quantitatively distinguish permanent (perennial) from temporary flow in Quebec. Hence, flow is deemed temporary when discharge falls below 1 l/s/km^2 , and is said to be intermittent if water remains (as puddles) in the channel. This type of flow is never observed in natural rivers in watersheds $\geq 1000 \text{ km}^2$, except downstream from reservoirs with all gates closed. Thus, when discharge falls below 1 l/s/km^2 , most of the minor channel becomes dewatered (Fig. 2), resulting in a discontinuity in flow in time and space.

In this study, we analyze the characteristics of this temporary flow (when specific discharge falls below 1 l/s/km^2) downstream from three reservoirs over the period from 1930 to 2010. Because water from spring snowmelt and summer rain is stored in these reservoirs, temporary flow occurs mainly from April to September downstream from them. Three characteristics of this temporary flow are analyzed:

- Temporary flow magnitude, which is the sum of flows $< 1 \text{ l/s/km}^2$ measured each year from April to September during the period from 1930 to 2010. The magnitude is expressed as a percentage of the sum of all flows measured each year from April to September.
- Temporary flow frequency, which is the total number of days when discharges $< 1 \text{ l/s/km}^2$ were measured.
- Temporary flow duration, which is the number of consecutive days when discharges $< 1 \text{ l/s/km}^2$ were measured.

Statistical analysis of the characteristics of temporary flow

- Statistical analysis was performed to compare the characteristics of temporary flow downstream from the three reservoirs on the one hand, and to correlate these characteristics with variables (temperatures and precipitations) and climate indices, on the other hand. To this end, several statistical methods were used:
- The analysis of variance (ANOVA), the parametric Student's t-test, and the non-parametric Kruskal-Wallis test were used to compare the magnitude and frequency of temporary flow downstream from the three reservoirs.
- The Chi-square method was used to compare class frequencies (spells) of temporary flow duration downstream from the three reservoirs.
- The Mann-Kendall method was used to compare the long-term trend of the magnitude and frequency of temporary flow downstream from the three reservoirs. It should be noted that the time series of these two characteristics showed no autocorrelation.
- The Lombard method was used to detect shifts in the mean values of temporary flow magnitude and frequency series. This method allows the detection of sharp and gradual shifts in the mean value of a statistical series. Its mathematical description and the conditions under which it may be used were detailed in Lombard (1987) and Quessy et al. (2011). This method is increasingly used in hydrology (e.g., Assani et al., 2011). According to this method, a shift in the mean value of a statistical series is present at the 5% probability level when the calculated value of S_n , the Lombard test statistic, is greater than 0.0403, the critical theoretical value (Lombard, 1987; Quessy et al., 2011). Frequency data were converted to percentages (the total number of days with temporary flow over the total number of days of the season from April to September each year).

This conversion was required so that the Lombard method could be applied to the frequency data.

- The simple linear correlation method was used to constrain the influence of temporary flow frequency on seasonal mean flows (measured from April to September) downstream from the three reservoirs on the one hand, and the influence of reservoir characteristics on temporary flow characteristics, on the other.

Finally, canonical correlation analysis (CCA) was used to analyze the relationship between two temporary flow characteristics (magnitude and frequency) and five climate indices. The use of these climate indices is predicated on the lack of continuous temperature and precipitation data from the vicinity of the three reservoirs (except for the Taureau reservoir on the Matawin River). From a climate standpoint, temperature and precipitation are influenced by climate indices, for which data are available. Climate indices may therefore be used instead of temperature and precipitation data to constrain the influence of climate on the temporal variability of temporary flow magnitude and frequency. It should be mentioned that flow management downstream from the reservoirs is in part influenced by climate. The following five climate indices were selected: AMO (Atlantic Multi-decadal Oscillation), AO (Arctic Oscillation), NAO (North Atlantic Oscillation), PDO (Pacific Decadal Oscillation), and SOI (Southern Oscillation Index). Climate indexes for the AMO and PDO were taken from the following website: [http://www.cgd.ucar.edu/cas/jhurrell/indices.data.html](http://www.esrl.noaa.gov/psd/data/ClimateIndices>List (viewed on 09-10-2013), the NAO from <a href=) (viewed on 10-06-2008), the AO from <http://jisao.washington.edu/data/ao/> (viewed on 10-02-2007), and the SOI from <http://www.cgd.ucar.edu./cas/catalog/climind/soi.html> (viewed on 10-02-2007). Data for these climate indices (NAO, AO and SOI) after 2006 were taken from the NOAA website:

<http://www.esrl.noaa.gov/psd/data/climateindices/list/> For each index, an annual mean was derived using monthly values from January to December. Data for all these indices since 1950 are available on the NOAA website: <http://www.esrl.noaa.gov/psd/data/climateindices/list/>. Annual means were calculated over the period from 1930 to 2010. For each of these five indices, the following three series were produced: a series of monthly means from April to September, a series of monthly means from October to April, and a series of monthly means from October to September. It should be recalled that canonical analysis is used to constrain the link between two groups of variables, a group of independent variables (climate indices in this case) and a group of dependent variables (magnitude and frequency in this case). This method, which is commonly used in hydrology, is described in detail by Afifi and Clark (1996), among others. The series of temporary flow characteristics and of climate indices were produced following the approach proposed by Mazouz et al. (2012).

Results

Comparison of the characteristics of temporary flow downstream from three reservoirs

The mean and standard deviation values for the magnitude, frequency and duration of temporary flow downstream from the three reservoirs are shown in Table 1. As far as magnitude is concerned, the three statistical methods used (ANOVA, Student's t-test, and Kruskal-Wallis test) revealed that the mean values of magnitude, expressed as the ratio of temporary over total seasonal flow, are significantly different downstream from the three reservoirs. The contribution of temporary flow to total flow is smaller downstream from the Taureau reservoir than downstream from the other two reservoirs, despite the fact that temporary flow frequency and duration are higher downstream from the Taureau reservoir than from the other two reservoirs. Indeed, downstream from the Taureau reservoir, the mean frequency and duration of temporary flow are 65 and 128 days per season (from April to September), respectively (Table 1). These values are

a considerably smaller downstream from the Gouin reservoir (24 and 40 days, respectively). The maximum durations of temporary flow observed are 152 consecutive days downstream from the Châteauvert reservoir, 155 consecutive days downstream from the Taureau reservoir and 158 consecutive days downstream from the Gouin reservoir. The maximum frequency, for its part, is 154 days downstream from the Châteauvert reservoir, 161 days downstream from the Taureau reservoir, and 162 days downstream from the Gouin reservoir.

Comparison of the interannual variability of temporary flow characteristics downstream from the three reservoirs

The interannual variability of the magnitude, frequency, and duration of temporary flow downstream from the three reservoirs is presented in Figures 3, 4, and 5. Results of the long-term trend analysis using the Mann-Kendall method, shown in Table 2, reveal significant positive trends of temporary flow magnitude and frequency downstream from the Gouin reservoir. In contrast, downstream from the Taureau reservoir, this trend is negative for temporary flow frequency. The number of days with discharges smaller than 1 l/s/km^2 decreased significantly over time downstream from these reservoir, whereas it increased significantly downstream from the Châteauvert reservoir. It should be mentioned, however, that downstream from the Châteauvert reservoir, results of the Mann-Kendall test are statistically significant only at the 10% level. Use of the Lombard method revealed that the shift in mean values of temporary flow magnitude downstream from the Gouin reservoir occurred in 1990 (Table 2) and that this shift was sharp. The shift in mean value of temporary flow frequency, for its part, occurred in 1955 downstream from the Châteauvert reservoir, in 1982 downstream from the Gouin reservoir, and in 1996 downstream from the Taureau reservoir. Hence, this shift in mean value did not occur synchronously downstream from the three reservoirs.

Analysis of factors that affect temporary flow characteristics

This influence was analyzed in three steps. First, temporary flow characteristics were correlated with reservoir characteristics (dam height, drainage area, maximum

retention capacity and reservoir area). No coefficient of correlation was statistically significant, even at the 10% level, despite the fact that some of the coefficient of correlation values were > 0.9000 (data not presented here). This lack of significant correlation is due to the very small size of the sample analyzed ($n = 3$ reservoirs).

The second step involved correlating the two temporary flow characteristics (magnitude and frequency) with temperature and precipitation. This analysis was restricted to the Matawin River watershed (Taureau reservoir), because continuous measurements of temperature and precipitation are lacking for the watersheds drained by the other two reservoirs. Coefficient of correlation values are presented in Table 3, from which it may be seen that magnitude is negatively correlated with total precipitation from October to March. It should first be recalled that, for the purpose of deriving coefficients of correlation, the temporary flow magnitude is the ratio of the sum of temporary daily flows ($< 1 \text{ l/s/km}^2$) over the sum of total daily flows measured from April to September downstream from the reservoirs. If the total amount of flows $< 1 \text{ l/s/km}^2$ increases, this ratio increases, and vice versa. The negative correlation observed between temporary flow magnitude and total precipitation implies that when precipitation increases, the ratio decreases because the total amount of flows $> 1 \text{ l/s/km}^2$ increases compared to the total amount of daily flow from April to September. As for frequency, aside from total precipitation from October to March, it is also negatively correlated with the amount of rainfall from April to September. When total precipitation from October to March and/or rainfall from April to September increase, large amounts of water are released downstream from the reservoir, resulting in a decrease in temporary flow frequency (number of days with discharge $< 1 \text{ l/s/km}^2$). Finally, correlation analysis revealed that temperatures are not significantly correlated with either the magnitude or frequency of temporary flow downstream from the Taureau reservoir.

Temperature and precipitation are influenced by climate indices. These indices were correlated with the magnitude and frequency of temporary flow using canonical correlation analysis as a third and final step. Canonical analysis results are summarized

in Table 4. The two characteristics of temporary flow (magnitude and frequency) show a better correlation with climate indices calculated over the period from April to September. V1 and V2 are canonical axes extracted from the group of dependent variables (magnitude and frequency) and W1 and W2 are canonical axes extracted from the group of independent variables (the five climate indices). V1 is correlated with W1 and V2 is correlated with W2. In light of this, temporary flow frequency shows a strong negative correlation with V1 as does magnitude with V2. As for climate indices, NAO shows a strong positive correlation with W1, as does SOI with W2. Consequently, frequency is negatively correlated with NAO, and magnitude is negatively correlated with SOI.

Discussion and conclusion

Temporary flow is a hydrological phenomenon found at all latitudes. However, in Quebec, because of the humid climate, this phenomenon is never observed in natural watersheds larger than 1000 km^2 where, even during the driest years, low-flow discharges always remain above 1 l/s/km^2 . To produce hydroelectric power in winter, however, many reservoirs have been built in the headwaters of large watersheds to store water derived from snowmelt in springtime and rainfall in summer that is then used to supply hydroelectric power plants located downstream in winter. Water storage during spring and summer often leads to a nearly complete interruption of flow downstream from reservoirs, with discharges falling below 1 l/s/km^2 , resulting in intermittent flow. This hydrological phenomenon has never been studied in Quebec. The goal of the present study was to analyze the extent of this intermittent flow and constrain the factors that account for it. The analysis of the extent of temporary flow was based on the study of the spatial and temporal variability of three characteristics of flow downstream from three reservoirs located in the Saint-Maurice River watershed. These three characteristics are the magnitude, frequency, and duration of temporary flow.

Temporary flow magnitude, which is defined as the contribution of temporary flow to total flow during the warm season (April to September) is less than

2% downstream from the three reservoirs. This limited contribution of temporary flow is due to the large amount of water stored in the reservoirs during the warm season. Analysis of the temporal variability of temporary flow magnitude only revealed a significant increase downstream from the Gouin reservoir, which started in 1990 (see Table 4). This year coincides with the end of log-driving, the long-standing practice in the area of using rivers to transport wood to paper mills located at the confluence of the Saint-Maurice and St. Lawrence Rivers. The end of this practice in 1990 made the development of new recreational activities carried out during the warm season possible, including sailing and rafting, which require relatively high water levels from April to September. As a result, Hydro-Québec, who manages the reservoirs since 1963, increased water levels in the Saint-Maurice River, although increases often occur on week-ends, when these recreational activities are carried out on a regular basis.

Temporary flow frequency, for its part, ranges on average from 24 to 65 days between April and September downstream from the three reservoirs, and has increased significantly over time, although this increase did not occur synchronously downstream from the three reservoirs. Thus, it occurred in 1982 downstream from the Gouin reservoir on the Saint-Maurice River, in 1955 downstream from the Châteauvert reservoir on the Manouane River, and in 1996 downstream from the Taureau reservoir on the Matawin River. The causes of this increase in frequency downstream from the three reservoirs are unknown. It is probably related to a shift in the mode of management of each reservoir, but no documented information was available to test this hypothesis. In the case of the Gouin reservoir, the increase in temporary flow frequency was accompanied by an increase in temporary flow magnitude, even though magnitude should logically decrease over time. The fact that the increase in magnitude is related to recreational activities that are only carried out regularly two or three days per week, as previously mentioned, accounts for this. To compensate for this increase in temporary flow magnitude, the number of days with discharges $< 1 \text{ l/s/km}^2$ was increased so that the amount of water stored in the Gouin reservoir from April to September did not change significantly over time.

Finally, temporary flow duration ranges on average from 40 to 128 consecutive days downstream from the three reservoirs. This duration highlights the extent of temporary flow downstream from the reservoirs. During particularly dry years, discharges $< 1 \text{ l/s/km}^2$ are sometimes observed to last more than 150 consecutive days. Clearly, such persistence could have ecological impacts on aquatic and semi-aquatic plants and animals downstream from the reservoirs. It should also be recalled that, from April to September, flows are generally high in natural rivers due to snowmelt and summer rainfall.

Intermittent flow downstream from reservoirs is influenced by both human and climatic factors. As far as the former are concerned, it was not possible, due to the small sample size, to bring out any statistically significant link with temporary flow characteristics downstream from the three reservoirs despite the fact that coefficient of correlation values are in some cases > 0.9000 . As for climate factors, the magnitude and frequency show a significant negative correlation with total precipitation and rainfall downstream from the Taureau reservoir in the Matawin River watershed. Thus, in dry years, the amount of water released downstream from this reservoir decreases significantly, but the number of days when small amounts of water are released increases significantly. As far as climate indices are concerned, canonical correlation analysis revealed that temporary flow frequency is negatively correlated with NAO and, to a lesser extent, with AO, while temporary flow magnitude is negatively correlated with SOI and PDO. Given that temperature does not influence temporary flow characteristics, it may be concluded that the influence of climate indices results in contributions from precipitation. Based on previous work on the link between these climate indices and precipitation and/or streamflow (e.g., Beauchamp et al., 2015; Brown, 2010; Kingston et al., 2005; Mazouz et al., 2012, Shabbar, 2006), it may be concluded that the positive phase of NAO is associated with a decrease in precipitation and, consequently, an increase in temporary flow frequency downstream from the reservoirs. As for the SOI and PDO indices, their negative phases are associated with a decrease in precipitation and hence, a decrease in inputs from temporary flow (discharge $< 1 \text{ l/s/km}^2$).

In conclusion, this study shows that, in spite of the humid climate conditions that characterize Quebec, the mode of management of some reservoirs may lead to temporary flow ($< 1 \text{ l/s/km}^2$) downstream from these structures. Given its extent, which was constrained as part of this study, this temporary flow may be harmful to aquatic plants and animals. To limit any potential harm, it is important to impose managed flow (controlled flow) levels that maintain ecological integrity downstream from these reservoirs by significantly reducing the frequency and duration of intermittent flow.

Conflicts of Interest: The author declares no conflict of interest.

References

- Afifi AA, Clark V (1995) Computer-aided multivariate analysis, third ed. Chapman and Hall, New-York, 505 p.
- Assani AA (2003) 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). Bull Soc Belge Geo 44: 87-96.
- 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) Rev Sci Eau 18: 103-127.
- 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 Resour Manage. 25: 3661-3675.
- Beauchamp M, Assani AA, Landry R, Massicotte P (2015) Temporal variability of the magnitude and timing of winter maximum daily flows in southern Quebec (Canada). J Hydrol 529: 410-417.
- Brown RD (2010) Analysis of snow cover variability and change in Quebec, 1948-2005. Hydrol Process 24: 1929-1954.
- Buttle JM, Boon S, Peres DL, Spence C, van Meerveld HJ, Whitfield PH (2012) An overview of temporary stream hydrology in Canada. Can Water Res J 37: 279-310.
- Gallart F, Prat N, Gracia-Roger EM, Latron J, Rieradevali M, Llorens P, Barbera GG, Brito D et al (2012) A novel approach to analysing the regime of temporary streams in relation to their controls on the composition and structure of aquatic biota. Hydrol Earth Syst Sci 16: 3165-3182.
- Kingston DG, Lawler DW, McGregor CR (2006) Linkage between atmospheric circulation, climate and streamflow in the northern North Atlantic: research prospects. Progr Phys Geogr 30: 143-174.
- Lajoie F, Assani AA, Roy AG, Mesfioui M (2007) Impacts of dams on monthly flow characteristics. The influence of watershed size and seasons. J Hydrol. 334: 423-439.
- Landry R, Assani AA, Biron S, Quessy J-F (2014) The management modes of seasonal floods and their impacts on the relationship between climate and streamflow downstream from dams in Quebec (Canada). River Res Applic 30: 287-298.

- Larned ST, Datry T, Arscott DB, Tockner K (2010) emerging concepts in temporary-river ecology. *Freshw Biol* 55: 717-738.
- Lombard F (1987) Rank tests for changepoint problems. *Biometr* 74: 615-624.
- Matteau M, Assani AA, Mesfioui M (2009) Application of multivariate statistical analysis methods to the dam hydrologic impacts studies. *J Hydrol.* 371: 120-128.
- Mazouz R, Assani AA, Quessy J-F (2012) Comparison of the interannual variability of spring heavy floods characteristics of tributaries of the St. Lawrence in Quebec (Canada). *Adv Water Resour* 35: 110-120.
- Quessy J-F, Saïd M, Favre A-C (2012) Multivariate kendall's tau for change-point detection in copulas. *Can J Statist* 40: 1-18.
- Shabbar A (2006) The impact of El Niño-Southern Oscillation on the Canadian climate. *Adv Geosci* 6: 149-153.
- Spence C, Woo M-K (2006) Hydrology of subarctic Canadian Shield: heterogeneous headwater basins. *J Hydrol* 317: 138-154.
- Svec JR, Kolka RK, Stringer JW (2005) Defining perennial, intermittent and ephemeral channels in Eastern kentucky: Application to forestry best management practices. *Forest Ecol Manage* 214: 170-182.
- Tooth S (2000) Process, form and change in dryland rivers: a review of recent research. *Earth Sci Rev* 51:67-107.
- Vadnais M-E, 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). *Geomorph* 175-176: 199-208.

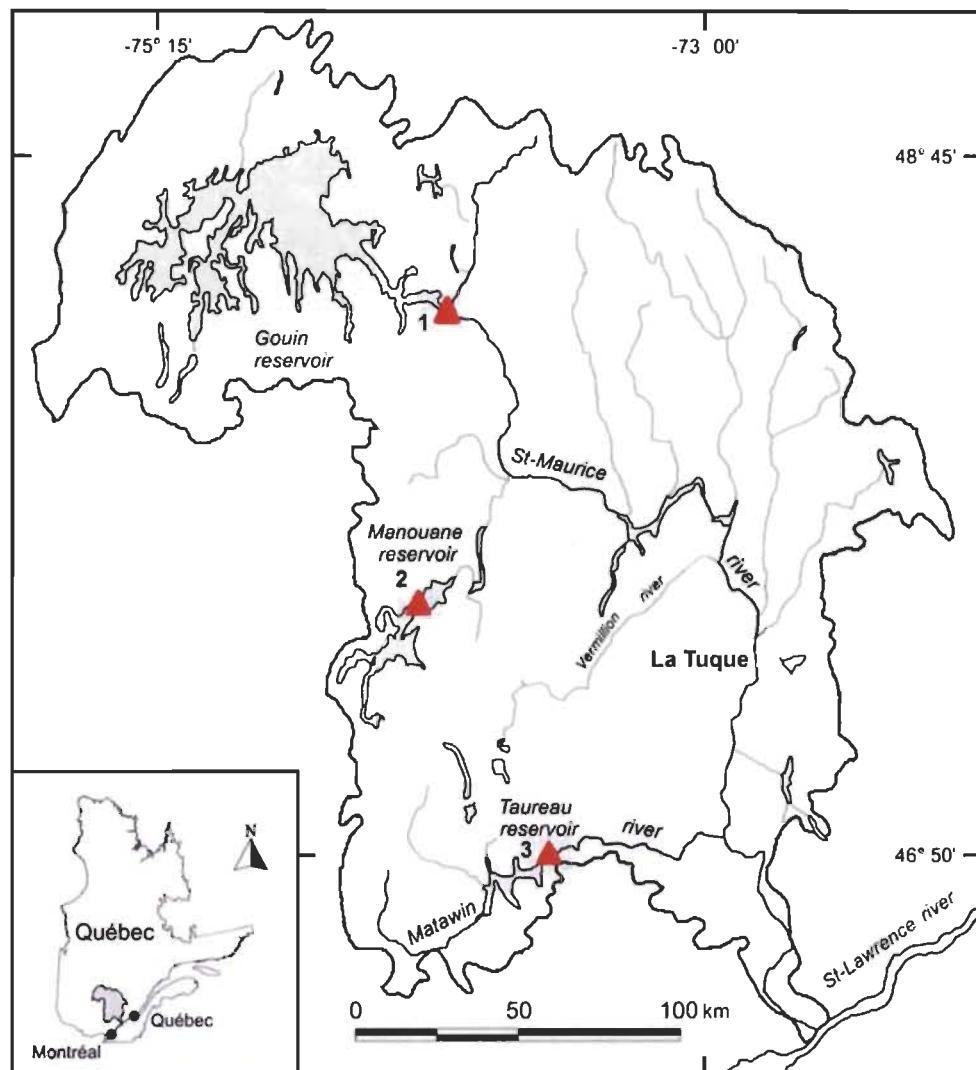
Tables and figures

Figure 1 Location of the reservoirs in the Saint-Maurice River watershed.



Figure 2 Exposure of the Matawin River low-flow channel downstream from the Taureau reservoir during intermittent flow in June 2003. The photo shows the spatial discontinuity of flow downstream from the reservoir.

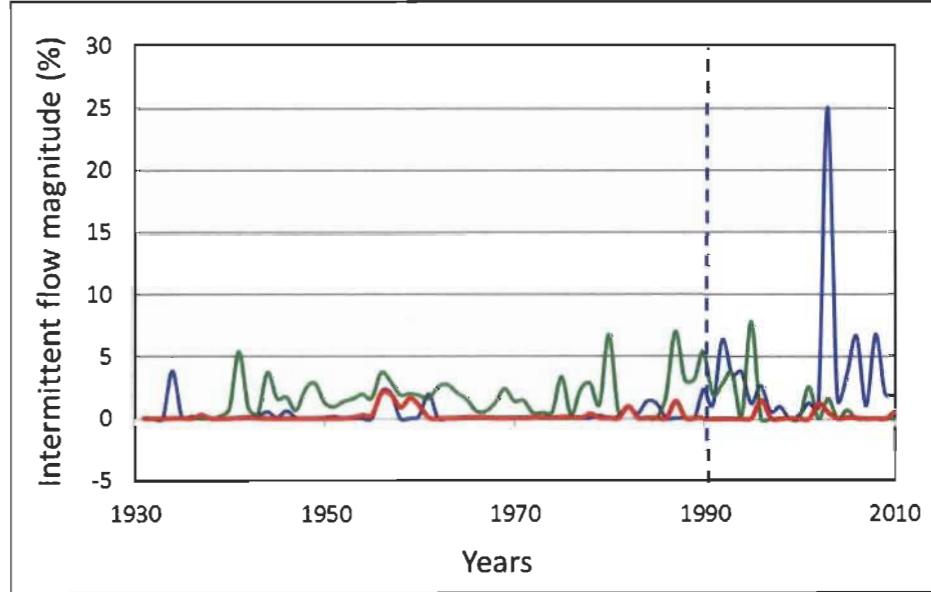


Figure 3 Temporal variability of intermittent flow magnitude (expressed as a % of total flow from April to September) downstream from three reservoirs during the period from 1930 to 2010.
Blue curve: Gouin Reservoir; red curve: Châteauvert Reservoir; green curve: Taureau Reservoir.

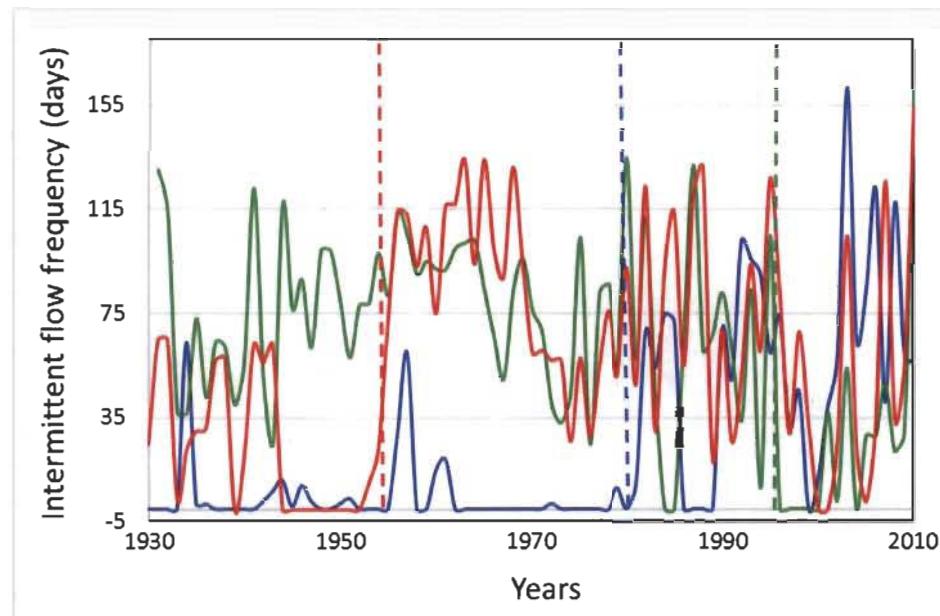
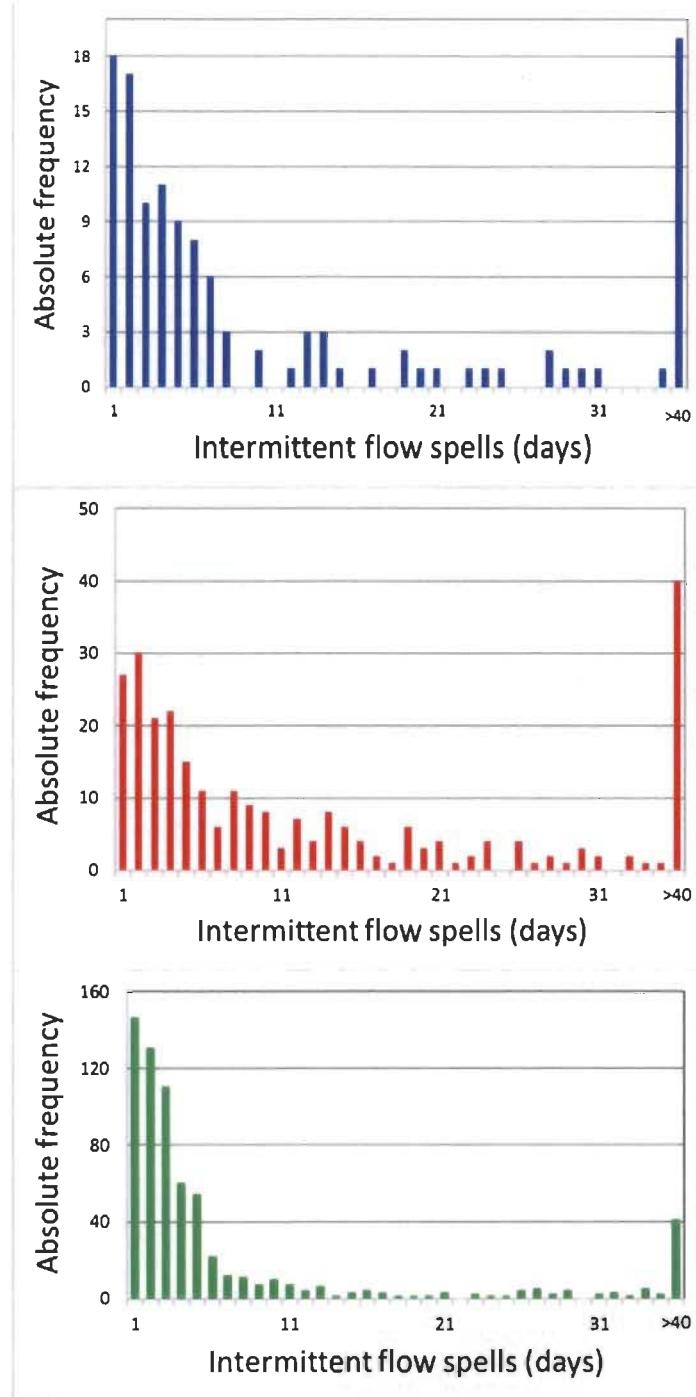


Figure 4 Temporal variability of intermittent flow frequency (in days) downstream from three reservoirs during the period from 1930 to 2010.

Blue curve: Gouin Reservoir; red curve: Châteauvert Reservoir; green curve: Taureau Reservoir.

**Figure 5**

Intermittent flow duration (in consecutive days) downstream from three reservoirs during the period from 1930 to 2010.

Blue bars: Gouin Reservoir; red bars: Châteauvert Reservoir; green bars: Taureau Reservoir.

Table 1. Comparison of temporary flow characteristics downstream from three reservoirs during the 1930-2010 period.

Reservoirs	Mean magnitude (%)	Mean frequency (days)	Mean duration (days)
Gouin	1.12 (3.09)	24 (36.7)	40 (111.6)
Châteauvert	0.20 (0.45)	58 (43)	98 (232)
Taureau	1.53 (1.73)	65 (38)	128 (244)

() = standard deviation

Table 2. Temporal variability of the magnitude and frequency of intermittent flow downstream from three reservoirs during the 1930-2010 period. Mann-Kendall and Lombard tests.

Reservoirs	Magnitude				Frequency			
	Mann-Kendal test		Lombard test		Mann-Kendal test		Lombard test	
	Z	p-values	S _n	T1/T2	Z	p-values	S _n	T1/T2
Gouin	4.21	0.00003	0.2434	1989/1990	4.36	0.00001	0.3006	1980/1982
Châteauvert	1.17	0.2434	0.0076	-	1.72	0.0845	0.0451	1954/1955
Taureau	-0.58	0.5608	0.0128	-	-3.27	0.0011	0.1316	1995/1996

Lombard test S_n values > 0.0403 are statistically significant at the 5% level (these values are shown in bold). T1 and T2 are the years of start and end, respectively, of significant changes in mean values of a given series.

Table 3. Coefficients of correlation calculated between the magnitude and frequency of temporary flow and climate variables downstream from the Taureau reservoir in the Matawin River watershed (1930-2010).

Climatic variables	Magnitude		Frequency	
	A	B	A	B
Total rainfall	-0.0297	-0.1976	0.1177	-0.3095
Total snowfall	0.0638	0.1741	-0.1552	0.0141
Total Precipitations (rainfall + snowfall)	-0.2444	-0.2040	-0.2397	-0.3023
Tmax	-0.0626	0.0715	-0.0812	-0.0173
Tmin	-0.0904	0.0198	-0.1148	-0.1077
Tme	0.0435	0.0086	0.0640	-0.0282

A = means calculated over the period from October to March; B = means calculated over the period from April to September; Tmax = Mean daily maximum temperatures; Tmin = Mean minimum temperatures; Tme = Mean daily temperatures; the statistically significant coefficients of correlation at the 5% threshold appear in bold.

Table 4. Canonical structure coefficients calculated between the temporary flow characteristics (magnitude and frequency) and the climate indices (April to September) downstream from three reservoirs during the 1930-2010 period.

Variables	V1	V2	W1	W2
Magnitude	0.4038	-0.9149		
Frequency	-0.9940	-0.1097		
AMO			-0.0331	0.1840
AO			0.6983	0.1646
NAO			0.9268	0.2094
PDO			-0.0066	0.6017
SOI			-0.1390	0.6970
EV (%)	57.6	42.5	27.3	19.1

EV = explained variance. The higher statistically significant canonical structure coefficients at the 5% threshold appear in bold.