

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
JEAN-MICHEL SYLVAIN

COMPARAISON DES EFFETS DE L'UTILISATION DES SOLS ET DU MODE DE
GESTION DES BARRAGES SUR LA VARIABILITÉ SPATIO-TEMPORELLE DES
CARACTÉRISTIQUES DES DÉBITS MINIMUMS JOURNALIERS ANNUELS
EXTRÊMES AU QUÉBEC MÉRIDIONAL (CANADA)

AVRIL 2016

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

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

Codirecteur

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

Membres du comité d'évaluation

Christophe Kinnard

Département des sciences de l'environnement

Université du Québec à Trois-Rivières

C.P. 500, Trois-Rivières (Québec)

G9A 5H7

Stéphane Campeau (Ph. D.)

Département de mathématiques et d'informatique

Université du Québec à Trois-Rivières

C.P. 500, Trois-Rivières (Québec)

G9A 5H7

AVANT-PROPOS

Le présent mémoire a été réalisé sous la direction des professeurs Ali Assani et Jean-François Quessy. Il est rédigé conformément à l'article 138.1 du *Règlement des études de cycles supérieurs*, permettant de présenter les résultats obtenus dans le cadre d'une maîtrise de recherche en sciences de l'environnement sous forme d'un ou plusieurs articles scientifiques.

Ce mémoire est constitué de deux chapitres. Le premier correspond à une mise en contexte de la problématique du sujet d'étude ainsi que la synthèse des méthodes. Par conséquent, certaines répétitions peuvent survenir entre les deux chapitres. Le deuxième chapitre est présenté sous forme d'article scientifique. Ce dernier a été traduit et soumis à une revue scientifique spécialisée pour publication. Je suis premier auteur de cet article. Il a été soumis et publié dans la revue *Water* sous le titre : « 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 ».

Conception et idées de recherche : J.M.S

Formulation des objectifs : J.M.S

Analyse des données : J.M.S, A.A, R.L

Résultats et discussion : J.M.S, A.A, R.L, J.F.Q, C.K

Écriture de l'article : J.M.S

REMERCIEMENTS

La rédaction de ce mémoire n'aurait été possible sans l'intervention de certaines personnes. Qu'elles trouvent ici l'expression de mes plus sincères remerciements.

Je tiens tout d'abord à remercier vivement mon directeur de recherche, le professeur Ali A. Assani, de même que mon codirecteur de recherche, le professeur Jean-François Quessy, pour leurs conseils précieux et leurs directives durant la réalisation de cet humble travail.

Merci aux professeurs Christophe Kinnard et Stéphane Campeau d'avoir accepté d'apporter un jugement sur ce travail.

J'aimerais aussi remercier Raphaëlle Landry pour l'aide qu'elle m'a apportée dans les analyses statistiques.

Merci à Nadjat Guerfi pour son aide dans les analyses statistiques et la mise en page du document.

Je tiens enfin à remercier tout particulièrement ma famille qui m'a accordé la patience nécessaire pour réaliser ce travail ainsi que toutes les personnes qui m'ont soutenue.

TABLE DES MATIÈRES

COMITÉ D'ÉVALUATION	ii
AVANT-PROPOS	iii
REMERCIEMENTS	iv
CHAPITRE I	
INTRODUCTION	1
1.1 Mise en contexte, problématique, objectifs et hypothèses du travail	1
1.2 Revue de littérature sur les méthodes d'analyse d'impacts des barrages et des changements d'utilisation des sols.....	8
1.2.1 Méthodes d'études d'impacts hydrologiques induits par les barrages ...	8
1.2.2 Méthodes d'études d'impacts hydrologiques induits par les changements d'utilisation des sols.....	9
1.3 Méthodologie de recherche.....	10
1.3.1 Justification du choix des bassins versants et leur description	10
1.3.2 Sources et constitution des séries hydroclimatiques.....	12
1.3.3 Méthodes statistiques d'analyse des données	14
1.4 Résultats.....	14
1.4.1 Comparaison de la variabilité spatiale des caractéristiques des DMJAE	14
1.4.2 Comparaison de la variabilité temporelle des caractéristiques des DMJAE	14
1.4.3 Corrélation entre les caractéristiques des débits et les variables climatiques.....	15
1.5 Conclusion	15
1.6 Références.....	16
CHAPITRE II	
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	21
Abstract	23
Introduction.....	24

Methods.....	25
Study area	25
Hydrological and climate series.....	27
Statistical analysis of hydroclimate series	29
Results.....	30
Comparison of the spatial variability of climate variables and AMEF characteristics	30
Comparison of the temporal variability of hydroclimate variables.....	30
Analysis of the link between AMEF characteristics and climate variables.....	31
Discussion and Conclusion	32
References.....	34
CHAPITRE III	
CONCLUSION GENERALE	50

CHAPITRE I

INTRODUCTION

1.1 Mise en contexte, problématique, objectifs et hypothèses du travail

Parmi les débits d'une rivière, les débits minimums extrêmes jouent un grand rôle dans le fonctionnement écologique et l'évolution morphologique des écosystèmes aquatiques ainsi que les activités socio-économiques (Anctil *et al.*, 2000). Sur le plan écologique, les débits minimums extrêmes influencent significativement l'abondance des populations aquatiques et semi-aquatiques pendant les périodes de sécheresse. Cette abondance dépend de la disponibilité de la nourriture, du volume d'habitat ainsi que de l'ampleur de la prédation qui résulte de la compétition entre les espèces pour se nourrir (Cunjat *et al.*, 1989). Du point de vue hydrochimique, les débits minimums extrêmes influencent la capacité de dissolution des polluants dans les cours d'eau, la quantité d'oxygène dissous disponible pour les organismes vivants et l'ampleur de réchauffement ou de refroidissement de l'eau. Du point de vue morphologique, les débits minimums extrêmes influencent significativement la sédimentation des particules en suspension dans les chenaux. Cette sédimentation peut ainsi affecter la qualité des habitats de poisson notamment en période d'étiage. Sur le plan hydraulique, les débits minimums extrêmes permettent de différencier les rivières à écoulement permanent de celles à écoulement intermittent. Sur le plan d'ingénierie, les débits minimums extrêmes sont pris en compte pour la conception de certains aménagements hydrauliques comme les barrages et les digues. Sur le plan de transport, les débits minimums influencent le volume et la fréquence du trafic. En effet, dans plusieurs fleuves au monde, les débits minimums extrêmes influencent la quantité et le volume des marchandises transportés par voie fluviale. Sur le plan récréotouristique, les débits minimums extrêmes influencent la pratique de certaines activités récréatives.

Cependant, les débits minimums extrêmes sont très vulnérables aux activités et aux aménagements anthropiques : déforestation, agriculture, urbanisation, barrages, réservoirs, etc. Ils sont aussi vulnérables à la variabilité naturelle et aux changements climatiques (voir entre autres Smahtin, 2001). Au Québec, les activités et les aménagements anthropiques qui affectent principalement les écoulements des rivières sont la déforestation et l'agriculture, la construction des barrages et réservoirs ainsi que l'urbanisation.

Dans le contexte naturel, plusieurs travaux se sont déjà intéressés à l'analyse des facteurs qui influencent la variabilité spatio-temporelle des débits minimums ou d'étiages au Québec. En ce qui concerne la variabilité spatiale, le travail le plus complet à ce sujet est sans nul doute celui réalisé par Belzile *et al.* (1997) pour élaborer les normes des débits réservés écologiques pour la protection des habitats du poisson dans les rivières du Québec. Dans le cadre de ce travail, ces auteurs ont corrélé les débits minimums à de nombreux facteurs qui peuvent influencer leur variabilité spatiale. La conclusion majeure qui ressort de ce travail est la mise en évidence de l'influence prépondérante de la superficie des bassins versants sur la magnitude de ces débits. Ainsi, seule cette superficie peut suffire à elle seule à estimer les débits réservés saisonniers et annuels pour n'importe quelle rivière du Québec. Toutefois, il faut noter que cette estimation à partir de la seule superficie d'un bassin versant doit tenir compte d'autres facteurs comme la saison, le cycle de vie des espèces de poisson-cible et les politiques de gestion pour protéger ces espèces cibles qui sont spécifiques à chaque région administrative. Il importe cependant de mentionner que d'autres débits que les débits minimums ont été inclus dans l'estimation des débits réservés écologiques. De plus, Belzile *et al.* ont analysé seulement les débits minimums mensuels. Dans la même perspective, Anctil *et al.* (2000) ont entrepris un travail de régionalisation des débits d'étiage 7 jours (moyenne des débits les plus faibles mesurés pendant 7 jours consécutifs) au Québec afin de pouvoir estimer ces débits à des stations non jaugées. Ils ont ainsi défini six régions hydrologiques homogènes dans lesquelles les débits d'étiage 7 jours peuvent être estimés au moyen de plusieurs lois de probabilité. Comme dans le cas des débits réservés écologiques, Anctil *et al.* (2000) ont conclu que la

superficie des bassins versants suffisait à elle seule à estimer les débits d'étiage 7 jours. Il ressort de ces deux travaux majeurs que la superficie des bassins versants est le principal facteur de la variabilité spatiale des débits minimums au Québec. Il faut cependant noter que ces auteurs n'ont pas analysé directement les débits minimums extrêmes même si dans certains cas les valeurs de ces débits peuvent être très proches de celles des débits d'étiage 7 jours. Quant à Assani *et al.* (2006), ils ont analysé les facteurs physiographiques et climatiques qui peuvent influencer la variabilité spatiale des caractéristiques des débits minimums extrêmes annuels (débit minimum le plus faible mesuré au cours d'une année). Ces caractéristiques ont été définies selon le paradigme écologique des débits naturels (voir Richter *et al.*, 1996; Poff *et al.*, 1997). Leur travail a démontré que les débits minimums annuels des rivières de la rive sud étaient caractérisés par une faible magnitude, une occurrence tardive et une forte asymétrie que ceux des rivières de la rive nord. Ils ont attribué cette différence observée entre les deux rives aux précipitations, mais selon une relation fort complexe entre celles-ci et les débits minimums annuels. En ce qui concerne la variabilité temporelle des débits minimums, à notre connaissance, il existe seulement une étude jusqu'à présent consacrée exclusivement aux débits d'étiage 7 jours des rivières du Québec. En effet, Assani *et al.* (2010) ont réalisé une régionalisation de ces débits en hiver et en été afin de pouvoir déterminer les facteurs climatiques (indices climatiques) qui influencent leur variabilité temporelle. L'application de la méthode en composantes principales leur a permis ainsi de définir trois régions hydrologiques homogènes dont deux sont situées de part et d'autre du 47°N en rive sud et l'autre en rive nord. Ils ont observé une hausse significative des débits d'étiage 7 jours estivaux et hivernaux en rive sud au sud de ce parallèle en raison de la hausse des précipitations estivales et automnales, mais une diminution significative de ces débits en été en rive nord en raison d'une hausse de l'évapotranspiration. Aucun changement significatif ne fut observé pour les rivières situées en rive sud au nord du 47°N. Seule l'oscillation nord-atlantique (ONA) était corrélée positivement à ces débits en rive nord, mais négativement en rive sud. Assani *et al.* (2014a, 2014b, 2016) ont analysé aussi la variabilité temporelle des débits minimums mensuels et annuels du fleuve Saint-Laurent pendant la période 1918-2012 en relation avec les indices climatiques. En ce qui concerne les débits

minimums annuels, ils n'ont détecté aucune tendance significative pendant la période 1918-2010. Ces débits étaient corrélés négativement à l'oscillation atlantique multi-décennale. Quant aux débits mensuels minimums, ils ont, en revanche, observé une diminution significative des débits minimums en hiver, au printemps et en automne en raison probablement d'une diminution de la quantité de neige. Ces débits étaient aussi corrélés au même indice climatique. À l'échelle pancanadienne, Khaliq *et al.* (2008) ont observé une diminution significative des débits minimums des différentes (y compris les débits minimums annuels) au Québec. Quant à Ehsanzadeh et Adamowski (2010), ils ont observé une occurrence précoce des débits minimums dans certaines rivières du Québec.

En ce qui concerne les impacts des activités et aménagements anthropiques, plusieurs études ont été déjà réalisées sur ces aspects au Québec. Les impacts de la déforestation/ou de l'agriculture sur les débits minimums ont été étudiés par plusieurs auteurs. Rappelons que selon Robinson *et al.* (2003), les impacts de la déforestation et de l'agriculture sur les débits varient d'une région à l'autre en raison des différences des caractéristiques physiographiques, climatiques et végétales. Il est donc inutile de comparer ces impacts d'un continent à l'autre. En Amérique du Nord, il est couramment admis que les impacts de la déforestation et de l'agriculture se traduisent par une diminution des débits minimums (Robinson *et al.*, 2003). Cette conclusion a été confirmée par Poff *et al.* (2006) dont l'étude était fondée sur 158 petits bassins versants (< 282 km²) situés dans les différentes régions des États-Unis. C'est la plus vaste étude menée jusqu'à présent en Amérique du Nord. Au Québec aussi, cette conclusion a été vérifiée aussi par Muma *et al.* (2011) qui ont observé une diminution significative des débits minimums mensuels pendant la période végétative (de mai à octobre) dans tous les bassins versants dont la couverture forestière était inférieure à 90 %. Ils ont ainsi conclu que les effets de la déforestation sur les débits minimums surviennent lorsque la superficie forestière dans un bassin versant est réduite d'au moins 10 %. Toutefois, Lavigne *et al.* (2004) ont, en revanche, conclu à une hausse potentielle des débits minimums dans le bassin versant de la rivière Famine, affluent de la rivière Chaudière en cas d'une déforestation du bassin versant. Cette conclusion est basée sur des études

de simulation au moyen d'un modèle hydrologique. Quoi qu'il en soit, d'après les observations publiées par l'Ordre des Ingénieurs forestiers du Québec (1996), la déforestation provoquait une hausse significative des débits minimums dans les provinces d'Ontario et du Nouveau-Brunswick. En ce qui concerne les impacts de la déforestation et/ou de l'agriculture sur la variabilité temporelle des débits minimums, à notre connaissance, il n'existe encore aucune étude sur ce sujet au Québec. Toutefois, Quilbé *et al.* (2008) ont analysé les impacts de changement d'utilisation des sols (hausse de la superficie agricole) sur les débits minimums notamment dans le bassin versant de la rivière Chaudière d'une part, et ceux résultant de l'évolution de ce changement d'utilisation des sols dans un contexte de réchauffement climatique, d'autre part. En ce qui concerne le premier cas (hausse dans le temps de la superficie agricole), la hausse de la superficie de l'agriculture dans le bassin versant s'est traduite par une hausse des débits minimums (de différentes durées) estivaux. Quant au second cas, les résultats furent mitigés. En effet, ils dépendaient des scénarios de gaz à effet de serre et des modèles climatiques ainsi que les scénarios de l'évolution de la superficie agricole. Ils conclurent qu'il était donc difficile d'élaborer un scénario d'impact de réchauffement climatique fiable. Quoi qu'il en soit, ces auteurs ont insisté sur le fait qu'il est important de prendre en compte les effets de l'agriculture pour prédire l'évolution des débits dans le contexte du réchauffement climatique dans les bassins versants agricoles.

Les impacts de barrages et réservoirs ont déjà fait l'objet de quelques publications au Québec. Il faut d'abord rappeler que la thèse la plus couramment défendue dans la littérature scientifique est le fait que les impacts des barrages et réservoirs se traduisent couramment par une hausse des débits minimums. Cette thèse a été confirmée par la vaste étude menée par Poff *et al.* (2006) sur les impacts de barrages sur les débits minimums annuels dans 43 bassins versants situés dans toutes les régions des États-Unis. Au Québec, d'après les travaux réalisés sur ce sujet (p. ex., Assani *et al.*, 2005; Lajoie *et al.*, 2006), cette hausse des débits minimums n'est pas généralisée en aval de tous les barrages et réservoirs. Les impacts dépendent du mode de gestion des barrages et des réservoirs. En effet, selon le mode de gestion, les débits minimums peuvent augmenter, diminuer ou rester constants en aval de ces aménagements.

Quant à l'urbanisation, à notre connaissance, aucune étude n'existe encore sur leurs impacts sur les débits minimums au Québec. En revanche, aux États-Unis, Poff *et al.* (2006) ont observé une diminution des débits minimums dans les bassins versants dont plus de 15 % de la superficie ont été urbanisés. Dans cette étude, l'urbanisation génère les mêmes impacts hydrologiques que l'agriculture.

La présente étude s'inscrit dans un programme de recherche qui vise à déterminer les impacts de deux principaux facteurs anthropiques : les barrages et réservoirs, ainsi que le changement de l'utilisation des sols sur la variabilité spatio-temporelle des caractéristiques des différents types des débits définies selon le concept écologique des débits naturels. Dans le cadre de ce programme, de nombreux travaux ont été déjà consacrés sur les caractéristiques des débits et des niveaux d'eau aux échelles annuelles (voir la liste complète de ces publications aux sites web suivants : https://oraprdnt.uqtr.quebec.ca/pls/public/gscw045a.afficher_detail_form_reponse?owa_no_site=1423&owa_bottin=&owa_no_fiche=15&owa_no_form_reponse=37981&owa_aperçu=N&owa_imprimable=N&owa_fenetre_surgissante=N&owa_no_champ_selecti onne=&owa_no_choix_selectionne=&owa_lettre=%&owa_no_page=1 et https://oraprdnt.uqtr.quebec.ca/pls/public/gscw030?owa_no_site=1459). À l'échelle journalière, très peu de ces travaux ont analysé les débits minimums journaliers. Rappelons que Assani *et al.* (2006) ont analysé les facteurs de variabilité spatiale des débits minimums annuels. Quant à Assani *et al.* (2011), ils ont analysé les facteurs climatiques qui influencent la variabilité temporelle des débits minimums saisonniers en hiver et en été. Muma *et al.* (2011) ont analysé l'impact de la superficie agricole sur les débits minimums mensuels notamment dans plusieurs bassins versants du Québec méridional. Enfin, Assani *et al.* (2005) ont comparé les impacts des barrages sur les caractéristiques des débits minimums annuels.

Toutes ces études réalisées dans le cadre de ce programme n'ont pas encore analysé les impacts des barrages et de changement d'affectation des sols sur la variabilité temporelle des caractéristiques des débits minimums annuels, saisonniers ou mensuels. C'est une lacune qu'il faut combler afin de pouvoir déterminer les facteurs

climatiques qui influencent cette variabilité temporelle. Par ailleurs, il existe une controverse sur les impacts de changement d'affectation des sols sur les débits minimums au Québec. En effet, certaines études ont démontré que les changements d'affectation des sols (déforestation et/ou agriculture) se traduisent par une hausse des débits minimums (par exemple, Lavigne *et al.*, 2004). D'autres, en revanche, ont mis en évidence une diminution des débits minimums dans les bassins versants agricoles (par exemple, Muma *et al.*, 2011). Il importe donc d'analyser cette problématique en abordant la variabilité spatiale des caractéristiques des débits minimums dans des bassins versants qui n'ont pas été analysés par Muma *et al.* notamment. Enfin, en ce qui concerne les barrages, il était aussi important de vérifier si les conclusions obtenues par Assani *et al.* (2005) pouvaient être généralisées à d'autres bassins versants qui n'ont pas été analysés par ces auteurs. Rappelons que ces derniers auteurs ont démontré l'influence du mode de gestion des barrages sur les caractéristiques des débits minimums, aspect qui n'a jamais été mis en évidence dans la littérature scientifique. Enfin, outre les deux facteurs anthropiques, les travaux récents ont démontré une diminution de la quantité de neige au Québec depuis la décennie 1980 (Brown, 2010; Guerfi *et al.*, 2015). Cette diminution était plus importante en rive nord qu'en rive sud du fleuve. À la lumière de ces considérations, notre mémoire poursuit les objectifs suivants :

1. Comparer la variabilité temporelle des caractéristiques des débits minimums annuels dans deux bassins versants se différenciant par l'utilisation des sols. Cet objectif repose sur l'hypothèse suivante : dans le bassin versant agricole, les caractéristiques des débits minimums annuels ont subi plus de changements de leurs propriétés statistiques (la moyenne en particulier) dans le temps que dans le bassin forestier.
2. Comparer la variabilité temporelle en aval de deux barrages se différenciant par leurs modes de gestion. Cet objectif repose sur l'hypothèse suivante : les caractéristiques des débits minimums journaliers extrêmes sont beaucoup plus modifiées en aval du barrage à régime hydrologique régularisé de type inversion qu'en aval du barrage à régime hydrologique régularisé de type

naturel. Quelle est l'échelle d'analyse des débits la plus appropriée pour détecter et suivre les impacts de ce réchauffement?

3. Comparer les facteurs climatiques qui influencent la variabilité temporelle des caractéristiques des débits minimums extrêmes annuels dans les deux bassins versants et les deux bassins versants régularisés. L'hypothèse qui sous-tend cet objectif est la suivante : en rivières naturelles, en raison de l'influence de l'utilisation des sols sur la variabilité temporelle des débits minimums extrêmes annuels, les facteurs climatiques qui influencent cette variabilité sont différents dans un bassin agricole que dans un bassin forestier. Cette différence sera observée aussi en aval des barrages.
4. Analyser les impacts potentiels de la diminution de la quantité de neige observée en rive nord depuis la décennie 1980. L'hypothèse qui sous-tend cet objectif est la suivante : la magnitude des débits minimums annuels a significativement diminué en milieu forestier et en milieu agricole. Mais cette diminution est plus importante dans le premier milieu que dans le second.
5. Comparer la variabilité spatiale des caractéristiques des débits minimums annuels en rivières naturelles et en rivières régularisées. Cet objectif repose sur l'hypothèse suivante : la magnitude des débits minimums annuels est plus faible dans un bassin versant agricole que dans un bassin versant forestier. De plus, ces débits surviennent beaucoup plus tôt dans le premier que dans le second bassin versant. Ces différences s'observent aussi en aval des barrages.

1.2 Revue de littérature sur les méthodes d'analyse d'impacts des barrages et des changements d'utilisation des sols

1.2.1 Méthodes d'études d'impacts hydrologiques induits par les barrages

Dans la littérature, trois méthodes sont couramment utilisées pour analyser les impacts de barrages (Assani *et al.*, 2005) :

- La méthode de station témoin qui consiste à comparer les données des débits mesurées à la même station avant et après la construction d'un barrage (voir entre autres, Richter *et al.*, 1997).
- La méthode de station contrôle basée sur la comparaison des débits mesurés en amont et en aval d'un barrage (voir entre autres, Assani *et al.*, 2005) ou sur la comparaison des débits mesurés sur une rivière non influencée par un barrage et en aval d'un barrage (voir entre autres, Benn et Erskine, 1994).
- La méthode de simulation hydrologique qui consiste à comparer les débits naturels reconstitués au moyen d'un modèle hydrologique aux débits effectivement mesurés à une station influencée par un barrage (Peters et Prowse, 2001).

1.2.2 Méthodes d'études d'impacts hydrologiques induits par les changements d'utilisation des sols

Quatre méthodes sont couramment utilisées pour quantifier les impacts des changements de l'utilisation des sols. Ces méthodes sont déjà largement décrites dans le mémoire de maîtrise d'un collègue du laboratoire. Par conséquent, je me limiterai à une brève description de chacune d'elle.

- La méthode d'appariement des bassins ou bassins comparatifs est fondée sur la comparaison des débits dans deux bassins versants se différenciant par l'utilisation des sols, mais dont les caractéristiques physiographiques et climatiques sont presque similaires (Andréassian, 2004).
- La méthode des bassins versants expérimentaux est basée sur la comparaison des débits dans un même bassin versant avant et après le changement de l'utilisation des sols (p. ex., Serrano *et al.*, 1985; Robinson *et al.*, 1991; Caissie *et al.*, 2002; Archer, 2003).
- La méthode de simulation ou de modélisation hydrologique consiste à simuler le cycle de l'eau dans un bassin versant au moyen d'un modèle hydrologique

dans les conditions naturelles (sans changement d'utilisation des sols) et comparer ce cycle de l'eau observé dans le contexte de l'utilisation des sols (p. ex., Bultot *et al.*, 1990; Roberts et Harding, 1996; Baron *et al.*, 1998; Watson *et al.*, 1999; Hernandez *et al.*, 2000).

- Enfin, la méthode de regroupement des bassins versants consiste à appliquer un modèle de régression multivariée afin d'examiner la relation entre le débit et la végétation et les facteurs environnementaux (Wei *et al.*, 2005). Cette relation permet ainsi de déterminer l'importance de la végétation sur les débits et de prédire ainsi tout changement dans la couverture de cette végétation.

1.3 Méthodologie de recherche

1.3.1 Justification du choix des bassins versants et leur description

Trois critères ont été utilisés pour choisir les bassins versants à analyser :

1. L'existence de données des variables climatiques (températures et précipitations) et des débits mesurés sur une période relativement longue.
2. La présence des barrages avec des données de débits mesurées en amont et en aval sur une période relativement longue.
3. La différence d'affectation des sols entre les bassins versants (avec et sans l'agriculture).

Sur la base de ces trois critères, on a choisi deux bassins versants : le bassin versant de la rivière Matawin et celui de la rivière l'Assomption (voir chapitre II). Les deux bassins versants sont contigus. Cette contiguïté garantit beaucoup de similitudes des conditions climatiques et physiographiques des deux bassins versants.

Le bassin versant de la rivière Matawin couvre une superficie totale de 5775 km². En 1930, on y a érigé un barrage pour alimenter en eau les centrales hydroélectriques

construites sur la rivière St-Maurice en aval pendant la période hivernale. Cet ouvrage draine une superficie de 4070 km². Les débits sont mesurés à une station située juste en aval du barrage (ID : 02NF005; 46°51'53''N, 73°38'59''O). Le barrage a inversé le régime hydrologique naturel de la rivière Matawin (voir chapitre II). Il existe une station (Saint-Michel-Des-Saints, ID: 02NF003; 46°41'09''N; 73°54'51''O) des mesures des débits en amont de ce barrage depuis 1930. Cette station (1390 km²) n'est pas influencée par le barrage (Ouarda *et al.*, 1998). À la même station, on mesure aussi les données de température et des précipitations. Mentionnons que le bassin versant de la rivière Matawin, qui est le principal affluent de la rivière St-Maurice, est entièrement circonscrit dans le Bouclier Canadien. Celui-ci est constitué principalement des roches dures précambriennes. Le barrage Matawin a été érigé en 1930 par la Shawinigan Water and Power Co dans le but d'alimenter en hiver les centrales hydroélectriques situées plus en aval sur la rivière Saint-Maurice comme la centrale de la Gabelle et la centrale de Grand-Mère. Il n'est donc doté d'aucune centrale hydroélectrique. Au printemps (de mi-avril au début mai), l'eau de la fonte des neiges est stockée dans le réservoir Taureau tandis que la vidange du réservoir est amorcée dès la mi-novembre, et ce, durant tout l'hiver. C'est ce mode de gestion qui a provoqué l'inversion du cycle naturel des débits de la rivière. Durant les saisons printanières et estivales, une quantité d'eau est néanmoins relâchée épisodiquement en aval pour assurer le maintien de certaines activités récréotouristiques comme le canotage (rafting). De plus, lorsque la capacité maximale du réservoir est atteinte au printemps, le surplus de l'eau apportée par les pluies estivales et automnales n'est évidemment plus stocké. Par conséquent, l'eau utilisée en hiver pour la production de l'énergie hydroélectrique provient exclusivement de celle apportée par la fonte de neige au printemps et stockée dans le réservoir.

Quant à la rivière L'Assomption, elle draine une superficie totale de 4220 km² avant de se jeter dans le fleuve Saint-Laurent en aval de la ville de Montréal. Les deux tiers de la superficie du bassin versant de la rivière L'Assomption s'étendent sur le Bouclier Canadien et le tiers, sur les Basses Plaines de Saint-Laurent. Cette dernière formation géologique est constituée principalement des dépôts sédimentaires meubles. Aucun barrage hydroélectrique n'a été construit sur le cours

même de la rivière L'Assomption. Néanmoins, deux barrages hydroélectriques furent érigés sur son affluent principal la rivière Ouareau; les barrages de Rawdon et de Crabtree. La rivière Ouareau draine une superficie totale de 1700 km². Le barrage de Rawdon (ID : X0004205; 46°02'45''N; 73°43'49'') fut construit en 1911 pour la production de l'énergie hydroélectrique. Il a été érigé au pied du Bouclier Canadien (zone de contact du Bouclier Canadien et des Basses Terres de Saint-Laurent). Ce barrage a induit un régime hydrologique régularisé de type naturel en aval. Ainsi, les débits maximums surviennent au printemps au moment de la fonte de neige et les débits minimums en hiver. Ce régime est donc comparable à celui de la rivière L'Assomption. Sur cette dernière rivière, les variables climatiques (température et précipitations) et les débits sont mesurés de manière continue à la station de Joliette (ID : 02OB001; 46°16'15''N; 73°46'18''O) respectivement depuis 1913 et 1925.

1.3.2 Sources et constitution des séries hydroclimatiques

Les données des variables climatiques ont été extraites du site Web d'Environnement Canada à l'adresse suivante : (http://climat.meteo.gc.ca/advanceSearch/searchHistoricData_f.html) et celles des débits, à l'adresse suivante : (<https://www.cehq.gouv.qc.ca/>). Notons qu'en ce qui concerne les données des débits mesurées en aval du barrage Matawin après 1994, elles nous ont été communiquées aimablement par Hydro-Québec, gestionnaire du barrage depuis 1962.

Les séries statistiques de données hydroclimatiques ont été constituées à partir des données journalières. L'année hydrologique a été définie de janvier à décembre. En ce qui concerne les caractéristiques des débits minimums journaliers annuels extrêmes (DMJAE), on a constitué les trois séries suivantes :

- La série de la magnitude des DMJAE constituée par la valeur la plus faible des débits journaliers mesurés chaque année (de janvier à décembre) pendant la période 1930-2010).

- La série de la durée des DMJAE constituée du nombre des jours pendant lesquels les DMJAE ont été mesurés chaque année pendant la période 1930-2010. Cette série représente aussi la fréquence d'occurrence des DMJAE.
- Enfin, la série de la période d'occurrence des DMJAE constituée par les premières dates d'occurrence (exprimées en jours juliens) des DMJAE pendant la période 1930-2010.

Quant aux variables climatiques, on a constitué sept séries selon la même approche.

- Une série des températures moyennes maximales journalières (TMMAX) constituée par des valeurs moyennes des températures maximales journalières mesurées chaque année pendant la période 1930-2010.
- Une série des températures moyennes minimales journalières (TMMIN) constituée par des valeurs moyennes des températures minimales journalières mesurées chaque année pendant la période 1930-2010.
- Une série des précipitations totales (PT) tombées chaque année pendant la période 1930-2010.
- Une série des précipitations totales tombées exclusivement sous forme de neige (PTN) chaque année pendant la période 1930-2010.
- Une série des précipitations totales tombées exclusivement sous forme de pluies (PTP) chaque année pendant la période 1930-2010.
- Une série des températures moyennes maximales journalières mesurées en été (TMMAXE) chaque année pendant la période 1930-2010.
- Une série des précipitations tombées exclusivement sous forme de pluie en été (PTPE) chaque année pendant la période 1930-2010.

1.3.3 Méthodes statistiques d'analyse des données

L'analyse statistique a été effectuée en trois principales étapes. À la première étape, on a comparé les moyennes des variables hydroclimatiques calculées sur la période 1930-2010 au moyen du t test apparié. À la seconde étape, on a calculé la stationnarité des séries climatiques et hydrologiques au moyen de l'analyse de Lombard. Cette méthode est décrite en détail au chapitre II. À la troisième étape, on a corrélé les sept variables climatiques aux trois caractéristiques des DMJAE, à l'aide de l'analyse de corrélation simple.

1.4 Résultats

1.4.1 Comparaison de la variabilité spatiale des caractéristiques des DMJAE

Les valeurs de la magnitude et de la durée des DMJAE sont plus élevées dans le bassin versant forestier (Matawin) que dans le bassin versant agricole (L'Assomption). Quant à la période d'occurrence, aucune différence significative n'a été observée en fonction de l'utilisation des sols. En aval des barrages, la magnitude des DMJAE est plus élevée en aval du barrage Rawdon, caractérisé par un mode de gestion de type naturel, qu'en aval du barrage Matawin, caractérisé par un mode de gestion de type inversé. En revanche, la durée des DMJAE est plus longue en aval de ce dernier qu'en aval du premier barrage. Enfin, les DMJAE surviennent fréquemment plus tôt dans l'année en aval du barrage Matawin qu'en aval du barrage Rawdon.

1.4.2 Comparaison de la variabilité temporelle des caractéristiques des DMJAE

L'application de la méthode de Lombard n'a révélé aucune différence significative des caractéristiques des DMJAE en fonction de l'utilisation des sols. En revanche, en aval des barrages, on a observé un changement significatif de la moyenne des périodes d'occurrence en aval du barrage Matawin. Ce changement s'est traduit par une occurrence de plus en plus précoce dans l'année des DMJAE en aval de ce barrage.

1.4.3 Corrélation entre les caractéristiques des débits et les variables climatiques

L'analyse de corrélations n'a révélé aucune influence de l'utilisation des sols sur le lien entre les caractéristiques des DMJAE et les variables climatiques. De fait, les caractéristiques des DMJAE sont corrélées presque aux mêmes variables climatiques dans les bassins versants de l'Assomption et de Matawin (en amont du barrage). En revanche, le lien entre ces variables est influencé par le mode de gestion des barrages. En effet, en aval du barrage de type inversé, la durée et la période d'occurrence des DMJAE ne sont corrélées significativement à aucune variable climatique contrairement aux faits observés en aval du barrage Rawdon.

1.5 Conclusion

Cette étude a permis de mettre en évidence l'influence de la différence de l'utilisation des sols et du mode de gestion des barrages sur la variabilité spatio-temporelle des caractéristiques des DMJAE. Ces caractéristiques sont plus fortement influencées par le mode de gestion des barrages que l'utilisation des sols. En ce qui concerne la variabilité temporelle, aucune différence ne fut observée sur la stationnarité des caractéristiques des débits minimums extrêmes entre les bassins versants agricoles et forestiers. En revanche, quant à la variabilité spatiale, les débits minimums extrêmes journaliers sont plus faibles et durent moins longtemps dans un bassin versant agricole que dans un bassin versant forestier. En aval des barrages, la différence entre les deux modes de gestion de barrages a été observée au niveau de la variabilité temporelle de la période d'occurrence des débits minimums extrêmes journaliers. De fait, en aval du barrage Matawin (régime hydrologique d'inversion), ces débits ont tendance à survenir tôt dans l'année. Quant à la variabilité spatiale, les débits minimums extrêmes journaliers sont plus élevés et surviennent tard en aval du barrage Ouareau (régime hydrologique de type naturel) qu'en aval du barrage Matawin (régime de type inversion). Enfin, la période d'occurrence et la durée des débits minimums extrêmes journaliers ne sont pas corrélées aux mêmes facteurs climatiques aussi bien en rivières naturelles qu'en rivières régularisées. Dans les deux bassins versants, aucun changement

statistiquement significatif de la quantité totale de neige ne fut observé. De plus, ce facteur n'est corrélé à aucune caractéristique des débits minimums extrêmes journaliers.

1.6 Références

- Adamowski J, Prokoph A, Adamowski K. 2011. Spatial temporal changes in streamflow patterns in eastern Ontario and southwestern Quebec, Canada and their relation to precipitation changes. *The International Journal of Climate Change: Impacts and Responses*, 3, 155-170.
- Adamowski J, Adamowski K, Prokoph A. 2013. Quantifying the spatial temporal variability of annual streamflow and meteorological changes in eastern Ontario and Southwestern Quebec using wavelet analysis and GIS. *Journal of Hydrology*, 499, 27-40.
- Affi A A, Clark V. 1996. *Computer-aided multi-variate analysis*. London, Chapman & Hall.
- Anctil F, Larouche W, Hoang VD. 2000. Analyse régionale des étiages 7-jours de la province de Québec. *Water Quality Resources Journal of Canada*, 35, 125-146.
- Anctil F, Coulibaly, P. 2004. Wavelet analysis of the interannual variability in Southern Québec Streamflow. *Water Resources Research*, 17, 163-173.
- Andréassian V. 2004a. Waters and forests: from historical controversy to scientific debate. *Journal of Hydrology*, 291: 1-27.
- Archer D. 2003. Scale effects on the hydrological impact of upland afforestation and drainage using indices of flow variability: the River Irthing, England. *Hydrology and Earth System Sciences*, 7, 325-338.
- Assani A.A., Gravel É, Buffin-Bélanger T., Roy AG. 2005. Impacts des barrages sur les caractéristiques des débits annuels minimums en fonction des régimes hydrologiques artificialisés au Québec (Canada). *Revue des sciences de l'eau*, 18, 103-127.
- Assani AA, Tadif S, Lajoie F. 2006. Statistical analysis of factors affecting the spatial variability of annual minimum flow characteristics in a cold temperate continental region (Southern Québec, Canada). *Journal of Hydrology*, 328, 753-763.

- Assani AA, Charron S, Matteau M, Mesfioui M, Quessy JF. 2010a. Temporal variability modes of floods for catchments in the St. Lawrence Watershed (Quebec, Canada). *Journal of Hydrology*, 385, 292-299.
- Assani AA, Landais D, Mesfioui M, Matteau M. 2010b. Relationship between an Atlantic multidecadal oscillation index and variability of mean annual flows for catchments in the St. Lawrence watershed (Québec, Canada) during the past century. *Hydrology Research*, 41, 115-125.
- Assani AA, Chalifour A, Légaré G, Manouane C-S, Leroux D. 2011. Temporal regionalization of 7-day low flow in the St. Lawrence watershed in Québec (Canada). *Water Resources and Management*, 25, 3661-3675.
- Assani AA, Landry R, Daigle J, Chalifour A. 2011. Reservoirs effects on the interannual variability of winter and spring streamflow in the St-Maurice River watershed (Quebec, Canada). *Water Resources Management*, 25, 3661-3675.
- Assani AA, Landry R, Laurencelle M. 2012. Comparison on interannual variability modes and trends of seasonal precipitation and streamflow in Southern Quebec (Canada). *River Research and Applications*, 28, 1740-1752.
- Assani AA, Landry R, S Biron, Frenette JJ. 2014. Analysis of the interannual variability of annual daily extreme water levels in the St Lawrence River and Lake Ontario from 1918 to 2010. *Hydrological Processes*, 28, 4011-40.
- Assani, A.A., Landry R, Labrèche M, Frenette JJ, Gratton D. 2014. Temporal variability of monthly daily extreme water levels in the St. Lawrence River at the Sorel station from 1912 to 2010. *Water*, 6, 197-214.
- Assani AA, Landry R, Azouaoui O, Massicotte P, Gratton D. 2016. Comparison of the characteristics (frequency and timing) of drought and wetness indices of annual mean water levels in the five North America Great Lakes. *Water Resources Management*, 30, 359-373.
- Belzile, L., Bérubé, P., Hoang, V.D., Leclerc, M. 1997. *Méthode écohydrologique de détermination des débits réservés pour la protection des habitats du poisson dans les rivières du Québec*. Rapport présenté par l'INRS-Eau et le Groupe-conseil Génivar inc. au ministère de l'Environnement et de la Faune et à Pêches et Océans Canada. 83 pp. + 8 annexes.
- Benn PC, Erskine WD. 1994. Complex channel response to flow regulation: Cudgegong River below Windamere Dam, Australia. *Applied Geography*, 14, 153-168.

- Brown, RD. 2010. Analysis of snow cover variability and change in Québec, 1948-2005. *Hydrological Processes*, 24, 1929-1954.
- Bultot F, Dupriez G.L., Gellens D. 1990. Simulation of land use changes and impacts on the water balance – a case study for Belgium. *Journal of Hydrology*, 114, 327-348.
- Caissie D, Jolicoeur S., Bouchard M., Poncet E. 2002. Comparison of streamflow between pre and post timber harvesting in Catamaran Brook (Canada). *Journal of Hydrology*, 258, 232-248.
- Cunjak RA, Prowse TD, Parris DL. 1998. Atlantic salmon (*Salmo Salar*) in winter: the season of parr discontent. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 55, 161-180.
- Ehsanzadeh E, Adamowski K. 2010. Trends in timing of low flows in Canada: impact of autocorrelation and long-term persistence. *Hydrological Processes*, 24, 970-980.
- Fortier C, Assani AA, Mhamed M, Roy AG. 2011. Comparison of interannual and interdecadal variability of heavy floods characteristics between upstream and downstream from Matawin dam. *Rivers Research and Applications*, 27, 1277-1289.
- 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*, 35, 4237-4246.
- Khaliq MN, Ouarda TBJM, Gachon P, Sushama L. 2008. Temporal evolution of low-flow regimes in Canadian rivers. *Water Resources Research*, 44 W08436, doi: 1029/2007WR006132
- Lajoie F, Assani AA, Matteau M, Mesfioui M et Roy A.G. 2006. Comparaison entre les débits réservés écologiques et les débits lâchés en aval des barrages au Québec. Influence du mode de gestion des barrages, de la taille des bassins versants et de la saison. *Water Quality Research Journal of Canada*, 41, 263-274.
- Landry R, Assani AA, Biron S, Quessy JF. 2014. The management modes of seasonal floods and their impacts on the relationship between climate and streamflow downstream from dams in Quebec. *Rivers Research and Applications*, 30, 287-298.

- Lavigne M-P, Rousseau AN, Turcotte R, Laroche A-M, Fortin J-P, Villeneuve J-P. 2004. Validation and use of a semi distributed hydrological modelling system to predict short-term effects of clear-cutting on a watershed hydrological regime. *Earth Interactions*, 8, 1-19.
- Lombard F. 1987. Rank tests for change point problems. *Biometrika*, 74, 615-624.
- Muma M, Assani AA, Landry R, Quessy JF, Mesfioui M. 2011. Effects of the change from forest to agricultural land use on the spatial variability of summer extreme daily flow characteristics in southern Quebec (Canada). *Journal of Hydrology*, 407, 153-163.
- Nalley D, Adamowski B, Khalil B. 2012. Using discrete wavelet transforms to analyze trends in streamflow and precipitation in Quebec and Ontario (1954-2008). *Journal of Hydrology*, 475, 204-228.
- Ordre des Ingénieurs Forestiers du Québec. 1996. *Hydrologie forestière et aménagement du bassin hydrographique*, in Manuel de Foresterie. Presses de l'Université Laval, St-Nicolas, Québec, 281-329.
- Peters DL, Prowse T. 2001. Regulation effects on the lower Peace River, Canada. *Hydrological Processes*, 15, 3181-3194.
- Poff, NL, Allan JD, Bain MB, Karr JR, Prestegard KL, Richter BD, Sparks RE, Stromberg JC. 1997. The natural flow regime. A paradigm for river conservation and restoration. *BioScience*, 47, 769-784.
- Poff NL, Blesdoe BP, Cuhaciyan CO. 2006. Hydrologic variation with land use across the contiguous United States: geomorphic and ecological consequences for stream ecosystems. *Geomorphology*, 79, 264-285.
- Quessy J-F, Favre A-C, Saïd M, Champagne M. 2011. Statistical inference in Lombard's smooth-change model. *Environmetrics*, 22, 882-893.
- Quilbé R, Rousseau AN, Moquet JS, Savary S, Ricard S, Garbouj MS. 2008. Hydrological responses of a watershed to historical land use evolution and future land use scenarios under climate change. *Hydrology and Earth Systems Sciences*, 12, 101-110.
- Richter, BD, Baumgartner JV, Powell J, Braun DP. 1996. A method for assessing hydrologic alteration within ecosystem. *Conservation Biology*, 10, 1163-1174.

- Roberts G, Harding RJ, 1996. The use of simple process-based models in the estimate of water balances for mixed land use catchments in East Africa. *Journal of Hydrology*, 180, 251-266.
- Robinson M, Gannon B, Schuch M. 1991. A comparison of the hydrology of moorland under natural conditions, agriculture use and forestry. *Hydrological Sciences Journal*, 36, 565-575.
- Robinson M, Cognard-Plancq A-L, Cosandey C, David J, Durand P, Führer H-W, Hall R, Hendriques MO, Marc V, McCarthy R, McDonnell M, Martin C, Nisbet T, O'Dea P, Rodger M, Zollner A. 2003. Studies of the impact of forests on peak flows and baseflows: a European perspective. *Forest Ecology and Management*, 186, 85-97.
- Smakhtin VU. 2001. Low flow hydrology: a review. *Journal of Hydrology*, 240, 147-186.
- Serrano SE, Whiteley HR, Irwin RW. 1985. Effects of agriculture drainage on streamflow in the Middle Thames River, Ontario, 1949-1980. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 12, 875-885.

CHAPITRE II

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

Ce chapitre est présenté sous forme d'article en anglais, et a été soumis et publié dans la revue *Water* (Jean-Michel **Sylvain**, Ali **Assani**, Raphaëlle **Landry**, Jean-François **Quessy** et Christophe **Kinnard**) sous le titre : « 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 ».

**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**

Jean-Michel Sylvain¹, Ali Assani^{2*}, Raphaëlle Landry³, Jean-François Quessy⁴ and
Christophe Kinnard⁵

¹ Department of Environmental Sciences, University of Quebec at Trois-Rivières, Trois-Rivières, 3351 Boulevard des Forges, Trois-Rivières, Québec, Canada, G9A 5H7; E-Mail: Jean-Michel.Sylvain@uqtr.ca

² Department of Environmental Sciences, University of Quebec at Trois-Rivières, Trois-Rivières, 3351 Boulevard des Forges, Trois-Rivières, Québec, Canada, G9A 5H7; E-Mail: Ali.Assani@uqtr.ca

³ Department of Environmental Sciences, University of Quebec at Trois-Rivières, Trois-Rivières, 3351 Boulevard des Forges, Trois-Rivières, Québec, Canada, G9A 5H7; E-mail: Raphaelle.Landry@uqtr.ca

⁴ Department of Mathematical and Computer Sciences, University of Quebec at Trois-Rivières, Trois-Rivières, 3351 Boulevard des Forges, Trois-Rivières, Québec, Canada, G9A 5H7; E-mail: Jean-Francois.Quessy@uqtr.ca

⁵ Department of Environmental Sciences, University of Quebec at Trois-Rivières, Trois-Rivières, 3351 Boulevard des Forges, Trois-Rivières, Québec, Canada, G9A 5H7; E-mail: Christophe.Kinnard@uqtr.ca

* Author to whom correspondence should be addressed; E-Mail: ali.assani@uqtr.ca; Tel.: +819-376-5011-3669; Fax: +819-376-5179

Abstract

This study presents a comparison of the spatio-temporal variability of characteristics (magnitude, duration and timing) of annual minimum daily extreme flows (AMEF) as a function of land use and the mode of management of dams. Streamflow measured at stations not affected by dams at Joliette, along the L'Assomption River (agricultural watershed, 1340 km²), and at Saint-Michel-des-Saints, on the Matawin River (forested watershed, 1390 km²) on one hand, and downstream from the Rawdon dam (regulated natural-type management mode), on the Ouareau River (1260 km²), which is the main tributary of the L'Assomption River, and from the Matawin dam (inverted-type management mode), on the Matawin River (4070 km²), on the other hand, were compared over the period from 1930 to 2010. As far as the spatial variability of natural rivers is concerned, the magnitude and duration of AMEF are higher in the forested watershed than in the agricultural watershed. In regulated rivers, AMEF magnitude is higher downstream from the dam characterized by a natural-type management mode than downstream from the dam characterized by inversion-type management. However, downstream from the latter, AMEF occur much more frequently and very early in the year. As for temporal variability, the Lombard method did not reveal any influence of land use differences on the stationarity of series of AMEF characteristics. In contrast, differences in dam management mode result in occurrences of AMEF downstream from the inversion-type dam progressively earlier in the year. The duration and timing of AMEF are not correlated with the same climate variables, be it in natural rivers or downstream from dams.

Keywords: annual minimum daily extreme flows; land use; dam management mode; statistical analysis

Introduction

Minimum extreme flows are sensitive to environmental changes induced by climate variability and human activities (deforestation, reforestation, urbanization, agriculture, dams, etc.). However, the impacts of such environmental changes vary between climate regions and between watersheds within the same climate region (e.g., [1]; [2]; [3]; [4]; [5]; [6]; [7]). In the current climate warming context, in the province of Quebec (Canada) for instance, a decrease in minimum streamflow is expected to result from increased evapotranspiration and lower springtime precipitation (lower infiltration) due to climate warming ([8,9]). Human activity could, however, prevent such a decrease. For instance, in a climate warming context, according to [8], deforestation would lead to a significant increase in minimum flows in summer in the Famine River watershed, a tributary of the Chaudière River. Using several general circulation models coupled with a hydrological model, [9] analyzed the impact of increased agricultural surface area, associated with increased temperature, on the evolution of summer minimum flows, among other things, in the Chaudière River watershed. Such predictions are often marred by relatively high uncertainty concerning the response of extreme hydrological events to climate warming (e.g., [10]; [11]). However, analysis of the spatial variability of minimum extreme flow characteristics during the growing season (May to October) revealed a decrease in magnitude of these flows in agricultural watersheds. The other characteristics (timing, frequency, variability) were not affected by agriculture ([12]). Aside from deforestation and farming, the impacts of numerous dams and reservoirs in Quebec on spatial variability of extreme minimum flows have been analyzed ([13]). These impacts depend on the type of dam management mode.

However, all these studies are restricted to the analysis of seasonal or monthly extreme minimum flows. Moreover, most of the studies focus on only one characteristic, namely magnitude, even though all characteristics (magnitude, frequency, duration, timing and variability) of extreme minimum flows affect fluvial ecosystem function (e.g., [14]; [15]). The analysis of all five characteristics is therefore important to better constrain the impacts of human activities and climate on the spatial and temporal variability of AMEF (annual minimum extreme flows) characteristics.

In light of the foregoing, the three objectives of this study are the following:

1. To compare the spatial and temporal variability of AMEF characteristics (magnitude, duration and timing) as a function of land use and dam management mode;
2. To compare the relationship between climate variables (temperature and precipitation) and AMEF characteristics as a function of land use and dam management mode;
3. To analyze the impacts of dam management mode on the relationship between AMEF characteristics and climate variables downstream from dams.

Methods

Study area

To study the effect of land use and dam management mode, two watersheds were chosen based on the following three criteria:

- The geographic proximity of the two watersheds to ensure similar physiographic features;
- The availability of long-term streamflow and climate (temperature and precipitation) measurements. These measurements are required to determine the effect of climate warming, land use and dam management mode on the interannual variability of streamflow;
- The ability to delineate more closely the impacts of land use and dam management mode types on the interannual variability of annual minimum daily extreme flows.

The first watershed chosen based on these criteria is the L'Assomption River watershed, of which 30% is covered by farmland. The main crops are forage plants (40% of crop area), corn and soy (38% of crop area), and grain crops (19% of crop area). Two dams were built in this watershed on the main tributary of the L'Assomption River, the Ouareau River. The two dams are located, respectively, near the foot of the Canadian Shield (Rawdon dam) and near the confluence of the Ouareau and L'Assomption Rivers (Crabtree dam) (Figure 1). The effect of the Rawdon dam is analyzed in this study because continuous streamflow measurements going back to 1919 are available. In contrast, the Crabtree dam was built in 1967, so that the associated record of streamflow measurements is much shorter. The Rawdon dam management mode is of regulated natural-type flow, meaning that downstream from the dam, maximum flows occur in the spring, during snowmelt, and minimum flows occur in winter (Figure 2b), as in natural rivers (Figure 2a). Therefore, the dam does not change the natural annual hydrological cycle of flow ([16]; [17]). Its impact on the hydrologic regime is restricted to a significant increase in flood flows ([17]). The dam is roughly 15-m high and the total area of its reservoir is on the order of 190 ha, for a total volume of roughly 6 000 000 m³ ([17]; [18]). The second watershed studied is the Matawin River watershed, which is typical of forested watersheds in the Canadian Shield of Quebec. Because of unfavorable climate and soil conditions, no farming is carried out in this watershed. In 1930, a 25-m high dam was built on the Matawin River. The total surface area of the reservoir is roughly 9500 ha and its total volume is estimated at approximately 950 000 000 m³. The dam management mode is of inversion-type, meaning that downstream from the dam, the annual hydrologic cycle of flows is completely inverted compared to that observed in pristine settings (Figure 2b): maximum flows are observed in winter while minimum flows occur in the spring, during snowmelt ([18]).

The L'Assomption River and its tributary, the Ouareau River, as well as the Matawin River, all originate in the Canadian Shield. Two thirds of the way down their respective courses, the L'Assomption and Ouareau flow through the St. Lawrence River Lowlands (Figure 1), the L'Assomption River flowing ultimately into the St. Lawrence. For its part, the Matawin River is entirely comprised within the Canadian Shield, where

it flows into the Saint-Maurice River. All three rivers show similar physiographic features due to the fact that they all flow through the Canadian Shield ([17]). Differences in their physiographic features (elevation, slope, course length, drainage density, etc.) cannot affect the interannual variability of streamflow in the three rivers. This variability is affected by climate and/or human activity. From a hydrological standpoint, in times of low flow, both watersheds are exclusively fed by Canadian Shield aquifers, and as a result, AMEF characteristics of both watersheds can be readily compared since the hydrogeological characteristics of these aquifers are similar.

Streamflow in the L'Assomption River watershed has been measured continuously since 1925 at the Joliette station (watershed surface area at this station: 1340 km²) and downstream from the Rawdon dam on the Ouareau River (watershed surface area: 1260 km²). Streamflow at the Joliette station is not affected by dams on the Ouareau River, since the station is upstream from the confluence of the L'Assomption and Ouareau Rivers. Streamflow in the Matawin River watershed has been measured continuously since 1930 at the Saint-Michel-des-Saints station (watershed surface area: 1390 km²) located upstream from the Matawin dam and at another station located immediately downstream from this dam (watershed surface area: 4070 km²). Streamflow measurements at the Saint-Michel-des-Saints station are not affected by the presence of the dam ([18]). Climate data are measured at the Joliette station in the L'Assomption River watershed and at the Saint-Michel-des-Saints station in the Matawin River watershed (Figure 1). These data are taken from the Environment Canada websites ([19] and [20]). However, streamflow data measured downstream from the Matawin dam after 1994 were kindly provided by Hydro-Québec, which manages the dam.

Hydrological and climate series

Three characteristics of streamflow were used to assemble hydrological time series for each of the four stations and each year from 1930 to 2010:

- AMEF magnitude, which is the lowest daily flow value for each year from January to December;

- AMEF duration, which is the number of days during which the lowest value of daily flow from January to December was measured. It is expressed in days and also reflects in part the annual frequency of AMEF;
- AMEF timing, which is the first date (expressed as a day of the year) when the lowest value of daily flow from January to December was measured.

Because it is not possible to define the variability of AMEF of annual series, this characteristic is not analyzed as part of this study.

Seven climate variable series were assembled as follows:

- a mean daily maximum temperature series (ATMAX) consisting of mean values of maximum daily temperatures measured each year from January to December;
- a mean daily minimum temperature series (ATMIN) consisting of mean values of minimum daily temperatures measured each year from January to December;
- a series of total precipitation (ATP) values fallen during each year from January to December;
- a series of total precipitation fallen exclusively as snow (ATSF) during each year from January to December. No data are available on the water content of snow;
- a series of total precipitation fallen exclusively as rain (ATRF) during each year from January to December;
- a mean daily maximum temperature series (STMAX) consisting of mean values of maximum daily temperatures measured during each summer (from July to September);
- a series of total precipitation fallen exclusively as rain (STRF) during each summer (from July to September).

Statistical analysis of hydroclimate series

Statistical analysis was done according to the following steps:

- To analyze the impacts of land use and dam management mode on the spatial variability of AMEF characteristics and climate variables, mean values of these hydroclimate variables calculated over the period from 1930 to 2010 were compared using the paired t test. AMEF magnitude was converted to specific discharge to remove any effect of differences in watershed size. As far as AMEF timing is concerned, monthly frequencies for both watersheds were also compared.
- The Lombard method was used to analyze the impacts of land use and dam management mode on the temporal variability of AMEF characteristics. This method allows the detection of shifts (sharp or gradual) in mean and variance values of series and the determination of the precise dates of these shifts. The mathematical basis for this method was described by ([21]) as well as ([22]). Its application to the analysis of hydroclimate data was documented, among others, by ([23]). In applying this method, the null hypothesis (absence of shift in mean or variance) is rejected at the 5% level when the S_n value of the Lombard test derived for observed hydroclimate series is larger than the (theoretical) critical value of 0.0403. This method was applied after removing any autocorrelation present in the analyzed series using the pre-whitening procedure ([24]) and to series of standardized values.
- The last step of this statistical analysis consisted in correlating the seven climate variables to the three AMEF characteristics. To avoid any effect of size on coefficient of correlation values, this method was applied to standardized values of the hydroclimate variables.

Results

Comparison of the spatial variability of climate variables and AMEF characteristics

Mean values of climate variables measured in both watersheds are shown in Table 1, which shows that temperature and precipitation are higher in the L'Assomption River watershed (agricultural watershed) than in the Matawin River watershed (forested watershed). However, the amounts of snow and of summer rain in the two watersheds do not differ significantly. Mean values of AMEF characteristics are presented in Table 2. For natural settings, AMEF magnitude and duration are lower in the L'Assomption River watershed than in the Matawin River watershed, whereas no significant difference in AMEF timing is observed between the two watersheds. Indeed, in both watersheds, AMEF are frequent in August and September, towards the end of the summer season (Fig. 3a). For regulated settings, AMEF magnitude is lower downstream from the Matawin dam (inversion management mode) than downstream from the Ouareau dam (natural management mode). However, AMEF occur much more frequently and earlier in the year downstream from the former than from the latter dam. Figure 3b reveals that AMEF occur frequently in October downstream from the Ouareau River dam, while they occur in April, during snowmelt, downstream from the Matawin River dam.

Comparison of the temporal variability of hydroclimate variables

As far as climate variables are concerned, results from the Lombard method reveal significant changes in mean minimum temperatures as well as mean total precipitation and mean rainfall (Table 3) in the L'Assomption River watershed. A shift in mean values of minimum temperature took place in 1950, while shifts in total precipitation and total rainfall occurred, respectively, in 1956 and 1960. Mean values of all three climate variables increased significantly after these shifts. In contrast, no shift in mean values of climate variables is observed for the Matawin River watershed. As for AMEF characteristics, their temporal variability is presented in Figures 4, 5 and 6. Use of the Lombard method revealed that, in natural settings, AMEF duration is the only characteristic that shows a shift in mean values (Tables 4 and 5), this break having

occurred in 1950 in the L'Assomption River watershed and in 1978 in the Matawin River watershed. This shift is abrupt for the former watershed, but gradual for the latter, and in both watersheds, AMEF duration decreased significantly after the shifts. This change in AMEF duration is also observed downstream from the dams. However, the shifts in mean are not synchronous in the L'Assomption River watershed, having occurred later downstream from the Ouareau River dam than upstream. In the Matawin River watershed, the shifts in mean values of AMEF duration upstream and downstream from the dam are synchronous. A break in mean values of AMEF timing is also observed in 1975 (Table 5) downstream from the Matawin River dam, after which AMEF tend to occur earlier in the year.

Analysis of the link between AMEF characteristics and climate variables

Coefficient of correlation values calculated between the three AMEF characteristics and the seven climate variables are shown in Tables 6 and 7. In natural rivers, AMEF magnitude is significantly correlated with total precipitation and rainfall in both watersheds, this correlation being positive. AMEF timing is positively correlated with maximum temperatures in the L'Assomption River watershed, while in the Matawin River watershed, it is negatively correlated with total precipitation as well as with annual and summer rainfall, but positively correlated with maximum summer temperature. Finally, AMEF duration is positively correlated with summer rainfall in the L'Assomption River watershed only.

Downstream from the Ouareau dam, the magnitude and timing of AMEF are positively correlated, respectively, with the amount of snow (ATSNF) and maximum temperatures (ATMAX). Duration is not significantly correlated with any climate variable. In contrast, downstream from the Matawin River dam, the first two characteristics are not significantly correlated with any climate variable, while duration is negatively correlated with the amount of rain (ATRNF).

Discussion and Conclusion

The impacts of land use and dam management modes on the spatial and temporal variability of AMEF characteristics (magnitude, duration and timing) as a function of climate variables were constrained as part of this study. To do so, two contiguous watersheds with similar physiographic and hydrogeological characteristics were selected, the L'Assomption River and Matawin River watersheds. The former is an agricultural watershed comprising a dam characterized by a natural-type management mode (maximum flows in the spring and minimum flows in winter), while the latter watershed is entirely forested and comprises a dam with an inversion-type management mode (maximum flows in winter and minimum flows in the spring).

Comparison of the mean values of AMEF timing revealed that these flows occur frequently in August and September in both watersheds. However, while their timing is synchronous, AMEF in the forested Matawin River watershed are higher and last longer than in the agricultural L'Assomption River watershed. Differences in precipitation cannot account for this difference between the two watersheds, because precipitation is higher in the latter (agricultural) watershed than in the former (forested). Like precipitation, annual and summer temperatures are higher in the agricultural watershed than in the forested watershed, and this difference in temperature may account for the higher magnitude and duration of AMEF in the forested watershed, as relatively higher temperature promotes evapotranspiration, leading to reduced AMEF magnitude and duration in the agricultural watershed. This factor was mentioned by ([12]) for other Quebec watersheds. According to these authors, the decrease in AMEF magnitude in agricultural watersheds does not result from reduced infiltration in these watersheds since peak flood flows in agricultural watersheds are not significantly different from those observed in forested watersheds. Such a decrease in the magnitude of minimum flows with a higher proportion of agricultural land in a watershed has been observed in many watersheds in the United States [6], among other places. In contrast, in Great Britain, an increase in agricultural area tends to lower the magnitude of minimum flows [5].

The lack of a statistically significant correlation between temperature and flow characteristics may be explained by the fact that, unlike rainfall, temperature does not directly affect minimum flow characteristics, its influence being effected through evapotranspiration and/or runoff ([24]). The study has highlighted the predominant influence of dam management mode on the spatial variability of AMEF characteristics in regulated rivers. Thus, downstream from the Matawin River dam, characterized by an inversion-type management mode, AMEF magnitude is much lower than downstream from the Ouareau River dam, characterized by a natural-type management mode. Furthermore, downstream from the former dam, AMEF last longer and occur earlier in the year than downstream from the latter. The inversion-type management mode is characterized by water storage in reservoirs in springtime during snowmelt, and water release in winter to supply hydroelectric power plants located downstream. Water storage in the spring produces long-lasting AMEF that frequently occur early (April) in the year. Thus, downstream from this type of dam, AMEF are not affected by evapotranspiration, but rather by large-scale water storage in reservoirs in the spring, during snowmelt.

As far as the temporal variability of AMEF characteristics is concerned, the only difference observed between the non-regulated rivers is the date and nature of the shift in mean values of AMEF duration. In the forested watershed, this shift occurred later and is gradual compared to the shift in mean observed in the agricultural watershed. In the latter watershed, this shift is synchronous with the break in minimum temperature. However, it was not possible to draw a causal link between the two variables. For regulated settings, little change is observed in the temporal variability of AMEF characteristics downstream from the two dams studied. The only significant change is a shift in mean AMEF timing downstream from the Matawin River dam, a shift that is not observed downstream from the other dam, nor in natural settings.

Analysis of correlation between the climate variables and the three AMEF characteristics revealed generally low coefficients of correlation, none of these coefficients exceeding 0.600, implying a weak linear relationship between AMEF

characteristics and climate variables. Be that as it may, in both the agricultural and forested watersheds, AMEF magnitude is better correlated with precipitation (particularly as rain) than with temperature. This positive correlation is explained by the occurrence of AMEF during the warm summer season, when aquifers are exclusively fed by rainwater infiltration. As for the timing of AMEF, while it is similar in the two watersheds, this characteristic is not significantly correlated with the same climate variables in the two watersheds: in the agricultural watershed, it is positively correlated with maximum temperature, while in the forested watershed, it is positively correlated with maximum summer temperature, and negatively correlated with precipitation. It follows that precipitation and temperature seem to have opposite effects on AMEF timing. As for AMEF duration, it is positively correlated with summer rain in the agricultural watershed, this correlation being absent in the forested watershed. Finally, these correlations change downstream from the dams, the largest difference being observed downstream from the inversion-type Matawin River dam.

In conclusion, human activity affects AMEF characteristics to varying degrees. Agriculture reduces the magnitude and duration of AMEF compared to the forested watershed. In the case of dams, the extent of changes in AMEF characteristics depends on the mode of management, with greater changes observed downstream from inversion-type dams.

References

1. Andréassian, V. Waters and forest: from historical controversy to scientific debate. *J. Hydrol.* **2004**, 291, 1-27.
2. Brown, A.E., Zhang, L., McMahon, T.A., Western, A.W., Versteessy, R.A. A review of paired catchment studies for determining changes in water yield resulting from alteration in vegetation. *J. Hydrol.* **2005**, 310, 28-61.
3. Consandey, C. Andréassian, V., Martin, C., Didon-Lescot, J.F., Lavabre, J., Folton, N., Mathys, N., Richard, D. The hydrological impact of the Mediterranean forest: a review of French research. *J. Hydrol.* **2005**, 235-249.

4. Farley, K.A., Jobbagy, E.G., Jackson, R.B. Effects of afforestation on water yield: a global synthesis with implications for policy. *Global Chang. Biol.* **2005**, 11, 1565-1576.
5. Johnson, R. The forest cycle and low river flows: a review of UK and international studies. *For. Ecol. Manage.* **1998**, 109, 1-7.
6. Poff, N.L., Bledsoe, B.P., Cuhaciyan, C.O. Hydrologic variation with land use across the contiguous United States: Geomorphic and ecological consequences for stream ecosystems. *Geomorph.* **2006**, 79, 264-285.
7. Smakhtin, V.U. Low flow hydrology: a review. *J. hydrol.* 2001, 240, pp. 147-186.
8. Lavigne, M-P.; Rousseau, A.N.; Turcotte, R.; Laroche, A-M.; Fortin, J-P.; Villeneuve, J-P. Validation and use of a semidistributed hydrological modelling system to predict short-term effects of clear-cutting on a watershed hydrological regime. *Earth Inter.* **2004**, 8, 1-19.
9. Quilbé, R.; Rousseau, A.N.; Moquet, J.-S.; Savary, S.; Ricard, S.; Garbouj, M.S. 2008. Hydrological responses of a watershed to historical land use evolution and future land use scenarios under climate change conditions. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 2008, 12, 101-110.
10. Arnell, N.W. Uncertainty in the relationship between climate forcing and hydrological response in UK catchments. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 2011, 15, 897-912.
11. Gosling, S.N.; Taylor, R.G.; Arnelle, N.W.; Todd, M.C. A comparative analysis of projected impacts of climate change on river runoff from global and catchment-scale hydrological models. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* **2011**, 15, 279-294.
12. Muma, M.; Assani, A.A.; Landry, R.; Quessy, J.F.; Mesfioui, M. Effects of the change from forest to agricultural land use on the spatial variability of summer extreme daily characteristics in southern Quebec (Canada). *J. Hydrol.* **2011**, 407, 153-163.
13. Assani AA, Gravel E, Buffin-Bélanger T, Roy AG. Impacts of dams on the annual minimum discharges according to artificialised hydrologic regimes. *J. Water Sci.* **2005**, 18, 103-127. (In French)
14. Poff, N.L.; Allan, J.D.; Bain, M.B.; Karr, J.R.; Prestegard, K.L.; Richter, B.D.; Sparks, R.E.; Stromberg, J.C. The natural flow regime. A paradigm for river conservation and restoration. *BioScience.* **1997**, 47, 769-784.

15. Richter, B.D.; Baumgartner, J.V.; Powell, J.; Braun, D.P. A method for assessing hydrologic alteration within ecosystem. *Conserv. Biol.* **1996**, *10*, 1163-1174.
16. Aubry, L; Assani, A.A.; Biron, S.; Gratton, D. Comparison of the hydromorphological evolution of the L'Assomption and Ouareau rivers channels (Quebec, Canada). *River Res. Applic.* **2013**, *29*, 979-990.
17. Landry, R.; Assani, A.A.; Biron, S.; Quessy, J.-F. The management modes of seasonal floods and their impact on the relationship between climate and streamflow downstream from dams in Québec (Canada). *River Res. Applic.* **2014**, *30*, 287-298.
18. Assani, A.A.; Buffin-Bélanger, T.; Roy, A.G. 2002. Impacts of a dam on the hydrologic regime of the Matawin river (Québec, Canada). *J. Water Sci.* **2002**, *15*, 557-574. (In French)
19. Environment Canada Web Page. Données Hydrométriques. Available online: http://climat.meteo.gc.ca/advanceSearch/searchHistoricData_f.html? (accessed on 10 october 2013).
20. Environment Canada Web Page. Données Hydrométriques. Available online: <http://www.wsc.ec.gc.ca/applications/H2O/index-fra.cfm> (accessed on 5 May 2013).
21. Lombard, F. Rank tests for changepoint problems. *Biometr.* **1987**, *74*, 615-624.
22. Quessy, J.-F.; Favre, A.-C.; Saïd, M.; Champagne, M. 2011. Statistical inference in Lombard's smooth-change model. *Environm.* **2011**, *22*, 882-893.
23. Assani, A.A.; Landry, R.; Daigle, J.; Chalifour, A. Reservoirs effects on the interannual variability of winter and spring streamflow in the St-Maurice River watershed (Quebec, Canada). *Water Res.Manage.* **2011**, *25*, 3661-3675.
24. Von-Storch H, Navarra A. (Eds). 1995. Analysis of Climate Variability. Springer, New-York.
25. Wittenberg, H. Effects of season and man-made changes on baseflow and low recession: case studies. *Hydrol. Process.* **2003**, *17*, 2113-2123.

Table 1. Comparison of mean values of climate variables in the L'Assomption (agricultural) and Matawin (forested) watersheds using the paired t test.

Climate variables	L'Assomption River watershed	Matawin River watershed	p-value
ATMAX (°C)	10.5	8.8	0.000
ATMIN (°C)	0.43	-3.1	0.000
ATP (mm)	942	882.1	0.007
ATSF (cm)	210.9	229.9	0.116
ATRF (mm)	727.8	658.7	0.001
STMAX (°C)	23.8	21.4	0.000
STRF (mm)	263.7	281	0.067

Statistically significant p-values at the 5% level are shown in bold.

Table 2. Comparison of mean values of daily annual minimum flow characteristics using the paired t test (1930-2010).

Flow characteristics	Pristine rivers			Regulated rivers		
	L'Assomption	Matawin (Upstream from dam)	p-values	Ouareau	Matawin (Downstream from dam)	p-values
Magnitude (l/s/km ²)	2.14	3.33	0.000	2.39	0.06	0.000
Duration (Days)	1.2	3.3	0.000	1.54	75.1	0.000
Timing (Day of year)	243.5	255.8	0.393	260.9	77.5	0.000

Statistically significant p-values at the 5% level are shown in bold.

Table 3. Comparison of the stationarity of climate variables in the two watersheds using the Lombard method (1930-2010).

Climate variables	L' Assomption River watershed			Matawin River watershed		
	Sn	T1	T2	Sn	T1	T2
ATMAX	0.0324	-	-	0.0275	-	-
ATMIN	0.1566	1949	1950	0.0106	-	-
ATP	0.1117	1955	1956	0.0285	-	-
ATSNF	0.0156	-	-	0.0145	-	-
ATRNF	0.1209	1959	1960	0.0285	-	-
STMAX	0.0214	-	-	0.0338	-	-
SRNF	0.0135	-	-	0.0195	-	-

Sn = Lombard test statistic. Statistically significant Sn values at the 5% levels are shown in bold. T1 and T2 = dates of start and end, respectively, of shifts in mean.

Table 4. Comparison of the stationarity of annual daily minimum flows in natural rivers using the Lombard method (1930-2010).

Flow characteristics	L'Assomption River			Matawin River (Upstream from dam)		
	Sn	T1	T2	Sn	T1	T2
Magnitude	0.0090	-	-	0.0109	-	-
Timing	0.0344	-	-	0.0092	-	-
Duration	0.0680	1949	1950	0.3817	1961	1978

Sn = Lombard test statistic. Statistically significant Sn values at the 5% levels are shown in bold. T1 and T2 = dates of start and end, respectively, of shifts in mean.

Table 5. Comparison of the stationarity of annual daily minimum flows in regulated settings using the Lombard method (1930-2010).

Flow characteristics	Ouareau River			Matawin River (Downstream from dam)		
	Sn	T1	T2	Sn	T1	T2
Magnitude	0.0046	-	-	0.0065	-	-
Timing	0.0327	-	-	0.2770	1974	1975
Duration	0.0712	1974	1975	0.3223	1961	1978

Sn = Lombard test statistic. Statistically significant Sn values at the 5% levels are shown in bold. T1 and T2 = dates of start and end, respectively, of shift in mean.

Table 6. Coefficients of correlation between characteristics of annual daily minimum flows and climate variables in natural settings (1930-2008).

Climate variables	L'Assomption River			Matawin River (Upstream from dam)		
	Magnitude	Timing	Duration	Magnitude	Timing	Duration
ATMax	-0.0304	0.2697*	0.0578	0.0000	0.1109	-0.0276
ATMin	-0.1067	0.0222	-0.1047	0.0506	0.1689	-0.0761
ATP	0.5040*	-0.0897	-0.0683	0.3502*	-0.3759*	-0.0387
ATSNF	0.2481*	-0.1482	0.0967	-0.2232	0.0981	-0.0375
ATRNF	0.4069*	-0.0662	-0.1252	0.3292*	-0.3397*	-0.1277
STMAX	-0.0059	0.1500	0.0523	0.0000	0.3617*	0.0085
SRNF	0.4142*	0.1583	0.2855*	0.0000	-0.3516*	-0.0153

* = statistically significant coefficients of correlation at the 5% level.

Table 7. Coefficients of correlation between characteristics of annual daily minimum flows and climate variables in regulated rivers (1930-2008).

Climate variables	Ouareau River			Matawin River (Downstream from dam)		
	Magnitude	Timing	Duration	Magnitude	Timing	Duration
ATMax	-0.0584	0.2697	-0.0968	-0.0072	-0.0139	-0.0616
ATMin	-0.0098	0.0222	-0.0177	0.1477	-0.0970	-0.0180
ATP	0.2249	-0.0897	-0.1611	0.1537	0.0015	-0.1005
ATSNF	0.2678	-0.1482	0.0795	-0.1179	-0.1092	-0.0065
ATRNF	0.1578	-0.0662	-0.0631	0.1216	0.2103	-0.3314
STMAX	-0.1360	0.1500	-0.0467	-0.1006	0.1192	-0.0667
RNF	0.1933	0.1583	0.1070	0.0087	-0.0342	-0.1971

* = statistically significant coefficients of correlation at the 5% level.

Figure 1. Location of the L'Assomption River and Matawin River watersheds.

1 = Saint-Michel des Saint station; 2 = Matawin downstream from dam station;
3 = Joliette station; 4 = Oureau downstream from dam station.

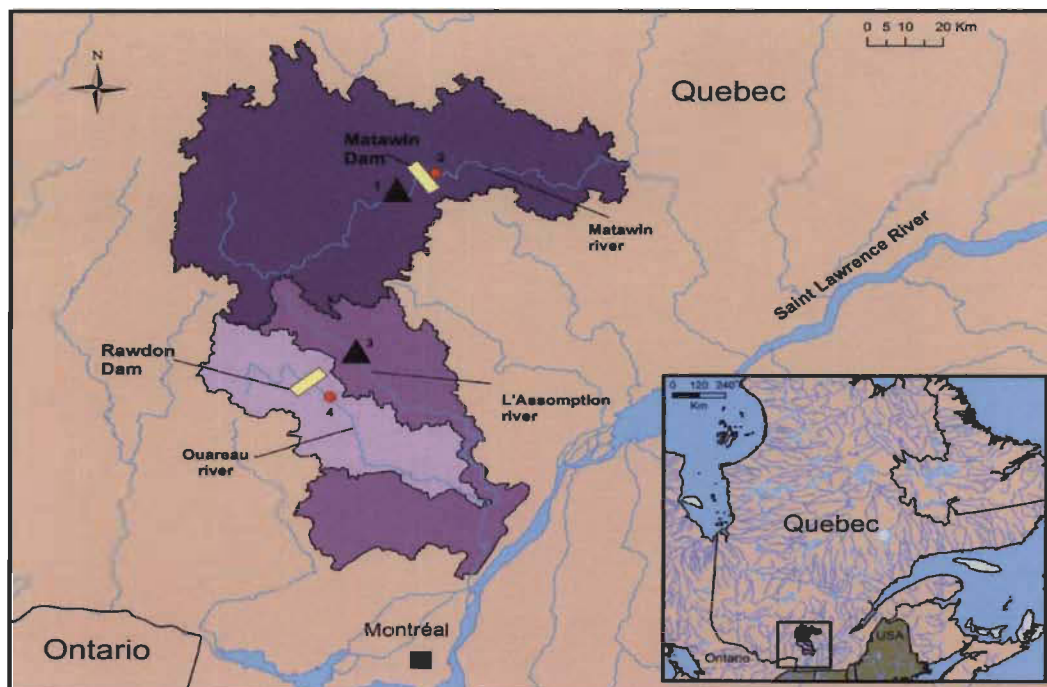


Figure 2a. Comparison of monthly discharge coefficients in natural rivers: L'Assomption River (blue bars) and Matawin River upstream from the Matawin dam (red bars).

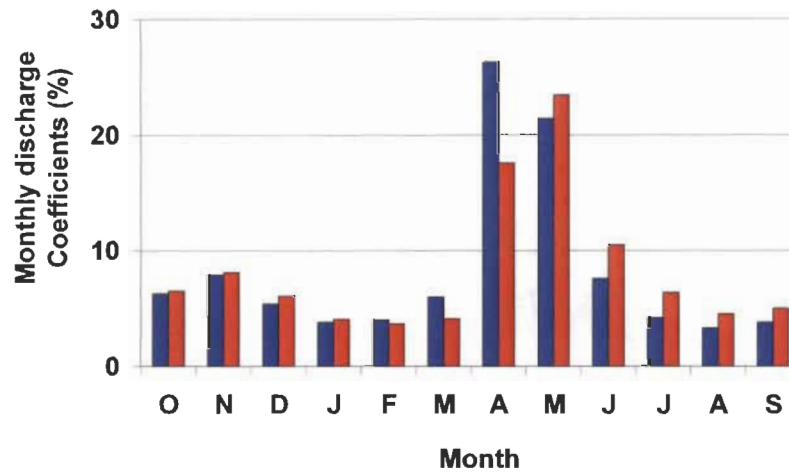


Figure 2b. Comparison of monthly discharge coefficients in regulated rivers: Ouareau River downstream from the Rawdon dam (blue bars) and Matawin River downstream from the Matawin dam (red bars).

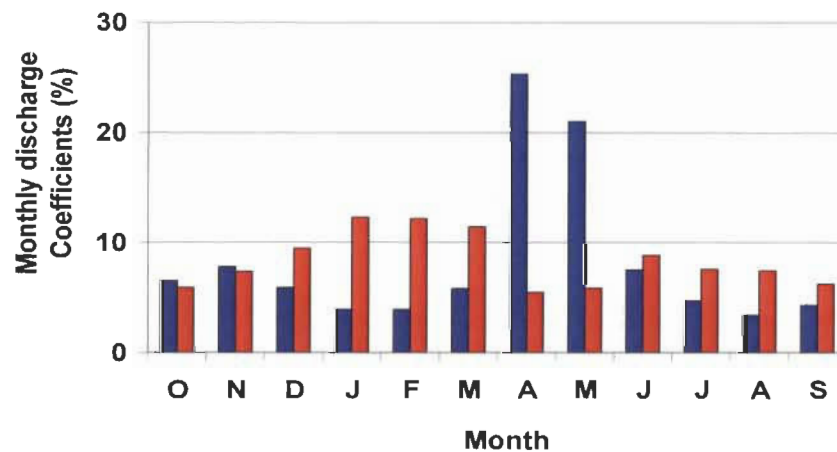


Figure 3a. Comparison of the monthly frequency of AMEF in the L'Assomption River (blue bars) and Matawin River upstream from the Matawin dam (red bars) from 1930 to 2010.

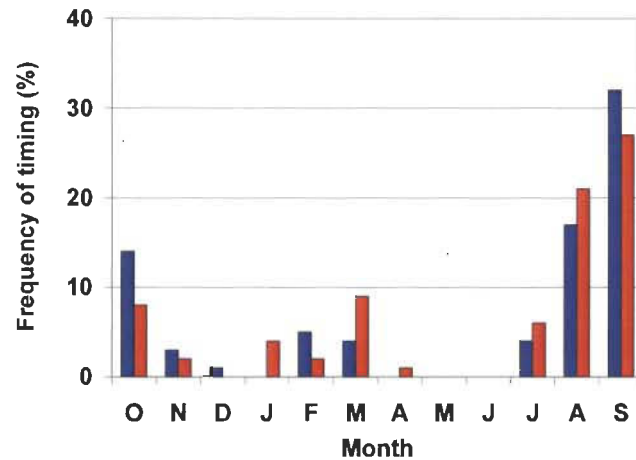


Figure 3b. Comparison of the monthly frequency of AMEF downstream from the Rawdon dam on the Ouareau River (blue bars) and from the Matawin dam on the Matawin River (red bars) from 1930 to 2010.

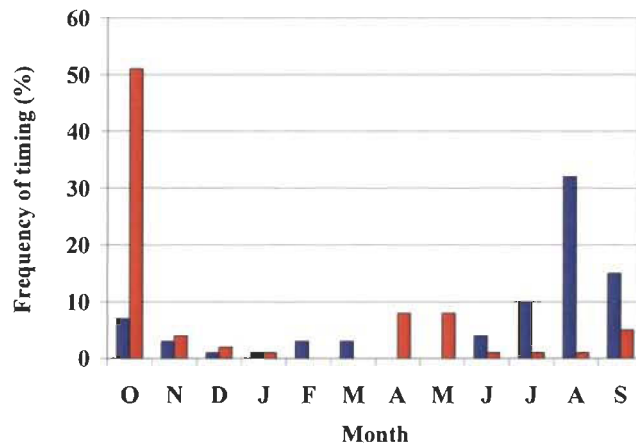


Figure 4a. Comparison of the temporal variability of AMEF magnitude in the L'Assomption River (blue curve) and Matawin River upstream from the Matawin dam (red curve), from 1930 to 2010.

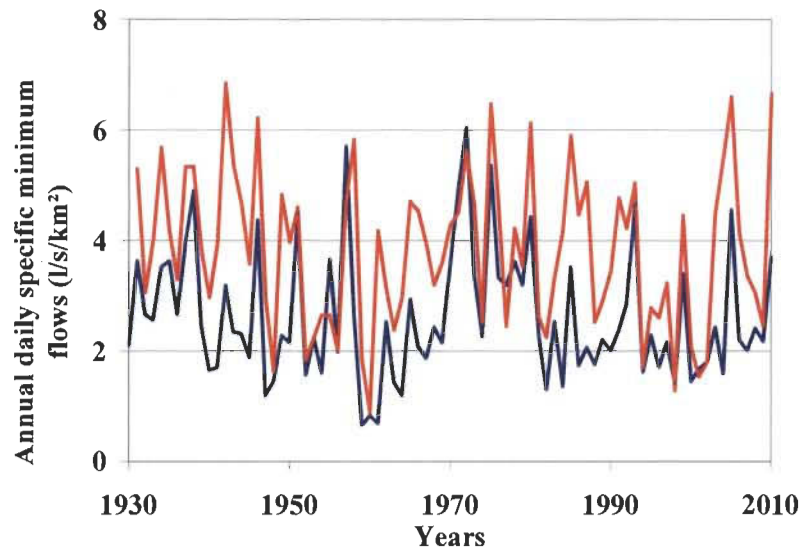


Figure 4b. Comparison of the temporal variability of AMEF magnitude (specific discharge) in the Ouareau River downstream from the Rawdon dam (blue curve) and in the Matawin River downstream from the Matawin dam (red curve) from 1930 to 2010.

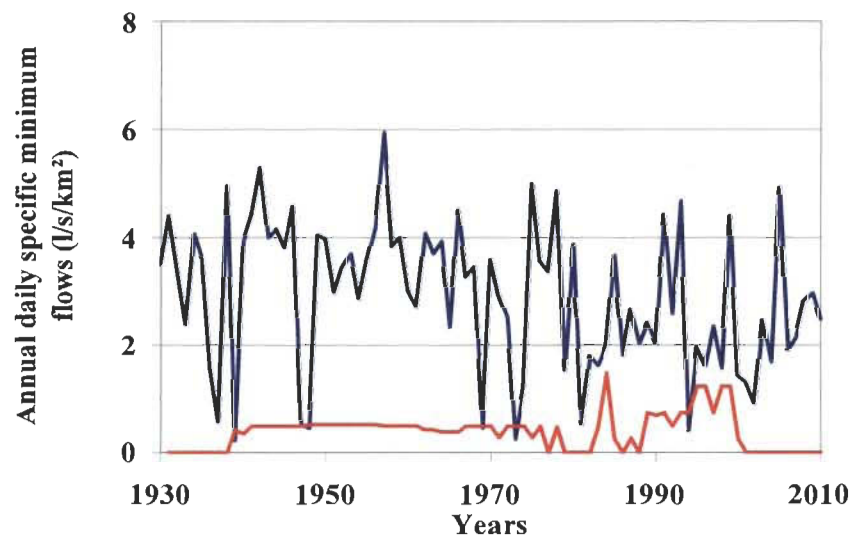


Figure 5a. Comparison of the temporal variability of AMEF duration in the L'Assomption River (blue curve) and Matawin River upstream from the Matawin dam (red curve), from 1930-2010.

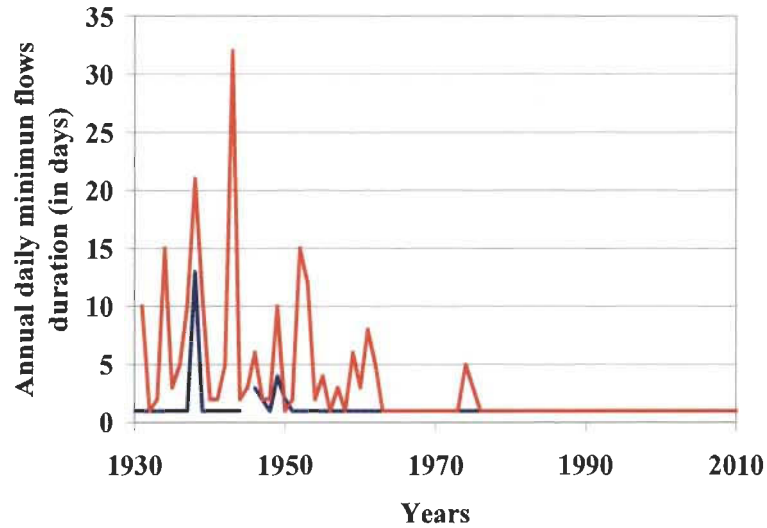


Figure 5b. Comparison of the temporal variability of AMEF duration in the Ouareau River downstream from the Rawdon dam (blue curve) and in the Matawin River downstream from the Matawin dam (red curve) from 1930 to 2010.

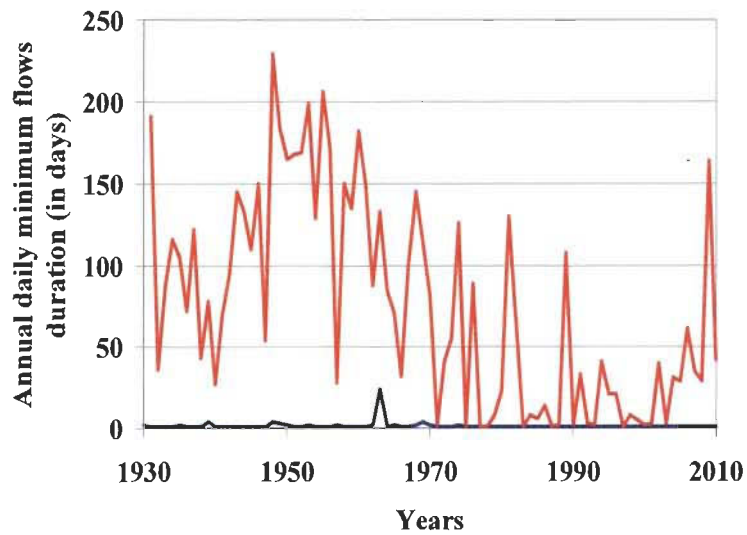


Figure 6a. Comparison of the temporal variability of AMEF timing in the L'Assomption River (blue curve) and Matawin River upstream from the Matawin dam (red curve), from 1930 to 2010.

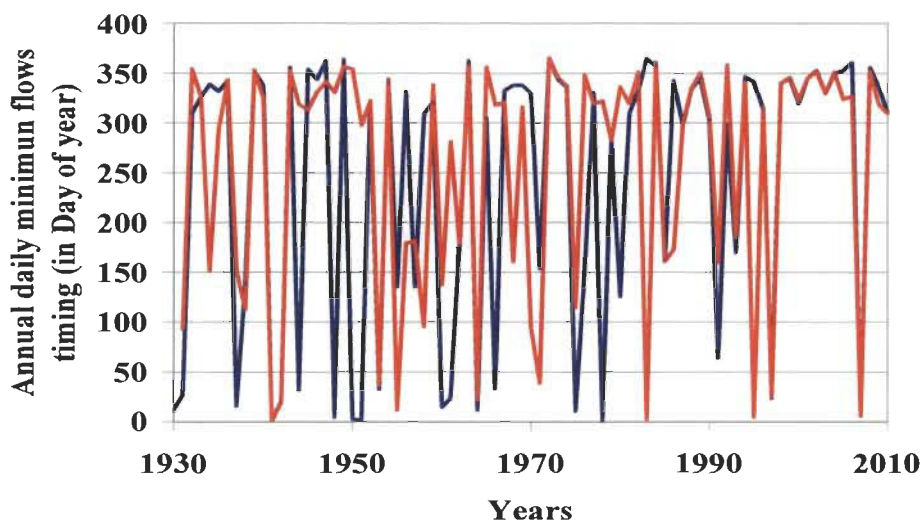
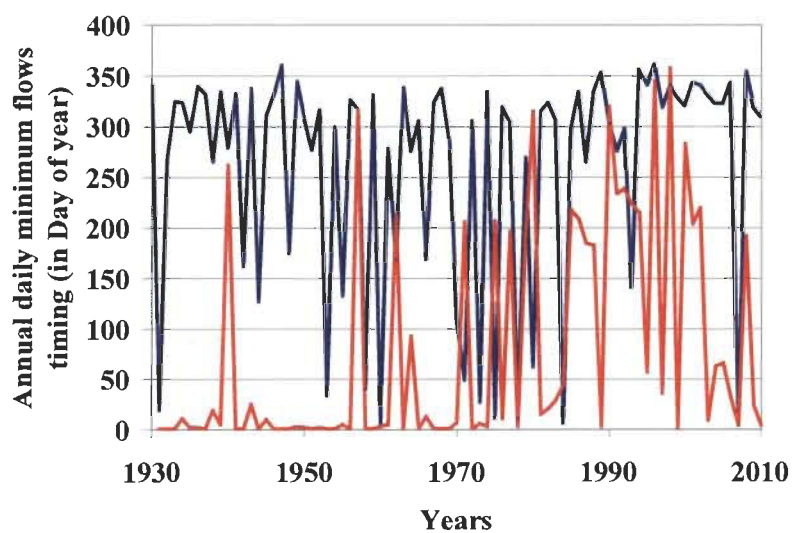


Figure 6b. Comparison of the temporal variability of AMEF timing in the Ouareau River downstream from the Rawdon dam (blue curve) and in the Matawin River downstream from the Matawin dam (red curve) from 1930 to 2010.



CHAPITRE III

CONCLUSION GENERALE

Cette étude a permis de cerner les impacts de l'utilisation des sols et du mode de gestion des barrages sur la variabilité spatio-temporelle des caractéristiques (magnitude, durée et période d'occurrence) des DMJAE en relation avec les variables climatiques.

La variabilité spatiale des caractéristiques des DMJAE n'est pas identique dans les deux bassins versants. En rivières naturelles, les DMJAE sont plus élevés et durent plus longtemps dans le bassin versant forestier malgré un quasi-synchronisme dans leurs périodes d'occurrence dans les deux bassins versants. Les températures étant plus élevées dans le bassin versant agricole que dans le bassin versant forestier, l'absence de corrélation statistiquement significative entre la température et les caractéristiques des DMJAE pourrait être expliquée par le fait que, les températures exercent leurs influences par le biais de l'évapotranspiration. En rivières régularisées, les DMJAE sont beaucoup plus faibles, durent longtemps et surviennent tôt dans l'année en aval du barrage caractérisé par un mode de gestion de type inversé (Rivière Matawin). Ces DMJAE sont influencés par le stockage des eaux dans les réservoirs au printemps au moment de la fonte de neige.

La variabilité temporelle des caractéristiques des DMJAE change peu dans les deux bassins versants. En rivières naturelles, elle est quasi similaire sauf pour les dates de ruptures des moyennes de la durée des DMJAE qui ne sont pas synchrones. Rien n'a permis d'expliquer cette différence, même si la rupture survenue plus tôt dans le bassin versant agricole est synchrones à celle des températures minimales. En aval des barrages, le seul changement significatif est la rupture de la moyenne des dates d'occurrence des DMJAE en aval du barrage Matawin. Cette rupture n'a pas été observée ni en aval de l'autre barrage ni en rivières naturelles.

En ce qui concerne le lien entre les caractéristiques des DMJAE et les variables climatiques, les caractéristiques des DMJAE sont faiblement liées linéairement aux variables climatiques, car l'analyse de corrélation a révélé que les coefficients sont globalement faibles. Enfin, cette corrélation est fortement influencée par le mode de gestion des barrages contrairement à l'utilisation des sols. En rivières naturelles, la magnitude est mieux corrélée aux précipitations qu'à la température à cause du fait que les DMJAE surviennent pendant la saison chaude estivale, période pendant laquelle les nappes aquifères sont exclusivement alimentées par les eaux d'infiltration de pluies. La période d'occurrence n'est pas corrélée aux mêmes variables climatiques malgré leur synchronisme, la corrélation positive entre la durée des DMJAE et les pluies estivales, observée dans le bassin versant agricole, disparaît dans le bassin versant forestier. En rivières régularisées les corrélations sont modifiées, la plus importante a été observée en aval du barrage de type inversion de la rivière Matawin.

Les aménagements anthropiques tels les activités agricoles et les barrages affectent beaucoup plus la variabilité spatiale des caractéristiques des DMJAE que leur variabilité temporelle. Ce constat suggère que dans le contexte du réchauffement climatique, la différence d'utilisation des sols aura peu d'impacts sur la variabilité temporelle des DMJAE. En revanche, la différence du mode de gestion peut affecter significativement la variabilité temporelle des DJMAE.