

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
LAURIANE AUBRY

ANALYSE DES IMPACTS DU BARRAGE DE RAWDON
SUR L'ÉVOLUTION HYDROMORPHOLOGIQUE DE
LA RIVIÈRE OUAREAU (QUÉBEC, CANADA)

AVRIL 2012

Université du Québec à Trois-Rivières

Service de la bibliothèque

Avertissement

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

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

REMERCIEMENTS

Je tiens à remercier spécialement mon directeur de maîtrise Ali Assani pour son support et son soutien pendant la réalisation de ce projet de maîtrise. De plus, je voudrais remercier les membres de mon comité d'évaluation, soit Messieurs Ali Assani, Denis Leroux, ainsi que Thomas Buffin-Bélanger. J'aimerais aussi prendre le temps de remercier famille, amies et collègues qui m'ont encouragée tout au long de ce processus et qui m'ont permis de me repousser mes limites.

RÉSUMÉ

Cette étude avait pour objectif d'analyser les impacts hydromorphologiques induits par le barrage de Rawdon construit sur la rivière Ouareau en 1913. Ce barrage a induit un régime de type naturel (débits maximums au printemps et débits minimums en hiver) en aval. Pour quantifier ces impacts, en l'absence des données hydromorphologiques avant la construction du barrage, nous avons appliqué la méthode de station contrôle. Celle-ci consiste à comparer l'évolution hydrologique et morphologique d'une rivière régularisée à celle d'une rivière non régularisée par un barrage. Nous avons ainsi comparé l'évolution hydromorphologique (débits maximums saisonniers, largeur à plein bord et sinuosité) de la rivière L'Assomption (rivière non régularisée par un barrage) à celle de la rivière Ouareau en aval du barrage de Rawdon pendant la période 1930-2008. La rivière Ouareau est le principal affluent de la rivière L'Assomption. La zone d'étude des deux rivières est située dans les Basses-Terres du Saint-Laurent, constituées principalement par un matériel non cohésif. L'évolution des débits aximums journaliers saisonniers de deux rivières a été analysée au moyen des méthodes de Lombard et du test t apparié. Quant à l'évolution morphologique, l'analyse diachronique des photographies aériennes prises en différentes périodes (1931, 1964, 1975, 1996 et 2008) a été effectuée au moyen des méthodes statistiques d'ANOVA et du test t apparié. Il ressort de cette comparaison les résultats significatifs suivants :

1. Sur le plan hydrologique, les débits maximums journaliers saisonniers ont significativement augmenté en aval du barrage de Rawdon comparativement à ceux de la rivière L'Assomption. En revanche, le barrage n'a pas affecté la variabilité interannuelle de ces débits. Cette variabilité interannuelle est identique pour les deux rivières. Elle est caractérisée par un changement significatif des débits maximums journaliers en hiver. Ce changement est survenu en 1973. Mais l'ampleur de ce changement a été plus importante pour la rivière L'Assomption que pour la rivière Ouareau.

2. La hausse des débits maximums journaliers aurait provoqué une augmentation de la largeur moyenne à plein bord et une diminution de la sinuosité du chenal de la rivière Ouareau. Pour une même superficie du bassin versant (1500 km²), la largeur moyenne à plein bord de la rivière Ouareau est presque deux fois supérieure à celle de la rivière L'Assomption, mais sa sinuosité est, en revanche, deux fois inférieure. Tous ces changements morphologiques se seraient produits avant 1930. Après cette date, ces deux variables morphologiques (largeur à plein bord et sinuosité) n'ont subi aucun changement.

Mots clés : Débits maximums journaliers saisonniers, largeur à plein bord, sinuosité, Méthode de Lombard, Test t apparié, ANOVA, Barrage de Rawdon, Rivière Ouareau, rivière L'Assomption, Basses-Terres du Saint-Laurent.

TABLE DES MATIÈRES

REMERCIEMENTS	ii
RÉSUMÉ.....	iii
LISTE DES FIGURES	vii
LISTE DES TABLEAUX.....	ix
LISTE DES ABRÉVIATIONS	x
CHAPITRE I	
INTRODUCTION GÉNÉRALE	1
1.1 Contexte de la recherche.....	1
1.2 Problématique.....	3
1.3 Objectif et hypothèses	5
CHAPITRE II	
REVUE DE LITTÉRATURE	8
2.1 Revue de la littérature succincte sur l'évolution morphologique des chenaux ..	8
2.1.1 Impacts des barrages sur les rivières.....	9
2.1.1.1 Impact sur le débit	9
2.1.1.2 Impact sur la charge sédimentaire	10
2.1.1.3 Impact sur le profil longitudinal et le profil transversal	11
2.1.1.4 Taux de changement et temps de réponse du système fluvial..	12
2.2 La classification des impacts morphologiques induits par les barrages selon Brandt	12
CHAPITRE III	
MATÉRIELS ET MÉTHODES	16
3.1 Choix et description des rivières d'étude	16
3.2 Justification du choix de la méthode d'analyse des données hydrologiques et morphologiques	24
3.3 Les données à analyser et leurs sources.....	25
3.4 Analyse des données.....	26
3.4.1 Analyse de données hydrologiques.....	26
3.4.2 Analyse des photographies aériennes	28

CHAPITRE IV	
RÉSULTATS	33
4.1 Comparaison de la variabilité interannuelle des débits maximums saisonniers des rivières Ouareau et L'Assomption	33
4.2 Comparaison de l'évolution de la largeur à plein bord et de la sinuosité des rivières Ouareau et L'Assomption	37
CHAPITRE V	
DISCUSSION ET CONCLUSIONS.....	42
BIBLIOGRAPHIE.....	50

LISTE DES FIGURES

Figure		Page
1.1	Schéma sur les impacts des barrages en lien avec les caractéristiques des débits.....	3
1.2	Les trois types des régimes hydrologiques régularisés observés en aval des barrages au Québec (Source : Assani et al., 2005)	5
2.1	Trinité de la dynamique fluviale.....	9
3.1	Bassin versant de la rivière L'Assomption (Source : MDDEP et Corporation de l'Aménagement de la rivière L'Assomption 2009).....	21
3.2	Localisation des stations hydrométriques et des sites d'étude morphologique sur les rivières Ouareau et L'Assomption	22
3.3	Comparaison des coefficients mensuels d'écoulement des rivières L'Assomption (barres bleues) et Ouareau (barres rouges) (1930-2008)	23
4.1	Comparaison de la variabilité interannuelle des débits maximums automnaux des rivières Ouareau (courbe en rouge) et L'Assomption (courbe en noir) pendant la période 1930-2008	35
4.2	Comparaison de la variabilité interannuelle des débits maximums hivernaux des rivières Ouareau (courbe en rouge) et L'Assomption (courbe en noir) pendant la période 1930-2008	35
4.3	Comparaison de la variabilité interannuelle des débits maximums printaniers des rivières Ouareau (courbe en rouge) et L'Assomption (courbe en noir) pendant la période 1930-2008	36
4.4	Comparaison de la variabilité interannuelle des débits maximums estivaux des rivières Ouareau (courbe en rouge) et L'Assomption (courbe en noir) pendant la période 1930-2008	36
4.5	Comparaison de l'évolution de la largeur à plein bord de la rivière L'Assomption en 1931 (courbe rouge) et en 2008 (courbe noire).....	39

4.6	Comparaison de l'évolution de la largeur à plein bord de la rivière Ouareau en 1931 (courbe rouge) et en 2008 (courbe noire)	40
5.1	Évolution des mandres recoupés de la rivière Ouareau a = 1931; b = 1975 et c = 2008	48-49

LISTE DES TABLEAUX

Tableau	Page
3.1 Comparaison des quelques caractéristiques physiographiques et de l'utilisation des sols des bassins versants de la rivière L'Assomption et de son affluent la Ouareau au niveau de leur confluence	19
3.2 Comparaison des quelques paramètres des courbes granulométriques des sédiments des berges des rivières Ouareau et L'Assomption en amont de leurs confluences	20
3.3 Les caractéristiques de deux barrages construits sur la rivière Ouareau	23
3.4 Informations sur les photographies aériennes et orthophotos analysées	26
3.5 Comparaison des erreurs en mètre au sol pour le géoréférencement de la rivière L'Assomption et Ouareau	31
4.1 Coefficients de corrélation calculés entre les débits maximums journaliers saisonniers des rivières Ouareau et L'Assomption (1930-2008).....	33
4.2 Méthode de Lombard appliquée sur la variabilité interannuelle des débits maximums journaliers saisonniers des rivières Ouareau et L'Assomption (1930-2008)	34
4.3 Comparaison des débits maximums saisonniers (m^3/s) des rivières L'Assomption et Ouareau (1930-2008) au moyen du test t apparié pendant la période 1930-2008	37
4.4 Comparaison de l'évolution de la largeur moyenne à plein bord des rivières L'Assomption et Ouareau pendant la période 1930-2008.....	38
4.5 Comparaison de l'évolution de la largeur moyenne à plein bord de la rivière L'Assomption au moyen du test de Tukey pendant la période 1930-2008	39
4.6 Comparaison des indices de sinuosité des rivières L'Assomption et Oureau pendant la période 1930-2008	40

LISTE DES ABRÉVIATIONS

m	Mètres
km ³	Kilomètre cube
MW	Mégawatts
Q	Écoulement
S	Pente du chenal
Lb	Matériel du lit
D	Diamètre du matériel du lit
Q	Débit
L	Charge sédimentaire
K	Capacité de transport

CHAPITRE I

INTRODUCTION GÉNÉRALE

1.1 Contexte de la recherche

Au fil du temps, la taille et le nombre des retenues d'eau ont significativement augmenté en raison de la diversification de leurs usages. Cette augmentation s'est accélérée avec l'avènement de l'électricité. Cette nouvelle énergie supplanta très rapidement les autres formes de production d'énergie. Son utilisation accrue dans les industries et pour les besoins domestiques nécessita la construction d'ouvrages de plus en plus imposants à travers le monde. C'est durant le 20^e siècle que la construction de ces ouvrages a connu un essor particulièrement important pour atteindre son apogée durant la décennie 1970 (Rosenberg et al., 2000). Selon Dynesius et Nilsson (1994), plus du tiers des cours d'eau de l'hémisphère nord sont plus ou moins profondément regularisés. De fait, durant le siècle passé, le nombre des grands barrages dont la hauteur d'ouvrage atteint ou dépasse 15 m est passé de 500 à 42000 (Morris et Fan, 1997 cités par Lopez-Moreno et al., 2004). La quantité d'eau stockée par ces barrages a atteint 6000 km³. Le Québec n'a pas échappé à cette vague de construction. En effet, d'après Astrade (1998), on dénombrerait plus de 10 000 barrages et digues au Québec ayant des utilisations diverses dont la principale est l'hydroélectricité.

L'histoire du développement hydroélectrique au Québec peut être subdivisée en trois grandes périodes : la période avant la nationalisation de l'énergie hydroélectrique en 1962, la période après la nationalisation jusqu'en 1970 et la période post-1970. La première période est caractérisée par un émiettement de la production hydroélectrique à l'origine d'un harnachement important des cours d'eau. En effet, l'énergie hydroélectrique est produite par de nombreuses compagnies privées éparpillées à travers la Province. Ainsi, plus de 90 % des barrages et digues actuels ont été construits à cette époque. L'énergie produite profitait peu au gouvernement provincial et à la population. Comme la plupart de ces compagnies étaient créées par les capitaux américains, presque

tous les profits tirés de cette exploitation hydroélectrique étaient rapatriés aux États-Unis. Ainsi en 1962, sous l’instigation de Monsieur René Lévesque, alors ministre libéral des ressources hydrauliques sous le gouvernement provincial dirigé par le premier ministre Lesage, il décréta la nationalisation de l’énergie hydroélectrique en expropriant du même coup ces nombreuses compagnies privées au profit d’Hydro-Québec, qui était une petite compagnie d’état. Cette seconde période n’a pas connu une fièvre de construction de nouveaux barrages. En revanche, à partir de 1970, sous l’impulsion du premier ministre Robert Bourassa, Hydro-Québec se lança dans construction de grands barrages et réservoirs dans la partie nord du Québec. Cette politique semble être reprise par l’actuel premier ministre, Monsieur Jean Charest, sous prétexte de poursuivre la mise en valeur des régions inhospitalières du nord du Québec. Créée en 1944, Hydro-Québec ne possédait que quatre centrales totalisant 696 mégawatts. En 1962, après la nationalisation, la puissance produite décupla pour dépasser 6 000 MW. Cette puissance est estimée aujourd’hui à plus de 32 000 MW (Lasserre, 2009).

Il va sans dire que la nationalisation a eu des impacts très positifs pour le développement socio-économique de la province. D’ailleurs, elle a été conçue comme « symbole de la maîtrise technologique du Québec et du contrôle de son territoire. Elle gonflait d’orgueil et de respect de soi-même la population francophone du Québec, lorsqu’elle voyait l’image de sa force matérielle et la puissance qu’elle détenait, à la fois sur les espaces du nord québécois et sur les voisins américains » (Lasserre, 2009).

Cependant, malgré ces apports positifs, la construction des barrages a suscité beaucoup de controverses, en particulier sur le plan environnemental. Ces controverses étaient d’autant plus alimentées qu’Hydro-Québec et le gouvernement provincial refusaient toute étude indépendante pour évaluer les impacts environnementaux induits par les grands barrages et réservoirs construits à partir de 1970 (Lasserre, 2009).

Ces controverses se justifiaient aussi en partie par l’absence des connaissances sur les impacts environnementaux des barrages construits avant 1970. En effet, avant cette

date, les préoccupations environnementales n'étaient pas prises en compte. Par conséquent, on ignorait les conséquences environnementales générées par les barrages.

Étant donné que les études réalisées par Hydro-Québec sur les impacts environnementaux des barrages pouvaient souffrir d'un certain soupçon de partialité, il était donc important d'effectuer des études indépendantes sur les impacts environnementaux des barrages au Québec afin de pouvoir donner une idée juste sur leur ampleur et sur leur nature. C'est dans ce cadre que s'est inscrit le programme de recherche élaboré par le professeur Ali Assani.

1.2 Problématique

Le programme de recherche élaboré par le professeur Ali Assani est subdivisé en trois volets. Le premier volet s'intéresse à la quantification des impacts des barrages sur les caractéristiques des débits (figure 1.1). Le second volet se penche sur les impacts de ces changements hydrologiques sur les composantes abiotiques, en particulier sur l'évolution morphologique des chenaux. Enfin, le dernier volet analyse les impacts de ces mêmes changements hydrologiques sur les composantes biotiques (flore et faune).

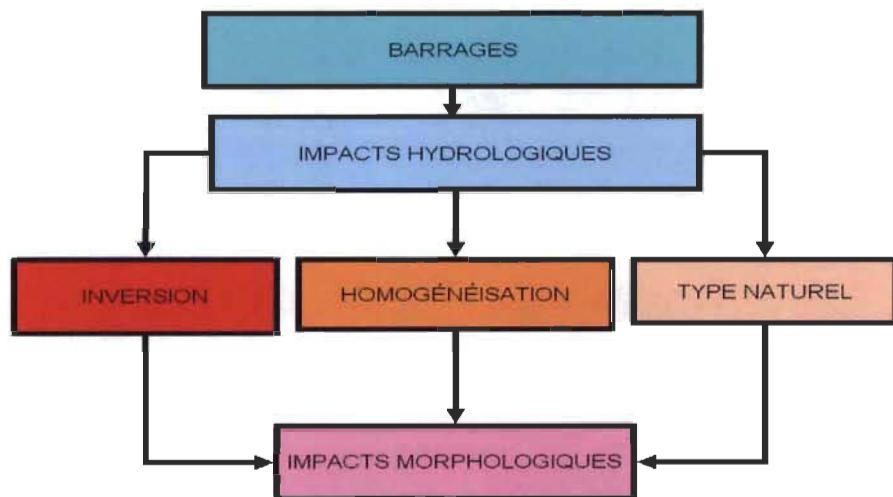


Figure 1.1 : Schéma sur les impacts des barrages en lien avec les caractéristiques des débits.

Assani et ses collaborateurs ont déjà analysé les impacts hydrologiques induits par les barrages construits avant 1970 dans le bassin versant du Saint-Laurent (Assani et al., 2002, 2005, 2006, 2007, 2008, 2009; Lajoie et al., 2006, 2007; Matteau et al., 2009). Un des résultats les plus originaux de ces études est la mise en évidence de trois types de régimes hydrologiques en aval des barrages. Il s'agit des régimes d'inversion, d'homogénéisation et de type naturel.

Régime hydrologique régularisé d'inversion

Le régime hydrologique d'inversion est caractérisé par le changement de toutes les caractéristiques fondamentales des débits (figure 1.2) : période d'occurrence, durée, fréquence et magnitude. Le trait caractéristique de ce régime est l'occurrence des débits maximums en hiver et des débits minimums au printemps. Il se produit une inversion du cycle hydrologique naturel des débits. Toutefois, la magnitude des débits diminue par rapport à celle des rivières naturelles, mais leur variabilité devient plus forte. Ce régime est observé exclusivement en rive nord en aval des réservoirs.

Régime hydrologique régularisé d'homogénéisation

Le trait caractéristique de ce régime est la faible variabilité intermensuelle des débits. Les débits demeurent ainsi quasi constants durant toute l'année (figure 1.2). Les débits maximums et minimums peuvent survenir en hiver ou au printemps. Ce régime d'homogénéisation est observé principalement en rive nord sur des grands cours d'eau. En fait, c'est une variante du premier régime.

Régime hydrologique régularisé de type naturel

Ce régime régularisé se distingue fondamentalement du régime typiquement naturel par une légère hausse des débits en hiver et une légère baisse des débits au printemps. Le cycle hydrologique naturel est conservé (figure 1.2). Ce régime est observé aussi bien en rive nord qu'en rive sud.

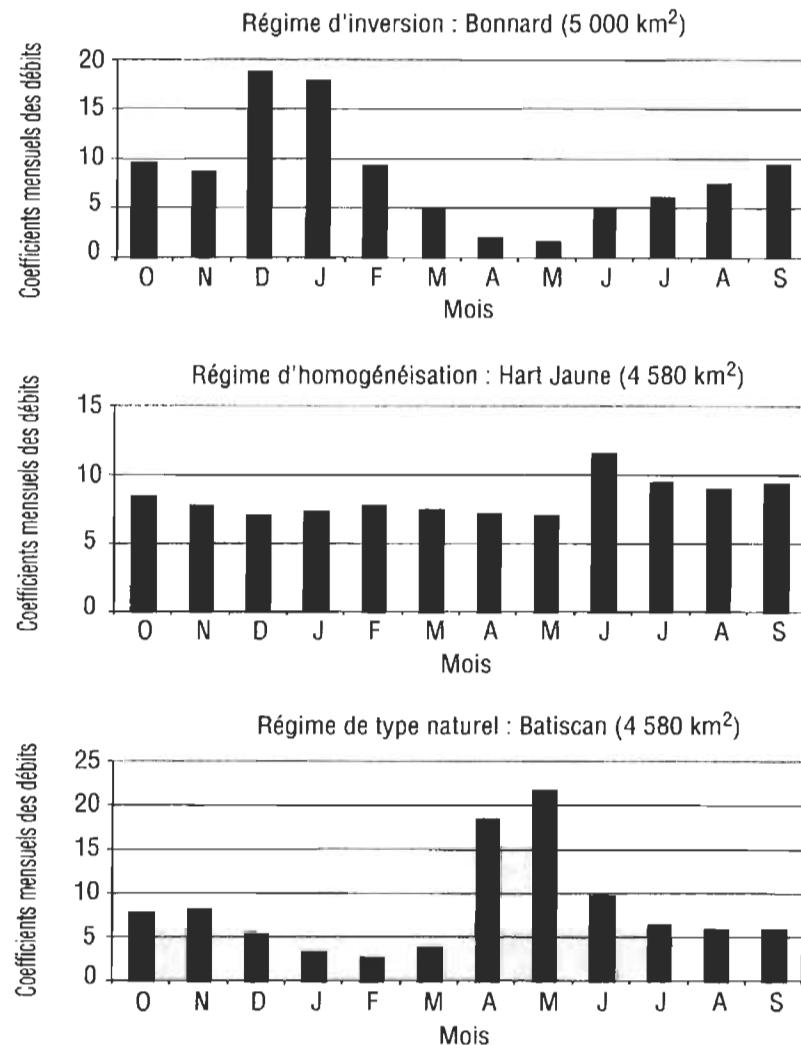


Figure 1.2 : Les trois types des régimes hydrologiques régularisés observés en aval des barrages au Québec (Source : Assani et al., 2005).

1.3 Objectif et hypothèses

L'existence de ces trois régimes hydrologiques régularisés démontre que tous les barrages n'induisent pas les mêmes impacts hydrologiques. En tenant compte du fait qu'une rivière est un système en équilibre et que le changement d'un seul paramètre modifiera son état, nous pouvons croire que les impacts sur les composantes abiotiques et biotiques vont varier d'un barrage à un autre. Dans le cadre de notre projet de recherche, nous nous intéressons à quantifier les impacts associés au régime hydrologique régularisé de type naturel sur l'évolution morphologique des chenaux. Le

choix de cet objectif se justifie par le fait que les impacts morphologiques induits par les deux autres régimes hydrologiques régularisés sont aussi en cours d'analyse. Ceci permettra de comparer les impacts morphologiques induits par les trois régimes hydrologiques régularisés.

Les études d'impacts morphologiques des barrages sont généralement fondées sur la comparaison des débits et de la morphologie d'un chenal avant et après la construction d'un barrage. Cette méthode est connue sous le nom de la méthode de « station témoin » (Assani et al., 2005). L'application de cette méthode nécessite l'existence de données avant et après la construction d'un barrage. Or, au Québec, il existe très peu de données hydrologiques et morphologiques avant la construction de la plupart des barrages. Par conséquent, l'application de cette méthode devient impossible. Pour contourner ce problème, on peut utiliser d'autres méthodes qui ne nécessitent pas l'existence de données avant la construction d'un barrage. Ces méthodes sont basées sur l'idée fondamentale suivante : certains changements hydrologiques, morpho-sédimentaires et biologiques significatifs induits par un barrage après sa construction restent permanents dans le temps et peuvent ainsi être détectés par d'autres méthodes que celle qui consiste à comparer ces changements avant et après la construction d'un barrage. Une de ces méthodes est la méthode de station contrôle (Assani et al., 2005, 2006). Celle-ci est basée sur la comparaison de l'évolution hydromorphologique d'une rivière régularisée par un barrage à celle d'une rivière naturelle située dans le même contexte lithologique et climatique. Ainsi, cette méthode est applicable à deux conditions : (1) absence de toute altération significative des changements induits par un barrage dans le temps. Cette altération peut être d'origine naturelle (variabilité ou changement du climat) ou anthropique (changement d'utilisation des sols par l'agriculture ou urbanisation, construction de nouveaux barrages, etc.). (2) Une certaine similitude des conditions lithologiques, physiographiques et climatiques entre le bassin versant de la rivière régularisée et le bassin versant de la rivière de référence (non régularisée). Malgré l'absence des données hydrologiques et morphologiques avant la construction du barrage Rawdon, il est donc possible d'analyser les impacts hydrologiques qui auraient été induits par ce barrage et qui

seraient restés permanents. L'objectif de notre étude est détecter ces impacts au moyen de la méthode de station contrôle. Concrètement, l'étude vise à détecter les impacts hydrologiques et morphologiques qui ont été induits par le barrage de Rawdon après sa construction et sont restés permanents dans le temps même si on ne dispose pas des données de comparaison avant la construction de ce barrage. Cette détection sera basée sur la comparaison des caractéristiques hydromorphologiques de la rivière Ouareau (en aval du barrage Rawdon) à celles de la rivière L'Assomption. Les deux rivières sont situées dans les mêmes contextes climatiques et lithologiques.

Cet objectif repose sur les deux hypothèses suivantes :

1. En raison du faible changement des caractéristiques des débits en aval des barrages associés au régime de « type naturel » d'une part, et de la diminution de la charge sédimentaire, d'autre part, l'évolution morphologique du chenal de la rivière Oaureau en aval du barrage Rawdon sera caractérisée par un élargissement et une incision du chenal. Mais ces changements ne seront observés que dans les tronçons constitués des matériaux faciles à éroder comme les Basses-Terres du Saint-Laurent.
2. L'élargissement et l'incision du chenal entraîneront une diminution de la sinuosité. Mais l'ampleur de cette diminution dépendra de l'importance de la hausse de la magnitude des débits de crues qui génèrent les changements morphologiques.

CHAPITRE II

REVUE DE LITTÉRATURE

2.1 Revue de la littérature succincte sur l'évolution morphologique des chenaux

La morphologie d'une rivière change continuellement dans le temps (Petts, 1984a). L'ensemble de tous les paramètres reliés aux rivières crée un système complexe. Ce système est défini comme une multitude d'objets liés et de processus qui interrelient ces objets ensemble (Charlton, 2008). Lane (1955) a pu conceptualiser les principes de base du changement de forme des chenaux. Il a proposé la relation suivante :

$$QS = f(Lb, D) \quad (1)$$

Dans cette équation, Q représente l'écoulement, S la pente du chenal, Lb le matériel du lit et D le diamètre du matériel du lit. Cette équation représente un chenal en équilibre. Ainsi, tout changement en charge sédimentaire et/ou en écoulement crée une perturbation rompant par le fait même l'état de quasi-équilibre atteint. Cette rupture amène un changement dans l'évolution du chenal. Sur de courtes périodes, le système d'une rivière peut sembler stable, mais sur une période plus longue, il est plutôt vu comme un système dynamique en équilibre (Petts, 1984a). En effet, plusieurs processus permettent à la rivière de garder un état d'équilibre. La trinité de Leeder (figure 2.1) illustre bien les influences mutuelles entre ces processus. Chacun des processus est associé à plusieurs paramètres qui doivent être aussi pris en considération. Plusieurs éléments influencent le processus d'écoulement, dont le débit, la vitesse moyenne, la turbulence, le profil de vitesse et la force de cisaillement. Pour ce qu'il en est du processus de transport de sédiment, il faut considérer la mise en mouvement, le mode de transport, la capacité sédimentaire, l'érosion et l'accumulation. Le troisième processus relié aux autres est la morphologie qui comprend la forme du lit, la taille du chenal, le profil transversal, la forme en plan et la pente.

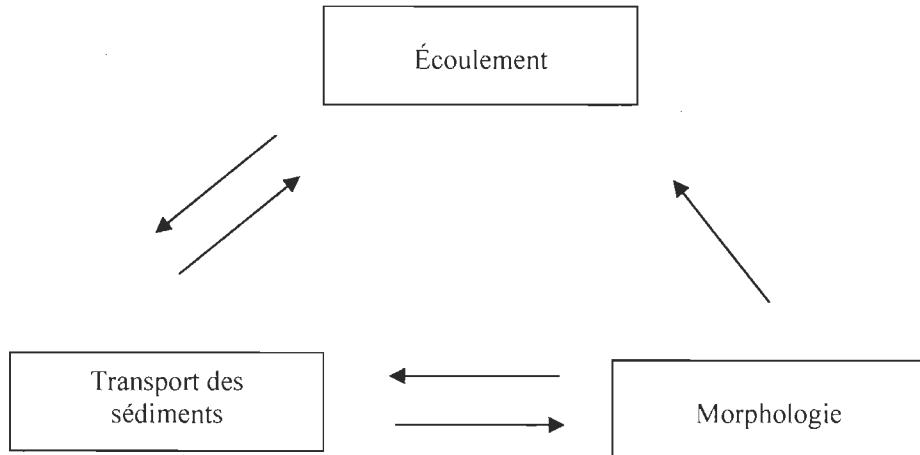


Figure 2.1 : Trinité de la dynamique fluviale.

2.1.1 Impacts des barrages sur les rivières

En aval des barrages, en raison des changements qui affectent les caractéristiques des débits, tous ces processus sont modifiés à degrés divers. Il s'ensuit un changement de l'évolution morphologique des chenaux. Les sections suivantes font un état succinct des principaux changements pouvant être observés en aval des barrages.

2.1.1.1 Impact sur le débit

Le débit est la variable la plus importante contrôlant la nature fondamentale des ruisseaux et des rivières. Les modifications du débit causées par la construction des barrages altèrent sans contredit la structure et la fonction des écosystèmes fluviaux. Les effets sur les caractéristiques hydrologiques du cours d'eau, engendrés par les barrages, sont reliés étroitement à la forme du réservoir, au contrôle du débit lors du relâchement et aux périodes de crue. (Petts, 1984a). Dès qu'il y a construction d'un barrage, il y a un certain effet sur le régime naturel présent auparavant, à l'exception de situations d'inondations extrêmes où les effets du barrage n'auront aucun impact. (Higgs et Petts, 1988). Les caractéristiques du barrage peuvent avoir un impact important sur le débit et certains paramètres des débits peuvent être grandement influencés. En effet, certaines études ont montré que les débits moyens annuels peuvent être modifiés à l'aval du barrage. (Batalla et al., 2004; Church, 1995). Des baisses de débits peuvent se produire

en aval des barrages lorsqu'on rencontre une situation où les eaux doivent être détournées. Les branches de la rivière qui accueilleront ce détournement auront quant à elles une augmentation de leurs débits. Les débits peuvent aussi être modifiés par la demande humaine. En effet, les demandes d'électricité peuvent modifier et même inverser les débits maximums journaliers. Dans ce même ordre d'idée, des changements pourront se produire à l'échelle saisonnière et annuelle (Petts, 1984b).

2.1.1.2 Impact sur la charge sédimentaire

Le débit n'est pas le seul paramètre influencé par les barrages. Le transport des sédiments sera également affecté. Nous retrouvons différents types de sédiment influençant par le fait même leurs transports. La charge de fond représente les sédiments qui sont transportés sur le fond des cours d'eau. Cette charge requiert une plus grande énergie lors du transport comparativement à la charge en suspension qui représente la portion des sédiments qui est maintenue en suspension pour une certaine distance et qui se dépose une fois la turbidité diminuée. Ces sédiments fins sont gorgés d'eau et influencent directement la morphologie du cours d'eau. La charge sédimentaire d'un cours d'eau est un processus naturel qui dépend des processus d'érosion du bassin versant et de l'intensité des pluies. Il en est ainsi pour une rivière naturelle, par contre, dans le cas où l'on érige un barrage, il faut tenir compte d'autres facteurs. Dépendamment du réservoir, une grande quantité de sédiments restera emprisonnée, relâchant seulement une partie de la charge accumulée en amont. (Brandt, 2000). Cet effet de trappe peut être prédit par la courbe de Brune qui met en lien la capacité du réservoir et les débits. Cependant, Chien (1985) a remarqué que même s'il y avait des relâchements importants de débit avec une charge importante en sédiment, ceux-ci ne sont pas nécessairement impliqués dans la formation des chenaux, lors de situation où les sédiments sont très fins.

2.1.1.3 Impact sur le profil longitudinal et le profil transversal

Plusieurs paramètres peuvent influencer le profil longitudinal d'une rivière que ce soit le débit, la charge sédimentaire ou son contexte granulométrique. Lorsque le débit subit une modification externe, la charge naturelle du régime devient irrémédiablement altérée. Ceci modifie par conséquent l'évolution et le comportement du profil longitudinal (Wellmeyer et al., 2005). Un débat subsiste quant à la charge sédimentaire nécessaire pour altérer et modifier significativement la trajectoire d'un cours d'eau (Wellmeyer et al, 2005). Schumm (1968) a observé que les méandres sinueux étaient caractérisés par un ratio largeur/profondeur faible et un pourcentage élevé de limon et d'argile. Quand la charge du lit diminue, le chenal devient un canal plus étroit et plus profond qui a tendance à vouloir créer des méandres.

Le profil transversal se mesure communément comme un rapport entre la largeur et la profondeur. Ce ratio augmentera simultanément avec une augmentation du débit et de l'érosion des berges. La présence de végétation est un paramètre qui a un impact sur l'évolution de l'érosion des berges. Plusieurs paramètres ont été classés et regroupés afin d'obtenir un portrait juste du profil transversal. Le premier groupe se compose des paramètres reliés aux bancs, tels la hauteur, la pente, le type du matériel (cohésif ou non). Le deuxième groupe se compose des paramètres reliés au chenal tels, l'effet de cisaillement sur les bancs, la forme en plan, la charge sédimentaire, etc. Le troisième groupe se compose des paramètres reliés à la végétation, tels que la diversité, la concentration de la végétation et la vigueur de celle-ci (Brandt, 2000).

D'après Leopold et Wolman (1957), la largeur du chenal sera la première modification à se produire lorsqu'il y a changement dans le débit, incluant les contraintes de profondeur, de vitesse, de pente et de rugosité. Des effets importants pour l'érosion verticale peuvent survenir si le débit est plus fort que la capacité de transport. Par contre, en situation où les deux paramètres s'équivalent, une érosion en largeur surviendra (Williams et Wolman, 1984).

2.1.1.4 Taux de changement et temps de réponse du système fluvial

Le barrage amène un effet certain sur le chenal en aval. Dès le début de la construction, des changements peuvent être observés. Les débits altérés et les mouvements des sédiments en sont la cause. Pour être juste dans l'analyse de l'évolution du barrage, il est préférable d'observer les effets dès le début de la construction du barrage et non seulement à la date d'ouverture du barrage du fait que le barrage peut prendre plusieurs années de construction. Évidemment, l'étendue des impacts réels sera connue que lorsque le barrage sera complètement opérationnel (William et Wolman, 1984).

2.2 La classification des impacts morphologiques induits par les barrages selon Brandt

De nombreux auteurs ont proposé des modèles d'évolution morphologique des chenaux en aval des barrages en fonction des changements qui affectent les deux variables majeures : les débits et la charge sédimentaire. Parmi ces modèles, celui proposé par Brandt (2000) nous paraît le plus complet. En effet, cet auteur a proposé neuf types d'évolution morphologique des chenaux qui peuvent être observés en aval des barrages. Ceux-ci seront présentés de manière succincte. Dans cet exposé Q représente le débit, L , la charge sédimentaire et K la capacité de transport.

Type 1 : Diminution de Q et $L < K$

Ce cas survient lorsque les débits diminuent, mais la charge sédimentaire dépasse la capacité de transport du cours d'eau (diminution Q et $L < K$). Lorsqu'il y a diminution du débit, l'érosion du cours d'eau peut se produire tout de même lorsqu'il s'agit de sédiments fins, mais il est également probable que la diminution du débit fera en sorte qu'il y aura incapacité à éroder ou à transporter les sédiments présents avant la construction du barrage. Plusieurs autres changements seront opérés dans le cours d'eau. En effet, cette situation amènera une diminution significative du profil transversal et une tendance à formation de terrasse.

Type 2 : Diminution de Q et L=K

La construction du barrage peut amener une situation où l'écoulement décroît, mais où la charge sédimentaire égale la capacité de transport du cours d'eau (diminution Q et L=K). Dans cette situation, il y aura diminution significative du profil transversal qui amènera une diminution de la largeur et de la profondeur. Il y aura aussi tendance à la formation de terrasses. Celle-ci sera accompagnée de nouvelles plaines inondables à des endroits du chenal qui était à l'origine sec. Puisque la charge sédimentaire égale la capacité de transport dans ce cas-ci, il y aura peu de dégradation subie par le chenal.

Type 3 : Diminution de Q et L>K

Dans certains cas l'écoulement décroît, mais la charge sédimentaire est supérieure à la capacité de transport du cours d'eau (diminution de Q et L>K). Dans cette situation, on observe dans le chenal une diminution du profil transversal qui se traduit par une réduction de profondeur et/ou de la largeur. Cette situation, bien que rare, peut se produire. Il en advient ainsi lorsque les sédiments peuvent traverser le barrage.

Type 4 : stabilité du Q et L<K

Il peut y avoir une situation où les débits ne changent pas après la construction d'un barrage, mais la charge sédimentaire devient moindre que la capacité de transport du cours d'eau (stabilité du Q et L<K). Dans cette situation, il n'y aura pas de grand changement dans le profil transversal du chenal (largeur/profondeur). Cependant, il peut y avoir un changement dans la forme du chenal et la position de celui-ci. Chien (1985) a évoqué deux changements qui pourraient se produire lorsque la charge sédimentaire devient inférieure à la capacité de transport. Le premier changement s'exprime sous forme d'érosion par l'eau provenant du réservoir amenant un approfondissement et un rétrécissement du lit. Le second changement se traduit par l'élargissement de la rivière.

Type 5 : Même Q et L=K

La construction du barrage peut amener une situation où l'écoulement reste égal et où la charge sédimentaire équivaut la capacité de transport du cours d'eau (même Q et

$L=K$). Dans cette situation, la construction du barrage n'influence en rien les paramètres morphologiques en aval. Puisqu'aucun changement ne s'opère dans l'écoulement, dans la charge sédimentaire ni dans la capacité de transport, le chenal n'en sera pas modifié.

Type 6 : Même Q et $L>K$

Ce cas s'applique à la situation où le débit ne change pas après la construction d'un barrage, mais la charge sédimentaire dépasse la capacité de transport du cours d'eau (même Q et $L>K$). Cette situation, plutôt rare, est due à l'effet de trappe exercé par le barrage. Par contre, cela peut tout de même se produire temporairement lors des périodes de relâchement des eaux du barrage. Dans certains cas, il peut alors se produire un rétrécissement assez important du cours d'eau pour ne plus laisser passer le débit antérieur à la construction du barrage dans le chenal, comme c'est le cas pour la rivière Rio Grande aux États-Unis (Collier et al., 1996). De plus, il pourra y avoir augmentation du niveau du lit (accumulation). Cependant, si le lit augmente, plusieurs études (voir Brandt, 2000 ; Brandt et Swenning, 1999) ont démontré qu'il y aura comme conséquence une augmentation de la pente et qu'il pourrait y avoir éventuellement une diminution de la taille des grains et de la rugosité (Brandt, 2000).

Type 7 : Augmentation de Q and $L<K$

Sur certains cours d'eau, on peut observer une situation où l'écoulement croît et où la charge sédimentaire dépasse la capacité de transport du cours d'eau (augmentation de Q et $L<K$). Dans cette situation, il y aura augmentation du profil transversal en raison de l'érosion du lit et des rives du chenal. La déviation du courant peut avoir comme conséquence l'augmentation de débit amenant l'augmentation de l'aire transversale (Brandt, 2000).

Type 8 : Augmentation de Q et $L=K$

Après la construction d'un barrage, le débit augmente et la charge sédimentaire égale la capacité de transport du cours d'eau (augmentation de Q et $L=K$). Dans cette situation, l'augmentation du débit aura pour effet d'approfondir et d'élargir le chenal (Brandt, 2000).

Type 9 : Augmentation de Q et L>K

Il peut arriver une situation où l'écoulement croît et la charge sédimentaire dépasse la capacité de transport du cours d'eau (augmentation de Q et L>K). Dans cette situation, il y aura une augmentation de l'aire du profil transversal qui se traduira par des dépôts de matériel et une élévation du niveau du lit. Par contre, dans certains cas si le débit est très concentré, les effets seront inverses, comme cela s'est produit en Chine (Brandt, 2000).

CHAPITRE III

MATÉRIELS ET MÉTHODES

3.1 Choix et description des rivières d'étude

Pour analyser les impacts morphologiques induits par le régime hydrologique régularisé de type naturel, nous avons choisi dans un premier temps la rivière Mékinac, affluent de la rivière Matawin. Mais, on a abandonné cette rivière, en raison de la difficulté à géoréférencer les points par manque de points de repère sur les anciennes cartes. Après plusieurs tentatives avec d'autres rivières, nous avons finalement choisi la rivière Ouareau où la présence de nombreux points de repère sur les anciennes cartes rendait possible le géoréférencement. Toutefois, le barrage construit sur cette rivière date de 1913. Or, il n'existe aucune photographie aérienne prise avant cette année. Par conséquent, nous ne pouvions pas appliquer la méthode classique de « station témoin » (basée sur la comparaison de la morphologie du chenal d'une rivière avant et après la construction d'un barrage) pour analyser les impacts de ce barrage sur l'évolution morphologique de cette rivière. Nous avons ainsi opté pour la méthode de « station contrôle » comme nous l'avons déjà mentionné dans le chapitre I. Cette méthode nécessite l'analyse d'une autre rivière pour pouvoir mettre en évidence les changements hydrologiques et morphologiques de la rivière Ouareau. Nous avons ainsi choisi la rivière L'Assomption en amont de sa confluence avec Ouareau. Ce tronçon de la rivière L'Assomption est comparable du point de vue physiographique à la rivière Ouareau en aval du barrage.

Les rivières Ouareau et L'Assomption sont toutes deux situées dans la région administrative de Lanaudière qui est située sur la rive nord du fleuve Saint-Laurent. La première est le principal affluent de la seconde. Leur superficie est respectivement de 1687 et 4220 km². Le bassin versant de L'Assomption chevauche deux régions naturelles : les Basses-Terres du Saint-Laurent et les Hautes-Terres Laurentiennes du Bouclier canadien (figure 3.1). Ces deux formations possèdent des caractéristiques

géologiques très distinctes amenant par le fait même une occupation du sol différente. Le Bouclier canadien est caractérisé par un relief plus accidenté dont l'altitude varie entre 450 à 650 m. Elle couvre les deux tiers (environ 3000 km²) de la superficie du bassin versant de la rivière L'Assomption et est entièrement couverte par la forêt. De par sa formation géologique, on y retrouve des roches telles le gneiss, le paragneiss et des roches granitoïdes qui sont toutes très résistantes à l'érosion. Plusieurs époques géologiques se sont succédé afin de façonner les différents paysages présents dans le bassin versant. Environ les deux tiers du territoire sont constitués des dépôts de surface découlant de la force érosive des glaciers de l'ère Wisconsinienne. Ces dépôts sont formés de till qui est un matériau de texture variable ayant une bonne proportion de cailloux. D'autres paysages sont le résultat du retrait des glaciers, vers 12 000 A.A. Ils sont constitués de dépôts sédimentaires du type sable et gravier. Ces dépôts sont généralement retrouvés dans les fonds des vallées et dans les principaux cours d'eau du bassin versant. Vers 9 000 A.A., l'épisode marin (mer de Champlain) qui a envahi le territoire a laissé des dépôts d'argiles et de silt. Ces conditions ont aidé à la formation des terrasses et des plaines alluviales le long des cours d'eau (PDE CARA, 2006). Les Basses-Terres du Saint-Laurent sont composées principalement des dépôts fluvioglaciaires. La topographie du terrain est plutôt plane et ne dépasse pas 150 m d'altitude. On y retrouve aussi du schiste et du calcaire. Ces caractéristiques en font un territoire favorable pour l'agriculture. Celle-ci occupe presque le tiers de la superficie du bassin versant.

La rivière Ouareau mesure plus de 128 km et prend sa source dans le Lac Ouareau situé au nord de Lanaudière dans le Bouclier canadien. Le tronçon qui est étudié est situé en aval de la centrale Rawdon, mais en amont du second barrage et mesure environ 20 km. Il traverse des terres agricoles avant de se jeter dans la rivière L'Assomption plus bas en aval. Deux grands barrages ont été érigés sur le cours de la rivière. Il s'agit des barrages de Rawdon et de Crabtree. Leurs caractéristiques sont consignées dans le tableau 3.1. Outre ces deux barrages, on a construit aussi quelques ouvrages (digues) au fil de l'eau. Dans le cadre de cette étude, nous analyserons seulement les effets morphologiques induits par le barrage de Rawdon. Quant à la rivière L'Assomption, elle

mesure 200 km. Plusieurs rivières s'y déversent dont les rivières Ouareau, Saint-Esprit, L'achigan et Noire. Le tronçon de la rivière L'Assomption, qui sera étudié et servira de rivière témoin, mesure presque 20 km, longueur comparable à celle du tronçon de la rivière Ouareau. Les deux tronçons sont comparables sur le plan hydrologique, climatique ainsi qu'à leur occupation du sol. C'est pourquoi la rivière L'Assomption servira de rivière témoin dans ce projet d'étude. Il convient de noter qu'aucun barrage n'existe sur le tronçon de la rivière L'Assomption qui sera analysé. Mentionnons aussi que les superficies des bassins versants des rivières Ouareau et L'Assomption aux deux sites d'étude sont la même, soit 1500 km². Enfin, le cycle hydrologique annuel de deux rivières est identique (figure 3.3). Il est en effet caractérisé par l'occurrence des débits maximums au printemps et des débits minimums en hiver. Ainsi, le barrage de Rawdon induit un régime de type naturel en aval.

Dans les deux bassins versants, le climat est plus ou moins fortement influencé par le relief. La température diminue avec l'altitude alors que les précipitations ont tendance à augmenter avec l'altitude. Dans les Hautes-Terres du Bouclier canadien, il règne un climat de type subpolaire et subhumide continental. Ce climat devient modéré dans les Basses-Terres du Saint-Laurent.

En ce qui concerne les caractéristiques granulométriques, 10 échantillons des sédiments, prélevés le long des tronçons analysés à une hauteur d'environ 70 cm du pied de la berge (les deux rivières étaient en période d'étiage), a révélé que la valeur modale de ces sédiments est située dans le sable fin pour les deux rivières. Néanmoins, les berges de la rivière Oaureau contiennent des sédiments un peu plus grossiers constitués principalement du sable grossier, et dans une moindre mesure, du gravier fin que celles de la rivière L'Assomption. Ainsi, la valeur moyenne de D90 est, par exemple, environ 4 fois plus élevée pour la rivière Ouareau que pour la rivière L'Assomption (tableau 3.2). Il importe de mentionner qu'il n'existant aucune variabilité verticale de la granulométrie des sédiments sur les sites échantillonnés. Ainsi, il n'était pas donc nécessaire de prélever à plusieurs endroits au même site d'échantillonnage.

Tableau 3.1

Comparaison des quelques caractéristiques physiographiques et de l'utilisation des sols des bassins versants de la rivière L'Assomption et de son affluent la Ouareau au niveau de leur confluence

Caractéristiques	Rivière L'Assomption	Rivière Ouareau
Superficie du bassin versant	1687 km ²	4220 km ²
Région naturelle sur la longueur du tronçon étudié	Basses-Terres du Saint-Laurent	Basses-Terres du Saint-Laurent
Longueur du tronçon étudié	Environ 20 km	20 km en amont de sa confluence
Altitude maximale (m)	254	263
Altitude minimale (m)	18	10
Altitude moyenne (m)	120.7	121.6
Pente moyenne sur l'ensemble du bassin versant*	4.17 %	4.20 %
Pente moyenne sur les Basses-Terres seulement	2.60 %	2.70 %
Densité du drainage	0.69	0.68
Superficie agricole (%)	10.4	11

* = Cette partie inclut le Bouclier canadien et les Basses-Terres du Saint-Laurent jusqu'à la confluence de deux rivières.

La variabilité longitudinale était aussi relativement faible (tableau 3.2). Toutefois, des bancs des schistes affleuraient à quelques endroits dans le lit et sur les berges et fournissaient ainsi localement des sédiments beaucoup plus grossiers aux deux rivières. Ces affleurements étaient observés dans les deux bassins versants en raison de l'homogénéité lithologique.

Tableau 3.2

Comparaison des quelques paramètres des courbes granulométriques des sédiments des berges des rivières Ouareau et L'Assomption en amont de leurs confluences

Paramètres (en mm)	Rivière Ouareau	Rivière L'Assomption
D10	0,068 (0,011)	0,063 (0,001)
D50	0,173 (0,101)	0,104 (0,042)
D90	0,916 (1,292)	0,223 (0,100)
Mode	0,164 (0,058)	0,126 (0,037)

() = écart type calculé sur 10 échantillons prélevés sur les berges à 50 cm du fond du lit.



Figure 3.1 : Bassin versant de la rivière L'Assomption (Source : MDDEP et Corporation de l'Aménagement de la rivière L'Assomption 2009).

Barrages et stations hydrométrique sur la rivière Ouareau et la rivière l'Assomption

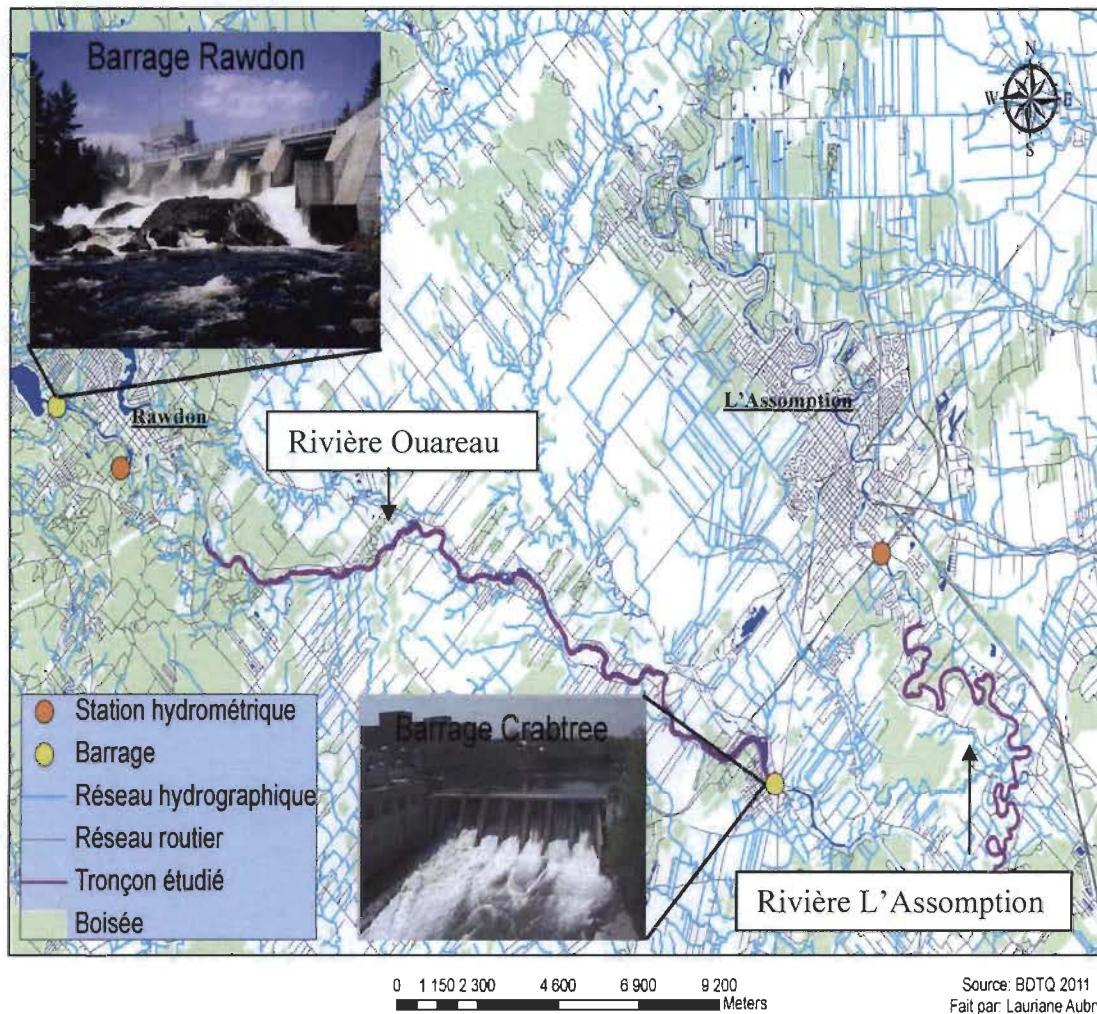


Figure 3.2 : Localisation des stations hydrométriques et des sites d'étude morphologique sur les rivières Ouareau et L'Assomption.

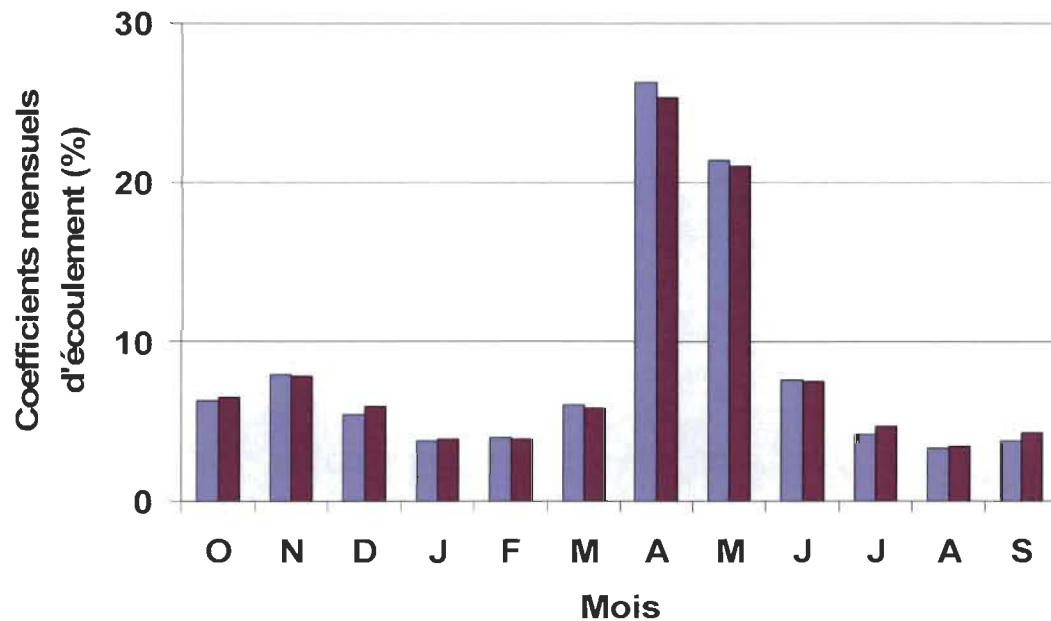


Figure 3.3 : Comparaison des coefficients mensuels d'écoulement des rivières L'Assomption (barres bleues) et Ouareau (barres rouges) (1930-2008).

Tableau 3.3

Les caractéristiques de deux barrages construits sur la rivière Ouareau

Numéro de barrage	Compagnie	Cours d'Eau	Municipalité	Années de construction	Hauteur du barrage (M)	Capacité de retenu (m)	Longueur (m)	Superficie du réservoir (ha)
X000 4205	APFC Inc.*	Ouareau	Rawdon	1913	11,7	19000000	240	194
X000 4079	Papier Scott ltée	Ouareau	Crabtree	1927	8,7	51000	53,3	1,3

APFC Inc.* = Algonquin Power Fund Canada Inc.

3.2 Justification du choix de la méthode d'analyse des données hydrologiques et morphologiques

Il existe trois méthodes pour analyser les impacts hydrologiques et morphologiques des barrages (Assani et al., 2005; 2006) :

- La méthode de station témoin qui consiste à comparer les données mesurées à la même station avant et après la construction d'un barrage (Richter et al., 1997).
- La méthode de station contrôle fondée sur la comparaison des données mesurées en amont et en aval d'un barrage (Assani et al., 2002) ou sur la comparaison des données mesurées sur une rivière non influencée par un barrage et en aval d'un barrage (Benn et Erskine, 1994).
- La méthode de simulation qui consiste à comparer les données naturelles reconstituées au moyen d'un modèle hydrologique à celles observées en aval des barrages (Peters et Prowse, 2001). Cette reconstitution peut se faire aussi à partir de la quantité d'énergie produite (Assani et al., 1999).

Le choix de l'une des trois méthodes dépend de la disponibilité des données. Néanmoins, la méthode de station témoin est la meilleure pour quantifier les changements hydrologiques et morphologiques induits par un barrage. Dans le cas de cette étude, comme nous l'avons déjà mentionné, il n'existe pas de données hydrologiques ni de photographies aériennes avant la construction des barrages. Par conséquent, nous ne pouvions pas appliquer la première méthode. Notre choix s'est donc arrêté sur la seconde méthode, car il est possible de comparer l'évolution des débits et de la morphologie du chenal de la rivière Ouareau à celle de la rivière L'Assomption. Quant à la dernière méthode, sa mise en œuvre demande beaucoup de temps qui dépasse largement l'échéance consacrée normalement à un mémoire de maîtrise.

3.3 Les données à analyser et leurs sources

Deux principaux types de données sont analysés dans le cadre de ce travail :

- Le premier type de données est les débits. L'évolution morphologique des chenaux dépend principalement des débits. Ainsi, notre première tâche consistera à vérifier si le barrage de Rawdon a modifié les débits de la rivière. Du point de vue morphologique, les débits les plus importants à analyser sont les débits maximums saisonniers, car ce sont ces débits qui sont susceptibles d'induire les changements morphologiques les plus importants durant chaque saison. Ces débits ont été analysés sous les deux aspects suivants : leur variabilité interannuelle et leur magnitude. L'analyse de la variabilité interannuelle permet de déterminer si les changements qui affectent l'évolution morphologique des chenaux peuvent être attribués aux effets des barrages ou à la variabilité naturelle du climat. Quant à l'analyse de leur magnitude, elle permettra de déterminer si la magnitude des débits maximums saisonniers a significativement diminué en aval du barrage de Rawdon par rapport à celle des débits maximums saisonniers de la rivière L'Assomption. Sur la rivière Ouareau, les débits sont mesurés depuis 1913 à la station de Rawdon, située en aval du barrage Rawdon. Quant à la rivière L'Assomption, les débits sont mesurés depuis 1921 à la station de Joliette. Les superficies des bassins versants aux deux stations de mesure sont de 1240 km² pour la rivière Ouareau et de 1340 km² pour la rivière L'Assomption. Les données des débits proviennent du site du Centre d'expertise hydrique du Ministère de Développement Durable et des Parcs (MDDP) de la province du Québec (site : <http://www.cehq.gouv.qc.ca>). Les débits journaliers ont été regroupés en quatre saisons: hiver (janvier à mars), printemps (avril à juin), été (juillet à septembre) et automne (d'octobre à décembre). Cette subdivision de l'année en saisons reflète mieux le cycle hydrologique naturel des débits au Québec.
- Les données morphologiques ont été tirées des analyses diachroniques des photographies aériennes. Nous disposons de cinq séries de photographies aériennes dont l'analyse nous permettra de reconstituer l'évolution morphologique des chenaux des rivières Ouareau et L'Assomption (tableau 3.4). Les photographies aériennes de

1931 proviennent de la Photothèque Nationale de l'air à Ottawa et celles des autres séries, de la Géomathèque (site : <http://www.geomatheque.com>) ainsi que du réseau des cartothèques du Québec.

Tableau 3.4

Informations sur les photographies aériennes et orthophotos à analyser

Rivière Ouareau				
Année	Date	Échelle	Note	Débit (m³/s)
1931	18 mai	1/20000	Noir et blanc	33,1
1964	10 juin	1/15000	Noir et blanc	14,5
1975	26 juin	1/15840	Noir et blanc	12,6
1997	6-7-8 juin	1/15000	Noir et blanc	18,7
2008	12 juillet	1/25000	Orthophoto	12,9

Rivière L'Assomption				
1931	18 mai	1/20000	Noir et blanc	30,3
1964	14 juin	1/15000	Noir et blanc	14,9
1975	26 juin	1/15840	Noir et blanc	14,8
1997	6-7-8 juin	1/15000	Noir et blanc	14,9
2008	12 juillet	1/25000	Orthophoto	16,7

3.4 Analyse des données

3.4.1 Analyse de données hydrologiques

Rappelons que les objectifs de cette analyse sont premièrement de pouvoir comparer la variabilité interannuelle des débits maximums saisonniers en aval des barrages de la rivière Ouareau à celle des débits de la rivière L'Assomption et deuxièmement de pouvoir comparer leur magnitude.

La comparaison de la variabilité interannuelle des débits entre les deux rivières sera effectuée au moyen de la méthode de coefficient de corrélation et celle de Lombard.

Cette dernière méthode est de plus en plus utilisée dans la littérature (Assani et al., 2011a, 2011b; Quessy et al, 2011). Elle permet de déterminer si les séries hydrologiques des débits maximums saisonniers sont affectées par les changements de leurs moyennes et/ou de leurs variances.

Supposons une série d'observations, dénotées X_1, \dots, X_n , où X_i est l'observation au temps $T = i$. Ces valeurs sont supposées indépendantes. Une question intéressante consiste à vérifier si la moyenne de cette série a changé. Si μ_i est la moyenne théorique de X_i , alors un scénario possible est donné par le smooth-change model de Lombard, ie

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

Ainsi, la moyenne passe graduellement de θ_1 à θ_2 entre les temps T_1 et T_2 . Un cas particulier est la rupture abrupte, lorsque $T_2 = T_1+1$.

Pour tester formellement si la moyenne d'une série est stable ou suit le modèle (1), nous pouvons utiliser la procédure statistique de Lombard (1987). À cette fin, soit R_i le rang de X_i parmi X_1, \dots, X_n . Prenons la fonction score de Wilcoxon, c'est-à-dire $\phi(u) = 2u - 1$, et définissons le score de X_i par

$$Z_i = \frac{1}{\sigma_\phi} \left\{ \phi \left(\frac{R_i}{n+1} \right) - \bar{\phi} \right\}, \quad i \in \{1, \dots, n\}, \quad (2)$$

où

$$\phi = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \phi \left(\frac{i}{n+1} \right) \quad \text{et} \quad \sigma_\phi^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left\{ \phi \left(\frac{i}{n+1} \right) - \bar{\phi} \right\}^2 \quad (3)$$

La statistique de test de Lombard est

$$S_n = \frac{1}{n} \sum_{T_1=1}^{n-1} \sum_{T_2=T_1+1}^n L_{T_1 T_2}^2, \quad (4)$$

où

$$L_{T_1 T_2} = \sum_{j=T_1+1}^{T_2} \sum_{i=1}^j Z_i \quad (5)$$

Si $S_n > 0.0403$, on conclut que la moyenne de la série a changé de façon significative selon un modèle de la forme (1). Il est à noter que le test est adéquat pour détecter tous les types de changements induits par le modèle (1), incluant les changements abrupts. Une étude complète sur la puissance et la robustesse de S_n et de cinq autres statistiques de ce test a été effectuée par Quessy et al. (2011).

Quant à la comparaison de la magnitude, elle sera fondée sur la méthode du test t apparié (échantillons appariés). Ce test consiste d'abord à calculer la différence de chaque paire de données des débits et, ensuite, inférer sur la moyenne de ces différences. Chaque paire de données est constituée par les débits des rivières Ouareau et L'Assomption.

3.4.2 Analyse des photographies aériennes

Le procédé utilisé pour l'analyse quantitative de l'évolution géomorphologique des chenaux des deux rivières a été fait à l'aide de photographies aériennes (analyse diachronique). C'est la seule méthode utilisée dans la littérature (e.g. Ta et al., 2008; Tiegs et Pohl, 2005 ; Wellmeyer et al., 2005). L'analyse des photographies aériennes a été réalisée en trois étapes: le géoréférencement, orthorectification, et la production de mosaïques. Vous trouverez ci-bas le descriptif des grandes étapes de chacune de ces trois étapes.

Numérisation des photographies aériennes

La première étape du volet géomatique a été de numériser toutes les photographies aériennes à une résolution de 600 DPI et 8 bits (profondeur de couleur). La résolution est donc estimée entre 0,6 m (pour les photos prises lors de 1:15000), 0,85 m (pour les photos prises lors de 1:20000) et 1,06 m (pour les photos prises à 1:25000). Une fois les photographies converties, il a fallu créer un modèle numérique d'élévation (MNE) qui a permis de géoréférencer les photographies aériennes numérisées. Les photographies aériennes de 1931 proviennent de la Photothèque Nationale de l'air à Ottawa et celles des autres séries, de la Géomatthèque (site : <http://www.geomattheque.com>) ainsi que du réseau des cartothèques du Québec.

Création du modèle numérique d'élévation

Les fichiers vectoriels provenant de la Base de données topographiques du Québec à l'échelle 1/20 000 (BDTQ) avec lesquels le MNE a été créé, ont préalablement été projetés en WGS 1984. Le modèle numérique d'élévation permet de représenter les valeurs d'élévation du terrain. Afin de créer un MNE, il est important de détenir les couches d'informations vectorielles concernant le réseau hydrographique et les courbes de niveau. Avec le couplage de ces deux couches d'informations, il est possible de créer un modèle numérique d'élévation avec le programme Arc GIS.

Une fois la création de celui-ci, il a fallu le valider. Pour ce faire, la méthode de validation croisée a été utilisée. Le principe de base de cette validation repose sur la sélection de points « training » et de points tests. Les points « training » préalablement sélectionnés à partir des fichiers de la base de données topographiques du Québec ont servi à l'interpolation des données tandis que les points tests ont servi à valider le modèle à la toute fin de la création de notre MNE. Une erreur moyenne a pu être observée en comparant les points « training » (échantillonnages du fichier d'origine) au point test provenant de la surface topographique réalisée.

Géoréférencement

L'étape du géoréférencement a été faite avec le programme Geomatica (PCI Geomatics 2003) et de son module associé orthoEngine. Une fois géoréférencée, chaque photo a été orthorectifiée. Plus spécifiquement les étapes du géoréférencement se décrivent comme suit :

- La première étape a consisté à déterminer la projection dans laquelle les photos ont été projetées. Dans ce cas-ci, elles ont été exportées du MNE qui avait la projection WGS 1984.
- La seconde étape a été d'entrer les données de calibration de la caméra qui sont fournies sur la première photo de la série.
- La troisième étape a consisté à entrer les données concernant la collecte des points fiduciaux.
- La quatrième étape a été la collecte des points de référence. La série de photographies la plus récente, soit 1997, a été utilisée pour débuter puisque nous y trouvions les points de contrôles plus faciles à identifier. À cette fin, un total de 30 points de contrôle au sol, pour chacune des séries de photos, ont été pris à des endroits facilement identifiables à partir du fichier vectoriel (route, hydrographie, etc.). Leurs coordonnées UTM ont été prises à partir des fichiers topographiques au 1:20000 (depuis 1995) de la Base de données topographiques du Québec. Le géoréférencement entraîne inévitablement des erreurs, par contre celles-ci peuvent être gérées. Dans le tableau ci-dessous, nous retrouvons l'erreur moyenne pour chacune des séries. Nous pouvons d'ailleurs remarquer que la série 1931, ayant une échelle plus petite ainsi qu'une définition moins nette, a engendré des erreurs plus grandes que les autres séries de photo. Une fois géoréférencées et orthorectifiées, les photos ont été assemblées en mosaïques (un pour chaque année de prise des photos). L'orthorectification comprend la correction de la distorsion spatiale due à l'inclinaison de la caméra et/ou le relief du terrain. Cette correction est basée sur les paramètres d'orientation de la caméra, les différents points de référence connues, et du modèle numérique d'élévation (DEM).

Tableau 3.5

Comparaison des erreurs en mètre au sol pour le géoréférencement de la rivière L'Assomption et Ouareau

	1931	1964	1975	1997	2008
RMS Moyen (Root Mean Square Error)	1,630	0,772	1,096	1,211	0,448

- Enfin, la cinquième et dernière étape a consisté à la création des orthophotos pour ainsi créer les mosaïques nécessaires au traçage des berges.

Traçage des berges

La dernière étape à effectuer lorsque la mosaïque d'orthophotos fut créée a été le traçage des berges. La délimitation des berges a été tracée sur le haut de la berge pour chacune des séries de photographies aériennes. Pour déterminer l'erreur maximale sur les mesures de largeur à plein bord de la photo-interprétation, celle-ci a été réalisée par deux opérateurs indépendants. La différence maximale de la largeur moyenne à pleins bords à une station donnée entre les valeurs obtenues par les deux opérateurs était < 1 m. Par conséquent, cette différence maximale représente l'erreur maximale sur les mesures de largeur du cours d'eau des photographies aériennes à une station donnée. Il est à noter que l'analyse de la variabilité temporelle de la largeur du chenal réalisée par les deux opérateurs ont donné les mêmes résultats. Les analyses ont été faites à l'aide d'un outil créé par un étudiant de l'Université du Québec à Trois-Rivières lors des étés 2007-2008. Cet outil permet, après la délimitation des berges, de produire des segments perpendiculaires au chenal. Cette approche automatisée élimine toute erreur humaine associée à des lignes perpendiculaires et donc dans la mesure de la largeur à plein bord du chenal. Le logiciel permet également le dessin automatisé des lignes perpendiculaires au même endroit entre deux points séparés par une équidistance de 100 mètres, et ce, sur les photos aériennes prises à des moments différents, quelque chose qui est très difficile de faire manuellement. La délimitation des berges a été validée à l'aide de points d'observations au sol. L'analyse diachronique de photographies aériennes a été possible

parce que les niveaux au moment où les photographies ont été prises étaient inférieures au débit à plein bord.

Pour analyser l'évolution temporelle de la largeur à plein bord des chenaux de deux rivières, nous avons comparé les largeurs mesurées sur les cinq séries de photographies aériennes au moyen de la méthode d'analyse de variance à un seul critère de classification. Lorsque cette méthode concluait à une différence significative entre les moyennes de largeur de ces cinq séries, nous avons appliqué *post hoc* le test apparié de Tukey qui permet d'identifier lesquelles des moyennes sont significativement différentes. Pour comparer les moyennes de largeur à plein bord des rivières Ouareau et L'Assomption, nous avons appliqué le test t apparié déjà décrit ci-dessus.

- Enfin, la sinuosité été calculée à partir du rapport entre la longueur réelle du chenal (en tenant compte de la méandration) et la longueur à vol d'oiseau (sans tenir compte de la méandration) selon la relation suivante :

$$S = L/l$$

CHAPITRE IV

RÉSULTATS

4.1 Comparaison de la variabilité interannuelle des débits maximums saisonniers des rivières Ouareau et L'Assomption

La variabilité interannuelle des débits maximums saisonniers des rivières Ouareau et L'Assomption est présentée aux figures 4.1, 4.2, 4.3 et 4.4. Cette variabilité est quasi identique durant les quatre saisons pour les deux rivières. En effet, le tableau 4.1 révèle que les coefficients de corrélation calculés entre les débits maximums saisonniers de deux rivières sont élevés. De fait, leurs valeurs dépassent 0.80 durant les quatre saisons. Les valeurs sont plus élevées pendant la période froide (automne et hiver) que pendant la période chaude (printemps et été).

Tableau 4.1

Coefficients de corrélation calculés entre les débits maximums journaliers saisonniers des rivières Ouareau et L'Assomption (1930-2008)

Saisons	Coefficient de corrélation
Automne	0,932
Hiver	0,901
Printemps	0,860
Été	0,892

Tous les coefficients de corrélation sont significatifs au seuil de 1 %.

L'application de la méthode de Lombard a révélé une hausse significative des débits maximums en hiver pour les deux rivières (tableau 4.2). Cette hausse est survenue en 1972-73. Après 1973, la moyenne des débits maximums journaliers de la

rivière L'Assomption a augmenté de 74 % passant ainsi 33,44 m³/s avant 1972 (1930-1971) à 58,04 m³/s après 1973 (1974-2008). Quant à la rivière Ouareau, cette hausse a été de 49 %. La moyenne des débits maximums journaliers est passée de 43,9 m³/s avant 1972 à 65,6 m³/s après 1973.

Tableau 4.2

Méthode de Lombard appliquée sur la variabilité interannuelle des débits maximums journaliers saisonniers des rivières Ouareau et L'Assomption (1930-2008)

			Saisons	Moyenne			Variance		
				Sn	T1	T2	Sn	T1	T2
Assomption	Max	Automne	0,0337	-	-	0,0034	-	-	-
		Hiver	0,0827	1972	1973	0,0149	-	-	-
		Printemps	0,0249	-	-	0,000	-	-	-
		Été	0,0058	-	-	0,0109	-	-	-
Ouareau	Max	Automne	0,0280			0,0216	-	-	-
		Hiver	0,0739	1972	1973	0,0357	-	-	-
		Printemps	0,0220	-	-	0,0011	-	-	-
		Été	0,0197	-	-	0,0159	-	-	-

Les valeurs de Sn > 0,0403 statistiquement significatives au seuil de 5 % apparaissent en gras. T1 et T2 correspondent aux années respectivement du début et de la fin du changement de la moyenne.

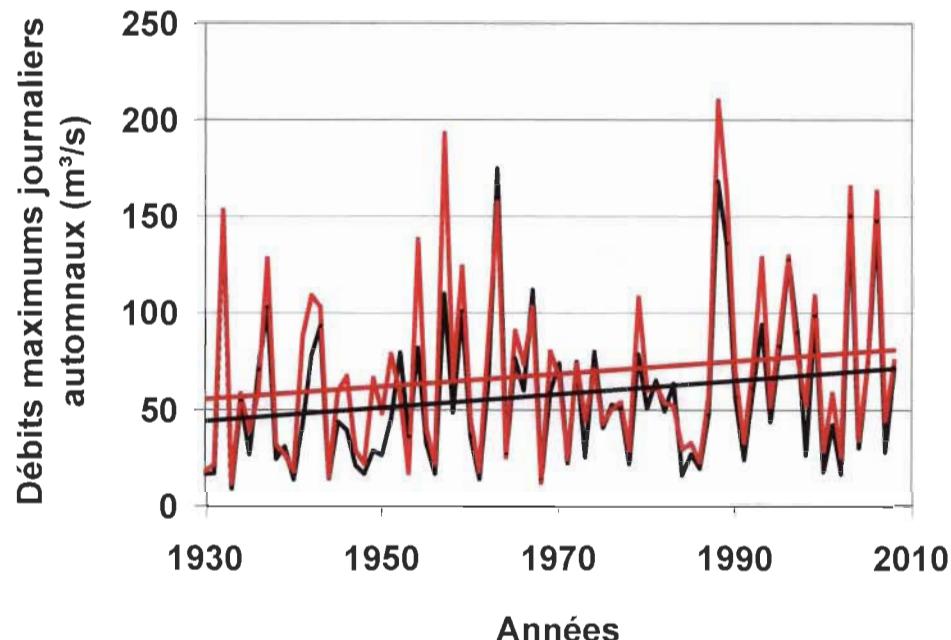


Figure 4.1 : Comparaison de la variabilité interannuelle des débits maximums automnaux des rivières Ouareau (courbe en rouge) et L'Assomption (courbe en noir) pendant la période 1930-2008.

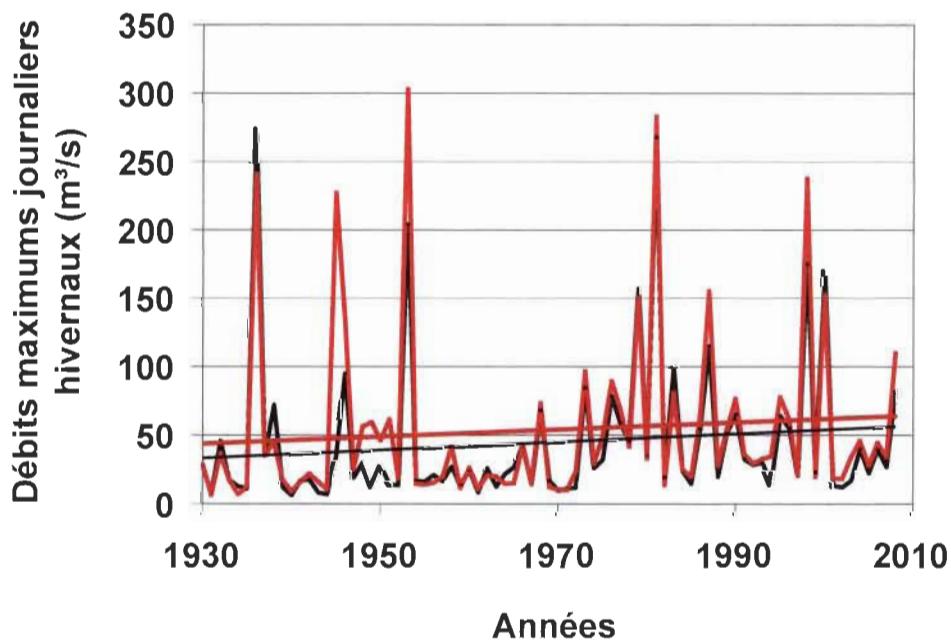


Figure 4.2 : Comparaison de la variabilité interannuelle des débits maximums hivernaux des rivières Ouareau (courbe en rouge) et L'Assomption (courbe en noir) pendant la période 1930-2008.

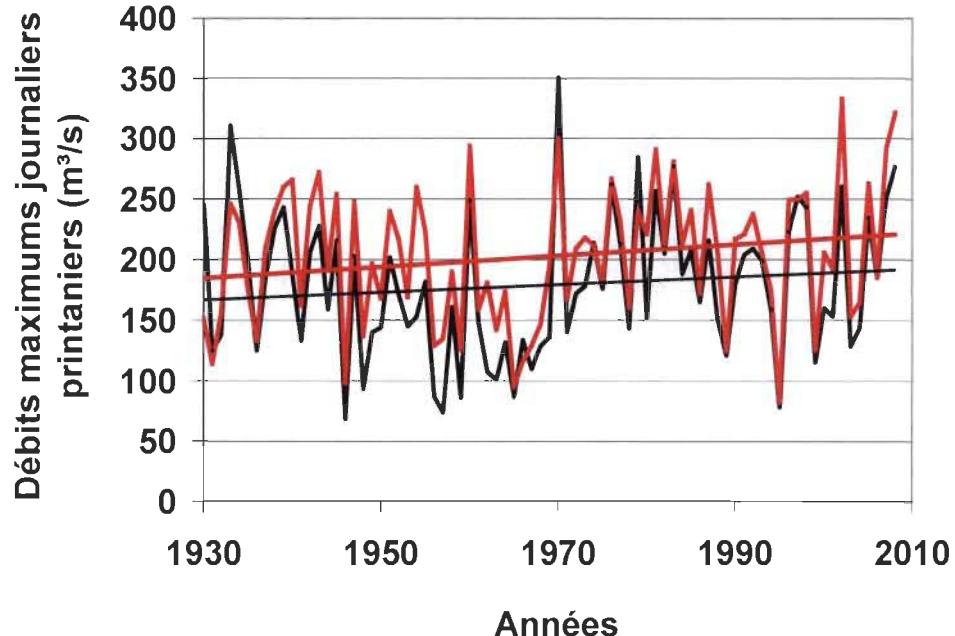


Figure 4.3 : Comparaison de la variabilité interannuelle des débits maximums printaniers des rivières Ouareau (courbe en rouge) et L'Assomption (courbe en noir) pendant la période 1930-2008.

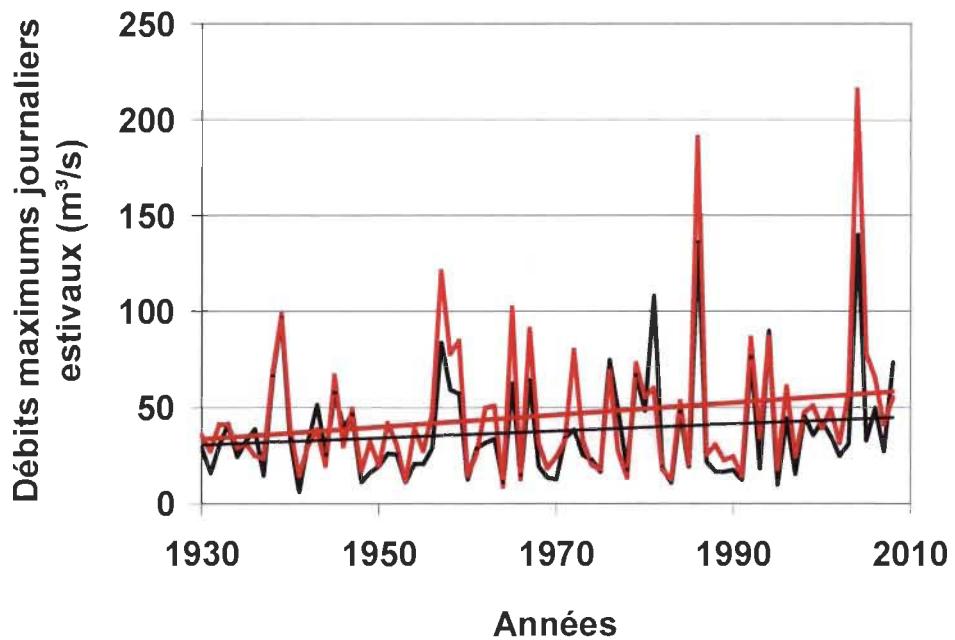


Figure 4.4 : Comparaison de la variabilité interannuelle des débits maximums estivaux des rivières Ouareau (courbe en rouge) et L'Assomption (courbe en noir) pendant la période 1930-2008.

La comparaison des débits maximums saisonniers des rivières Ouareau et L'Assomption révèle que les débits de l'Ouareau sont systématiquement supérieurs à ceux de la rivière L'Assomption durant les quatre saisons, et ce, malgré le fait que la superficie du bassin versant de la rivière Ouareau à la station de jaugeage des débits (1270 km^2) soit inférieure à celle de la rivière L'Assomption (1340 km^2). Cette différence des débits entre les deux rivières est plus importante au printemps que durant les trois autres saisons (tableau 4.3).

Tableau 4.3

Comparaison des débits maximums saisonniers (m^3/s) des rivières L'Assomption et Ouareau (1930-2008) au moyen du test t apparié pendant la période 1930-2008

Saisons	L'Assomption	Ouareau	Valeurs de p
Automne	57,8 (39,87)	68,3 (45,11)	0,0001
Hiver	44,9 (54,25)	53,9 (63,62)	0,005
Printemps	179,2 (59,52)	202,74 (56,36)	< 0,0001
Été	37,7 (27,48)	45,9 (35,43)	0,0001

Toutes les valeurs du test t sont statistiquement significatives au seuil de 0.01 %.
() = écart type

4.2 Comparaison de l'évolution de la largeur à plein bord et de la sinuosité des rivières Ouareau et L'Assomption

Le tableau 4.4 compare la variabilité temporelle de la moyenne de la largeur à plein bord du chenal de chacune des deux rivières au moyen de la méthode d'analyse de variance (ANOVA) d'une part, et les moyennes des deux rivières au moyen du test t apparié, d'autre part.

Tableau 4.4

Comparaison de l'évolution de la largeur moyenne à plein bord des rivières L'Assomption et Ouareau pendant la période 1930-2008

Rivières	1931	1964	1975	1997	2008	Valeurs de p (ANOVA)
L'Assomption	44,2 (11,91)	40,3 (11,88)	42,7 (11,74)	40,8 (9,88)	40,6 (7,93)	0,000
Ouareau	72,3 (30,98)	70,9 (31,58)	71,8 (31,45)	71,1 (31,51)	71 (29,73)	0,988
Valeurs du test t apparié	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	

Les valeurs de p (ANOVA) et de $t < 0,001$ sont statistiquement significatives au seuil de 1 %. () = Valeurs des écarts types des moyennes.

En ce qui concerne la variabilité temporelle de la largeur moyenne à plein bord, elle a significativement diminué après 1931 pour la rivière L'Assomption, comme le confirme le test de Tukey (tableau 4.5 et figure 4.5). Toutefois, il convient de mentionner que cette largeur a légèrement augmenté en 1975, si bien que les moyennes de la largeur en 1931 et en 1975 ne sont pas statistiquement significatives (voir tableau 4.5). Quant à la rivière Ouareau, aucun changement significatif de la largeur moyenne à plein bord ne fut observé dans le temps (tableau 4.4 et figure 4.6).

La comparaison des moyennes de la largeur en plein bord des deux rivières au moyen du test t apparié révèle que la largeur moyenne de la rivière Ouareau est presque deux fois supérieure à celle de la rivière L'Assomption, malgré que la taille du bassin versant de cette dernière rivière soit plus grande que celle de son affluent (tableau 4.4).

Tableau 4.5

Comparaison de l'évolution de la largeur moyenne à plein bord de la rivière L'Assomption au moyen du test de Tukey pendant la période 1930-2008
Valeurs de p du test

	1931	1964	1975	1997	2008
1931	1				
1964	0,001	1			
1975	0,588	0,124	1		
1997	0,007	0,990	0,317	1	
2008	0,004	0,998	0,231	1,000	1

Les valeurs < 0.01 sont statistiquement significatives au seuil de 1 %. Elles apparaissent en gras.

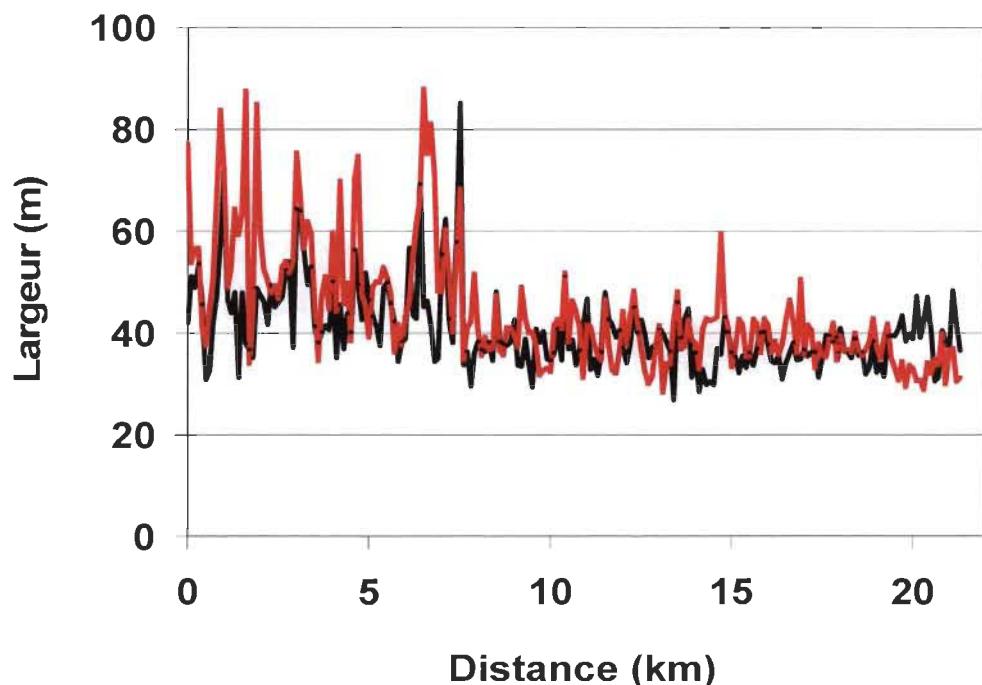


Figure 4.5 : Comparaison de l'évolution de la largeur à plein bord de la rivière L'Assomption en 1931 (courbe rouge) et en 2008 (courbe noire).

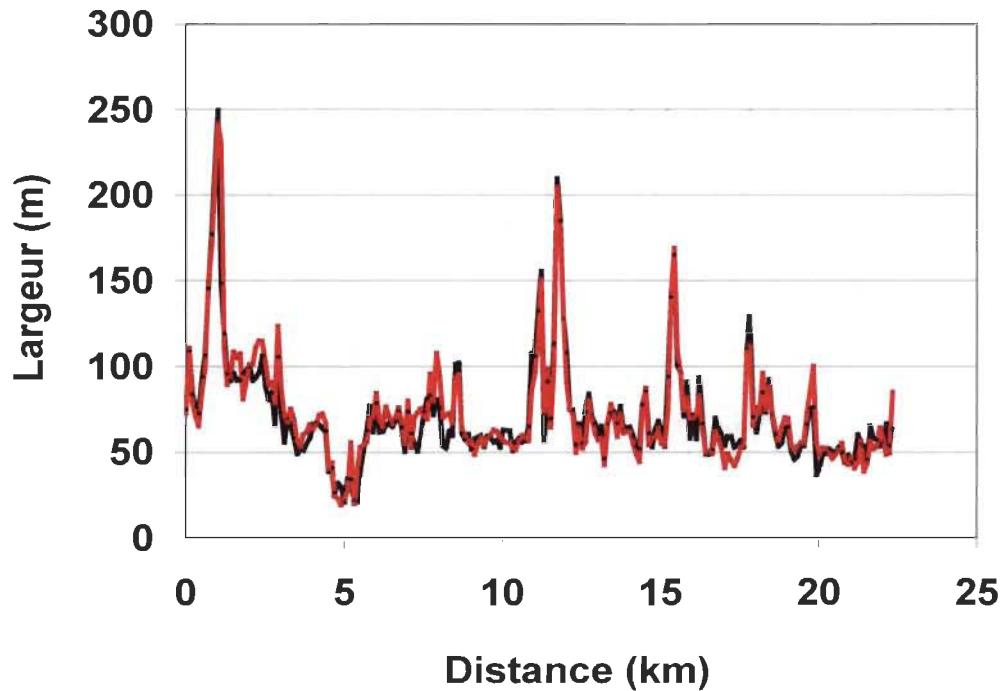


Figure 4.6 : Comparaison de l'évolution de la largeur à plein bord de la rivière Ouareau en 1931 (courbe rouge) et en 2008 (courbe noire).

Enfin, en ce qui concerne la sinuosité, aucun changement ne fut observé pour les deux rivières bien que leurs indices de sinuosité soient relativement élevés (> 2) (tableau 4.6). Cependant, si nous comparons la sinuosité des deux rivières, les valeurs des indices de sinuosité de la rivière L'Assomption sont deux fois plus élevées que celles de la rivière Ouareau, bien que les contextes climatique et lithologique soient les mêmes pour les deux rivières.

Tableau 4.6

Comparaison des indices de sinuosité des rivières L'Assomption et Ouareau pendant la période 1930-2008

Rivière	1931	1964	1975	1997	2008
L'Assomption	2,60	2,64	2,66	2,67	2,66
Ouareau	1,33	1,33	1,33	1,33	1,33

En conclusion, du point de vue morphologique, comparativement au chenal de la rivière L'Assomption, l'impact du barrage Rawdon s'est traduit par un élargissement et une diminution de la sinuosité du chenal de la rivière Ouareau. Ces deux changements morphologiques sont compatibles.

CHAPITRE V

DISCUSSION ET CONCLUSIONS

La méthode couramment utilisée pour détecter les changements hydrologiques et morphologiques induits par un barrage consiste à comparer les données avant et après la construction d'un barrage (méthode de station témoin). Cependant, dans de nombreux cas au Québec notamment, on ne dispose pas toujours de données avant la construction d'un barrage. Ainsi, la méthode classique de station témoin ne peut être appliquée pour détecter les changements induits par le barrage. Pour surmonter cette difficulté, d'autres méthodes d'analyse ont été proposées. Elles sont fondées sur l'hypothèse que les changements hydrologiques et morphologiques qui restent permanents dans le temps (sans être altérés par la variabilité ou les changements climatiques, le changement de l'utilisation des sols, la construction d'autres barrages, etc.) peuvent être détectés même si on ne dispose pas des données avant la construction d'un barrage. Pour tester cette hypothèse, on a appliqué la méthode de la station contrôle qui consiste à comparer les caractéristiques hydrologiques et morphologiques observées en aval d'un barrage à celles d'une rivière naturelle dont les caractéristiques physiographiques, lithologiques et climatiques sont quasi similaires à celles de la rivière régularisée. Dans le cas de cette étude, on a comparé les caractéristiques hydrologiques (débits maximums journaliers saisonniers) et morphologiques (la largeur moyenne à plein bord et la sinuosité) de la rivière Ouareau en aval du barrage de Rawdon à celles de la rivière non régularisée de l'Assomption afin de détecter les changements induits par ce barrage. Cette comparaison a permis d'identifier trois changements qu'on peut attribuer au barrage Rawdon construit en 1913.

1. Les débits maximums journaliers de la rivière Ouareau en aval du barrage Rawdon sont systématiquement supérieurs à ceux de la rivière L'Assomption. On peut invoquer plusieurs facteurs pour expliquer cette différence de la magnitude des débits entre les deux rivières :

- La différence de superficies des bassins versants. Au Québec, toutes les études de régionalisation hydrologiques des débits maximums journaliers ont démontré une relation de forte proportionnalité ($r > 0,900$) entre les débits et les superficies des bassins versants aussi bien pour les rivières naturelles que celles régularisées par les barrages (e.g. Anctil et al. 1998; Assani et al., 2006, 2009; Belzile et al., 1997; Ribeiro-Corréa et al. 1995). En d'autres termes, la différence des débits entre deux bassins versants ou rivières est expliquée principalement par celle de leurs superficies. En se fondant sur cette relation de proportionnalité entre les débits et les superficies des bassins versants au Québec, la magnitude des débits maximums journaliers saisonniers en aval du barrage Rawdon serait en principe plus faible que celle de la rivière L'Assomption, car la superficie du bassin versant à la station de mesure des débits (station de Joliette) sur cette dernière rivière est plus élevée que celle du bassin versant de la rivière Ouareau au niveau du barrage où les débits sont mesurés. Or, on observe le contraire. Les débits maximums journaliers sont plus élevés en aval du barrage Rawdon que sur la rivière L'Assomption. Il s'ensuit que ce facteur ne peut expliquer les valeurs de la magnitude des débits maximums journaliers plus élevées en aval du barrage de Rawdon que sur la rivière L'Assomption.
- La différence des conditions climatiques. On peut supposer que dans le bassin versant de la rivière Ouareau, la quantité saisonnière de pluies et de neige serait supérieure à celle observée dans le bassin versant de l'Assomption pour expliquer la différence de magnitude des débits maximums journaliers observée entre les deux bassins versants. Cette hypothèse est à exclure, car dans cette région, qui englobe les deux bassins versants, il n'existe aucune variabilité spatiale significative de la quantité de neige pendant la période froide (d'octobre à avril). Tous les bassins versants reçoivent la même quantité de neige pendant cette période en dépit de la différence d'altitude entre les bassins versants. Quant aux pluies, elles sont plus abondantes dans les Basses-Terres du Saint-Laurent que sur les Hautes-Terres du Bouclier canadien. Or, les deux bassins versants s'étendent

sur les deux régions (Basses-Terres et Bouclier canadien). Par conséquent, il ne peut exister aucune différence significative de la quantité de pluies entre les deux bassins versants. De plus, il n'existe aucune différence significative d'altitude entre les deux bassins versants qui pourrait induire une différence de la quantité de pluies.

- La différence dans la variabilité du climat entre les deux bassins versants. On peut aussi supposer que la quantité de neige et/ou de pluies aurait significativement augmenté dans le temps dans le bassin versant de la rivière Ouareau que dans le bassin versant de l'Assomption. Cette hypothèse est à exclure, car l'analyse de la variabilité interannuelle des débits maximums annuels journaliers de deux rivières au moyen de la méthode de Lombard a révélé une forte corrélation qui traduit en fait une forte similitude de la variabilité de ces débits, et par conséquent, celle du climat dans les deux bassins versants. Il s'ensuit que cette variabilité du climat ne peut pas expliquer des débits maximums journaliers plus élevés en aval du barrage Rawdon que sur la rivière L'Assomption.
- La différence dans l'utilisation des sols (superficie agricole). Ce facteur est aussi à exclure, car la superficie agricole est quasi identique. Par conséquent, la différence de l'utilisation des sols ne peut pas non plus expliquer des débits maximums journaliers plus élevés en aval du barrage Rawdon que sur la rivière L'Assomption. De plus, Muma et al. (2011) ont récemment démontré que la superficie occupée par l'agriculture n'avait aucun impact significatif sur la magnitude des débits maximums journaliers au Québec. Ceci exclut définitivement l'influence de l'agriculture pour expliquer les valeurs relativement élevées de la magnitude des débits en aval du barrage Rawdon.
- La différence dans les autres caractéristiques physiographiques (pente moyenne, densité de drainage, longueur de cours d'eau, superficie des lacs, etc.). Tous les travaux consacrés sur la variabilité spatiale des débits à différentes échelles (année, saisons, mois et jours) ont démontré que ces

caractéristiques physiographiques comme la superficie des lacs et marais, la pente moyenne du bassin versant, la superficie des forêts, la longueur du cours d'eau n'avaient aucun impact significatif sur les débits maximums journaliers en particulier (Anctil et al., 1998; Assani et al., 2005, 2006, 2007; Belzile et al., 2007; Lajoie et al., 2006, 2007, Matteau et al., 2009; Pandey and Nguyen, 1999; Ribeiro-Corréa et al. 1995). Ceci exclut par conséquent l'influence de ces facteurs pour expliquer la différence de la magnitude des débits maximums journaliers entre les deux rivières

2. Le second changement qu'on peut attribuer au barrage est sans nul doute l'élargissement important du chenal de la rivière Ouareau en aval du barrage Rawdon. En effet, le test t-apparié a révélé que la largeur moyenne à plein bord du chenal de la rivière Ouareau en aval du barrage Rawdon est quasi deux fois supérieure à celle du chenal de la rivière L'Assomption. Plusieurs facteurs peuvent être invoqués pour expliquer l'élargissement important du chenal de la rivière Ouareau en aval du barrage de Rawdon.
 - La différence de taille des bassins versants. Sous les mêmes conditions lithologiques, climatiques et physiographiques, il existe une relation proportionnelle entre la taille du bassin versant et la largeur à plein bord d'un chenal. Ce facteur ne peut pas rendre compte de l'élargissement du chenal de la rivière Ouareau pour la simple raison que dans le secteur d'étude, la superficie de bassins versants de deux rivières est quasi identique.
 - La différence des débits morphogéniques. Il est bien connu que la largeur du chenal d'un cours d'eau est généralement proportionnelle aux débits, en particulier au débit à plein bord ou les débits morphogéniques qui façonnent le chenal (e.g. Bravard and Petit, 1997; Schumm, 1968). Au cours d'une saison donnée, les changements morphologiques les plus importants sont toujours associés aux débits maximums les plus élevés mesurés au cours de cette saison. Or, on a déjà démontré précédemment que ces débits sont supérieurs en aval du barrage Rawdon que sur la rivière non régularisée de l'Assomption. On peut donc conclure que l'élargissement du chenal de la

rivière Ouareau en aval du barrage Rawdon résulterait de la hausse des débits maximums journaliers due à la présence du barrage.

- La différence des caractéristiques granulométriques des sédiments des berges et du fond du lit. Il est aussi bien connu que la largeur à plein bord du chenal d'un cours d'eau dépend de la taille des sédiments qui tapissent les berges et le fond du lit (charge solide) (e.g. Bravard et Petit, 1997; Schumm, 1968). Rappelons que dans les tronçons étudiés, les deux rivières coulent sur un substrat similaire (Les Basses-Terres du Saint-Laurent). Ainsi, il n'existe pas de différence importante entre la taille médiane et modale des sédiments qui constituent les berges de deux rivières. Toutefois, les berges de la rivière Ouareau en aval du barrage Rawdon contient une proportion plus élevée des sédiments grossiers (sables grossiers et graviers) que les berges de la rivière L'Assomption. Par conséquent, on peut conclure que ces sédiments grossiers peuvent favoriser l'érosion des berges de la rivière Ouareau en aval du barrage Rawdon. Cette érosion pourrait ainsi expliquer l'élargissement important du chenal de la rivière Ouareau en aval du Barrage Rawdon. Cependant, la différence de largeur en plein bord de deux rivières est beaucoup plus importante pour être expliquée par la différence de la proportion des éléments grossiers. À notre avis, ces éléments grossiers auraient contribué de manière secondaire à l'élargissement du chenal de la rivière Ouareau en aval du barrage de Rawdon. Le principal facteur de cet élargissement serait sans nul doute la hausse des débits maximums journaliers en raison de la présence du barrage Rawdon.
- La pente du cours d'eau. Ce facteur ne peut expliquer l'élargissement, car la pente est quasi identique pour les deux cours d'eau.
- La différence de sinuosité. La présence des méandres peut ralentir l'érosion des berges par perte d'énergie (rugosité élevée) et le ralentissement de la transmission de l'onde de crues d'amont et en aval. Ainsi, la largeur moyenne des chenaux des rivières rectilignes ont tendance à être plus élevée que celle des rivières sinuueuses. En aval du barrage de Rawdon, la sinuosité

de la rivière Ouareau est presque deux fois inférieure à celle de la rivière L'Assomption. Cette différence de sinuosité, combinée à la magnitude des débits maximums journaliers saisonniers relativement élevée et des berges plus sensibles à l'érosion en raison d'une proportion plus élevée des sédiments grossiers, peut ainsi contribuer à l'élargissement important du chenal de la rivière Ouareau observé en aval du barrage Rawdon.

3. Le troisième changement qu'on peut attribuer au barrage de Rawdon est la faible sinuosité observée en aval de ce barrage. De fait, la sinuosité de la rivière Ouareau en aval du barrage Rawdon est presque deux fois inférieure à celle du chenal de la rivière L'Assomption. Cette différence de sinuosité ne peut être expliquée ni par la différence de lithologie ni par celle de la pente. Le facteur le plus plausible susceptible de rendre compte de cette faible sinuosité est sans nul doute la hausse des débits maximums journaliers. Ceux-ci favoriseraient ainsi le recouplement des méandres par le processus de tangence ou déversement. Plusieurs traces des méandres recoupés et plus ou moins comblés sont encore visibles sur le terrain (figure 5.1). Étant donné que le secteur d'étude est fortement sous l'emprise de l'agriculture, on peut supposer que les traces d'autres méandres ont complètement disparu dans le paysage par un comblement volontaire ou non. Par ailleurs, dans l'hypothèse où la faible sinuosité du chenal de la rivière en aval du barrage Rawdon ne résulterait pas des impacts du barrage, elle aurait néanmoins contribué à l'élargissement du chenal de la rivière pour les raisons qu'on a déjà exposées.

En guise de conclusion, malgré l'absence des données hydromorphologiques avant la construction du barrage de Rawdon en 1913 sur la rivière Ouareau, l'application de la méthode de station contrôle, basée sur la comparaison de l'évolution hydromorphologique des rivières Ouareau et L'Assomption, a permis d'identifier trois changements que l'on peut associer à la présence de ce barrage. Il s'agit d'une hausse des débits maximums journaliers saisonniers qui est associée à un élargissement et une faible sinuosité du chenal de la rivière Ouareau en aval du barrage. D'un point de vue morphologique, ces changements sont compatibles et ne peuvent pas être expliqués par

les différences des caractéristiques physiographiques et lithologiques, climatiques ainsi que celles de l'utilisation des sols entre les deux bassins versants. Enfin, ces types de changements hydromorphologiques associés au barrage de Rawdon ont été aussi observés en aval de certains barrages dans le monde (Brandt, 2000).

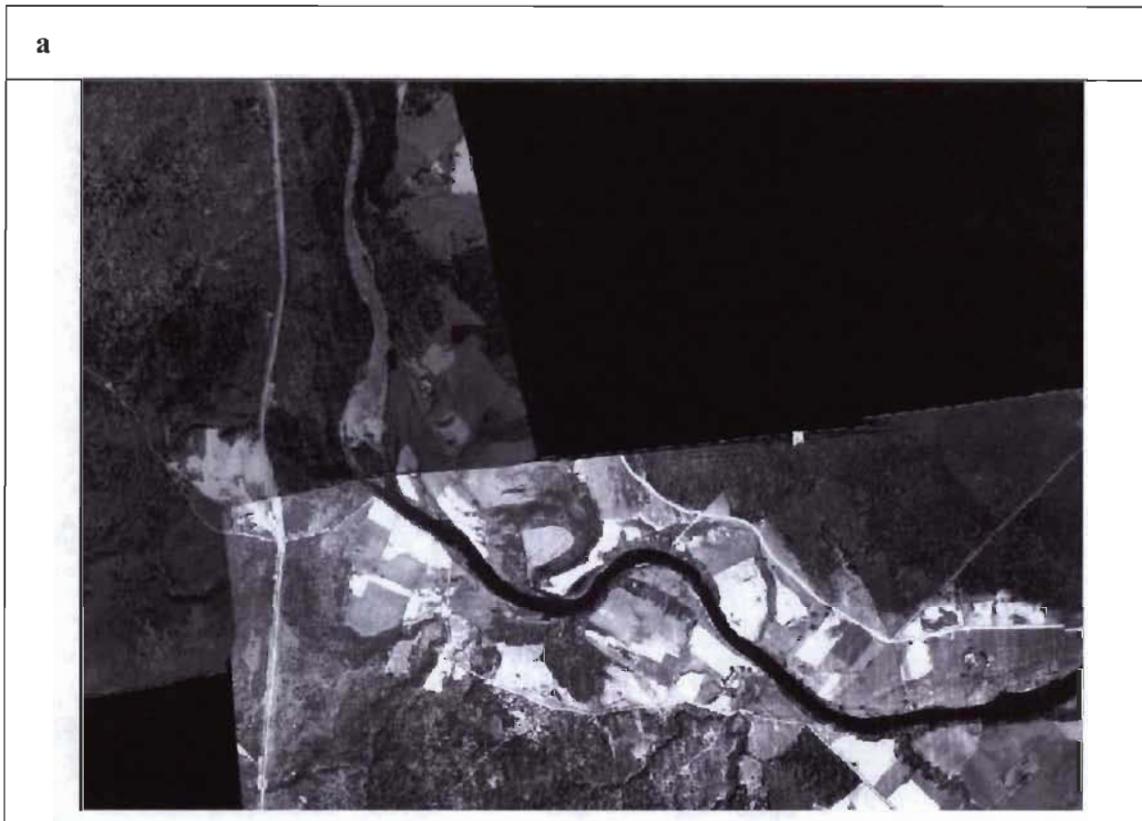


Figure 5.1 : Évolution des méandres recoupés de la rivière Ouareau.
a = 1931, b = 1975 et c = 2008.

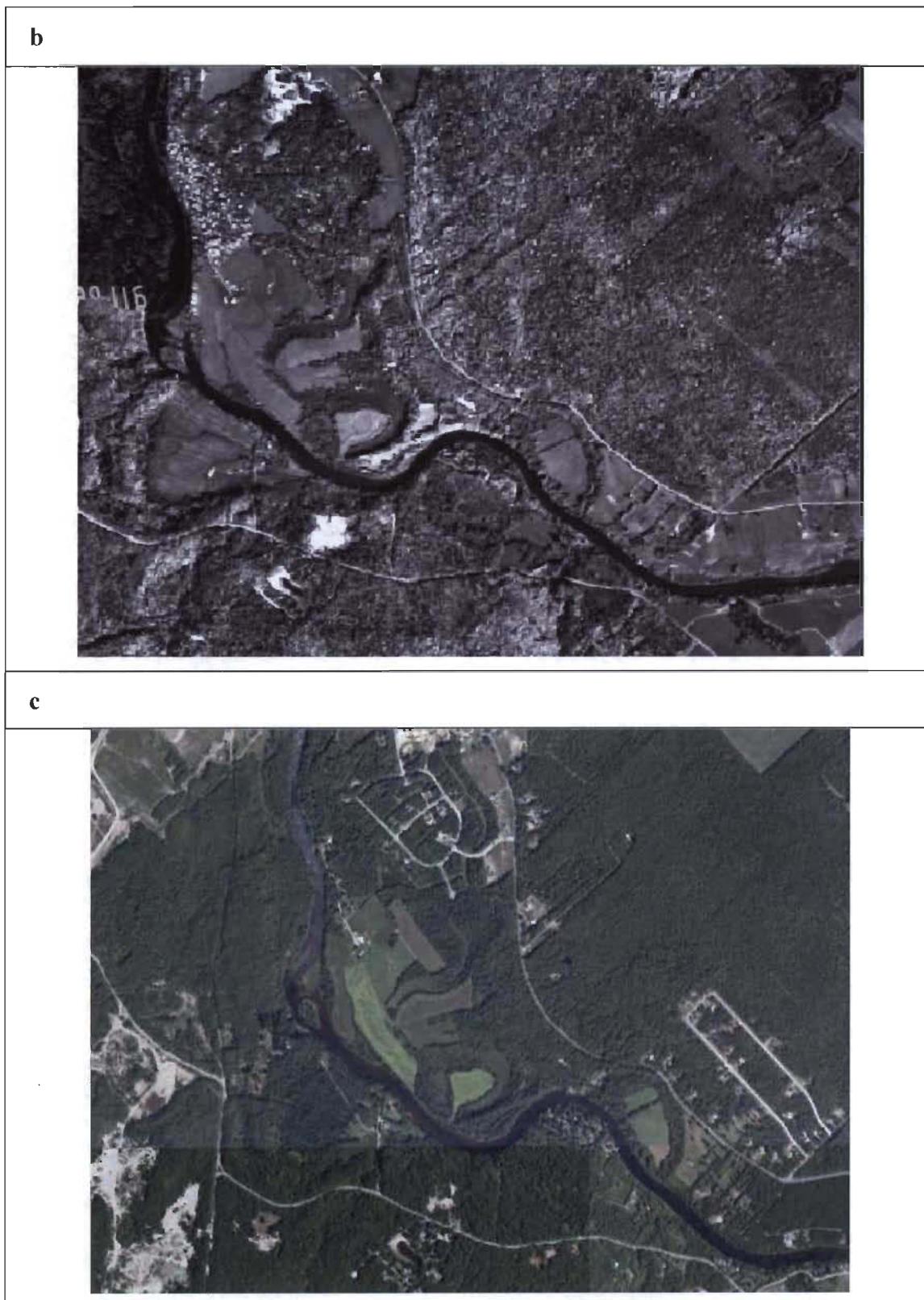


Figure 5.1 (suite) : Évolution des méandres recoupés de la rivière Ouareau.
a = 1931, b = 1975 et c = 2008.

BIBLIOGRAPHIE

- Alibert M, Assani AA, Gratton D, Leroux D, Laurencelle M (2011). Statistical analysis of the evolution of a semialluvial stream channel upstream from an inversion-type reservoir: The case of the Matawin River (Quebec, Canada). *Geomorphology*, **131**: 28-34.
- Ancil F, Martel F, Hoang VD (1998). "Analyse régionale des crues journalières de la province du Québec". *Canadian Journal of Civil Engineering*, **25**, 125-146.
- Assani A A, Buffin-Bélanger T, Roy AG (2002). "Analyse d'impacts d'un barrage sur le régime hydrologique de la rivière Matawin (Québec, Canada)". *Revue des sciences de l'eau* **15**: 557-574.
- Assani AA, Gravel E, Buffin-Bélanger T, Roy AG (2005). "Impacts des barrages sur les débits annuels minimums en fonction des régimes hydrologiques artificialisés au Québec (Canada)". *Revue des sciences de l'eau* **18**: 103-127.
- Assani A. A., F. Lajoie, Laliberté C (2007). "Impacts des barrages sur les caractéristiques des débits moyens annuels en fonction du mode de gestion et de la taille des bassins versants au Québec". *Revue des sciences de l'eau* **20**: 127-146.
- Assani AA, Landry R, Daigle J, Chalifour A. 2011a. Reservoirs effects on the interannual variability of winter and spring streamflow in the St-Maurice River watershed (Quebec, Canada). *Water Resources Management*, doi: 10.1007/s11269-011-9875-1(in press).
- Assani AA., Landry R., Laurencelle M. 2011b. Comparison of interannual variability modes and trends of seasonally precipitations and streamflow in Southern Quebec (Canada). *River Research and Applications*, doi: 10.1002/rra.1544 (in press).
- Assani AA, Matteau M, Mesfioui M (2009). Analysis of factors influencing the extent hydrologic changes of annual maximum and minimum flows downstream from dams in Québec. In P. Hayes and M.C. Barnes (Ed): Dams: Impacts, Stability and Design. NovaPublishers, New-York, pp197-214.
- Assani AA, Petit F, Buffin-Bélanger T, Roy AG (2003). "Analyse de la variation spatio-temporelle de la morphologie du chenal de la Warche en amont du barrage de Butgenbach (Belgique)". *Zeitschrift fur Geomorphologie* **47**: 469-483.

Assani AA, Stichelboud E, Roy AG, Petit F (2006). Comparison of impacts of dams on the annual maximum flow characteristics in three regulated hydrologic regimes in Québec (Canada). Hydrological Processes **20**: 3485-3501.

Astrade L (1998), "La gestion des barrages-réservoirs au Québec : exemples d'enjeux environnementaux". Annales de géographie, 604, 590-609.

Batalla RM, Gomez CM, Kondolf GM (2004). "Reservoir-induced hydrological changes in the Ebro River basin (NE Spain)". Journal of Hydrology, 290, 117-136.

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. Rapport scientifique soumis par INRS-Eau et 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.

Brandt SA (2000), "Classification of geomorphological effects downstream of dams". Catena 40, 375-401.

Brandt SA, Swenning J (1999). "Sedimentological and geomorphological effects of reservoir flushing of the Cashi Reservoir", Costa Rica, 1996, Geographiska Annaler, 81A, 391-407.

Bravard JP, Petit F (1997). Les cours d'eau - Dynamique du système fluvial, Armand Collin editions. U Géographie: 222 pp.

Brien M (2006), "Mesure de l'érosion des berges, du ravinement et de la migration des cours d'eau dans la portion agricole du bassin versant de la rivière des Envies (Québec)". Mémoire de maîtrise, Université du Québec à Trois-Rivières, 131 p.

CARA (2006), "Plan directeur de l'eau de la corporation de l'aménagement de la rivière L'Assomption".

Charlton R (2008) "Fundamentals of Fluvial Geomorphology" Edition Routledge, 256 p.

Chien N (1985) "Change in rivers regime afeter the construction of upstream reservoirs". Earth surfaces Procsesses and Landforms **10**, 143-159.

Church M (1995) "Geomorphic response to river flow regulation: Case studies and time scales" Regulated rivers: Research and Management **11**, 3-22.

Cunjak RA, Prowse TD, Parrish DL (1998). Atlantic salmon (*Salmo salar*) in winter: "The season of parr discontent". *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences* **55**: 161-180.

Dynesius M, Nilsson C (1994). Fragmentation and flow regulation of river systems in the Northern third of the world. Sciences, **266**, 753-762.

Dubois JJ, Kergomard C, Lageat Y (2002) Géographie physique, Milieux et environnement dans le système de la terre, Armand Colin, Paris, 368p.

Emery JC, Gurnell AM, Clifford NJ, Petts GE (2004) "Characteristics and controls of gravel-bed riffles: an analysis of data from the River Habitat Survey" J. CIWEM **18**, 210-216.

Fortier C, Assani AA, Mesfioui M, Roy AG. (2010). Comparison of interannual and interdecadal variability of heavy floods characteristics between upstream and downstream from Matawin dam. Rivers Research and Applications. doi: 10.1002/rra.1423 (*in press*).

Gravel E. (2006). "Impacts des barrages sur les caractéristiques des débits minimums annuels dans le bassin versant du fleuve Saint-Laurent et les effets de leur fluctuation sur les caractéristiques de l'eau, des sédiments et de la végétation du lit mineur de la rivière Matawin (Québec)". Mémoire de maîtrise en sciences de l'Environnement, Université du Québec à Trois-Rivières : 105 p. + annexes.

Gregory K J (2006). "The human role in changing river channels". Geomorphology **79**: 172-191.

Higgs G, Petts GE (1988). "Hydrological changes and river regulation in the UK". Regulated Rivers: Research & Management, 2, 349-368.

Hooke J M (2006). "Human impacts on fluvial systems in the mediterranean region". Geomorphology **79**: 311-335.

James LA, Marcus WA (2006). "The human role un changing fluvial systems: Retrospect, inventory and prospect". Geomorphology **79**: 152-171.

Lajoie F, Assani AA, Matteau M, Mesfioui M, Roy AG (2006). "Comparaison entre débits réservés écologiques et débits lâchés en aval des barrages au Québec : Influence du mode de gestion des barrages, de la taille des bassins versants et de la saison". Water Quality Research Journal of Canada **41**: 263-274.

Lajoie F, Assani AA, Roy AG, Mesfioui M (2007). "Impacts of monthly flow characteristics. The influence of watershed size and seasons". Journal of Hydrology **334**: 423-439.

Lane EW (1955). "The importance of fluvial morphology in hydraulic engineering". Proceedings **81**: 17.

Lasserre F (2003). "Les impacts des grands barrages du nord québécois. Entre ambitions géopolitiques, impacts environnementaux et sécurité énergétique". <http://fig-st-die.education.fr/actes/actes-2003/lasserre/Impactsbarrages.pdf>

Leopold LB, Wolman MG (1957). "River channel patterns: braided, meandering and straight". In : Geological survey Professional Paper 282-B U.S. Government Printing Office, Washington, pp. 39-84.

Lombard, F. (1987). Rank tests for changepoint problems. Biometrika. 1987; **74**: 615-624.

Lasserre F (2009). "Les impacts des grands barrages du nord québécois. Entre ambitions géopolitiques, impacts environnementaux et sécurité énergétique". Geocarrefour, **84**: 21p.

Lopez-Moreno JI, Begueria S, Garcia-Ruiz JM (2004). The management of a large Mediterranean reservoir: storage regimens of the Yesa Reservoir, upper Aragon River basin, central Spanish Pyrenees. Environmental Management, **34**: 508-515.

Matteau M., Assani AA, Mesfioui M (2009). "Application of multivariate statistical analysis methods to the dam hydrologic impact studies". Journal of Hydrology, **371**, 120-128.

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.

Pandey GR, Nguyen VTV (1999). "A comparative study of regression based methods in regional flood frequency analysis". Journal of Hydrology, **225**, 92-101.

- Peters DL, Prowse T (2001)."Regulation effects on the lower Peace River, Canada". *Hydrological Process*, 15, 3181-3194.
- Petts GE (1987). "Times-scales for ecological change in regulated rivers" *Regulated Streams, Advances in ecology*, New York, 257-266.
- Petts G.E et Gurnell A. M. (2005) "Dams and geomorphology: research progress and future directions". *Geomorphology* 71: 27-47.
- Petts G.E (1984a). Impounded rivers: Perspective for ecological Management, Wiley, Chischester, 326p.
- Petts G.E (1984b). Sedimentation within a regulated river *Earth surface Processes Landforms*, 9: 125-134.
- Poff N L, Bledsoe 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*, doi: 10.1002/env.1108 (in press).
- Ribeiro-Corréa J, Cavadias GS, Clément B, Rousselle J (1995). Identification of hydrological neighborhoods using canonical correlations analysis. *Journal of Hydrology*, 173, 71-89.
- Rosenberg DM, Berkes F, Bodaly RA, Kelly CA, Rudd JWD (1997). Large-scale impacts of hydroelectric development. *Environment Review*, 5: 27-54.
- Schumm SA (1968). River metamorphosis. *Journal of Hydraulics Division. Proceedings of the America Society of Civil Engineers* HY1: 255-273.
- Surian N (1999). Channel changes due to river regulation: the case of the Piave River, Italy. *Earth Surfaces Processes and Landforms* 24: 1135-1151.
- Ta W, Xiao H, Dong Z (2005). "Long-term morphodynamic changes of desert reach of the Yellow River following upstream large reservoirs'operation". *Geomorphology*, 97, 249-259.

Tiegs SD, Pohl M (2005). "Planform channel dynamics of the lower Colorado River: 1976-2000". Geomorphology, 69, 14-27.

Valadas B. (2004) Geomorphologie dynamique. Armand Collin, Paris, 192p.

Wang J, Bai S, Liu P (2009). Channel sedimentation and erosion of the Jiangsu reach of the Yangtze River during the last 44 years. Earth Surface Processes and Landform **34**: 1587-1593.

Wellmeyer JL, Slattery MC, Phillips JD (2005). Quantifying downstream impact of impoundment on flow regime and channel planform, lower Trinity River, Texas. Geomorphology **69**: 1-13.

William GP, Wolman MG (1984) "Downstream effects of dams on alluvial rivers" Geological Survey Professional Paper 1286 U.S. Government printing Office, Washington, DC, v + 83 pp.