

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
MARTIN MATTEAU**

**ANALYSE DES FACTEURS DE VARIABILITÉ SPATIALE ET
ESTIMATION DES DÉBITS EXTRÊMES EN AVAL DES BARRAGES DU
QUÉBEC MÉRIDIONAL**

AVRIL 2007

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 désire premièrement remercier mon directeur M. Ali A. Assani qui m'a fait confiance dès le tout début en me proposant ce poste d'étudiant à la maîtrise et n'a jamais douté de ma réussite malgré les multiples changements apportés à mon projet.

Je désire remercier aussi mon codirecteur, M. Stéphane Campeau. Son esprit critique m'a permis plus d'une fois d'accorder un regard nouveau sur mes travaux. Il m'a de plus apporté une grande confiance en moi en m'intégrant, à la fin de mon baccalauréat en géographie, comme géomaticien au sein de son laboratoire naissant et durant ma maîtrise en me donnant le poste d'assistant pour son cours de Gestion intégrée des bassins versants.

Je tiens aussi à remercier M. Mhamed Mesfioui et Denis Gratton d'avoir accepté de faire partie de mon comité d'évaluation, M. Guy Samson en tant qu'hôte intéressé de tous les séminaires et M. Pierre-André Bordeleau de son soutien technique en géomatique.

Je remercie mes collègues Gabrielle Trottier, Martine Grenier, Maxime Brien, Francis Lajoie, Yan Bordeleau, Émilie Stichelbout, Édith Gravel, Isabelle Lavoie et Marie-André Fallu pour leur support technique ou moral.

Finalement je tiens à souligner quelques professeurs qui m'ont marqué par leur compétence ou leur attitude sympathique, soit Ali Assani, Normand Brouillette, Denis Gratton, Denis Leroux, Claude Genest, Gilbert Cabana, Marco Rodriguez, Guy Samson et Esther Lévesque.

RÉSUMÉ

Bien que les impacts écologiques et géomorphologiques des barrages soient bien étudiés, peu d'auteurs s'intéressent aux impacts hydrologiques des barrages desquels ceux-ci dépendent. Les méthodes déjà utilisées pour évaluer les impacts hydrologiques comportent des failles, que ce soit par un traitement ponctuel, une nécessité d'utilisation de certaines variables ou une incapacité à identifier les différentes caractéristiques de barrages influençant chacune des caractéristiques hydrologiques définies par le concept d'écoulement naturel. Ce travail propose une nouvelle méthode d'identification des facteurs influent l'ampleur des changements hydrologiques des débits en aval des barrages, en l'occurrence la méthode d'analyse des corrélations canoniques. Cette méthode permet de déterminer les facteurs de la variabilité spatiale des caractéristiques hydrologique en aval des barrages afin de pouvoir notamment sélectionner les variables pertinentes pour y estimer les débits. Les analyses effectuées sur plus de 60 stations influencées par les barrages au Québec permettent de conclure que la date d'occurrence des débits extrêmes maximums est influencée principalement par le type de régime hydrologique artificialisé et, dans une moindre mesure, par la capacité des réservoirs. La magnitude et la fréquence des débits annuels maximum sont influencées principalement par la taille des bassins versants. Dans le cas des débits minimums, la date d'occurrence moyenne des débits extrêmes minimums est influencée par la capacité du réservoir et par le type de régime hydrologique artificialisé tandis que leur magnitude et fréquence sont influencées principalement par la taille des bassins versants. Du point de vue de l'estimation des débits en aval des barrages, la taille du bassin versant suffit à estimer les débits maximums et minimums en aval des barrages au Québec.

Mots clés : Impacts hydrologiques des barrages, concept d'écoulement naturel, estimation des débits, Québec, analyse des corrélations canoniques, débits extrêmes

TABLE DES MATIÈRES

REMERCIEMENTS	ii
RÉSUMÉ	iii
TABLE DES MATIÈRES.....	iv
LISTE DES TABLEAUX	vi
LISTE DES FIGURES	viii
CHAPITRE I : INTRODUCTION.....	1
1.1 Contexte de la recherche	1
1.2 Problématique, objectifs et hypothèses de recherche.....	4
CHAPITRE II : MÉTHODOLOGIE.....	7
2.1 Sources de données et choix de station d'étude.....	7
2.2 Description des caractéristiques des barrages : le choix des variables indépendantes.....	12
2.3 Définition des variables hydrologiques des séries extrêmes : application du concept de régime d'écoulement naturel.....	13
2.4 Méthodes d'analyse des données.....	20
2.4.1 Identification des facteurs influents	20
2.4.2 Estimation des débits en aval des barrages.....	23

CHAPITRE III : RÉSULTATS.....	25
3.1 Identification des facteurs qui influencent les changements hydrologiques en aval des barrages au Québec.....	25
3.1.1 Débits maximums annuels.....	25
3.1.2 Débits minimums annuels.....	28
3.2 Estimation des débits en aval des barrages	31
3.2.1 Sélection des facteurs d'estimation des débits maximums et minimums annuels au moyen de l'analyse des corrélations canoniques	33
3.2.2 Estimation des débits maximums et minimums annuels	36
CHAPITRE IV : DISCUSSION ET CONCLUSION.....	40
BIBLIOGRAPHIE	46

LISTE DES TABLEAUX

2.1	Liste des barrages étudiés et certaines de leurs caractéristiques....	8
2.2	Impacts des caractéristiques hydrologiques sur les écosystèmes	14
2.3	Changements écologiques liés aux débits minimums	15
2.4	Changements écologiques liés aux débits maximums.....	16
2.5	Implications écologiques des modifications géomorphologiques induites par les caractéristiques hydrologiques	17
2.6	Variables utilisées pour chacune des caractéristiques hydrologiques	19
3.1	Coefficients de corrélations canoniques (débits maximums annuels)	25
3.2	Corrélation entre les caractéristiques des débits maximums annuels et leurs variables canoniques	27
3.3	Corrélation entre les caractéristiques des barrages et leurs variables canoniques.....	28
3.4	Coefficients de corrélations canoniques (débits minimums annuels)	29
3.5	Corrélation entre les caractéristiques des débits minimums annuels et leurs variables canoniques	29
3.6	Corrélation entre les caractéristiques des barrages et leurs Variables canoniques... ..	30
3.7	Résumé sur la relation entre caractéristiques de barrages et caractéristiques hydrologiques des débits	31
3.8	Résultats de l'analyse de covariance pour les débits maximums annuels..... ..	32
3.9	Résultats de l'analyse de covariance pour les débits minimums annuels	33

3.10	Coefficients de corrélation canonique	34
3.11	Corrélation entre les variables originales des débits maximums annuels et leurs variables canoniques	35
3.12	Corrélation entre les variables originales des débits minimums annuels et leurs variables canoniques	36
3.13	Paramètres des droites de régressions	38
3.13	Proportion des valeurs incluses à l'intérieur de l'intervalle de confiance de 95%.....	38

LISTE DES FIGURES

1.1	Taux de construction des grands barrages au 20 ^e siècle	1
2.1	Localisation des barrages selon leur régime.....	7
2.2	Hydrogramme annuel d'une rivière en régime hydrologique de type homogénéisation.....	10
2.3	Hydrogramme annuel d'une rivière en régime hydrologique de type naturel.....	11
2.4	Hydrogramme annuel d'une rivière en régime hydrologique de type inversion.....	11
2.5	Comparaison des méthodes d'estimation des débits.....	21
3.1	Relation entre la superficie des bassins versants et les caractéristiques hydrologiques	38

CHAPITRE I

INTRODUCTION

1.1 Contexte de la recherche

À l'aube d'une hausse drastique des besoins énergétiques et des changements climatiques, il est de plus en plus important de trouver de nouvelles sources d'énergie renouvelables ou d'améliorer le rendement énergétique et écologique des sources déjà en usage. De ces sources, l'hydroélectricité figure toujours comme l'une des meilleures solutions à moyen et long termes à ces problèmes. Selon le second World Water Report réalisé par l'UNESCO (2006), l'hydroélectricité est la forme d'énergie la plus polyvalente. La flexibilité des petites, micro ou pico centrales hydroélectriques au fil de l'eau pour soutenir les réseaux énergétiques existant ou alimenter des communautés éloignées ou pauvres et la capacité des grands barrages réservoirs à emmagasiner de l'énergie potentielle permet de répondre à tous types de demande. En ce sens, l'on observe, toujours selon ce rapport, une hausse du nombre des chantiers et des projets hydroélectriques dans les pays en voie de développement, la Chine en tête.

Les pays en développement ne sont pas seuls bâtisseurs des grands barrages. En effet, depuis le début du 20^{ème} siècle, le nombre des barrages construits dans le monde a considérablement augmenté atteignant son apogée durant la décennie 70 (ROSENBERG et al., 2000, fig.1.1). Selon DYNESIUS et NILSSON (1994), plus de tiers des cours d'eau de l'hémisphère nord sont plus ou moins profondément régularisés. Au Québec,

on dénombre plus de 10 000 barrages et digues érigés depuis le 19^{ème} siècle (ASTRADE, 1998).

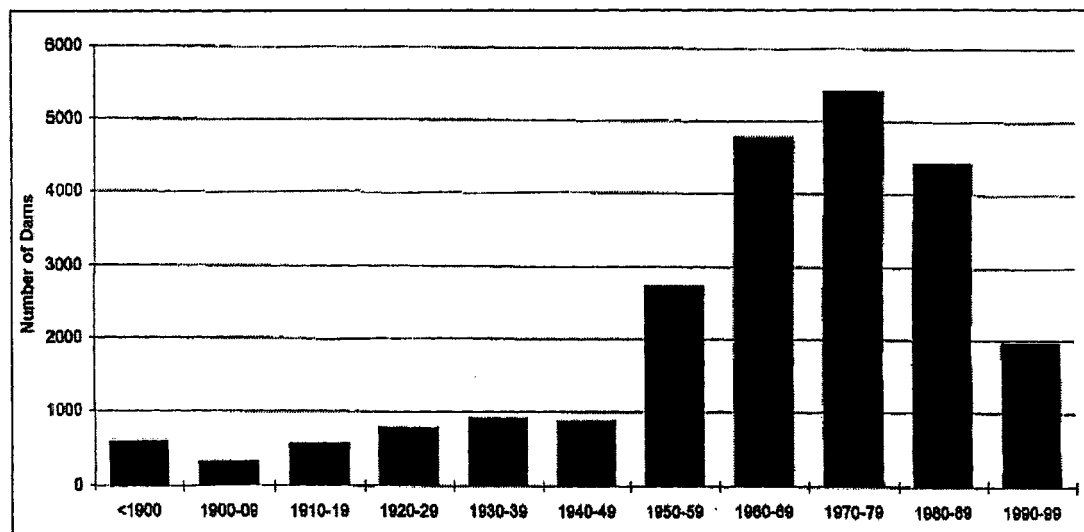


FIGURE 1.1 : Taux de construction des grands barrages au 20^e siècle

Cette hausse de l'importance de l'énergie hydroélectrique, loin d'avoir atteint son potentiel mondial maximal (UNESCO 2006), doit donc s'accompagner de mesures pour s'assurer de son développement durable. L'International Hydropower Association (2004) énonce en ce sens à l'attention de ses membres que « *Changes to downstream hydrology impact on river hydraulics, instream and streamside habitat, can affect local biodiversity. Operating rules should not only consider the requirements for power supply, but also be formulated, where necessary and practicable, to reduce downstream impacts on aquatic species and human activities* ».

De nombreux auteurs ont étudié les effets écologiques associés aux modifications des régimes hydrologiques sur les écosystèmes aquatiques et riverains. Pour en citer quelques uns, notons STANFORD et al. (1996) qui ont observé une hausse de l'invasion des espèces exotiques dans un milieu où

l'écoulement est homogénéisé. OLIVIERA et al. (2004) ont mesuré des baisses du nombre de milieux de reproduction potentiels pour les lamproies marines au Portugal. Quant à MALQVIST et ENGLUND (1996), ils ont constaté une baisse de l'abondance et de la diversité des éphémères en milieu régulé. Pour plus de détails sur les impacts écologiques des rivières régularisées, on peut consulter les excellentes synthèses de BUNN et ARTHINGTON (2002) sur la biodiversité aquatique ainsi que celle de NILSSON et SVEDMARK (2002) sur les plantes ripariennes. De même, il existe aussi une littérature de plus en plus abondante sur les impacts morphologiques et sédimentologiques des barrages (voir les synthèses de BRANDT, 2000; Petts, 1979; GURNELL et PETTS, 2005). Les impacts morphologiques se traduisent le plus souvent par une incision associée à un élargissement des lits mineurs de rivières.

En revanche, comparativement aux impacts morphologiques et écologiques des barrages, les études relatives aux impacts hydrologiques sont encore limitées comme l'avait déjà stigmatisé VIVIAN (1994). Pourtant, les autres impacts dépendent directement des impacts hydrologiques. Selon HART al. (2002), la détermination des impacts hydrologiques est primordiale pour mieux analyser les autres impacts (morphologiques et écologiques) du fait que « *water flow is a master variable that governs the fundamental nature of streams and rivers, so it should come as non surprise that the modification of flow by dams alters the structure and function of river ecosystems* ». Au Québec, malgré la présence de nombreux barrages, il existe encore très peu d'études sur les impacts hydrologiques induits par les ouvrages comme l'avaient déjà mentionné PATOINE et al. (1999) dans leur mémoire remis au Bureau des audiences publiques sur l'environnement dans le cadre des audiences publiques sur la Gestion de l'eau au Québec. C'est pour combler cette lacune que le professeur Ali Assani a élaboré un programme de recherche pour analyser les impacts hydrologiques des barrages notamment. C'est dans le cadre de ce programme que s'inscrit le présent travail.

1.2 Problématique, objectifs et hypothèses de recherche

Les études consacrées aux impacts hydrologiques des barrages poursuivent comme principal objectif la quantification des changements induits par les barrages sur les caractéristiques des débits (ANDREWS et PIZZI, 2000; ASSANI, 2004; ASSANI et al., 2002; BATALLA et al., 2004; DYNESIUS et NILSSON, 1994; GAILIUSIS et al., 2003; GRAF, 1999; HARMAN et STEWARDSON, 2005; HIGGS et PETTS, 1988; HUSZAR et al., 1999; LECONTE et al., 2001; LOIZEAU et DOMINIK, 2000; MAGILLIGAN et NISLOW, 2003, 2005; MONTALDO et al., 2004; PEGG et al., 2003; PETERS et PROWSE, 2001; PETTS, 1984; RICHTER et al., 1998; SAAD et TURGEON, 1988; TURGEON et CHARBONNEAU, 1998; VUGLINSKY, 1997; YANG et al., 2004; YE et al., 2003). Il s'agit en fait de déterminer l'ampleur des modifications hydrologiques provoquées par un barrage. Mais, selon ASSANI et al. (2006a), cet objectif ne peut déboucher sur l'élaboration des politiques de gestion, de conservation et de restauration des tronçons régularisés car les facteurs qui influencent ces diverses modifications ne sont pas identifiés par ces études. C'est la faiblesse majeure de cet objectif. Cette élaboration est la finalité de toute étude d'impacts hydrologiques induits par les barrages. Pour atteindre cette finalité, ils définirent d'autres objectifs suivants.

- La détermination des facteurs influençant l'ampleur des modifications hydrologiques induites par les barrages.
- La détermination des caractéristiques hydrologiques les plus modifiées par les barrages.
- Enfin, l'influence des conditions climatiques sur l'ampleur des modifications hydrologiques induites par les barrages.

Dans une série de travaux, ASSANI et al. (2005, 2006, 2007) et LAJOIE et al. (2006, 2007) se sont intéressés à identifier les facteurs qui influencent l'ampleur des modifications hydrologiques en aval des barrages au moyen de la méthode de proportionnalité (relation entre taille des bassins versants et variables hydrologiques). Cette méthode leur a permis de mettre en évidence l'influence de la taille des bassins versants et le mode de gestion des barrages sur cette ampleur. Cependant cette méthode présente certaines faiblesses :

- Elle présuppose l'existence d'une relation de proportionnalité entre la taille des bassins versants et les variables hydrologiques. Or, cette relation n'a pas été observée pour toutes les variables hydrologiques.
- Elle nécessite un grand nombre de bassins versants d'une vaste gamme de taille tant en rivières régularisées que naturelles.
- Enfin, elle ne permet pas d'analyser simultanément plus de deux variables indépendantes et dépendantes.

C'est pour surmonter ces lacunes que nous comptons utiliser une nouvelle méthode pour déterminer les facteurs qui influencent l'ampleur des modifications hydrologiques en aval des barrages. C'est le premier objectif de cette étude. Elle repose sur l'hypothèse suivante : les caractéristiques des débits en aval des barrages peuvent être influencées par d'autres facteurs autres que le mode de gestion des barrages et la taille des bassins versants.

Un des intérêts majeurs de l'identification des facteurs qui influencent l'ampleur des modifications hydrologiques est la possibilité de pouvoir prédire (estimer) les caractéristiques des débits en aval des barrages. En ce qui concerne le Québec, cette estimation des débits est fort importante. En effet, comme l'avait souligné le rapport NICOLET (1997) sur le déluge de Saguenay, les données des débits en aval des barrages sont importantes pour assurer

la sécurité des populations humaines vivant en aval et pour prévenir les risques liés aux événements météorologiques extrêmes notamment. Au Québec, il existe très peu de données de débits en aval des barrages. À titre d'exemple, les données des débits publiées par Environnement Canada (2002) concernent moins de 100 barrages sur les quelques 10 000 barrages et digues inventoriés au Québec (ASTRADE, 1998). De plus, parmi ces 100 barrages moins de 20% seulement disposent de mesures journalières continues des débits (LAJOIE et al., 2006). À l'instar des rivières naturelles, l'estimation des débits devient donc une préoccupation pour assurer la sécurité des ouvrages et de la population. Or, les méthodes d'estimation des débits en rivières naturelles, développées dans le cadre des travaux de régionalisation (ANCTIL et al., 1998, 2000, CAVADIAS, 1990; DAVIAU et al., 2000; DESFORGES et TREMBLAY, 1974; GREHYS, 1996; PABDEY et NGUYEN, 1999) au Québec, ne peuvent pas être appliquées en rivières régularisées. Par conséquent, il est nécessaire de mettre au point une autre approche pour estimer les débits en aval des barrages. C'est le second objectif de cette étude. Il visera à déterminer le nombre de facteurs nécessaires pour obtenir une meilleure estimation des débits en aval des barrages. Pour des raisons d'efficacité, l'estimation des débits en aval des barrages doit répondre à trois contraintes :

- 1- Les données des facteurs d'estimation des débits doivent être facilement accessibles. Sinon, l'estimation présente peu d'intérêt.
- 2- Les équations d'estimation doivent être relativement faciles à manipuler, les équations complexes pouvant décourager leur utilisation.
- 3- Enfin, les équations doivent fournir des estimations satisfaisantes des débits.

CHAPITRE II

MÉTHODOLOGIE

2.1 Sources de données et choix de stations d'étude

Cette étude est fondée sur une analyse de 62 stations influencées directement par des barrages. Toutes les stations sont situées dans le bassin versant du fleuve Saint-Laurent au Québec (fig. 2.1 et tableau 2.1).

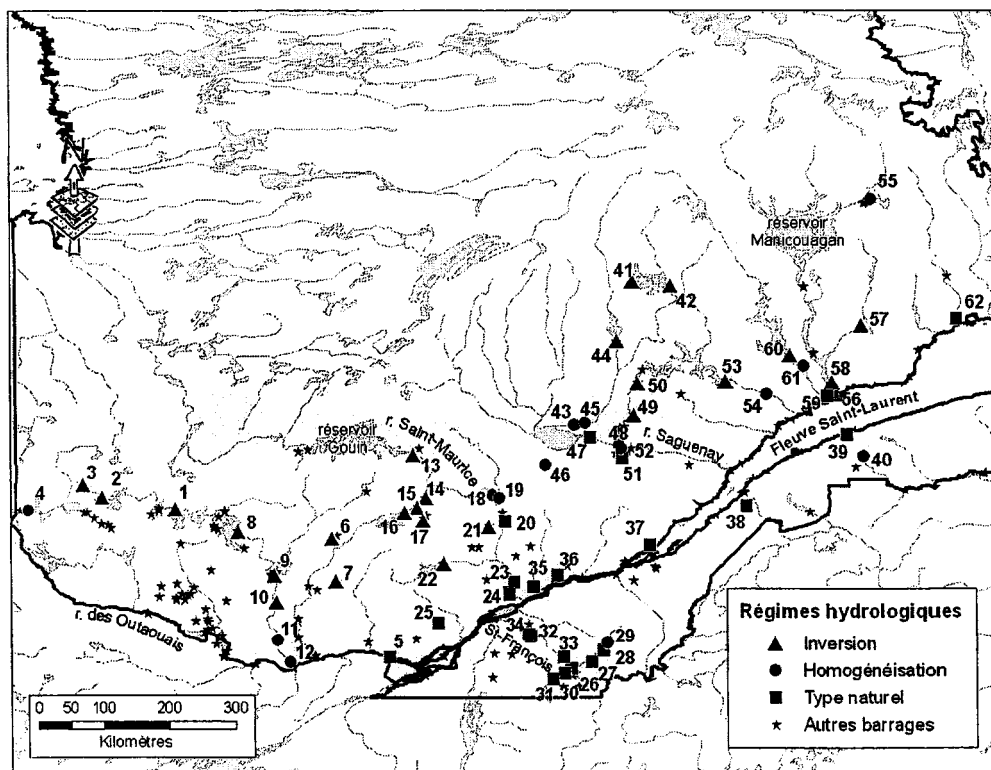


FIGURE 2.1 : Localisation des barrages selon leur régime

TABLEAU 2.1
Liste des barrages étudiés et certaines de leurs caractéristiques

no.	no. Hydat	rivière	Hauteur (m)	régime	Ca (m³)	BV (km²)	latitude	longitude	années de mesures
1	02JA003	Outaouais	17	inversion	1870000000	8210	47,606000	-77,304333	20
2	02JB005	Outaouais	26	inversion	4970000000	13130	47,767667	-78,306333	49
3	02JB006	Outaouais	35	inversion	2320000000	14000	47,933333	-78,573000	35
4	02JB010	Outaouais	7	homogénéisation	90000000	23400	47,588000	-79,324500	22
5	02LB024	Outaouais	30	type naturel	1710000000	143000	45,568667	-74,389000	27
6	02LE008	Mitchinamecus	17	inversion	1061252500	932	47,209667	-75,171333	40
7	02LE018	Kiamika	15,8	inversion	618084000	707	46,620000	-75,125833	10
8	02LG002	Gens de Terre	9	inversion	1560000000	2620	47,302667	-76,466833	58
9	02LG006	Gatineau	25	inversion	2345000000	15600	46,706833	-75,976167	62
10	02LH008	Gatineau	6	inversion	10000000	19400	46,335500	-75,941500	32
11	02LH009	Gatineau	46	homogénéisation	940000000	22500	45,805667	-75,925833	25
12	02LH030	Gatineau	20	homogénéisation	20000000	23600	45,492833	-75,758500	8
13	02NA001	Saint-Maurice	26	inversion	8243000	9480	48,335000	-74,055167	75
14	02NB001	Manouane	15	inversion	2700000000	461	47,755167	-73,889500	66
15	02NB002	Manouane	8,9	inversion	2050000000	2240	47,626000	-74,002000	31
16	02NB003	Manouane	5,7	inversion	4100000000	1500	47,550000	-74,183333	32
17	02NB005	Mondonac	6	inversion	990000000	326	47,451333	-73,926333	22
18	02NC002	Saint-Maurice	45	homogénéisation	4660000000	22600	47,791167	-72,967667	54
19	02NC003	Saint-Maurice	53	homogénéisation	60000000	25700	47,752333	-72,874167	38
20	02NE002	Saint-Maurice	40	type naturel	48000000	32100	47,439833	-72,791833	59
21	02NE009	Cinconsine	6	inversion	510000000	211	47,373500	-73,022833	21
22	02NF005	Matawin	25	inversion	310000000	4070	46,858833	-73,643167	58
23	02NG001	Saint-Maurice	26	type naturel	270000000	42000	46,609500	-72,674333	69
24	02NG005	Saint-Maurice	23,5	type naturel	9000000	44000	46,443000	-72,737333	62
25	02OB016	Ouareau	11,7	type naturel	190000000	1260	46,040500	-73,725167	12
26	02OE006	Magog	8,5	type naturel	74000	2022	45,403333	-71,889833	52
27	02OE007	Saint-François	13,4	type naturel	2287500	3330	45,493000	-71,617333	52
28	02OE017	Saint-François	13,4	type naturel	1072000	2930	45,657167	-71,458333	11
29	02OE025	Saint-François	8,9	homogénéisation	201928700	1710	45,756167	-71,403833	47
30	02OE059	Magog	17,1	type naturel	1078000000	1960	45,337167	-71,989500	11
31	02OE060	Magog	9	type naturel	7663000000	1770	45,258000	-72,140333	16
32	02OF002	Saint-François	18,3	type naturel	200000000	9610	45,857000	-72,451833	64
33	02OF004	Saint-François	6,3	type naturel	3975000	8680	45,558333	-72,003833	37
34	02OF019	Saint-François	22	type naturel	10000000	9620	45,885667	-72,483333	11
35	02PA003	Batiscan	21	type naturel	9000000	4580	46,542500	-72,409500	47
36	02PB002	Sainte-Anne	26,5	type naturel	12000000	1800	46,704167	-72,083333	54
37	02PE001	Sainte-Anne Nord	20,9	type naturel	30000000	1077	47,120833	-70,817667	64

38	02PG003	Fourchue	16,3	type naturel	81430000	261	47,650500	-69,507667	43
39	02QA003	Mitis	21	type naturel	1100000	1800	48,619833	-68,135833	55
40	02QA004	Mitis	11	homogénéisation	97000000	300	48,325027	-67,910444	41
41	02RA001	Bonnard	15,5	inversion	3900000000	5000	50,719667	-71,040333	46
42	02RB001	Manouane	11	inversion	3900000000	5000	50,655000	-70,523333	19
43	02RC002	Peribonca	39	homogénéisation	600000000	26900	48,752500	-71,837333	36
44	02RC003	Peribonca	48	inversion	5600000000	16000	49,900000	-71,252500	31
45	02RC007	Peribonca	34	homogénéisation	1200000000	25600	48,775167	-71,691833	36
46	02RG008	Ouiatchouane	7,5	homogénéisation	183475600	562	48,203667	-72,236667	22
47	02RH001	Saguenay	44	type naturel	6500000000	73000	48,573000	-71,634500	76
48	02RH003	Shipshaw	14	homogénéisation	2000000	2270	48,470833	-71,235667	55
49	02RH004	Shipshaw	16,3	inversion	493500000	1740	48,887500	-71,036667	23
50	02RH005	Shipshaw	21,3	inversion	13900000000	13183	49,324667	-70,973667	24
51	02RH015	Chicoutimi	15,2	type naturel	706552000	3390	48,302500	-71,190000	66
52	02RH019	Saguenay	32	homogénéisation	725000000	73800	48,437500	-71,209333	46
53	02SB002	Betsiamites	25	inversion	13900000000	13400	49,352500	-69,785833	27
56	02SB004	Betsiamites	83	homogénéisation	1617000000	16100	49,172000	-69,223000	25
55	02TB001	Hart Jaune	22,9	homogénéisation	2500000000	4580	51,833333	-67,805000	11
56	02TC001	Manicouagan	24	type naturel	92000000	45800	49,200833	-68,336667	31
57	02TC002	Toulnostouc		inversion	3273000000	7930	50,123333	-67,933333	28
58	02TC003	Manicouagan	91	inversion	4999000000	45600	49,334333	-68,341833	23
59	02TE001	Outardes	55	type naturel	185000000	18900	49,153000	-68,402667	52
60	02TE002	Outardes	122	inversion	24400000000	17200	49,704167	-68,904667	19
61	02TE003	Outardes	80	homogénéisation	141000000	17900	49,555000	-68,719167	17
62	02UB002	Sainte-Marguerite	36	type naturel	230800000	6140	50,206833	-66,656333	41

Les données des débits analysées ont été extraites du CD-ROM Hydat publié par ENVIRONNEMENT CANADA (2002). En ce qui concerne les valeurs extrêmes, seules les valeurs et leurs dates de mesure sont publiées. Quant aux données sur les caractéristiques de chaque barrage, nous les avons consultées sur le site internet du ministère de l'Environnement du Québec (<http://barrages.menv.gouv.qc.ca>, 03/03/2004). Sur ce site, le ministère publie quatre catégories d'informations : l'identification, la catégorie administrative et le type d'utilisation ainsi que les caractéristiques techniques de chaque barrage. Les 62 stations ont été regroupées selon les trois régimes hydrologiques régularisés identifiés au Québec (ASSANI et al., 2005, 2006, 2007).

Le premier régime régularisé d'homogénéisation est caractérisé par une diminution modérée des débits printaniers, une hausse modérée des débits automnaux et hivernaux ainsi que des débits moyens mensuels minimums mais une baisse importante des valeurs du coefficient d'immodération (rapport entre les débits mensuels maximums et minimums). Le trait caractéristique de ce régime est la faible variabilité inter-mensuelle des débits. Ce régime est associé aux grands réservoirs (fig. 2.2).

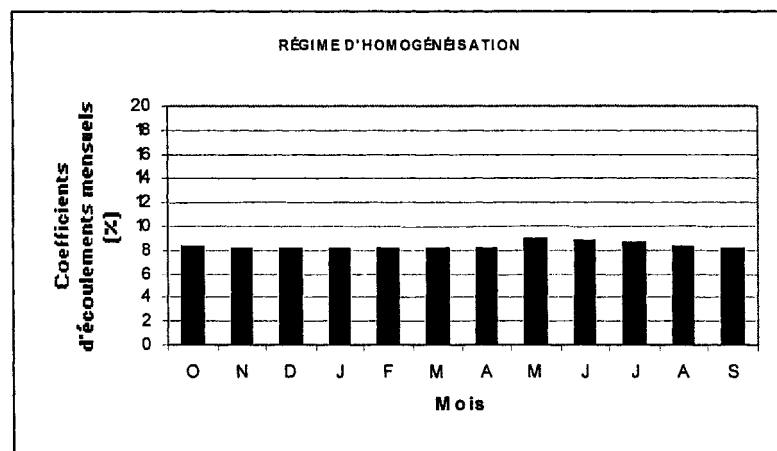


FIGURE 2.2 : Hydrogramme annuel d'une rivière en régime de type homogénéisation

Le régime régularisé de type naturel ne présente aucune différence significative des débits par rapport aux rivières naturelles. Il est associé exclusivement aux barrages et aux centrales hydroélectriques construits sur les rivières avec des réservoirs de faible capacité (fig. 2.3). Toutefois, ce type de régime se distingue du régime strictement naturel par une légère hausse des débits en hiver et une légère baisse des débits au printemps. De plus, les débits minimums surviennent plus fréquemment en été ou en automne.

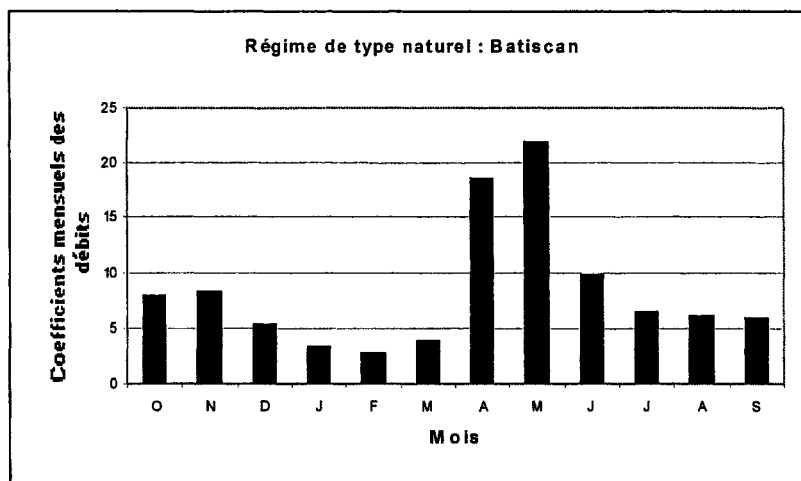


FIGURE 2.3 : Hydrogramme annuel d'une rivière en régime hydrologique de type naturel

Le régime régularisé d'inversion est caractérisé par une baisse très importante des débits au printemps et des valeurs du coefficient d'immodération mais une hausse très importante des débits hivernaux et automnaux ainsi que des débits moyens mensuels minimums. C'est un régime caractérisé par une inversion complète du cycle hydrologique naturel. Il est associé exclusivement aux réservoirs (fig. 2.4).

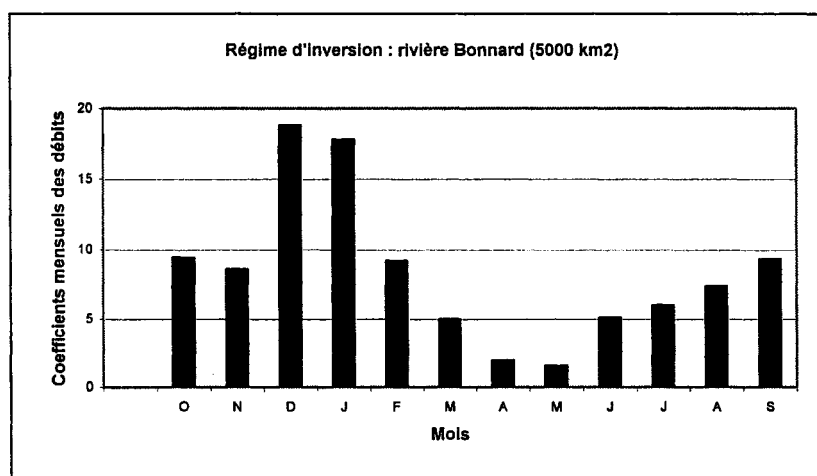


FIGURE 2.4 : Hydrogramme annuel d'une rivière en régime de type inversion

Le choix d'une station reposait sur les quatre critères suivants :

- Disponibilité des données relatives aux caractéristiques des barrages.
- Existence d'une station hydrologique en aval de la retenue.
- Absence d'affluent(s) majeur(s) entre le réservoir et la station susceptibles d'influencer significativement les débits en aval du barrage.
- Existence des données de débits sur une période continue d'au moins de 10 ans.

2.2 Description des caractéristiques des barrages retenus : le choix des variables indépendantes

Huit caractéristiques des barrages ont été définies comme variables indépendantes, chacune d'entre elles étant préalablement transformées en logarithme afin de les normaliser.

- Le type de régime hydrologique artificialisé (R). Il s'agit d'une variable qualitative notée 1 (régime d'inversion), 2 (régime d'homogénéisation) et 3 (régime de type naturel).
- La taille du bassin versant du barrage en km^2 (BV).
- La position géographique en latitude et longitude (Lat, Long).
- La capacité maximale C_a du réservoir en m^3 . Les données de cette variable sont disponibles sur le site web du Ministère du Développement Durable, de l'Environnement et des Parcs du Québec (<http://www.cehq.gouv.qc.ca/barrages>, consulté le 01/05/2006).
- Le rapport CC entre la somme des capacités totales (en m^3) de tous les barrages à vocation hydroélectrique (identifiés par une étoile à la

figure 2.1) en amont de la station et la superficie du bassin versant au droit de la station.

- Le rapport, noté IR, entre la capacité totale d'un barrage et les débits moyens annuels (DMA) naturels. Ce rapport a été utilisé par BATALLA et al. (2003) dans le bassin d'Ebro en Espagne.
- Le rapport IRC, calculé selon la formule proposée par BATALLA et al. (2003), entre la somme des capacités totales de tous les barrages en amont de la station et DMA.

Les valeurs de DMA ont été estimées au moyen de la relation (1) établie par ASSANI ET AL. (2006a) pour les affluents naturels du fleuve Saint-Laurent au Québec.

$$\text{DMA} = 0,0305S^{0,9494} \quad (1)$$

S, étant la taille du bassin versant à une station donnée. Le coefficient de détermination (R^2) de cette régression est de 95%.

2.3 Définition des variables hydrologiques des séries extrêmes : application du concept de régime d'écoulement naturel

La définition des variables hydrologiques a été fondée sur le concept de « régime des débits naturels ». Selon ce concept, l'écoulement peut être décomposé en plusieurs caractéristiques fondamentales. RICHTER et al. (1996) ainsi que POFF et al. (1997) ont défini cinq caractéristiques fondamentales suivantes : la magnitude (volume d'écoulement), la fréquence, la variabilité, la durée et la période d'occurrence de l'écoulement. Selon ces

auteurs, chaque caractéristique joue un rôle primordial dans le fonctionnement des écosystèmes aquatiques (tableau 2.2).

TABLEAU 2.2

Impacts des caractéristiques hydrologiques sur les écosystèmes

Caractéristiques	Implications écologiques
Magnitude	Définit le volume d'habitat disponible pour les espèces aquatiques ou semi-aquatiques. Influence le niveau de productivité des écosystèmes.
Fréquence	Influence la dynamique des populations (reproduction et mortalité)
Variabilité de la fréquence	Variabilité du volume d'habitat disponible: degré de stress (compétition, risque d'être emprisonné dans les milieux humides riverains, etc.)
Date d'occurrence des débits extrêmes	Donne le signal de départ de certains cycles vitaux synchronisés de manière à éviter ou exploiter les crues ou les étiages
Variabilité de la date d'occurrence des débits extrêmes	Augmente le degré de stress ou de mortalité en déplaçant dans le temps le signal de départ de certains cycles vitaux.

Toute modification de l'une des caractéristiques, notamment par les barrages, entraîne des conséquences plus ou moins graves sur la flore et la faune aquatique et riveraines de même que sur leur habitat. Les tableaux 2.3 et 2.4 présentent quelques exemples des changements écologiques résultant des modifications des caractéristiques des débits extrêmes (minimums et maximums) en aval des barrages. Le tableau 2.5 résume pour sa part

quelques types d'implications géomorphologiques de ces caractéristiques hydrologiques influant sur la quantité, la qualité et la variété des habitats disponibles.

Pour définir ces caractéristiques, RICHTER et al. (1996) ont proposé 32 variables hydrologiques connues sous le nom des indices d'altération hydrologique dont l'objectif est de quantifier les impacts induits par les activités anthropiques sur les hydrosystèmes fluviaux. Ces indices sont largement utilisés en écologie aquatique (BLANCH et al., 2000; CLAUSEN et BIGGS, 2000; BIGGS et al., 2005; DYER et THOMS, 2006; FLEMING, 2005; PETIT et al., 2001; POFF et al., 2006;; POFF et WARD, 1989; POFF, 1996; REID et OGDEN, 2006; RICHTER et al., 1997; SHELDON et THARME, 2003; THOMS, 2006).

TABLEAU 2.3

Changements écologiques liés aux débits minimums

Altérations hydrologiques	Réponses écologiques	références
Étiages prolongés	Baisse de la diversité et de la couverture végétale riveraine	STROMBERG et al., 1996
	Stress physiologique menant à des baisses du taux de croissance, des changements morphologiques et une hausse du taux de mortalité.	ROOD et al., 1995 STROMBERG et al., 1992 KONDOLF et CURRY, 1986

TABLEAU 2.4

Changements écologiques liées aux débits maximums

Altérations hydrologiques	Réponses écologiques	références
Diminution de la magnitude des crues saisonnières	Invasion du chenal par des espèces ripariennes exotiques	HORTON ,1977
	Perte du signal d'amorçage de la migration	WILLIAMS, 1996
	Perte du signal de début de reproduction pour les poissons	FAUSH et BESTGEN, 1997
	Baisse du taux de croissance et du recrutement des plantes ripariennes	ROOD et MAHONEY, 1990 FENNER et al., 1985
Inondations prolongées	Perte d'habitat de seuils pour les espèces aquatiques	BOGAN, 1993
	Altération des communautés riveraines	FRIEDMAN et AUBLE, 1999
Baisse de connectivité entre les habitats riverains (diminution de la magnitude des crues)	Diminution de la diversité et intégrité écologique compromise.	WARD et al, 1999 BRUNKE et GONSER, 1997 WARD et STANFORD, 1995
Accélération de la succession des crues	Échec de l'ensemencement des plantes	ROOD et al., 1995

TABLEAU 2.5

Implications écologiques des modifications géomorphologiques
induites par les caractéristiques hydrologiques

Variables hydrologiques	impacts géomorphologiques	Implications écologiques
Débit maximum	Espace disponible pour les formations fluviales et les processus sédimentaires; taille de la plaine inondable.	Quantité et type de substrats différent pour les organismes aquatiques et riverains.
Date d'occurrence des crues	Interactions entre les écoulements érosifs et la végétation stabilisante.	Signaux des habitats pour la reproduction et les comportements de survie.
Débit minimum	Limite le transport des sédiments et l'entretien des chenaux	Limite physique de l'habitat aquatique
Date d'occurrence des étiages	Interactions entre l'écoulement et les espèces envahissant les chenaux actifs.	Accès aux habitats de nidifications et isolation des prédateur durant la nidification
	Interaction entre la végétation et les processus de sédimentation	Signaux des habitats pour la reproduction et les comportements de survie.
Variabilité des débits	Stabilité générale des berges et du chenal	Fréquence des changements au sein des habitats riverains et aquatiques marginaux
Débits journaliers moyens	Taille et forme du chenal normalement actif en étiage et complexité géomorphologique	Disponibilité des habitats et des refuges contre les prédateurs; Disponibilité en eau du sol pour les plantes riveraines; Disponibilité de la nourriture.

Source : adapté de Graf (2006)

La définition des 32 variables de l'indice d'altération hydrologique nécessite l'utilisation de données quotidiennes de débits. Cependant, ASSANI et al. (2005, 2006a, 2006, 2007) ont démontré que chaque série hydrologique peut être décomposée en différentes caractéristiques. Ainsi, à l'échelle journalière, une série annuelle (série constituée des valeurs des débits maximums ou minimums les plus élevées mesurées chaque année) peut être décomposée en sept caractéristiques suivantes : la magnitude, la fréquence, la période d'occurrence, la variabilité de la magnitude, la variabilité de la période d'occurrence, la durée et la forme de courbe de distribution. Bien que son rôle écologique ne soit pas encore défini, cette dernière caractéristique est ajoutée car elle est couramment utilisée dans les études hydrologiques et qu'elle tient compte de la fréquence des débits supérieurs et inférieurs à la série. Elle est entre autre utilisée dans le domaine de la régionalisation des débits, notamment par HOSKING et WALLIS (1993).

Dans le cadre de ce travail, nous n'avons pas tenu compte de la durée car celle-ci est constante pour tous les débits annuels maximums et minimums. En définitive, nous avons utilisé seulement six caractéristiques. Celles-ci ont été définies par une ou deux variables hydrologiques (tableau 2.6).

TABLEAU 2.6

Variables utilisées pour chacune des caractéristiques hydrologiques

Caractéristiques	Variables hydrologiques
Magnitude	Moyenne des débits journaliers maxima et minima (Moy).
Fréquence	Perçentiles 90 et 10 des débits journaliers maxima et minima ¹ (Q90 et Q10)
Variabilité de la fréquence	Coefficient de variation des débits journaliers maxima et minima (CV)
Date d'occurrence des débits extrêmes	Date julienne moyenne d'occurrence des débits extrêmes maxima et minima ² (JJ)
Variabilité de la date d'occurrence des débits extrêmes	Coefficient de variation des dates juliennes d'occurrence des débits extrêmes maxima et minima ² (JJ CV)
Forme de la courbe de distribution	Coefficient d'asymétrie de Pearson des débits journaliers maxima et minima (CA)

¹ Valeurs exprimées en m³/s/BV pour éviter l'effet de taille des bassins versants² JJ = rang du jour dans l'année de 1 (pour le 1^{er} janvier) à 365 (pour le 31 décembre)

2.4 Méthodes d'analyse statistique des données

2.4.1 Identification des facteurs influents

Rappelons d'abord qu'il existe quatre méthodes utilisées pour analyser les impacts des barrages sur les débits.

- La méthode de « station témoin » (fig 2.5a) qui consiste à comparer les données mesurées à la même station avant et après la construction d'un barrage (e.g. MAGILLIGAN et NISLOW, 2005).
- La méthode de « station contrôle » (fig. 2.5b) fondée sur la comparaison des débits mesurés en amont et en aval d'un barrage (e.g. ASSANI et al., 2002) ou sur la comparaison des débits mesurés sur une rivière non influencée par un barrage et en aval d'un barrage (e.g. BENN et ERSKINE, 1994).
- La méthode de « reconstitution » (fig 2.5c) qui consiste à comparer les débits reconstitués en condition naturelle et les débits lâchés en aval d'un barrage. Cette reconstitution des débits peut être effectuée à partir de la production journalière de l'énergie électrique (e.g. ASSANI et al., 1999) ou au moyen d'un modèle hydrologique (e.g. MAHESWARI, 1995; PETERS et PROWSE, 2001).
- La méthode de proportionnalité (fig. 2.5d) qui consiste à comparer les paramètres de deux droites de régression ajustées sur les données

des débits en fonction des superficies des bassins versants en rivières naturelles et en rivières régularisées (e.g. ASSANI et al., 2005, 2006a).

De ces quatre méthodes, seule la dernière permet de déterminer les facteurs qui influencent l'ampleur des changements hydrologiques en aval des barrages. Les trois autres méthodes ne servent qu'à quantifier cette ampleur. De plus, elles consistent à analyser séparément chaque station. Comme nous l'avons déjà mentionné dans le premier chapitre, la méthode de proportionnalité présente certaines faiblesses. Pour les surmonter, nous proposons d'utiliser la méthode de l'analyse des corrélations canoniques afin d'identifier les différents facteurs qui influencent l'ampleur des changements des débits en aval des barrages.

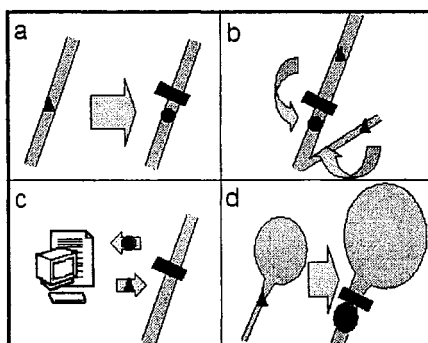


FIGURE 2.5 : Comparaison des méthodes d'estimations des débits (cercle: débits régularisés; triangle : débits naturels estimés ou observés)

L'analyse des corrélations canoniques crée des paires de combinaisons linéaires entre chaque groupe de variables (variables hydrologiques et caractéristiques de barrages) appelées variables canoniques, de manière à ce que la corrélation entre les variables d'une même paire soit maximisée et que la corrélation entre les variables de deux

paires différentes soit nulle. Cette méthode, jamais utilisée dans le cas d'analyse des impacts hydrologiques des barrages au Québec en particulier et dans le monde en général, a fait ses preuves pour l'estimation des débits en rivières naturelles (RIBEIRO-CORRERA et ROUSSELLE 1995; OUARDA et al. 2001). Les analyses ont été effectuées à partir du logiciel SAS version 8 et la description suivante adaptée de VANDERPOORTEN et PALM (1998).

Considérons les p variables hydrologiques x_j ($j = 1, \dots, p$) et les q caractéristiques de barrage y_k ($k=1, \dots, q$) et x_j^0 et y_k^0 leurs variables standardisées respectives. Pour chacun de ces groupes de variables standardisées, les variables canoniques sont calculées de la façon suivante (2):

$$w_i = a_{1i}x_1^0 + a_{2i}x_2^0 + \dots + a_{pi}x_p^0 \text{ et } v_i = b_{1i}y_1^0 + b_{2i}y_2^0 + \dots + b_{qi}y_q^0, \quad (2)$$

La valeur maximum de l correspondant au nombre de variables du groupe le plus petit.

Les coefficients de corrélation canonique a_{jl} et b_{kl} sont calculés selon les deux critères (3) et (4):

$$\text{Corr}(w_{l+1}, v_{l+1}) < \text{Corr}(w_l, v_l) \quad (3)$$

$$\text{Corr}(w_l, w_{l'}) = 0, \text{corr}(v_l, v_{l'}) = 0 \text{ et } \text{corr}(w_l, v_{l'}) = 0 \text{ si } l' \neq l \quad (4)$$

Des coefficients de corrélations linéaires sont ensuite calculés entre les variables de chacun des groupes originaux et leurs variables canoniques correspondantes pour obtenir ce que certains auteurs appellent des coefficients de structure, de même qu'entre les variables originales d'un groupe et les variables canoniques du groupe opposé. L'identification des facteurs influençant les variables hydrologiques se fait en trois étapes :

- 1- Identifier quelles paires de variables canoniques (v_i, w_i) sont significatives au seuil de probabilité de 5%;
- 2- Pour chacune des variables hydrologiques y , identifier lesquelles sont significativement corrélées aux axes canoniques (coefficients de structure significatifs).
- 3- Pour chacune des variables y identifiées à l'étape précédente, jumeler cette variable aux caractéristiques de barrages x de la variable canonique w correspondante.

L'analyse des corrélations canoniques présente deux avantages majeurs par rapport à la méthode de proportionnalité.

- Elle tient compte simultanément de toutes les variables hydrologiques et de tous les facteurs susceptibles de les influencer en mettant en évidence les liens entre les variables hydrologiques entre elles et les facteurs explicatifs entre eux.
- Elle ne compare pas les débits mesurés en aval des barrages à ceux mesurés en rivières naturelles. Ce qui facilite l'analyse de données et permet de réduire la taille des données à analyser.

2.4.2 Estimation des débits en aval des barrages

Pour estimer les débits en aval des barrages, nous avons tenu compte seulement de deux caractéristiques : la magnitude et la fréquence. Ces deux caractéristiques qui intéressent particulièrement les usagers et les exploitants des barrages. Comme ASSANI et al. (2005, 2006) ont démontré qu'elles

étaient fortement influencées par les régimes hydrologiques régularisés (mode de gestion), nous avons voulu vérifier si il était justifié ou non d'estimer les débits en tenant compte de ces régimes. Ainsi, nous avons appliqué en premier lieu l'analyse de covariance avec un seul critère de classification pour déterminer si le régime hydrologique avait une influence significative sur les autres facteurs explicatifs retenus par l'analyse des corrélations canoniques. Enfin, après avoir vérifié l'influence des modes de gestion, nous avons calculé en deuxième lieu une simple droite de régression entre le facteur le plus corrélé et les débits. Ce choix se justifie par le fait que l'équation d'estimation doit être facile à utiliser.

CHAPITRE III

RÉSULTATS

3.1 Identification des facteurs qui influencent les changements hydrologiques en aval des barrages au Québec

3.1.1 Débits annuels maximums

Deux coefficients de corrélation canonique sont significatifs (tableau 3.1). La valeur du premier coefficient de corrélation est près de 0,9000. Ce qui traduit un fort lien entre les variables canoniques de deux groupes.

TABLEAU 3.1

Coefficients de corrélation canoniques (débits maximums annuels)

	Débits maximums annuels		
	Coefficient	F	Pr > F
1	0,886268	3,60	<0,0001
2	0,758790	2,16	0,0002
3	0,559830	1,28	0,1615
4	0,424441	0,88	0,6086
5	0,283570	0,59	0,8466
6	0,207093	0,45	0,8427
7	0,086792	0,20	0,8184

En gras : valeurs significatives à 95%

L'analyse des coefficients de structure calculés sur les variables hydrologiques dépendantes révèle que la période d'occurrence des débits annuels maximums est fortement corrélée à la première variable canonique (V1). La moyenne des débits annuels maximums ainsi que les percentiles 90 et 10 sont corrélés à la seconde variable canonique (V2). Les coefficients d'asymétrie et de variation sont corrélés à la troisième variable canonique (V3) et le coefficient de variation de la date d'occurrence à la cinquième variable canonique (V5) (tableau 3.2). Toutefois, les coefficients de corrélation canonique associés à ces deux dernières variables canoniques ne sont pas significatifs.

Les variables canoniques indépendantes significatives (W1 et W2), sont respectivement fortement inversement corrélées au régime (R) et à la taille du bassin versant (BV). Quant aux variables non-significatives, W3 est corrélée à la capacité cumulée (CC) et aux coordonnées géographiques (Lat, Long) tandis que W5 l'est à l'indice IRC et W6 à la capacité simple (Ca) et à l'indice IR.

Il ressort de ces résultats que seulement deux facteurs influencent la plupart des caractéristiques des débits annuels maximums en aval des barrages au Québec : le mode de gestion des barrages exprimé par la variable « régime hydrologique » et la taille du bassin versant (BV). Ces 2 facteurs sont corrélés seulement à quatre variables hydrologiques : la période d'occurrence des débits annuels maximums ainsi que la moyenne et les percentiles 90 et 10 des débits annuels maximums. Étant donné que seul le régime R est corrélé à plus de 0,5 au sein de son propre groupe, la variable JJ Moy est donc exclusivement influencée par cette dernière. C'est le cas aussi des variables de magnitude et de fréquence (Moy, P90 et P10), celles-ci n'étant influencées que par la taille du bassin versant (BV).

En conclusion, en tenant compte de la valeur des coefficients de corrélation, le régime hydrologique et la superficie des bassins versants apparaissent comme les deux principaux facteurs qui influencent les débits annuels maximums en aval des barrages au Québec. Les facteurs influençant les autres caractéristiques hydrologiques ne peuvent être identifiées car celles-ci sont corrélées à des variables canoniques non significatives.

TABLEAU 3.2

Corrélation entre les caractéristiques des débits maximums annuels et leurs variables canoniques.

y	V1	V2	V3	V4	V5	V6	V7
CV	0,0379	0,3232	0,5660	0,2617	0,4889	-0,0605	0,5124
CA	0,3571	-0,1274	0,8333	0,2771	-0,0818	0,2769	0,0413
JJ Moy	0,8266	0,3122	-0,1888	0,3656	-0,1902	0,1119	0,0354
JJ CV	0,4817	-0,1450	0,1242	-0,5164	0,6395	-0,2330	0,0404
Moy	-0,3420	0,8259	0,2257	-0,2749	-0,0224	0,0307	-0,2701
Q90	-0,3514	0,8436	0,2140	-0,2350	0,1157	0,0703	-0,2135
Q10	-0,1688	0,5433	0,2005	-0,5308	-0,5273	0,2112	-0,1780

En gras : valeurs significatives à 95%

TABLEAU 3.3.

Corrélation entre les caractéristiques des barrages et leurs variables canoniques

x	W1	W2	W3	W4	W5	W6	W7
R	-0,9692	0,0223	-0,1108	0,0606	-0,1512	-0,0362	-0,1408
CC	-0,2439	0,4053	0,5127	0,0735	0,5508	0,2362	0,3138
Ca	-0,0759	0,0322	0,1096	-0,1492	0,4965	0,7225	-0,4360
BV	-0,0425	-0,8257	-0,4555	0,2734	-0,0264	-0,0384	-0,1038
Lat	0,4772	0,2249	-0,5244	0,5595	-0,1288	0,0722	0,2948
Long	0,2471	-0,3960	0,6085	-0,0967	0,3414	-0,2310	-0,4649
IR	-0,0554	-0,1424	0,2633	-0,1098	0,3531	0,7631	-0,2801
IRC	-0,3677	-0,0536	0,1793	-0,0487	0,8199	0,1034	0,3680

En gras : valeurs significatives à 95%

3.1.2 Débits minimums annuels

Deux coefficients de corrélation canoniques sont significatifs dans le cas des débits minimums annuels (tableau 3.4). Par rapport aux débits maximums annuels, la valeur du premier coefficient de corrélation canonique est plus faible tandis que celle du second coefficient est légèrement supérieure. Ceci signifie que le lien entre les deux groupes de variables est plus faible pour les débits minimums que pour les débits maximums.

Les coefficients de structure, consignés dans le tableau 3.5, révèlent une situation bien différente. Ainsi, V1 est corrélé à la moyenne et au percentile 90 (Moy et P90). V2 est quant à elle suffisamment corrélée à toutes les variables hydrologiques sauf deux, JJ CV et P90. Seul le

coefficient de variation de la date d'occurrence n'est pas corrélé à une variable canonique significative.

TABLEAU 3.4

Coefficients de corrélation canoniques (débits minimums annuels)

	Débits minimums annuels		
	Coefficient	F	Pr > F
1	0,775979	2,38	<0,0001
2	0,770408	1,88	0,0021
3	0,557367	1,01	0,4647
4	0,388848	0,60	0,9087
5	0,243549	0,35	0,9763
6	0,165575	0,23	0,9649
7	0,041327	0,04	0,9598

En gras : variables significatives à 95%

TABLEAU 3.5

Corrélation entre les caractéristiques des débits minimums annuels et leurs variables canoniques

y	V1	V2	V3	V4	V5	V6	V7
CV	-0,1706	-0,7451	0,1589	0,3703	0,1338	0,1262	0,4685
CA	0,0399	-0,6011	0,3036	0,3243	0,2639	-0,2004	0,5744
JJ moy	-0,1925	0,7362	-0,2966	0,5658	-0,0080	-0,0476	-0,1023
JJ CV	0,3468	0,1032	0,6425	-0,3468	-0,0688	0,5546	0,1541
Moy	0,6839	0,5990	-0,3283	0,1503	-0,0090	0,0852	-0,1890
Q90	0,7286	0,4309	-0,1868	0,2923	-0,0312	0,0934	-0,3916
Q10	0,4031	0,6321	-0,4823	-0,0770	0,3843	0,2180	0,0650

En gras : variables significatives à 95%

En ce qui concerne les coefficients de structure extraits des facteurs explicatifs (tableau 3.6), les résultats diffèrent une fois de plus de ceux des débits maximums annuels. Deux caractéristiques de barrages sont corrélées pour chacune des deux variables canoniques significatives, soit la capacité et la latitude (Ca et Lat) à W1 et le régime et la taille du bassin versant (R et BV) à W2. Quant aux variables canoniques non-significatives W4 à W7, elles sont respectivement corrélées aux caractéristiques suivantes : IR, Long, IRC et CC. La troisième variable canonique n'est finalement corrélée à aucune caractéristique de barrages.

TABLEAU 3.6

Corrélation entre les caractéristiques des barrages et leurs variables canoniques

x	W1	W2	W3	W4	W5	W6	W7
R	-0,0967	0,7233	0,3987	0,1602	-0,0837	0,0629	-0,0297
CC	-0,3402	-0,1426	0,4282	-0,4104	0,1462	0,3170	0,5854
Ca	-0,5027	0,2635	-0,3501	-0,4957	0,3533	-0,2886	0,2360
BV	0,4909	0,5400	-0,6110	0,1463	-0,0577	0,0336	0,1643
Lat	0,7089	-0,4886	-0,1673	-0,0649	-0,2014	-0,3481	0,0465
Long	-0,1605	0,0998	-0,1897	-0,2437	0,6223	0,4037	-0,2535
IR	-0,4034	0,2673	-0,3518	-0,7626	0,1383	-0,1731	0,0044
IRC	-0,3102	0,0392	-0,0784	-0,2922	0,0580	0,6168	0,5699

En gras : valeurs significatives à 95%

Le tableau 3.7 résume les résultats de l'analyse des corrélations canoniques.

TABLEAU 3.7

Résumé sur la relation entre caractéristiques de barrages et caractéristiques hydrologiques des débits

Variables hydrologiques	Débits maximums annuels	Débits minimums annuels
CV	-	R, BV
CA	-	R, BV
JJ Moy	BV	R, BV
JJ CV	-	-
Moy	BV	Ca, Lat, R, BV
P90	BV	Ca, Lat
P10	BV	R, BV

- : variable non corrélée à aucune caractéristique de barrages.

3.2 Estimation des débits en aval des barrages

Bien que toutes les caractéristiques des débits influencent de manière significative le fonctionnement des écosystèmes fluviaux, les gestionnaires des barrages s'intéressent particulièrement à la magnitude et à la fréquence des débits. Par conséquent, nous nous sommes particulièrement intéressés à estimer ces deux caractéristiques de débits. Par ailleurs, ASSANI et al. (2005, 2006b) ont pu démontrer que la magnitude et la fréquence des débits annuels maximums et minimums étaient fortement influencées par les régimes hydrologiques (modes de gestion) des barrages et la taille des bassins versants.

C'est ainsi que par exemple, la magnitude et la fréquence les débits annuels minimums diminuent significativement en régimes d'inversion et de type naturel alors qu'elles augmentent en régime d'homogénéisation pour quelques stations.

Quant aux débits annuels maximums, la magnitude et la fréquence diminuent significativement en régimes d'inversion et d'homogénéisation alors qu'en régime de type naturel, aucun changement n'a été observé. Il est donc important de déterminer si l'estimation des débits doit tenir compte de cette influence du « régime hydrologique ». En d'autres termes, doit-on estimer les débits selon les régimes hydrologiques des barrages ou pas ?

Pour répondre à cette question, nous avons donc procédé par une analyse de covariance pour déterminer l'influence du régime hydrologique sur le lien entre la superficie des bassins versants et les trois caractéristiques (moyenne, percentiles 90 et 10) des débits en aval des barrages. Les résultats des analyses de covariance (tableaux 3.8 et 3.9) montrent que le régime hydrologique n'a aucun effet sur la relation entre la superficie des bassins versants et les débits. Par conséquent, les trois régimes peuvent être analysés ensemble.

TABLEAU 3.8

Résultats de l'analyse de covariance pour les débits maximums annuels

Facteurs	Débits maximums annuels					
	Moyenne		P90		P10	
	F	p	F	p	F	p
Régimes	0,127	0,881	0,011	0,989	2,014	0,143
Superficie	347,91	0,000	285,32	0,000	219,1 7	0,000
Interaction	0,885	0,418	0,475	0,625	2,73	0,074

F est le test F; p = seuil de signification du test F.

TABLEAU 3.9

Résultats de l'analyse de covariance pour les débits minimums annuels

Facteurs	Débits minimums annuels					
	Moyenne		P90		P10	
	F	p	F	p	F	p
Régimes	1,03	0,364	0,182	0,834	1,34	0,271
Superficie	221,62	0,000	211,67 0	0,000	71,63	0,000
Interaction	1,86	0,166	0,611	0,546	2,01	0,144

F est le test F; p = seuil de signification du test F.

3.2.1 Sélection des facteurs d'estimation des débits maximums et minimums annuels au moyen de l'analyse des corrélations canoniques

L'analyse des corrélations canoniques effectuée précédemment avait révélé l'influence de la superficie des bassins versants sur la moyenne ainsi que les percentiles 90 et 10 des débits annuels maximums et minimums. Pour confirmer ces résultats, nous avons procédé par une nouvelle analyse des corrélations canoniques dans laquelle nous avons conservé seulement les trois variables hydrologiques susmentionnées.

En ce qui concerne les débits annuels maximums, un seul coefficient de corrélation canonique est significatif (tableau 3.10). Mais la valeur du premier coefficient de corrélation canonique est plus faible que celle obtenue

en tenant compte de toutes les variables hydrologiques (Tableau 3.1). Le tableau des coefficients de structure révèle que les trois variables hydrologiques sont corrélées à la première variable canonique V1 (Tableau 3.11). Les valeurs de ces coefficients de structure sont plus élevées que celles obtenues en tenant compte de toutes les autres variables hydrologiques (tableau 3.2). Quant à la variable canonique W1, extraite des facteurs explicatifs, elle est fortement corrélée seulement à la superficie des bassins versants. Il s'ensuit que les trois variables sont fortement influencées par la superficie des bassins versants car, rappelons le, V1 et W1 sont corrélés.

A l'instar des débits annuels maximums, un seul coefficient de corrélation canonique est significatif pour les débits minimums annuels (tableau 3.10). De même, la valeur du premier coefficient de corrélation canonique est plus faible que celle obtenue en tenant compte de toutes les autres variables hydrologiques (tableau 3.1). L'analyse des coefficients de structure (tableau 3.12) révèle aussi que les trois variables sont significativement corrélées à la superficie des bassins versants. Par conséquent, ce facteur apparaît comme le seul facteur susceptible d'être utilisé pour estimer les débits en aval des barrages.

TABLEAU 3.10

Coefficients de corrélation canoniques

	Débits maximums annuels			Débits minimums annuels		
	Coefficient	F	Pr > F	Coefficient	F	Pr > F
1	0,730808	2,34	0,0010	0,745954	2,72	0,0001
2	0,335930	0,65	0,8187	0,421766	0,96	0,4977
3	0,215426	0,43	0,8557	0,215371	0,43	0,8559

En gras : variables significatives à 95%

TABLEAU 3.11

Corrélation entre les variables originelles des débits maximums annuels et leurs variables canoniques

Variables	V1	V2	V3	W1	W2	W3
Moy	0,9781	-0,1683	-0,1226			
P90	0,9983	-0,0585	-0,0062			
P10	0,6327	-0,7619	-0,1382			
R				0,4073	0,1900	-0,3924
CC				0,5646	0,3168	0,4149
Ca				0,1496	0,0575	0,6675
BV				-0,8105	0,2819	-0,1357
Lat				-0,1741	0,2429	0,1029
Long				-0,3152	0,0818	-0,0857
IR				-0,0047	-0,0341	0,5990
IRC				0,1905	0,5160	0,5296

En gras : variables significatives à 95%

TABLEAU 3.12

Corrélation entre les variables originelles des débits minimums annuels et leurs variables canoniques

Variables	V1	V2	V3	W1	W2	W3
Moy	0,9841	-0,1406	0,1088			
P90	0,8845	-0,4280	0,1859			
P10	0,8414	0,4048	0,3581			
R				0,4333	0,0008	-0,1506
CC				-0,5066	0,2433	-0,0600
Ca				-0,1456	0,9232	-0,0779
BV				0,8743	0,1076	0,0620
Lat				0,1038	-0,5037	-0,1404
Long				-0,0139	0,4581	0,6200
IR				-0,0488	0,8780	-0,2098
IRC				-0,1576	0,4072	0,1274

En gras : variables significatives à 95%

3.2.2 Estimation des débits annuels maximums et minimums

La superficie des bassins versants apparaissant la seule variable bien corrélée aux trois variables hydrologiques, nous avons donc calculé une régression simple entre ce facteur et les trois variables hydrologiques (fig. 3.1 et tableau 3.13).

Les coefficients de détermination (R^2) sont relativement élevés. Ce qui démontre une bonne adéquation de la droite de régression ajustée. Toutefois, pour les débits annuels minimums, la valeur de R^2 est inférieure à 70% en raison de l'existence des débits nuls observés au cours de certaines années en aval des barrages. Ainsi, la présence de ces valeurs nulles rend l'estimation moins satisfaisante.

Évaluation des droites

Malgré des valeurs de R^2 relativement élevées (tableau 3.13), tous les points ne sont pas situés dans la zone délimitée par les deux courbes d'intervalle de confiance à 95% (figure 3.1).

En ce qui concerne les débits maximums, il n'y a environ que le tiers des stations qui sont incluses dans cette zone (33% pour P50, 36% pour P90 et 42% pour P10). Ces résultats démontrent que la méthode de régression ne permet pas d'estimer de manière satisfaisante les débits en aval de tous les barrages. Par ailleurs, il n'existe aucune proportionnalité entre les pourcentage des stations incluses dans la zone délimitée par les intervalles de confiance (tableau 3.14) et les valeurs de R^2 . En effet, les valeurs de R^2 les plus faibles (P90 avec 0,79 de R^2) ne correspondent pas au pourcentage d'inclusion le plus bas (33% pour Moy).

Quant aux débits minimums annuels, leur distribution autour des droites de régression est différente de celle des débits maximums annuels. Contrairement à ces derniers, les pourcentages d'inclusion sont proportionnels aux valeurs des R^2 . On observe donc les valeurs suivantes : 53% d'inclusion pour un R^2 de 0,88 pour P90, 50% d'inclusion pour un R^2 de 0,83 pour P50 et 36% d'inclusion pour un R^2 de 0,69 pour P10 (tableaux 3.13 et 3.14).

TABLEAU 3.13

Paramètres des droites de régressions

	Moy max	P90 max	P10 max	Moy min	P90 min	P10 min
A	0,6528	1,0575	0,2636	0,00007	0,0004	0,000009
B	0,7417	0,7353	0,7908	1,3979	1,2669	1,5109
R ²	0,8191	0,7929	0,8329	0,8330	0,8756	0,6935

TABLEAU 3.14

Proportion des valeurs incluse à l'intérieur de l'intervalle de confiance de 95%

Variables	Valeurs incluses	Valeurs exclues
Maxima moyen	33%	66%
Maxima P90	36%	64%
Maxima P10	42%	58%
Minima moyen	50%	50%
Minima P90	53%	47%
Minima P10	36%	64%

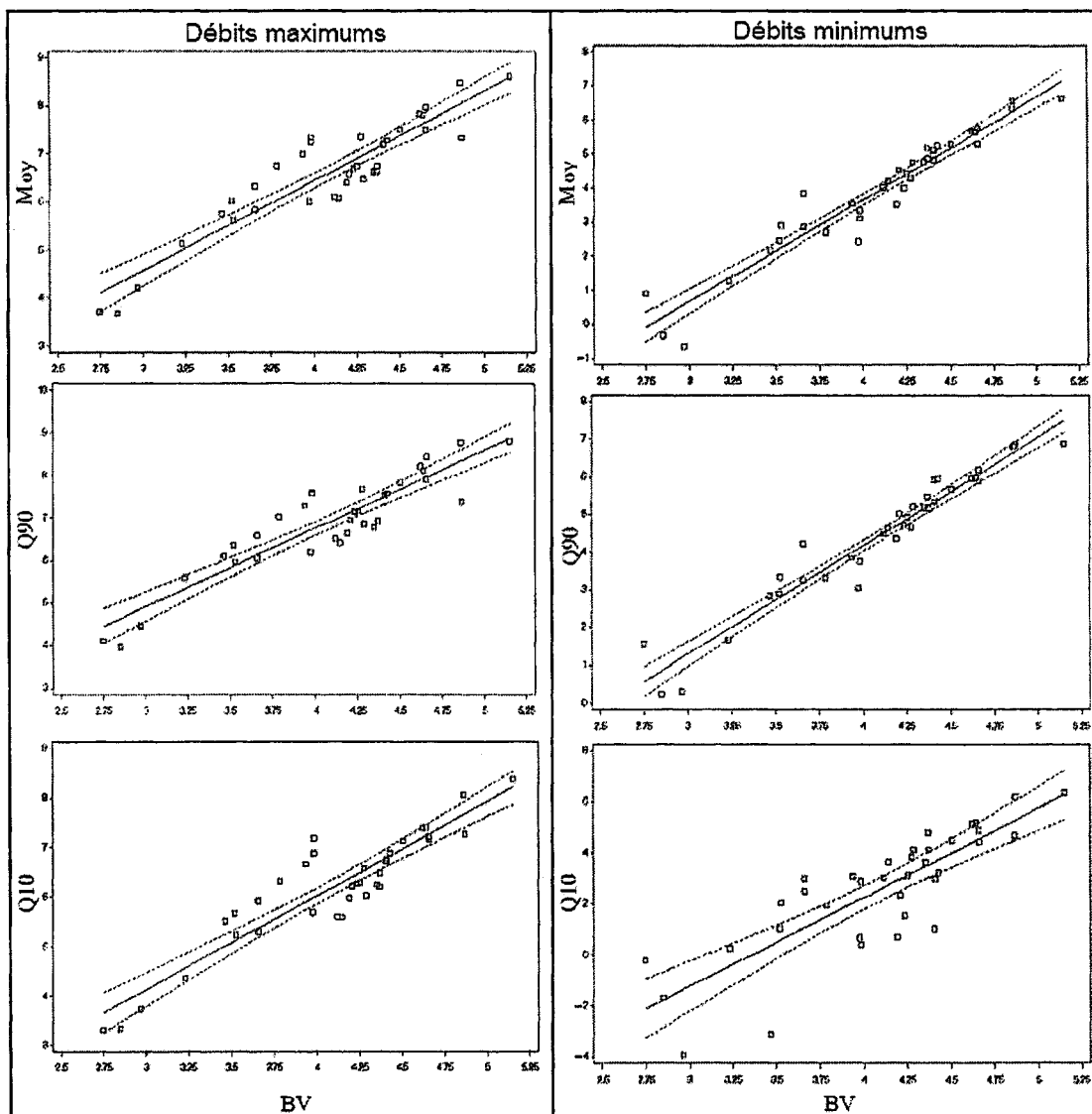


FIGURE 3.1 : Relation entre la taille du bassin versant et les caractéristiques hydrologiques.

CHAPITRE IV

DISCUSSION ET CONCLUSION

Les débits en aval des barrages sont influencés par trois groupes de facteurs suivants : le climat, les caractéristiques des barrages, la physiographie des bassins versants ainsi que l'homme.

Influence du climat sur les caractéristiques des débits en aval des barrages

L'influence du climat sur les débits lâchés en aval des barrages a été déjà mise en évidence en Espagne (BATALLA et al., 2003) et aux États-Unis (MAGILLIGAN et NISLOW, 2005). Au Québec, plusieurs faits peuvent étayer l'influence du climat sur les caractéristiques des débits lâchés en aval des barrages. Son influence se manifeste surtout sur les modes de gestion des barrages. En effet, en raison d'un climat très froid, le principal mode de gestion des barrages consiste à stocker beaucoup d'eau au printemps au moment de la fonte des neiges et à déverser cette eau en hiver pour augmenter le débit disponible pour les centrales hydroélectriques en aval. Ce mode de gestion a comme conséquence hydrologique la diminution significative des débits au printemps et la hausse significative des débits en hiver provoquant ainsi ce qu'on appelle l'inversion du cycle naturel des débits.

L'inversion est un phénomène rarement observé dans le monde. Mais au Québec, elle affecte plus de 30% des barrages en raison de son climat froid. La conséquence de cette inversion est le changement des périodes d'occurrence des débits maximums et minimums annuels. Ainsi, les débits maximums annuels deviennent plus fréquents en hiver (janvier et février) et

les débits minimums annuels, plus fréquents au printemps (avril et mai). C'est ce qui explique le fait que la période d'occurrence de ces deux types de débits soit fortement corrélée au régime hydrologique (mode de gestion) comme l'a révélé l'analyse des corrélations canoniques.

La quantité d'eau lâchée en hiver dépend de la température de la saison. Lors des hivers très froids, la quantité d'eau lâchée en hiver augmente significativement en raison d'une hausse de consommation de l'énergie hydroélectrique. Par conséquent, les débits maximums annuels lâchés en aval des barrages augmentent aussi. Mais lors des hivers doux, la consommation de l'énergie hydroélectrique diminue, la quantité d'eau turbinée diminue aussi. Ainsi, les débits maximums annuels lâchés en aval des barrages diminuent. Au printemps, la quantité d'eau stockée dans les réservoirs dépend des apports pluviométriques naturels. Si les apports pluviométriques naturels sont abondants (saison hivernale très pluvieuse), la quantité d'eau lâchée en aval des barrages augmente parce que les réservoirs se sont remplis et doivent se libérer de cette eau excédentaire pour éviter d'aggraver les inondations en amont. Lors des années sèches, on stocke davantage d'eau dans les réservoirs pour éviter une pénurie éventuelle en hiver. Il en résulte une diminution significative de la quantité d'eau lâchée en aval au printemps. Ainsi, les débits minimums annuels sont très faibles. Durant les années sèches, on ne lâche pas d'eau en aval des réservoirs pendant plusieurs jours voire plusieurs semaines. Ainsi, les débits minimums annuels deviennent nuls en aval de ces barrages. Ce qui affecte la qualité d'estimation de ces débits comme nous l'avons démontré.

Influence des caractéristiques des barrages et de la physiographie des bassins versants

Le deuxième groupe de facteurs qui influencent les caractéristiques des débits en aval des barrages est les caractéristiques des barrages (hauteur, taille du réservoir, nombre des barrages en amont, etc.) ainsi que les caractéristiques physiographiques des bassins versants. Ces caractéristiques dépendent de la taille des bassins versants et des objectifs assignés aux barrages. Dans le cas du Québec, tous les barrages analysés sont destinés à la production de l'énergie hydroélectrique. Toutefois, ils ne remplissent pas tous les mêmes fonctions. Il existe trois types de barrages :

- 1- Les réservoirs qui ont comme rôle exclusif d'accumuler de l'eau au printemps et d'approvisionner les centrales hydroélectriques situées en aval en hiver. Ils ne sont pas dotés de centrales hydroélectriques.
- 2- Les barrages-réservoirs qui ont un double rôle : accumuler de l'eau et produire de l'énergie hydroélectrique. En fait ce sont des réservoirs dotés de centrales hydroélectriques. Ils sont généralement construits sur de grands cours d'eau.
- 3- Les centrales hydroélectriques au fil d'eau. Ce sont des centrales qui n'accumulent pas d'eau. Elles sont alimentées par les réservoirs situés en amont ou par l'écoulement naturel lors de la fonte de neige.

En ce qui concerne les réservoirs induisant les changements hydrologiques les plus importants, la quantité d'eau stockée au printemps dépend de la taille des bassins versants. En effet, pour les petits et moyens bassins versants, la quantité d'eau stockée est très importante à cause d'un faible écoulement naturel en hiver. Par conséquent, les débits minimums

annuels sont généralement plus faibles en aval de ces réservoirs en raison de cet important stockage de l'eau. Pour les grands bassins versants ($> 10\,000\text{ km}^2$), ce stockage est limité car l'écoulement naturel même en hiver reste relativement important pour alimenter les réservoirs. Ainsi, les débits annuels minimums restent relativement élevés au printemps malgré le stockage de l'eau. Quant aux autres types de barrages, on observe peu de changement en aval en ce qui concerne les débits minimums annuels. Par conséquent, les débits maximums annuels augmentent proportionnellement à la taille des bassins versants comme en rivière naturelle. Ce qui explique la corrélation positive observée entre les débits minimums annuels et la superficie des bassins versants.

En revanche, en ce qui concerne les débits maximums annuels, lors des années humides on peut lâcher des débits relativement importants en aval des réservoirs construits sur les petits et moyens bassins versants. Cela n'est pas le cas pour les bassins versants de grande taille dont les lâchers sont moins importants pour éviter d'aggraver les inondations en aval ou assurer la sécurité des populations habitant à même les vallées. Par conséquent, la corrélation canonique entre les débits maximums annuels et la superficie des bassins versants devient négative contrairement aux débits minimums annuels. De plus, comme les débits sont exprimés en débits spécifiques (débits divisés par la taille des bassins versants), ceux-ci augmentent lorsque la taille des bassins versants diminue.

La superficie des bassins versants apparaît ainsi comme le principal facteur qui influence les débits en aval des barrages. Elle suffit donc à estimer ces débits. L'estimation des débits à partir de la seule superficie des bassins versants permet de répondre aux trois exigences que nous nous sommes imposés pour estimer les débits en aval des barrages :

- La relation entre la superficie des bassins versants et les débits est relativement simple à manipuler.
- La superficie des bassins versants est une donnée relativement facile à obtenir.
- Enfin, les équations proposées fournissent des estimations satisfaisantes.

Il est important de mentionner que la superficie des bassins versants est aussi utilisée pour estimer les débits en rivières naturelles au Québec (ANCTIL et al., 1998, 2000; BELZILE et al., 1997).

C'est le cas notamment des débits réservés écologiques pour protéger les habitats du poisson (BELZILE et al., 1997). Selon ces derniers auteurs : « dans toutes les régions échohydrologiques, la connaissance de la superficie du bassin versant en amont du point où l'on veut estimer le débit peut, à elle seule, suffire pour déterminer ce dernier. Les autres variables n'ajoutent que peu d'informations ou de précisions additionnelles à l'estimation ».

Conclusion

Comme l'ont auparavant affirmé plusieurs auteurs, la taille du bassin versant est la variable primordiale pour estimer la plupart des caractéristiques hydrologiques des rivières naturelles (ANCTIL et al., 1998, 2000; BELZILE et al., 1997; OUARDA et al. 2001). Les résultats de mes travaux confirment cette affirmation. Ainsi, cette variable primordiale s'applique aux rivières régularisées en ce qui a trait à la magnitude et à la fréquence des débits extrêmes (tableaux 3.11 et 3.12, figure 3.1).

Selon ces mêmes tableaux, on observe une variable influente de seconde importance, soit la capacité cumulée de tous les réservoirs en amont (CC). Néanmoins, ce rapport CC doit être interprété prudemment. En effet, comme cette variable est calculée à partir de la capacité maximale des réservoirs et non la capacité réelle – cette dernière donnée étant indisponible – il peut s'en suivre une sur-évaluation ou une sous-évaluation de son poids en tant que variable influente. De meilleures connaissances de l'écart entre capacité de stockage réelle et maximale permettraient de mieux estimer son utilité en tant que variable explicative. Cette réflexion s'applique aussi aux autres variables basées sur la capacité, soit les Ca, IR et IRC.

En ce qui concerne l'identification des facteurs qui influencent les caractéristiques des débits, la superficie des bassins versants se distingue encore une fois comme la variable la plus influente (tableau 3.9), en particulier pour les débits maximums annuels dont elle est l'unique facteur identifié par l'analyse des corrélations canoniques. En ce qui concerne les débits minimums annuels, nous avons identifié plusieurs facteurs : la superficie des bassins versants, le type de régime hydrologique artificialisé et la capacité totale ainsi que la latitude (Lat).

BIBLIOGRAPHIE

ANCTIL F., MARTEL N., HOANG V.D. 1998. Analyse régionale des crues journalières de la province de Québec. *Canadian Journal of Civil Engineering*. 25, 360-369.

ANCTIL F., LAROUCHE W., HOANG V.D. 2000. Analyse régionale des étiages 7-jours de la province de Québec. *Water Quality Research Journal of Canada*. 35, 125-146.

ANDREW, E.D., et PIZZI, L.A. 2000. Origin of the Colorado River experimental flood in Grand Canyon. *Hydrological Sciences Journal* 45, 607-627

ASSANI, A.A, BUFFIN-BÉLANGER, T., ROY, A.G. 2002. Analyse des impacts d'un barrage sur le régime hydrologique de la rivière Matawin (Québec, Canada). *Revue des Sciences de l'Eau* 15, 557-574.

ASSANI A.A., GRAVEL E, BUFFIN-BÉLANGER T, ROY AG. 2005. Impacts des barrages sur les caractéristiques des débits annuels minimums en fonction des régimes hydrologiques artificialisés au Québec (Canada). *Revue des Sciences de l'Eau* 18, 103-127.

ASSANI, A.A., LAJOIE, F., LALIBERTÉ C., 2007. Impact des barrages sur les caractéristiques des débits moyens annuels en fonction du mode de gestion et de la taille des bassins versants au Québec. *Revue des Sciences de l'Eau* 20, 127-146.

ASSANI, A.A, PETIT, F., MABILLE, G., 1999. Analyse des débits de la Warche aux barrages de Butgenbach et de Robertville (Ardenne belge). *Bulletin de la Société Géographique de Liège* 36, 17-30.

ASSANI A.A., STICHELBOU E., ROY AG., PETIT F. 2006. Comparison of impacts on the annual maximum flow characteristics in three regulated hydrologic regimes. *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, J., C.M, GOMEZ et G.M., KONDOLF. 2004. Reservoir-induced hydrological changes in the Ebro River basin (NE Spain). *Journal of hydrology* 290, 117-136.

BELZILE, L., BÉRUBÉ, P., HOANG, V.D., LECLERC, M. 1997. *Méthode écohydrologique de détermination des débits réservés pour la protection des habitats du poisson dans les rivières du Québec*. Rapport présenté par l'INRS-Eau et le Groupe-conseil Génivar inc. au ministère de l'Environnement et de la Faune et à Pêches et Océans Canada. 83p + 8 annexes

BENN, P.C, ERSKINE, W.D. 1994. Complex channel response to flow regulation: Cudgegong River below Windamere Dam, Australia. *Applied Geography* 14, 153-168.

BIGGS B.J.F., VLADIMIR I.N., SNELDER T.H. 2005. Linking scales of flow variability to lotic ecosystems structure and function. *River Research. Applications* 21, 283-298.

BJERKLIE, D.M., MOLLER, D., SMITH, L.C. et DINGMAN, S.L. 2005. Estimating discharge in rivers using remotely sensed hydraulic information. *Journal of Hydrology* 309, 191-209.

BLANCH S.J., WALKER K.F., GANF G.G. 2000. Water regimes and littoral plants in four weir pools of the river Murray, Australia. *Regulated Rivers : Research & Management* 16, 445-456.

BOGAN, A.E. 1993. Freshwater bivalve extinctions (Mollusca: Unionida): a search for causes. *American Zoologist* 33, 599-609.

BRANDT S.A., 2000. Classification of geomorphological effects downstream of dams. *Catena* 40, 375-401

BRUNKE, M., GONSER, T. 1997. The ecological significance of exchange between rivers and groundwater. *Freshwater Biology* 37, 1-33.

BUNN, S.E. and ARTHINTON, A.H. (2002). Basic principles and ecological consequences of altered flow regimes for aquatic biodiversity. *Environmental Management* 30, 492-507.

CAVADIAS G.S. 1990. The canonical correlation approach to regional flood estimation. Proceedings Symposium Regionalization in Hydrology. Ljubljana. April 1990, *IAHS*, 171-178.

CAVADIAS, G.S., OUARDA, T.B.M.J., BOBÉE, B. et GIRARD, C. 2001. A canonical correlation approach to the determination of homogenous regions for regional flood estimation of ungauged basins. *Hydrological Sciences Journal* 46, 499-512.

CLAUSSEN, B., BIGGS, B.J.F. 2000. Flow variable for ecological studies in temperature streams: grouping based on covariance. *Journal of Hydrology* 237, 184-197.

DAVIAU J-L., ADAMOWSKI K. & PATRY, G.G. 2000. Regional flood frequency analysis using GIS, L-moment and geostatistical methods. *Hydrological Processes* 14, 2731-53.

DESFORGES P. & TREMBLAY R. 1974. Analyse de la fréquence des crues pour le Québec. Direction générale des eaux, ministère des Richesses naturelles, rapport H.P.-33, 46p.

DYER F.J., THOMS M.C. 2006. Managing river flows for hydraulic diversity: an example of an upland regulated gravel-bed river. *River Research and Applications* 22, 257-267

DYNESIUS M., NILSSON C. 1994. Fragmentation and flow regulation of rivers systems in the northern third of the world. *Science* 266, 753-762.

ERSKINE, W.D, TERRAZZOLO, N., WARNER, R.F. 1999. River rehabilitation from the hydrogeomorphic impacts of large hydro-electric power project: Snowy River, Australia. *Regulated Rivers: Research & Management* 15, 3-24.

ENVIRONMENT CANADA 1992. Sommaire chronologique de l'écoulement. Province du Québec. Inland Waters Directorate, Ottawa, 526 pp.

ENVIRONNEMENT CANADA 1996. HYDAT CDROM : Données sur les eaux de surface et sur les sédiments jusqu'en 1994. CDROM 2245.

FAUNE et PARCS QUÉBEC (FAPAQ). 1999. *Politique de débits réservés écologiques pour la protection du poisson et de ses habitats*. Ministère de l'environnement et de la faune du Québec. Direction de la faune et des habitats, Québec.

FAUSH, K.D. et BESTGEN, K.R. 1997. Ecology of fishes indigenous to the central and southwestern Great Plains. Pages 131-166 dans KNOPF, F.L. et SAMSON, F.B. eds. *Ecology and Conservation of Great Plains vertebrates*. New-York: Springer-Verlag.

FENNER, P., BRADY, W.W. et PATTEN, D.R. 1985. Effect of regulated water flows on regeneration of Fremont cottonwood. *Journal of Range Management* 38, 135-138.

FLEMING S.W. 2005. Comparative analysis of glacial and nival streamflow regimes with implications for lotic habitat quantity and fish species richness. *River Research and Applications* 21, 363-379.

FRIEDMAN, J. M., AUBLE, G. T. 1999. Mortality of riparian box elder from sediment mobilization and extended inundation. *Regulated Rivers: Research and Management* 15, 463-476.

GAILIUSIS, B., KRIAUCIUNIENE, J., RIMAVICIUTE E. 2003. Modelling the effect of the hydroelectric pumped storage plant on hydrodynamic regime of the Kauna Reservoir in Lithuania. *Nordic Hydrology*, 34, 507-518.

GRAF, W.L. 1999. Dam nation : a geographic census of American dams and their large-scale hydrologic impacts. *Water Resources Research* 35, 1305-1311.

GRAF, W.L. 2006. Downstream hydrologic and geomorphic effects of large dams on American rivers. *Geomorphology* 79, 336-360.

GREHYS, 1996. Presentation and review of some methods for regional flood frequency analysis. *Journal of Hydrology* 186, 63-84

HACHÉ, M., OUARDA, T.B.M.J., BRUNEAU, P. et BOBÉE, B. 2002. Estimation régionale par la méthode de l'analyse canonique des corrélations : comparaison des types de variables hydrologiques. *Canadian Journal of Civil Engineering* 29, 899-910.

HARMAN, C., STEWARDSON, M. 2005. Optimizing dam release rules to meet environmental flow targets. *River Research and Applications* 21, 113-129.

HART D.D., JOHSON T.E., BUSHAW-NEWTON K.L., HORWITZ R.J., BEDNAREK A.T., CHARLES D.F., KREEGER D.A., VELINSKY D.J. 2002. Dam Removal : challenges and opportunities for ecological research and river restoration. *Bioscience* 52, 669-681.

HIGGS, G., PETTS, G.E. 1988. Hydrological changes and river regulation in the UK. *Regulated Rivers : Research & Management* 2, 349-368.

HORTON, J.S. 1977. *The development et perpetuation of the permanent tamarisk type in the phreatophyte zone of the Southwest USDA Forest Service*. General Technical Report nr RM-43, 124-127.

HOSKING J.R.M., WALLIS J.R., 1993. Some statistics useful in regional flood frequency analysis. *Water Resources Research* 29, 271-281.

HUSZAR, E., SHAW, W.D., ENGLIN, J. 1999. Recreational damages from reservoir storages level changes. *Water Resources Research* 35, 3489-3494.

INTERNATIONNAL HYDROPOWER ASSOCIATION (IHA). 2004. Sustainability Guidelines, 25pp. Disponible en ligne au www.hydropower.org/sustainable_hydropower/sustainability_guidelines.html

KHALIL, A.F., McKEE, M., KEMBLOWSKI, M. et ASEFA, T. 2005. Basin scale water management and forecasting using artificial neural networks. *Journal of the American Water Resources Association* 41, 195-208.

KONDOLF, G.M., et CURRY, R.R. 1986. Channel erosion along the Carmel River, Monterrey County, California. *Earth Surface Processes and Landforms* 11, 307-319.

KLOBINSKY, C.J., CLARKE, R.T., BRENNER, A.C., FREY, H., 1993. Measurement of river level with satellite altimetry. *Water Resources Research* 29, 1839–1848.

LAJOIE, F., ASSANI, A.A., MATTEAU, M., MESFIOU, M. et ROY, A.G. 2006. Comparaison entre les débits réservés écologiques et les débits lâchés en aval des barrages au Québec : influence du mode de gestion des barrages, de la taille des bassins versants et de la saison. *Water quality Research Journal of Canada* 41, 263-274.

LAJOIE, F., ASSANI, A.A., ROY, A.G. and MESFIOUI, M. 2007. Impact of the dam on the monthly flow characteristics: the influence of watershed size and seasons. *Journal of Hydrology* 334, 423-439.

LECONTE, R., PIETRONIRO, A., PETERS, D., PROUSE T.D. 2001. Effects of flow regulation on hydrologic patterns of large, inland Delta. *Regulated Rivers : Research & Management* 17, 51-65.

LOIZEAU, J-L., DOMINIK, J. 2000. Evolution of upper Rhone River discharge and suspended sediment load during the last 80 years some implications for Lake Geneva. *Aquatic Sciences* 62, 54-67.

MAGILLIGAN, F.J., NISLOW, K.H. 2001. Long-term changes in regional hydrologic regime following impoundment in a humid-climate watershed. *Journal of the America Water Resources Association* 37, 1551-1569.

MAGILLIGAN, F.J., NISLOW, K.H. 2005. Changes in hydrologic regime by dams. *Geomorphology* 71, 61-78.

MAHESHWARI, B.L, WALKER, K.F, McMAHON, T.A. 1995. Effects of regulation on the flow regime of the River Murray, Australia. *Regulated Rivers : Research & Management* 10, 15-38.

MONTALDO N., MANCINI M., ROSSO R. 2004. Flood hydrograph attenuation induced by a reservoir system: analysis with a distributed rainfall-runoff model. *Hydrological Processes* 18, 545-563.

MALMQVIST, B. et ENGLUND, G. 1996. Effets of hydropower-induced flow perturbations on mayfly (Ephemeroptera) richness and abundance in north Swedish river rapids. *Hydrobiologia* 341, 145-158.

MAHESHWARI, B.L, WALKER, K.F, McMAHON, T.A. 1995. Effects of regulation on the flow regime of the River Murray, Australia. *Regulated Rivers : Research & Management* 10, 15-38.

NICOLET (1997). Rapport de la Commission scientifique et technique sur la gestion des barrages. 350p + annexes.

NILSSON, C. et SVEDMARK, M. 2002. Basic Principles and Ecological Consequences of Changing Water Regimes: Riparian Plant Communities. *Environmental Management* 30, 468–480.

NILSSON, P., UVO, C.B., BERNDTSSON, R. 2006. Monthly runoff simulation: Comparing and combining conceptual and neural network models. *Journal of Hydrology* 321, 344-363.

OLIVIERA, J.M., FERREIRA, M.T., PINIHEIRO, A.N. et BOCHECHAS, J.H. 2004. A simple method for assessing minimum flows in regulated rivers : the case of sea lamprey reproduction. *Aquatic Conservation : Marine and Freshwater Ecosystems* 14, 181-189.

OUARDA, T.B.M.J., GIRARD, C., CAVADIAS, G.S., and BOBÉE, B., 2001. Regional flood frequency estimation with canonical correlation analysis. *Journal of Hydrology* 254, 157-173

PATOINE A., BLAIS A-M., FORGET M-H., LAMONTAGNE S., MARTY J., 1999. *Respecter la variabilité naturelle pour une gestion durable des ressources aquatiques*. Mémoire remis au Bureau des audiences publiques sur l'environnement dans le cadre des audiences publiques sur la Gestion de l'eau au Québec, Montréal, 16p + annexes.

PEGGS, M.A., PIERCE, C.L., ROY, A. 2003. Hydrological alteration along the Missouri River basin : a time series approach. *Aquatic Sciences* 65, 63-72

PETERS, D.L, PROWSE, T. 2001. Regulation effects on the lower Peace River, Canada. *Hydrological Process* 15, 3181-3194.

PETTIT N.E., FROEND R.H., DAVIES P.M. 2001. Identifying the natural flow regime and the relationship with riparian vegetation for two contrasting western Australian rivers. *Regulated Rivers : Research and Management* 17, 201-215.

PETTS G., 1979. Complex response of river channel morphology subsequent to reservoir construction. *Progress in Physical Geography* 3, 329-362.

PETTS, G.E. 1984. Impounded Rivers. Perspective for Ecological Management, Wiley, New York. 326 p.

POFF, N.L, ALLAN, J.D., BAIN, M.B., KARR, J.R., PRESTEGAARD, K.L., RICHTER, B.D., SPARKS, R.E, STROMBERG, J.C. 1997. The natural flow regime. A paradigm for river conservation and restoration. *BioScience*. 47, 769-784.

POFF N.L., 1996. A hydrogeography of unregulated streams in the United-States and an examination of scale-dependance in some hydrological descriptors. *Freshwater Biology* 36, 71-91.

POFF N.L., OLDEN J.D., PEPIN D.M., BLEDSOE, B.P. 2006. Placing global stream flow variability in geographic and geomorphologic contexts. *River Research and Application*, 22, 149-166.

POFF N.L., WARD J.V., 1989. Implications of stream variability and predictability for lotic community structure : a regional analysis of streamflow patterns. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences* 46, 1805-1818.

REID M.A., OGDEN R.W. 2006. Trend, variability or extreme event? the importance of long-term perspectives in river ecology. *River Research and Applications* 22, 167-177.

RIBEIRO-CORRÉA, J., CAVADIAS, G.S., CLÉMENT, B. et ROUSSELLE, J. 1995. Identification of hydrological neighborhoods using canonical correlation analysis. *Journal of Hydrology* 173, 71-89.

RITCHER BD, BAUMGARTNER JV, POWELL J, BRAUN DP. 1996. A method for assessing hydrologic alteration within ecosystem. *Conservation Biology* 10, 1163-1174.

RITCHER, B.D., BAUMGARTNER, J.V., BRAUN, D.P. 1997. How much water does a river need ? *Freshwater Biology* 37, 231-249.

RITCHER, B.D, BAUMGARTNER, J.V., BRAUN, D.P., POWELL, J. 1998. A spatial assessment of hydrologic alteration within a river network. *Regulated Rivers: Research & Management* 14, 329-340.

RICHTER B.D., RICHTER H.E. 2000. Prescribing flood regimes to sustain riparian ecosystems along meandering rivers. *Conservation Biology* 14, 1467-1478

ROOD, S.B. et MAHONEY, J.M. 1990. Collapse of riparian poplar forests downstream from dams in western prairies: Probable causes and prospects for mitigation. *Environmental Management* 14, 451-464.

ROOD, S.B., MAHONEY, J.M., REID, D.E. et ZILM, L. 1995. Instream flows and the decline of riparian cottonwoods along the St-Mary's River, Alberta. *Canadian Journal of Botany* 14, 451-464.

SAAD, M., TURGEON, A. 1988. Application of principal component analysis to long-term reservoir management. *Water Resources Research* 24, 907-912.

STROMBERG, J.C., TRESS, J.A., WILKINS, S.D. et CLARK, S. 1992. Response of velvet mesquite to groundwater decline. *Journal of Arid Environments* 23, 45-58.

STROMBERG, J.C., TILLER, R. et RICHTER, B. 1996. Effects of groundwater decline on riparian vegetation of semiarid regions: the San Pedro River, Arizona, USA. *Ecological Applications* 6, 113-131.

STANFORD, J. A, WARD, J.V., LISS, W.J., FRISSEL, C.A., WILLIAMS, R.N., LICHATOWITCH, J.A. et C. C. COUTANT, C.C. 1996. A general protocol for restoration of regulated rivers. *Regulated Rivers: Research and Management* 12, 391-413.

TURGEON, A., CHARBONNEAU, R. 1998. An aggregation-disaggregation approach to long-term reservoir management. *Water Resources Research* 34, 3585-3594.

UNESCO. 2006. World water report 2. Unesco Publishing, 601pp. disponible en ligne au: <http://unesdoc.unesco.org/images/0014/001454/145405E.pdf>

VANDERPOORTEN A. et PALM R., 1998. Canonical variables of aquatic bryophyte combinations for predicting water trophic level. *Hydrobiologia* 386, 85-93.

VIVIAN H. 1994. L'hydrologie artificialisée de l'Isère en amont de Grenoble. Essai de quantification des impacts des aménagements. *Revue de Géographie Alpine* 82, 97-112.

VUGLINSKY, V. 1997. Reservoirs and environment (hydrological aspects and interaction). *IAHS Publ. no 240*, 251-257.

WANG, W., PIETER, H.A.J.M., GELDER, V., VRIJLING et MA, J. 2006. Forecasting daily streamflow using hybrid ANN models. *Journal of Hydrology* 324, 383-399.

WARD, J.V. et STANFORD, J.A. 1995. Ecological connectivity in alluvial river ecosystems and it's disruption by flow regulation. *Regulated Rivers: Research and Management* 11, 105-119.

WARD, J.V., TOCKNER, K. et SCHIEMER, F. 1999. Biodiversity of floodplain river ecosystems: Ecotones and connectivity. *Regulated Rivers: Research and Management* 15, 125-139.

YANG, D., Ye, B., SHIKLOMANOV A. 2004. Discharge characteristics and changes over the Ob River watershed in Siberia. *Journal of Hydrometeorology* 5, 595-610.

YE, B., YANG, D., KANE, D.L. 2003. Changes in Lena River streamflow hydrology : human impacts versus natural variations. *Water Resources Research*, 39, SWC81-SWC814.