

Article

« Impacts des barrages sur les débits annuels minimums en fonction des régimes hydrologiques artificialisés au Québec (Canada) »

A. A. Assani, É. Gravel, T. Buffin-Bélanger et A. G. Roy

Revue des sciences de l'eau / Journal of Water Science, vol. 18, n° 1, 2005, p. 103-127.

Pour citer cet article, utiliser l'information suivante :

URI: <http://id.erudit.org/iderudit/705552ar>

DOI: 10.7202/705552ar

Note : les règles d'écriture des références bibliographiques peuvent varier selon les différents domaines du savoir.

Ce document est protégé par la loi sur le droit d'auteur. L'utilisation des services d'Érudit (y compris la reproduction) est assujettie à sa politique d'utilisation que vous pouvez consulter à l'URI <https://apropos.erudit.org/fr/usagers/politique-dutilisation/>

Érudit est un consortium interuniversitaire sans but lucratif composé de l'Université de Montréal, l'Université Laval et l'Université du Québec à Montréal. Il a pour mission la promotion et la valorisation de la recherche. Érudit offre des services d'édition numérique de documents scientifiques depuis 1998.

Pour communiquer avec les responsables d'Érudit : info@erudit.org

Impacts des barrages sur les débits annuels minimums en fonction des régimes hydrologiques artificialisés au Québec (Canada)

Impacts of dams on the annual minimum discharges according to artificialised hydrologic regimes in Quebec (Canada)

A. A. ASSANI^{1*}, E. GRAVEL¹, T. BUFFIN-BÉLANGER², A. G. ROY³

Reçu le 5 janvier 2004, accepté le 6 juillet 2004**.

SUMMARY

Annual minimum discharges represent a crucial hydrologic parameter for the health of aquatic ecosystems. They determine the volume of available habitat for aquatic species and influence the concentration of pollutant within the fluvial system during low flows. They are also of importance for instream infrastructures and for the regulation of fluvial transport. For these reasons, the minimum discharges constitute the main hydrologic parameters for which clear regulation have been defined in several countries. In the province of Québec, albeit the large amount of dams on several important fluvial systems, there seems to exist a lack of studies examining their effects on the annual minimum discharges. This paper is aiming at highlighting the effects of dams (1) by examining their effect on the characteristics of annual minimum discharges for artificialised flow regimes in Québec, and (2) by comparing those discharges with recommended instream flows to protect fish habitats.

Firstly, the effect of dams on annual minimum discharges is examined for the three types of artificialised flow regimes found in Québec. From the analysis of seasonal and monthly discharges, ASSANI *et al.* (2004) documented the three types of artificialised hydrologic regime downstream from dams: the inversion, the homogenization, and the natural type flow regimes. The inversion flow regime presents high monthly discharge values in winter and low monthly discharge values during spring. This type of regime occurs solely on the north shore of the St-Lawrence River and pertains to rivers with large

-
1. Laboratoire d'hydro-climatologie et de géomorphologie fluviale, section de Géographie, Pavillon Léon-Provencher, Université du Québec à Trois-Rivières, 3351, boulevard des Forges, Trois-Rivières, Québec, G9A 5H7, Canada. Tél. : (819) 376-5011 ; Fax: 376-5179.
 2. Département de Géographie, Université du Québec à Rimouski, 3000, Allée des Ursulines, Rimouski (Québec), G5L 3A1, Québec, Canada.
 3. Département de géographie, Université de Montréal, C.P. 6128, succursale Centre-Ville, Montréal, Québec, H3C 3J7, Canada.

* Correspondance: Ali_Assani@uqtr.ca

** Les commentaires seront reçus jusqu'au 28 février 2006.

reservoirs feeding in hydropower stations. The homogenization flow regime presents small annual fluctuations of the monthly discharge. The maximum monthly discharges are recorded during spring where- as the minimum monthly discharges frequently occur during fall. This type of regime is often associated with reservoirs created on large streams for which the storage of spring water is less important. This regime is observed mainly on the north shore of the St-Lawrence river. In the natural type flow regime, the maximum monthly discharges take place during spring snowmelt while minimum monthly discharges occur either during summer or winter. The annual natural flow characteristics are thus conserved albeit the existence of the dam. This regime pertains to dams with small reservoirs and it is found on both side of the St-Lawrence River.

Secondly, annual minimum discharges are compared with minimum instream flows recommended by BELZILE *et al.* (1997). These ones defined the minimum instream flows based on the different species of fish and their life cycle. Downstream from dams, the instream flows (Q_r) can be estimated using the following relation:

$$Q_r = e^k \cdot S^a$$

where S represents the drainage area upstream from the dam; a and k are respectively regional and seasonal parameters. These parameters are associated to the ecohydrological region, to the season as well as to the critical phases of life cycle for the fish species found within the ecohydrological regions.

From the Historical Stream Flow Summary of Environmental Canada, the distribution of discharge from 107 stations were selected and analysed. From those, 72 were located on rivers with dams and 75 on rivers with no regulation. On regulated rivers, 26, 18 and 28 were identified as belonging to the inversed, homogeneous and natural type regimes, respectively. All stations were located in the St-Lawrence drainage area. To highlight the effect of dams, we performed a comparison between the annual minimum discharges for stations on artificialised rivers to those from stations belonging to rivers with no regulation. The comparison is performed according to the size of the drainage basins (proportionality method) and uses a set of parametric and non-parametric statistical tests depending on the type of data. The proportionality method was chosen because of the non-availability of the discharges for the pre-dam periods. According to RICHTER *et al.* (1996), river flows can be described using several parameters relating to the daily discharges: the magnitude, the frequency, the duration, the timing and the rate of change (amplitude of the variability). The daily discharges required to compute these parameters were not available. The date of occurrence of annual minimum discharges, their magnitude, the interannual variability of the magnitude and the skewness of the distribution could however be obtained from the Historical Stream Flow Summary of Environmental Canada.

The analysis of annual minimum discharges for the three types of artificialised flow regimes highlights several key elements associated with the effect of dams. For the inversion flow regime, the presence of dams increases and decreases significantly the occurrence of annual minimum discharges during spring and summer, respectively. For drainage area smaller than 10 000 km², the magnitude of the annual minimum discharge is decreased significantly. Finally, the between-year variability is increased and the distribution presents a strong skewness. For the natural type flow regime, an increase in annual minimum discharges during the period between November and January can be observed as well as a significant decrease in magnitude for the small fluvial systems (drainage area < 6 000 km²). For the homogenization flow regime, the frequency of annual minimum discharge is increased during spring and fall while decreased during summer time. However, in contrast with the two previous artificialised flow regimes, there is an increase in magnitude for the minimum annual discharges.

Finally, for the three types of artificialised flow regime and for the four seasons, the minimum annual discharges released downstream from the dams appear to be systematically smaller than the instream flows recommended by BELZILE *et al.* (1997). The main differences are observed during spring and summer for drainage basins > 10 000 km².

Keywords: *annual minimum discharges, instream discharges, magnitude, timing, interannual variability, skewness, inversion, homogenization, natural type, dams, Saint-Laurent, Quebec.*

RÉSUMÉ

Les débits annuels minimums des rivières déterminent le volume d'habitat minimum disponible pour assurer la survie des espèces aquatiques en période d'étiage. Dans cette étude, nous comparons les impacts de barrages sur les caractéristiques (période d'occurrence, magnitude, amplitude de variation et asymétrie) de ces débits dans trois régimes hydrologiques artificialisés d'une part, et les débits annuels minimums mesurés en aval des barrages aux normes de débits réservés pour protéger les habitats du poisson au Québec, d'autre part. Nous avons analysé 72 stations appartenant aux régimes artificialisés d'Inversion (26 stations), d'Homogénéisation (18 stations) et de Type Naturel (28 stations). Toutes ces stations appartiennent au bassin versant du fleuve Saint-Laurent. La présente analyse est fondée sur la comparaison des débits mesurés en rivières naturelles (75 stations) à ceux mesurés en aval des barrages au moyen des méthodes de proportionnalité et graphique. Il ressort de ces comparaisons les principaux résultats suivants.

– En régime artificialisé d'Inversion caractérisé par les débits mensuels maximums en hiver et les débits mensuels minimums au printemps, les impacts des barrages se traduisent par une hausse significative de fréquence des débits annuels minimums au printemps au moment de la fonte des neiges mais une baisse en été, une diminution significative de la magnitude des débits pour les bassins versants de taille < 10 000 km², une hausse de la variabilité inter-annuelle et une forte asymétrie de la distribution.

– En régime artificialisé de Type Naturel caractérisé par des débits mensuels maximums au printemps et des débits mensuels minimums en hiver ou en été, on observe une hausse de la fréquence des débits annuels minimums pendant la première moitié de la période froide (de novembre à janvier), une diminution significative de la magnitude pour certaines rivières de taille < 6 000 km².

– En régime d'Homogénéisation caractérisé par des débits mensuels quasi constants toute l'année, les barrages provoquent une hausse de la fréquence des débits annuels minimums (printemps et automne) mais une baisse en été. Mais contrairement aux deux régimes précédents, l'impact des barrages se manifeste surtout par une hausse de la magnitude des débits annuels minimums pour quelques rivières.

Pour les trois régimes artificialisés et durant les quatre saisons, les débits réservés sont systématiquement supérieurs aux débits annuels minimums lâchés en aval des barrages. L'écart entre les deux types de débits est surtout observé au printemps et en été pour les bassins versants > 10 000 km².

Mots clés: *débits annuels minimums, débits réservés, magnitude, période d'occurrence, variabilité inter-annuelle, asymétrie, inversion, homogénéisation, type naturel, barrages, Saint-Laurent, Québec.*

1 - INTRODUCTION

Parmi les débits caractéristiques des régimes hydrologiques de cours d'eau, les débits minimums jouent un rôle particulièrement crucial sur le cycle de vie des organismes aquatiques et semi-aquatiques, en général, et des poissons, en particulier (FRENETTE *et al.*, 1984; GIBSON et MYERS, 1988; POFF et WARD, 1989; PETTS 1995; POWER *et al.*, 1996; STANFORD *et al.*, 1996; CUNJAK, 1996; RICHTER *et al.*, 1996; CUNJAK *et al.*, 1998; CAZAUBON et GIUDICELLI, 1999; WARD *et al.*, 2001; OLDEN et POFF, 2003). Ces débits déterminent le volume d'habitat minimum disponible nécessaire pour la survie des nombreuses communautés aquatiques en période des basses eaux. CUNJAK *et al.* (1998), entre autres, ont ainsi rapporté que, dans le cas du ruisseau Catamaran au Nouveau-Brunswick, l'abondance des saumons juvéniles en été était grande après les étiages hivernaux caractérisés par des débits minimums relativement abondants qui favorisent un taux de survie élevé d'œufs. D'autre part, la qualité de l'eau dépend des débits minimums en raison de leur influence sur la dilution des polluants en période d'étiage (ANCTIL *et al.*, 2000). Ces différents rôles ont justifié depuis fort longtemps le maintien des débits minimums naturels dans les écosystèmes fluviaux anthropisés pour atténuer les impacts (PETTS, 1995; POFF *et al.*, 1997). Au Canada et dans d'autres pays développés, de nombreux travaux sont ainsi consacrés à la détermination des débits réservés – définis comme le débit minimum qui doit être assuré à la rivière tout au long de l'année (COSANDEY et ROBINSON, 2000) – pour protéger et restaurer les différentes communautés aquatiques (CAISSIÉ et EL-JABI, 1995; LECLERC *et al.*, 1995; BELZILE *et al.*, 1997; ROOD *et al.*, 2003). D'autre part, le changement de la période d'occurrence des débits minimums peut perturber plus ou moins profondément les écosystèmes aquatiques. ROOD *et al.* (1995) ont attribué le déclin des peupliers ripariens en aval du barrage construit sur la rivière St-Mary en Alberta au changement de la période d'occurrence des débits minimums. De même REILY et JOHNSON (1982) avaient déjà invoqué le même facteur pour expliquer le ralentissement de la croissance radiale de certaines espèces d'arbres en aval du barrage Garrison construit sur la rivière Missouri.

Si la détermination des débits réservés reste toujours la principale préoccupation, peu de travaux existent encore sur les impacts des barrages sur les débits minimums. Ces travaux, qui devraient contribuer à l'élaboration des normes des débits réservés, concernent souvent une seule rivière (VIVIAN, 1994; MAHESHWARI *et al.*, 1995) et n'analysent qu'une seule des caractéristiques de débits minimums, à savoir la magnitude. Pourtant, comme l'avaient déjà fait remarquer FRIEDMAND *et al.* (1998), les conclusions tirées d'études d'impacts des barrages sur un seul cours d'eau sont parfois contradictoires. Ces auteurs préconisèrent ainsi d'entreprendre des études d'impacts impliquant de nombreux bassins versants de différentes tailles à l'échelle régionale. D'autre part, RICHTER *et al.* (1996) considèrent que la caractérisation des débits par une seule variable, en l'occurrence la magnitude, est une démarche insuffisante et incomplète. Ils suggèrent de tenir compte de toutes les caractéristiques de débits. Au Québec, à notre connaissance, il n'existe pas encore d'études consacrées spécifiquement aux impacts des barrages sur les débits minimums, et ce malgré l'élaboration des normes des débits réservés écologiques (BELZILE *et al.*, 1997), définis comme « débits minimums requis pour

maintenir, à un niveau jugé acceptable, les habitats du poisson» (FAUNE ET PARCS QUÉBEC, 1999). Toutefois, dans une étude portant sur les impacts du réservoir Taureau sur le régime hydrologique de la rivière Matawin, nous avons montré que ces impacts se traduisaient par une diminution significative et un changement des périodes d'occurrence des débits minimums (ASSANI *et al.*, 2002). Il était donc important de vérifier si les conclusions de cette étude pouvaient être généralisées à l'ensemble des barrages construits au Québec dans la perspective de l'élaboration des mesures de restauration des tronçons régularisés.

À la lumière de la remarque de FRIEDMAN *et al.* (1998), cette vérification s'imposait dans la mesure où le Québec est l'une des régions au monde disposant d'un grand nombre de barrages. Selon ASTRADE (1998), on y dénombre près de 10 000 barrages et digues sur ses rivières et ses lacs. La plupart de ces barrages servent surtout à la production de l'énergie hydroélectrique à telle enseigne que le Québec en est devenu le troisième producteur mondial. Cet article vise à analyser les impacts des barrages sur les débits annuels minimums des affluents du fleuve Saint-Laurent au Québec. Dans cette étude, nous aborderons les deux points suivants :

1. Analyse des impacts des barrages sur les caractéristiques des débits annuels minimums. Elle sera entreprise en fonction des régimes hydrologiques artificialisés décrits en aval des barrages au Québec (ASSANI *et al.*, 2004), c'est-à-dire des régimes hydrologiques influencés directement par les barrages. L'hypothèse que nous voulons vérifier est la suivante : les impacts de barrages sur les caractéristiques des débits minimums dépendent du régime hydrologique artificialisé (mode de gestion).

2. Comparaison des débits annuels minimums mesurés en aval des barrages aux normes des débits réservés écologiques pour la protection des habitats du poisson. Ces normes ont été élaborées par BELZILE *et al.* (1997) et leur application a été recommandée par l'organisme FAUNE ET PARCS QUÉBEC (1999). À notre connaissance, depuis leur élaboration, elles n'ont jamais été vérifiées en aval des barrages. On ignore encore si ces normes y sont respectées afin de mieux protéger les habitats du poisson.

2 – DONNÉES ET MÉTHODES D'ANALYSE

2.1 Source des données et choix des stations d'étude

Dans le cadre de cette étude, nous nous limiterons seulement au bassin versant du fleuve Saint-Laurent (673 000 km²) puisque nous n'avons pu obtenir les données de débits des rivières régularisées des deux autres grands bassins versants du Québec (Baies d'Hudson et d'Ungava). Quoi qu'il en soit, presque tous les barrages hydroélectriques sont construits dans le premier bassin versant (figure 1). Du point de vue lithologique, ce bassin est constitué de trois grandes formations géologiques : le Bouclier Canadien (roches intrusives et métamorphiques) en rive nord, les Appalaches (roches sédimentaires plissées) en rive sud et les Basses Terres de Saint-Laurent (schistes et carbonates). Ces

dernières, de faibles étendues, longent les deux rives du fleuve dont elles tirent leur nom. Les données des débits analysées sont publiées dans le Sommaire chronologique de l'écoulement au Québec édité par ENVIRONNEMENT CANADA (1992). En ce qui concerne les débits minimums, seules les valeurs des débits minimums annuels et leurs dates de mesure sont publiées. Pour certaines rivières dont les mesures des débits étaient inférieures à 10 ans, nous avons étendu les séries hydrologiques par des données puisées dans les annuaires hydrologiques publiés annuellement par le ministère de l'Environnement du Québec entre 1991 et 1993 (MINISTÈRE DE L'ENVIRONNEMENT DU QUÉBEC, 1994). Dans le cas d'une station influencée directement par un barrage, on indique le nom de ce dernier. Cette indication nous a permis de rechercher les caractéristiques de chaque barrage sur le site internet du ministère de l'Environnement du Québec (<http://barrages.menv.gouv.qc.ca>, 03-03-2003). 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.

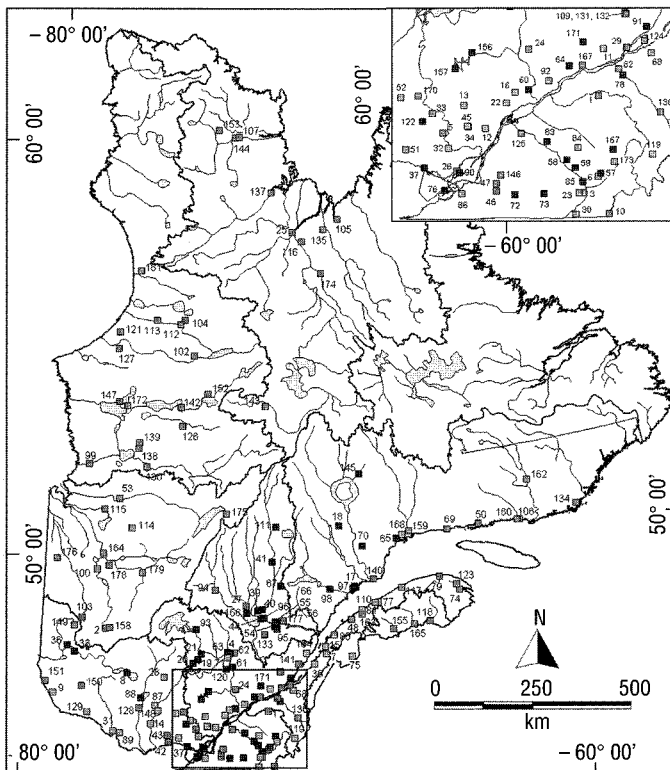


Figure 1 Localisation des stations hydrologiques naturelles (rectangle gris) et influencées par les barrages (rectangle noir) au Québec. Les numéros de stations renvoient à notre base de données.

Location of stations in natural rivers (grey rectangle) and regulated rivers (black rectangle).

En ce qui concerne les régimes hydrologiques artificialisés, c'est-à-dire les régimes hydrologiques influencés directement par les barrages, l'analyse en composantes principales des débits mensuels et saisonniers a mis en évidence trois types de régimes (ASSANI *et al.*, 2004). Retenons que ces derniers correspondent chacun à un mode de gestion spécifique des barrages.

- Le régime d'inversion est caractérisé par des débits mensuels maximums en hiver (décembre à mars) et des débits mensuels minimums au printemps (d'avril à juin) au moment de la fonte des neiges. Le cycle hydrologique naturel est donc complètement inversé. Ce type de régime ne s'observe exclusivement qu'en rive nord du fleuve Saint-Laurent en raison du faible écoulement hivernal et d'une forte production de l'énergie électrique en hiver (figure 2).

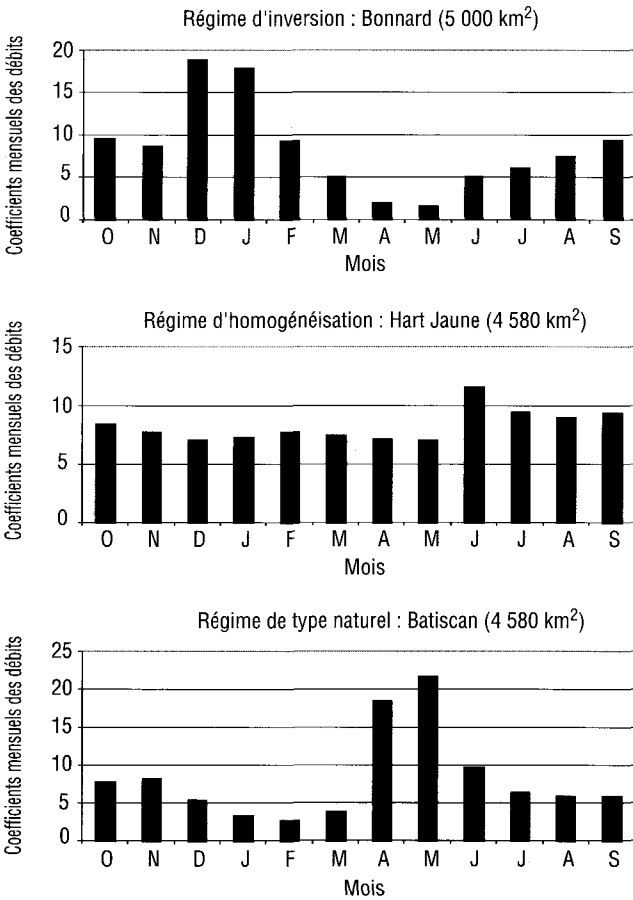


Figure 2 Les trois régimes hydrologiques artificialisés observés au Québec.
The three regulated hydrologic regimes observed in Québec.

– Le régime d’homogénéisation est caractérisé par une faible variation des débits durant toute l’année. C’est un régime moins contrasté que le régime précédent (figure 2). En fait le rapport entre les débits maximums et les débits minimums est proche de 1 alors qu’en condition naturelle, il est toujours supérieur à 5. De plus, contrairement au régime précédent, les débits mensuels minimums saisonniers ne se produisent jamais au printemps au moment de la fonte des neiges. Mais en revanche, les débits mensuels maximums peuvent être observés en hiver. Ce régime hydrologique artificialisé est très fréquent en rive nord.

– Le régime de type naturel est caractérisé par l’absence de changement des périodes d’occurrence des débits mensuels maximums et/ou minimums. Il est comparable aux régimes des rivières naturelles. Les débits mensuels maximums surviennent au printemps au moment de la fonte de neiges et les débits minimums, en hiver et/ou en été (figure 2). Contrairement aux deux régimes précédents, il est bien représenté sur les deux rives du fleuve Saint-Laurent.

Enfin, soulignons qu’en condition naturelle, les débits minimums ou d’étiages au Québec sont enregistrés en deux périodes : en hiver en raison du stockage des précipitations sous forme de neiges et en été en raison de la diminution des lames d’eau précipitées (ANCTIL *et al.*, 2000). Dans le cadre de cette étude, nous avons analysé les stations dont les mesures de débits s’étendaient sur au moins 15 ans : 26 stations en régime d’inversion, 18 stations en régime d’homogénéisation, 28 stations en régime du type naturel et 75 stations de rivières non influencées par les barrages.

2.2 Méthodes d’analyse des données

2.2.1 Caractérisation des débits annuels minimums

Du point de vue écologique, RICHTER *et al.* (1996) ont montré que les débits d’une rivière peuvent être décrits par les cinq caractéristiques suivantes : la magnitude, la période d’occurrence, la durée, l’amplitude de la variation et la fréquence. Ces cinq caractéristiques sont quantitativement décrites par 32 variables hydrologiques connues sous le nom des Indicateurs d’Altération Hydrologique (IAH). Elles permettent de détecter et de quantifier les impacts d’origine anthropique notamment les barrages sur les régimes hydrologiques naturels. Ces auteurs ont souligné l’importance de ces caractéristiques en écologie pour la gestion des cours d’eau. Ainsi, elles sont de plus en plus utilisées dans la communauté scientifique pour décrire les régimes hydrologiques et quantifier les impacts anthropiques (CLAUSSEN et BIGGS, 2000 ; OLDEN et POFF, 2003 ; RICHTER *et al.*, 1997 ; RICHTER *et al.*, 1998). Cependant, ces 32 variables ne s’appliquent que lorsqu’on dispose des relevés journaliers des débits. Dans notre cas, nous ne possédons que les débits annuels minimums soit une seule valeur des débits journaliers minimums par année du fait que les données journalières des débits mesurés au niveau des barrages ne sont pas divulguées au public par les compagnies d’hydroélectricité pour des raisons de concurrence industrielle. En fait, ces données révéleraient la production journalière de l’énergie hydroélectrique au niveau de chaque barrage. Pour cette raison, nous ne pouvons donc tenir compte de toutes les cinq caractéristiques pour analyser les impacts de barrages sur les débits minimums. Néanmoins, on peut définir trois de ces cinq caractéristiques sur une série annuelle des débits : la magni-

tude, la période d'occurrence et la variabilité inter-annuelle. De plus, nous avons ajouté une quatrième caractéristique qui n'a pas été proposée par RICHTER *et al.* (1996), à savoir la forme (l'asymétrie) de la courbe de distribution des débits annuels minimums. Cette caractéristique tient aussi compte indirectement de la fréquence des débits supérieurs et inférieurs à la moyenne de la série.

En ce qui concerne la magnitude, elle a été définie par la moyenne arithmétique des débits annuels minimums. Quant à la période d'occurrence, nous avons d'abord déterminé les fréquences d'occurrence mensuelles (nombre de fois qu'un débit annuel minimum a été enregistré au cours d'un mois) des débits annuels minimums. Ensuite, nous avons calculé la moyenne de ces fréquences pour chaque type de régime hydrologique. La variabilité de la magnitude et de la période d'occurrence a été calculée au moyen du coefficient de variation. En ce qui concerne la dernière caractéristique, nous avons utilisé les jours juliens pour ce calcul. Enfin, la forme de la courbe de distribution des débits annuels minimums a été définie au moyen du coefficient d'asymétrie de Pearson.

2.2.2 Méthodes d'étude pour analyser les impacts de barrages

Dans la littérature, trois méthodes sont couramment utilisées pour analyser les impacts de barrages.

- 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 débits mesurés en amont et en aval d'un barrage (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 (BENN et ERSKINE, 1994).

- La méthode de simulation hydrologique qui consiste à comparer les débits naturels reconstitués au moyen d'un modèle hydrologique aux débits effectivement mesurés à une station influencée par un barrage (PETERS et PROWSE, 2001).

Dans le cadre de cette étude, nous ne pouvions appliquer aucune de ces trois méthodes pour les raisons suivantes :

- Nous ne disposons pas de données de débits ni avant la construction des barrages ni en amont des barrages.

- Il est impossible de simuler les débits naturels au moyen d'un modèle hydrologique unique pour toutes les stations analysées (72 stations). De plus, l'élaboration d'un modèle hydrologique est un processus long et fastidieux et ne peut se justifier dans le cadre de ce travail. C'est une méthode généralement utilisée lorsqu'on travaille sur une seule station ou sur plusieurs stations d'une même rivière.

Nous avons ainsi utilisé une nouvelle méthode d'analyse d'impacts de barrages qui consiste à comparer les débits en rivières naturelles et les débits en rivières influencées par les barrages en fonction de la taille des bassins versants (méthode de proportionnalité). Cette approche se justifie du fait qu'en rivières naturelles, il existe une forte proportionnalité entre les débits et les

superficies de bassins versants au Québec (BELZILE *et al.*, 1997) malgré l'influence des autres facteurs physiographiques. Cette comparaison a été effectuée au moyen de plusieurs tests statistiques (analyse de variance, test de Khi-carré, test t de Student, etc.) en fonction de la nature des données, et ce en considérant les distributions des débits normales ou approximativement normales. Toutefois, en ce qui concerne le calcul des intervalles de confiance pour les petits échantillons ($n < 20$), nous avons appliqué la méthode de «jackknife» (DAGNELIE, 1992). La linéarité des droites de régression a été testée par l'analyse de variance.

Lorsqu'il n'était pas possible d'appliquer les tests statistiques, nous nous sommes contentés de comparer les données par une approche graphique. Cette approche consiste tout simplement à comparer une variable hydrologique mesurée en rivières naturelles et en rivières influencées par les barrages sur un graphique représentant en ordonnée la variable étudiée et en abscisse la taille des bassins versants.

2.3 Estimation des débits réservés écologiques en aval des barrages

L'un des deux objectifs de cette étude est de comparer les débits réservés écologiques et les débits observés en aval des barrages. Les méthodes d'élaboration des débits réservés écologiques sont exposées en détail dans BELZILE *et al.* (1997). Nous n'y reviendrons pas dans le cadre de cette étude. Ce sont des méthodes hydrologiques adaptées au Québec pour répondre aux besoins spécifiques de différentes régions hydroécologiques afin de mieux protéger les habitats de poisson en général et des espèces de poisson cibles en particulier durant les différentes périodes (mois et saisons) de l'année. Les espèces cibles sont des espèces qui requièrent plus d'attention en raison de leur rareté, leur statut d'espèces menacées, leur intérêt sportif ou économique, ou encore leur sensibilité particulière aux modifications des conditions naturelles d'écoulement à des moments bien précis de leur cycle vital. Le nombre de ces espèces cibles varie d'une région hydrologique à une autre. Pour plus de détails sur ces espèces, lire BELZILE *et al.* (1997). Ces auteurs ont ainsi proposé 6 indices des débits réservés écologiques qui tiennent compte des régions hydrologiques et des phases critiques du cycle vital des espèces cibles durant l'année. Ces indices sont résumés au tableau 1.

Pour estimer les débits réservés écologiques en aval des barrages, nous avons procédé selon les étapes suivantes :

- Détermination de la région échohydrologique d'appartenance de la station influencée directement par un barrage au moyen des coordonnées géographiques de celle-ci.

- Prise en compte du mois ou de la saison pour lequel on veut estimer le débit réservé écologique.

Ces deux éléments nous ont permis de choisir l'indice et les coefficients de l'équation pour estimer les débits réservés écologiques à une station influencée directement par un barrage. Cette équation est de forme :

$$Q_r = e^k \cdot S^a \quad (1)$$

Où e est le logarithme népérien, Q_r le débit réservé (en m^3/s) à estimer à une station donnée dont la superficie du bassin versant est S exprimée en km^2 . k et

a sont des exposants régionalisés et saisonnalisés. Leurs valeurs dépendent de la région écohydrologique et de la saison ainsi que des phases critiques du cycle vital des espèces de poissons cibles dans les différentes régions écohydrologiques. Les valeurs de ces coefficients sont fournies par BELZILE *et al.* (1997) en fonction de ces différents facteurs.

L'estimation des débits réservés écologiques à partir de la seule superficie des bassins versants peut paraître simpliste. Mais BELZILE *et al.* (1997) justifie cette approche par le fait que « dans toutes les régions écohydrologiques, 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 ».

Tableau 1 Les 6 indices pour estimer les débits réservés écologiques au Québec (BELZILE *et al.*, 1997).

Table 1 *The six indexes to estimate instream discharges in Quebec (BELZILE et al., 1997).*

Indice	Signification	Période d'application	Régions Hydrologiques d'application
0,5 QMA	Moitié du débit moyen annuel	Toutes les saisons	Toutes les régions
0,3 QMA	30 % du débit moyen annuel	Saison automnale	H-3
0,25 QMA	25 % du débit moyen annuel	Saison hivernale*	Toutes les régions
0,5 QMP	Moitié du débit de la période (saison)	Saison printanière*	Toutes les régions
Q ₅₀ Août	Débit médian du mois d'août	Saison estivale *	Toutes les régions
Q ₅₀ Sept.	Débit médian du mois de septembre	Saison automnale *	Toutes les régions

H-3: Estrie (partie est)/Bois-Francs/Chaudière-Appalaches (rive sud).

* : date d'application variable suivant les régions écohydrologiques et les espèces cibles.

3 – RÉSULTATS

3.1 Impacts des barrages sur la période d'occurrence des débits annuels minimums

La figure 3 compare les fréquences mensuelles moyennes (et leur intervalle de confiance) d'occurrence des débits annuels minimums en aval des barrages à celles observées en rivières naturelles. Nous avons appliqué le test de Khi-carré et le test t de Student sur ces données. En ce qui concerne les stations influencées par les barrages, elles ont été groupées en trois régimes hydrologiques décrits précédemment. Il ressort de cette analyse les considérations suivantes :

- En régime d'inversion, on observe une baisse significative de la fréquence d'occurrence des débits minimums annuels en été (juillet à septembre) mais une hausse très significative au printemps (avril, mai et juin) au moment de la fonte de neiges.

- En régime d'homogénéisation, la diminution de la fréquence d'occurrence des débits annuels minimums survient surtout en hiver (février et mars) et en été

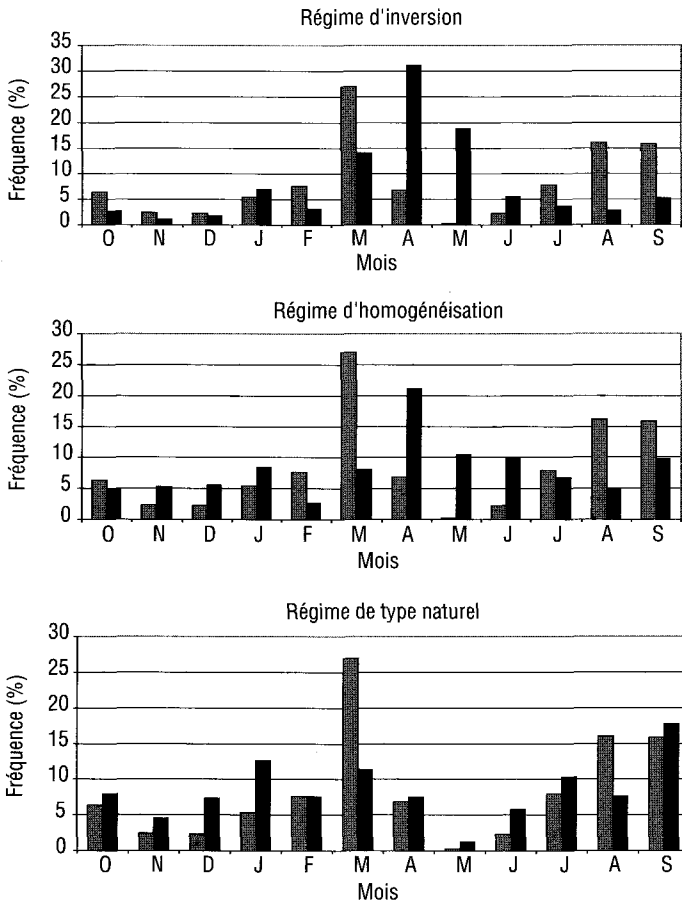


Figure 3 Comparaison des fréquences mensuelles des dates d'occurrence des débits annuels minimums entre les rivières naturelles (barres grises) et les rivières régulées (barres noires).

Comparison of monthly frequencies of timing of annual minimum discharges between natural rivers (grey bars) and regulated rivers (black bars). The confidence intervals of the mean of monthly frequencies of timing are delimited by the bars.

(août et septembre). La hausse de cette fréquence est observée au printemps (avril, mai et juin), en automne (novembre et décembre) et en hiver (janvier).

– En régime de type naturel, la diminution se produit aux mois de mars et d'août et la hausse pendant les deux premiers mois d'hiver (décembre et janvier) et à la fin du printemps (juin).

En ce qui concerne la variabilité inter-annuelle des dates d'occurrence des débits minimums annuels, il ressort de la figure 4 que cette variabilité est globalement plus importante en régimes d'inversion et d'homogénéisation qu'en régime naturel pour les bassins versants de taille supérieure à 10 000 km². En

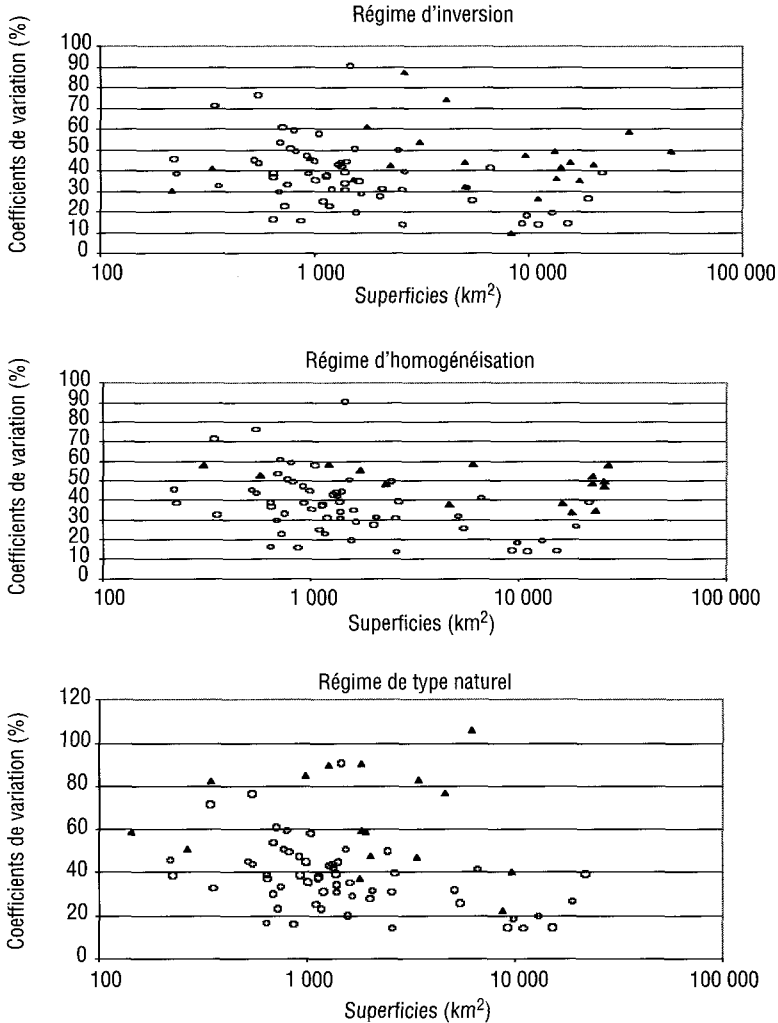


Figure 4 Comparaison des coefficients de variation des dates d'occurrence des débits annuels minimums entre les rivières naturelles (cercles) et les rivières régularisées (triangles).

Comparison of coefficient of variation of timing of annual minimum discharges between natural rivers (circles) and regulated rivers (triangles).

revanche, en régime de type naturel, ce sont les bassins versants de taille inférieure à 10 000 km² qui se caractérisent par une variabilité inter-annuelle relativement importante.

En conclusion, les impacts de barrages sur la fréquence d'occurrence des débits annuels minimums se traduisent par une hausse significative au printemps et une baisse significative en été et en hiver pour les régimes d'inversion et d'homogénéisation. Rappelons que ces deux saisons correspondent aux périodes des basses eaux en condition naturelle. En régime de type naturel, on observe une baisse importante à la fin de l'hiver (mars) et une hausse au début

de cette même saison (décembre et janvier) et en juin. D'autre part, dans l'ensemble, la variabilité inter-annuelle des dates d'occurrence des débits minimums annuels est plus importante en aval des barrages qu'en rivières naturelles.

3.2 Impacts de barrages sur la magnitude des débits annuels minimums

La figure 5 compare les moyennes des débits minimums annuels en rivières naturelles à celles calculées en aval des barrages dans les trois régimes artificialisés. Afin de mieux visualiser les impacts des barrages en fonction des régimes

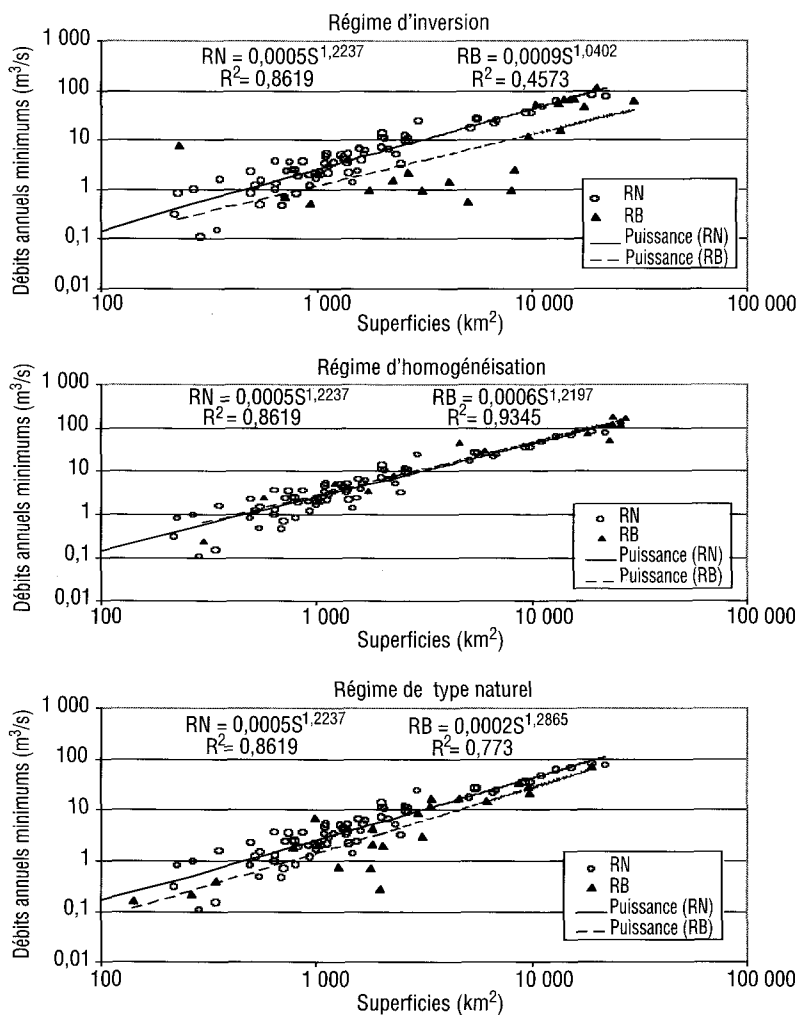


Figure 5 Comparaison des moyennes des débits annuels minimums en rivières naturelles (RN) et en régimes régulés (RB).
 Comparison of averages of annual minimum discharges between natural rivers (RN) and regulated rivers (RB).

hydrologiques, nous avons représenté séparément les trois régimes hydrologiques artificialisés. Néanmoins, il importe de préciser que nous n'avons pas représenté les stations directement influencées par les barrages dont la taille des bassins versants étaient supérieures à 30 000 km² en raison du fait que la taille du bassin versant la plus élevée en rivières naturelles ne dépasse pas 22 000 km².

Pour mettre en évidence l'impact des barrages, nous avons ajusté les droites de régression (après transformation logarithmique) entre les débits annuels et les superficies de bassins versants en rivières naturelles et en rivières influencées par les barrages. Ensuite, nous avons testé le parallélisme (pente et ordonnée à l'origine) entre les deux droites au moyen de l'analyse de variance et du test t de Student. Ces deux tests ont révélé que les pentes des deux droites sont statistiquement différentes en régime d'inversion et de type naturel (tableau 2). Par conséquent, on peut affirmer que globalement, les débits annuels minimums en régime d'inversion et de type naturel ont diminué en aval des barrages dans les deux régimes hydrologiques. D'autre part, il convient de noter aussi que les barrages modifient significativement la relation de proportionnalité entre les débits annuels minimums et les superficies de bassins versants. Cette modification se traduit par une diminution significative de la part expliquée de la variabilité des débits par la superficie. La diminution est surtout importante en régime d'inversion où la valeur du coefficient de détermination (R^2) ne représente plus que 46 % de la variance totale expliquée alors qu'en rivières naturelles, sa valeur est supérieure à 85 %. Pour les deux autres régimes hydrologiques, le changement est de moindre importance.

Tableau 2 Analyse des régressions. Valeurs de F.

Table 2 Regression analysis. Value of F test.

Régime	Régime	Degré de liberté	Carré moyen	F
		N: 2	N: 1,3034	
RN	RI	D: 91	D: 0,1270	10,26 *
		N: 2	N: 0,0076	
RN	RH	D: 87	D: 0,0550	0,140
		N: 2	N: 0,4493	
RN	RTN	D: 92	D: 0,0752	5,98*

RN: Rivières naturelles; RI: Régime d'inversion; RH: Régime d'homogénéisation; RTN: Régime de type naturel; N: numérateur, D: Dénominateur. *: Différence statistiquement significative au seuil de 5 %.

Cependant la méthode de comparaison de droites de régression ne permet pas de tester individuellement chaque station. En effet, l'examen graphique suggère que l'écart entre les débits annuels minimums de certaines stations en aval des barrages et ceux de rivières naturelles semble être faible. Les points représentant les débits de ces stations en aval des barrages sont parfois confondus aux nuages de points représentant les débits de rivières naturelles. On peut donc présumer que pour ces stations, les débits n'ont subi aucun changement après la construction des barrages. Pour tester cette hypothèse, nous avons procédé selon les trois étapes suivantes:

– Nous avons comparé les débits annuels minimums observés à chaque station influencée par les barrages aux valeurs des débits annuels minimums

estimés (DME), à partir des superficies des bassins versants, par la régression de la droite établie entre les débits et la taille des bassins versants en rivières naturelles. Le DME correspond théoriquement au débit qui devrait être observé à une station sans la présence d'un barrage. Cette estimation se justifie par le fait qu'il existe une forte proportionnalité entre les débits annuels minimums et les superficies de bassins versants en condition naturelle. En effet, la superficie explique plus de 85 % de la variabilité totale des débits annuels minimums en condition naturelle.

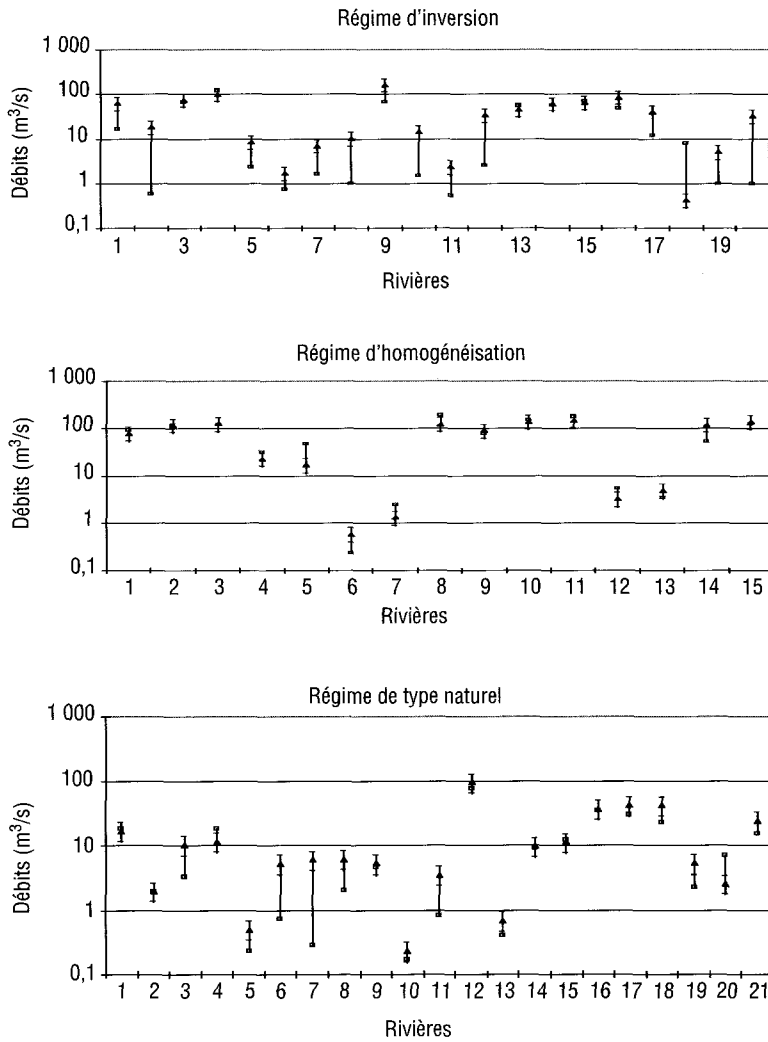
– Ensuite, nous avons calculé les intervalles de confiance des DME au seuil de 95 %.

– Enfin, nous avons comparé le débit observé (DMO) effectivement en aval d'une station influencée par un barrage au DME correspondant en tenant compte, bien entendu, de l'intervalle de confiance de ce dernier. Lorsque le débit mesuré en aval d'un barrage se situait à l'intérieur de cet intervalle de confiance, nous avons donc considéré que les deux débits n'étaient pas significativement différents. L'application de cette approche a révélé qu'en régime d'inversion (figure 6), pour 80 % des stations (16 stations sur 20), les débits observés (DMO) en aval des barrages se situaient en dehors des intervalles de confiance des débits naturels estimés (DME). On peut donc conclure qu'il y a effectivement une diminution des débits en aval des barrages à l'exception d'une seule station où le débit annuel minimum a significativement augmenté. La différence entre DMO et DME a été surtout observée pour presque tous les bassins versants de taille inférieure à 10 000 km². En régime du type naturel, pour 51 % de stations (11 stations sur 21), la différence entre DMO et DME a été significative. La taille de bassins versants de ces stations est inférieure à environ 6 000 km². Quant au régime d'homogénéisation, nous avons observé, en revanche, une hausse des débits annuels minimums pour 4 (25 %) stations. En effet, les valeurs des DMO sont supérieures à celles des DME (figure 5).

Ces résultats nous autorisent à conclure avec certitude que les barrages entraînent surtout une baisse des débits annuels minimums au Québec. Cette baisse affecte particulièrement les rivières de taille inférieure à 10 000 km² et les stations appartenant au régime d'inversion.

3.3 Impacts de barrages sur la variabilité inter-annuelle de la magnitude et la forme de distribution des débits annuels minimums

En ce qui concerne la variabilité inter-annuelle de la magnitude, la figure 7 compare les valeurs de coefficients de variation des rivières naturelles et des rivières régularisées en fonction de la taille des bassins versants. Rappelons que pour cette analyse, nous n'avons retenu que les rivières dont les mesures de débits s'étendaient sur au moins 20 ans. Il n'existe aucune proportionnalité entre la taille des bassins versants et les coefficients de variation aussi bien en rivières naturelles qu'en rivières régularisées. En effet, toutes les droites de régression ajustées ne sont pas statistiquement significatives comme le révèlent d'ailleurs les faibles valeurs de coefficients de détermination. Ceci a été confirmé par les tests d'analyse de variance. Par conséquent, nous avons recouru exclusivement à la méthode graphique pour comparer les données des rivières naturelles à celles des rivières régularisées. On observe une variabilité inter-annuelle de la magnitude des débits annuels minimums relativement plus forte en aval des barrages qu'en

**Figure 6**

Comparaison entre débits annuels minimums estimés (DME, triangle) et débits annuels minimums observés (DMO, cercles) en aval des barrages. Les intervalles de confiance de DME sont délimités par les barres horizontales.

Comparison between estimated annual minimum discharges (DME, triangles) and observed annual minimum discharges (DMO, circles). The confidence intervals of DME are delimited by the bars.

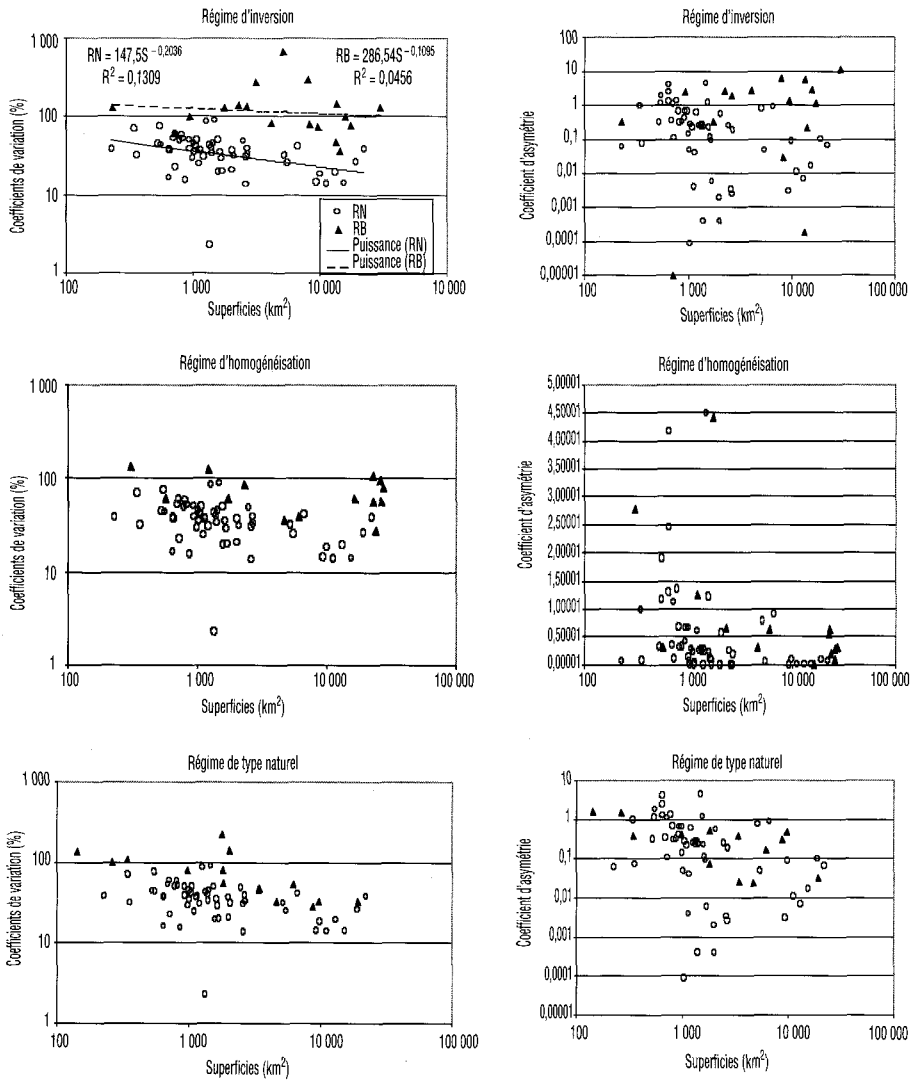


Figure 7

Comparaison des coefficients de variation de la magnitude et des coefficients d'asymétrie entre les rivières naturelles (cercles) et les rivières régulées (triangles).

Comparison of coefficients of variation of magnitude and coefficients of skewness between natural rivers (circles) and regulated rivers (triangles).

rièrres naturelles. En régimes artificialisés, le régime d'inversion est caractérisé par une plus forte variabilité que les deux autres régimes. Quant à la forme de distribution des débits annuels minimums, les changements des coefficients d'asymétrie ont surtout été observés en régime d'inversion caractérisé par des valeurs relativement élevées par rapport à celles des rivières naturelles (figure 7).

3.4 Comparaison des débits annuels minimums mesurés en aval des barrages avec les normes des débits réservés écologiques estimés

Les figures 8a et 8b comparent les moyennes des débits annuels minimums et les débits réservés écologiques estimés en aval des barrages pour chaque saison et pour chaque régime hydrologique régularisé. Nous avons procédé par la même démarche que celle utilisée pour comparer la magnitude des débits. Toutefois, nous avons comparé les débits réservés estimés aux moyennes de débits annuels minimums observées (DMO) et non estimées par une régression. Précisons que pour cette comparaison, nous avons aussi tenu compte des intervalles de confiance des DMO. Nous avons comparé les débits minimums et les débits réservés pour chaque saison du fait que ces derniers sont saisonnalisés et les premiers peuvent survenir durant toute l'année aussi bien en rivières naturelles qu'en rivières régularisées comme nous l'avons vu au point 3.1.

Il ressort de cette comparaison que les débits réservés sont systématiquement supérieurs aux débits annuels minimums en aval des barrages pour les trois régimes artificialisés et durant les quatre saisons. En effet, les droites de régression ajustées sur les débits réservés et les débits annuels minimums sont significativement différentes. L'écart entre les débits réservés et les moyennes des débits annuels minimums est surtout très prononcé au printemps et en été pour les trois régimes artificialisés et ce, pour les rivières de taille inférieure à 10 000 km². Il ressort de ces considérations que les normes de débits réservés pour protéger les habitats du poisson ne semblent pas être respectées en aval des barrages au Québec.

4 – DISCUSSION ET CONCLUSION

L'analyse comparative des impacts de barrages sur les caractéristiques des débits annuels minimums dans trois régimes hydrologiques régularisés (inversion, homogénéisation et type naturel) au Québec a révélé deux faits significatifs suivants :

- les barrages modifient les caractéristiques (période d'occurrence, magnitude, variabilité inter-annuelle et forme) des débits annuels minimums ;
- l'ampleur de ces changements dépend du régime hydrologique artificialisé.

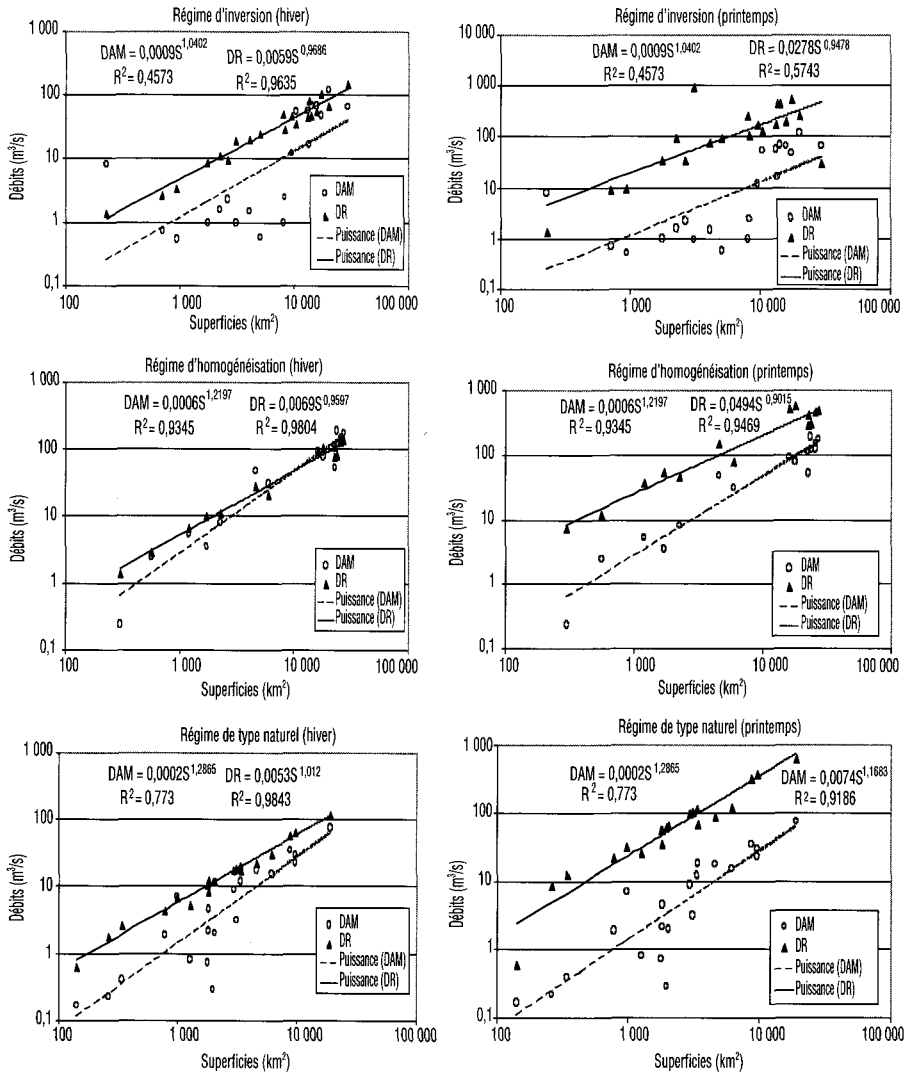


Figure 8a Comparaison des débits annuels minimums (DAM) et des débits réservés estimés (DR) en rivières régularisées en hiver et au printemps.

Comparison between annual minimum discharges (DAM) and in-stream discharges (DR) in Winter and Spring.

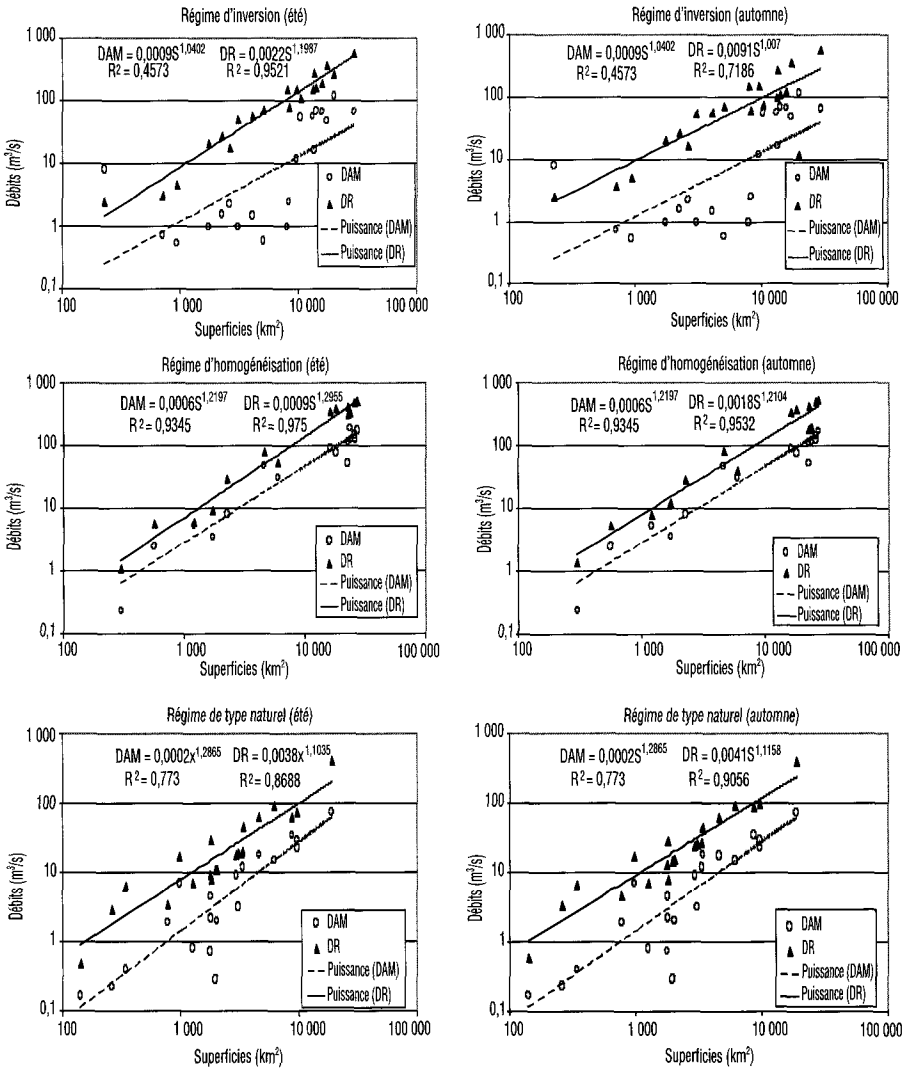


Figure 8b Comparaison des débits annuels minimums (DAM) et des débits réservés écologiques estimés (DR) en rivières régularisées en été et en automne.

Comparison between annual minimum discharges (DAM) and in-stream discharges (DR) in Summer and Fall.

En ce qui concerne le changement de la période d'occurrence, le changement le plus significatif a été observé en régimes d'inversion et d'homogénéisation. Il se traduit par une hausse très importante de la fréquence des débits minimums au printemps au moment de la fonte de neige alors qu'en condition naturelle, ces débits sont mesurés fréquemment en hiver et en été (ANCTIL *et al.*, 2000). Conséquemment, durant ces deux dernières saisons, on observe une diminution significative de la fréquence des débits annuels minimums. En régime de type naturel, la hausse de la fréquence des débits minimums annuels est observée surtout durant les deux premiers mois d'hiver (décembre et janvier). La hausse des fréquences des débits minimums en pleine période de fonte de neige en aval des barrages peut être qualifiée de phénomène exceptionnel. Même au Québec comme nous venons de le voir, il n'est pas observé en aval de tous les barrages. Les études effectuées sur les impacts des barrages dans d'autres pays, où l'écoulement hivernal est relativement faible en raison du stockage de l'eau sous forme de neige ou de glace à l'instar du Québec, n'ont pas mis en évidence ce type de changement. Dans ces pays, la diminution des débits printaniers (suppression des crues) ne s'accompagne pas d'une hausse de fréquence des débits annuels minimums (ANDREWS et PIZZI, 2000 ; ERSKINE *et al.*, 1999 ; MAHESHWARI *et al.*, 1995 ; MERRITT et COOPER, 2000 ; VIVIAN, 1994 ; WEINGARTNER et ASCHWANDER, 1994) si on exclut, bien entendu, le phénomène du transfert inter-bassins (dérivation des eaux). Dans le cas du Québec, ce sont des barrages réservoirs qui sont surtout affectés par ce type de changement. En effet, ces barrages sont destinés généralement à alimenter en eau les centrales hydroélectriques situées en aval pendant la période hivernale et à prévenir les inondations au printemps au moment de la fonte des neiges. Ainsi, au printemps (avril et mai), on stocke toute l'eau provenant de la fonte des neiges pour reconstituer les réserves d'eau qui seront utilisées en hiver. Enfin, en aval des barrages, nous avons observé une variabilité inter-annuelle des dates d'occurrence des débits minimums annuels plus forte qu'en rivières naturelles. Cette variabilité est plus importante pour les bassins versants dont la superficie excède 10 000 km² en régimes d'inversion et d'homogénéisation.

Quant à la magnitude des débits minimums annuels, il convient de noter que globalement, les barrages provoquent une diminution des débits annuels minimums. Cette diminution est plus importante en régime d'inversion et affecte particulièrement les stations dont la taille du bassin versant est inférieure à 10 000 km². En revanche, en régime d'homogénéisation, nous avons observé une hausse des débits annuels minimums pour quelques stations. En règle générale, les barrages entraînent une hausse ou un maintien des débits minimums (MAHESHWARI *et al.*, 1995 ; STANFORD *et al.*, 1996 ; VIVIAN, 1994) sauf en cas du transfert inter-bassins des eaux. Dans le cas du Québec, la diminution des débits minimums observée en aval des barrages est une conséquence directe du stockage de grandes quantités d'eau au printemps dans les réservoirs comme nous l'avons déjà souligné. En fait, plus de la moitié du volume d'eau provenant de la fonte de neiges au printemps est stockée dans les réservoirs si bien que l'écoulement printanier ne représente plus que moins de 20 % de l'écoulement annuel total alors qu'en condition naturelle, il représente plus de 50 % (ASSANI *et al.*, 2004). Ainsi, en aval de nombreux réservoirs, on ne lâche pratiquement rien pendant la période de remplissage des réservoirs (en avril et en mai). Ainsi, les lits deviennent parfois complètement asséchés juste

en aval des barrages avec toutes les conséquences écologiques qui peuvent en découler. Mais celles-ci n'ont jamais été analysées.

En ce qui concerne la variabilité inter-annuelle des débits annuels minimums, elle est plus forte surtout en régime d'inversion qu'en rivières naturelles. Les deux autres régimes artificialisés sont peu affectés par ce changement. Il en est de même de la forme de distribution des débits annuels minimums. En effet, en régime d'inversion, la forme de distribution tend à devenir plus asymétrique qu'en rivières naturelles.

La comparaison des normes des débits réservés écologiques pour protéger les habitats du poisson (BELZILE *et al.*, 1997) – recommandées par FAUNE ET PARC QUÉBEC (1999) – estimés en aval des barrages aux débits annuels minimums révèle que ces derniers sont systématiquement inférieurs à ces normes durant les quatre saisons. La différence entre les deux débits est surtout importante au printemps et en été pour les bassins versants < 10 000 km². Rappelons que c'est pendant cette période que de nombreux organismes aquatiques ont besoin de beaucoup d'eau pour accomplir leur cycle. Le fait que les normes des débits réservés soient supérieures aux débits annuels minimums même en régime d'homogénéisation qui n'a subi aucun changement significatif des débits peut suggérer que les valeurs de ces normes soient relativement élevées. Quoi qu'il en soit, il est probable que le non-respect de ces normes en aval des barrages puisse affecter certaines phases des cycles vitaux du poisson dans les rivières du Québec. Des études de terrain seront entreprises pour analyser l'impact réel de ce non-respect des normes.

Cette étude démontre pour la première fois que les impacts des barrages sur les débits annuels minimums dépendent fortement du type de régime hydrologique régularisé. Par conséquent, les mesures de restauration de tronçons et les politiques des débits réservés pour la protection de la biodiversité doivent être spécifiques à chaque type de régime hydrologique. Ainsi, aucune norme des débits ne doit être généralisée sur l'ensemble des barrages au Québec.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- ANCTIL F., LAROUCHE W., HOANG V.D., 2000. Analyse régionale des étiages 7-jours de la province de Québec. *Water Qual. Res. J. Canada*. **35**, 125-146.
- ANDREWS E.D., PIZZI A.L., 2000. Origin of Colorado River experimental flood in Grand Canyon. *Hydrol. Sc. J.* **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). *Rev. Sci. Eau*. **15**, 557-574.
- ASSANI A.A., GRAVEL E., BUFFIN-BÉLANGER T., ROY A.G., 2004. Classification et caractérisation des régimes hydrologiques des rivières régularisées au Québec. Application de l'approche écologique. Soumis à *Can. Water Res. Ass.*
- ASTRADE L., 1998. La gestion des barrages-réservoirs au Québec: exemples d'enjeux environnementaux. *Ann. Géo.* **604**, 590-609.
- BELZILE L., BÉRUBÉ P., HOANG V.D., LECLERC M., 1997. Méthode écohydrologique de détermination des débits

- réservés pour la protection des habitats du poisson dans les rivières du Québec. Rapport présenté par l'INRS-Eau et le Groupe-conseil Génivar inc. au ministère de l'Environnement et de la Faune et à Pêches et Océans Canada. 83 p + 8 annexes.
- BENN P.C., ERSKINE W.D., 1994. Complex channel response to flow regulation: Cudgong River below Windamere Dam, Australia. *Appl. Geogr.* **14**, 153-168.
- CAISSIÉ D., EL-JABI N., 1995. Comparison and regionalization of hydrologically based instream flow techniques in Atlantic Canada. *Can. J. Civ. Eng.* **22**, 235-246.
- CAZAUBON A., GIUDICELLI J., 1999. Impacts of the residual flow on the physical characteristics and benthic community (algae, invertebrates) of a regulated Mediterranean River, the Durance, France. *Regul. Rivers: Res. Mgmt.* **15**, 441-461.
- CLAUSSEN B., BIGGS B.J.F., 2000. Flow variable for ecological studies in temperate streams: grouping based on covariance. *J. Hydrol.*, **237**, 184-197.
- COSANDEY C., ROBINSON M., 2000. Hydrologie continentale. Armand Colin, Paris, 360 p.
- CUNJAK R.A., PROWSE T.D., PARRISH D.L., 1998. Atlantic salmon (*Salmo salar*) in winter: "The season of parr discontent". *Can. J. Fish. Aquat. Sci.* **55**, 161-180.
- DAGNELIE P., 1992. Statistique théorique et appliquée. Les bases théoriques. Les presses agronomiques de Gembloux, Gembloux, tome 1, 492 p.
- ENVIRONNEMENT CANADA, 1992. Sommaire chronologique de l'écoulement. Province du Québec. Direction générale des eaux intérieures, Ottawa, 526 p.
- ERSKINE W.D., TERRAZZOLO N., ET WARNER R.F., 1999. River rehabilitation from the hydrogeomorphic impacts of a large hydro-electric power project: Snowy River, Australia. *Regul. Rivers: Res. Mgmt.* **15**, 3-24.
- FAUNE ET PARCS QUÉBEC, 1999. Politique de débits réservés écologiques pour la protection du poisson et de ses habitats. Direction de la faune et des habitats. 23 p.
- FRENETTE M., CARON M., JULIEN P., 1984. Interaction entre le débit et les populations de tacons (*Salmo salar*) de la rivière Matamec, Québec. *Can. J. Aquat. Sci.* **41**, 954-963.
- FRIEDMAN J.M., OSTERKAMP W.R., SCOTT M.L., AUBLE G.T., 1998. Downstream effects of dams on channel geometry and bottomland vegetation: regional patterns in the Great Plains. *Wetlands.* **18**, 619-633.
- GIBSON R.J., MYERS R.A., 1988. Influence of seasonal river discharge on survival of juvenile Atlantic Salmon, *Salmo Salar*. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.* **45**, 344-348.
- LECLERC M., BOUDREAU P., BÉCHARA J.A., CORFA G., 1995. Two-dimensional hydrodynamic modelling: a neglected tool in the instream flow incremental methodology. *Trans. Am. Fish. Soc.* **124**, 645-662
- MAHESHWARI B.L., WALKER K.F., MCMAHON T.A., 1995. Effects of regulation on the flow regime of the River Murray, Australia. *Regul. Rivers: Res. Mgmt.* **10**, 15-38.
- MERRITT D.M., COOPER D.J., 2000. Riparian vegetation and channel change in response to river regulation: a comparative study of regulated and unregulated streams in the Green River basin, USA. *Regul. Rivers: Res. Mgmt.* **16**, 543-564.
- MINISTÈRE DE L'ENVIRONNEMENT DU QUÉBEC, 1994. Annuaire hydrologique. Direction du réseau hydrique, Québec, 152 p.
- OLDEN J.D., POFF N.L., 2003. Redundancy and the choice of hydrologic indices for characterizing streamflow regimes. *River Res. Applic.* **19**, 101-121.
- PETERS D.L., PROWSE T., 2001. Regulation effects on the lower Peace River, Canada. *Hydrol. Process.* **15**, 3181-3194.
- PETTS G.E., 1995. Water allocation to protect river ecosystems. *Regul. Rivers: Res. Mgmt.* **12**, 353-365.
- POFF N.L., WARD J.V., 1989. Implications of stream variability and predictability for lotic community structure: a regional analysis of streamflow patterns. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.* **46**, 1805-1818.
- 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.
- POWER M.E., DIETRICH W.E., FINLAY J.C., 1996. Dams and downstream aquatic biodiversity: potential food web consequences of hydrologic and geomorphic change. *Environment Management*. **20**, 887-895.
- REILY P.W., JOHNSON W.C., 1982. The effects of altered hydrologic regime on tree growth along the Missouri River in North Dakota. *Can. J. Bot.* **60**, 2410-2423.
- RICHTER B.D., BAUMGARTNER, J.V., POWELL, J., BRAUN D.P., 1996. A method for assessing hydrologic alteration within ecosystem. *Conservation Biology*. **10**, 1163-1174.
- RICHTER 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. *Regul. Rivers: Res. & Mgmt.* **14**, 329-340.
- ROOD S.B., MAHONEY J.M., REID D.E., ZILM L., 1995. Instream flows and the decline of riparian cottonwoods along the St. Mary River, Alberta. *Can. J. Bot.* **73**, 1250-1260.
- ROOD S.B., TYMENSEN W., MIDDLETON R., 2003. A comparison of methods for evaluating instream flow needs for recreation along rivers in Southern Alberta, Canada. *River Res. Applic.* **19**, 123-135.
- STANFORD J.A., WARD J.V., LISS W.J., FRISSELL C.A., WILLIAMS R.N., LICHTOWICH J.A., COUTANT C.C., 1996. A general protocol for restoration of regulated rivers. *Regul. Rivers: Res. Mgmt.* **12**, 391-413.
- VIVIAN H., 1994. L'hydrologie artificialisée de l'Isère en amont de Grenoble. Essai de quantification des impacts des aménagements. *Rev. Géogr. Alpine*. **2**, 97-112.
- WARD J.V., TOCKNER K., UEHLINGER U., MALARD F., 2001. Understanding natural patterns and processes in river corridors as the basis for effective river restoration. *Regul. Rivers: Res. Mgmt.* **17**, 311-323.
- WEINGARTNER R., ASCHWANDEN H., 1994. Quantification des débits des cours d'eau des Alpes suisses et des influences anthropiques qui les affectent. *Rev. Géogr. Alpine*. **2**, 45-58. <l