

COMPARAISON DE LA VARIABILITÉ INTER-ANNUELLE DES DÉBITS EN FONCTION DE RÉGIMES HYDROLOGIQUES ARTIFICIALISÉS DANS UN COMPLEXE DE BARRAGES SUR LA RIVIÈRE SAINT-MAURICE (QUÉBEC, CANADA)

Ali Arkamose ASSANI

Résumé

Nous avons comparé la variabilité inter-annuelle des débits dans trois types de régimes hydrologiques artificialisés (inversion, homogénéisation et type naturel) appartenant au complexe de barrages de la rivière Saint-Maurice (43 427 km²), affluent du fleuve Saint-Laurent au Québec. Ces trois régimes correspondent chacun à un mode de gestion spécifique. Cette comparaison est fondée sur le calcul de plusieurs indices pour caractériser l'intensité et l'amplitude de la variabilité inter-annuelle des débits ainsi que la succession des périodes sèches et humides aux échelles annuelle, saisonnière (hiver, printemps, été et automne) et journalière (débits annuels maximums et minimums) de 1930 à 1990.

L'intensité et l'amplitude de la variabilité inter-annuelle des débits sont plus importantes en régime d'inversion que dans les deux autres régimes aux échelles annuelle et saisonnière. Toutefois, à l'échelle journalière, cette variabilité devient forte en régime d'homogénéisation. Quant à la succession des périodes sèches et humides, des différences entre les régimes hydrologiques sont surtout observées aux échelles saisonnière (hiver, printemps et été) et journalière (débits annuels maximums).

Comparativement aux rivières naturelles, il ressort de cette étude que les impacts de barrages sur la variabilité inter-annuelle des débits dépend du régime hydrologique associé au barrage. En régime d'inversion, les impacts de barrages se traduisent par une variabilité inter-annuelle des débits relativement forte, à l'exception des débits annuels maximums et minimums. En régime du type naturel, on observe une variabilité relativement faible par rapport aux rivières naturelles. En régime d'homogénéisation, la variabilité des débits est forte à l'échelle journalière et les débits hivernaux sont en hausse.

Mots-clés

variabilité inter-annuelle des débits, régimes hydrologiques artificialisés, complexe de barrages, Saint-Maurice, Québec

Abstract

We compared the inter-annual variability of discharges in three artificialised hydrological flow regimes (inversion, homogenization and natural type) belonging to a complex of dams on the St-Maurice River (43 427 km²), tributary of the St-Lawrence River in Quebec. These three hydrological flow regimes correspond each one to specific method of management. This comparison is found on calculation several indexes to characterize the intensity and range of the inter-annual variability of discharges as the succession of dry and wet sequences at different time-scales (annual, seasonal and daily) for 1930 to 1990.

The intensity and range of inter-annual variability of discharges are higher in inversion hydrological regime than in the two others regimes at annual and seasonally time-scales. However, at daily time-scale, the variability of discharges becomes high in homogenization regime. As for the succession of dry and wet spells, the difference between the hydrological regimes are observed on seasonal (winter, spring and summer) and daily (annual maximum discharges) time-scales.

The comparison with the pristine river revealed that the impacts of dams on inter-annual variability of discharges depend on the artificialised hydrological regimes. In inversion regime, the inter-annual variability discharges is higher than in pristine condition except the annual maximums and minimums discharges. In natural type regime, it is weaker. In homogenization regime, we observed a high inter-annual variability of annual maximums and minimums discharges and an increase discharges in winter.

Keywords

Inter-annual variability of discharges, artificialised hydrological regime, complex of dams, Saint-Maurice River, Quebec

INTRODUCTION

Le Québec est l'une des provinces canadiennes qui dispose d'un grand nombre des barrages et digues. Selon Astrade (1998), plus de 10 000 retenues d'eau ont été érigées sur les cours d'eau. Cependant, il existe encore très peu d'études relatives aux impacts de ces ouvrages sur les régimes hydrologiques (Assani *et al.*, 2002 ; Haleur, 2001). Pour combler cette lacune, nous avons entrepris des études sur les impacts hydrologiques des barrages au Québec à différentes échelles de temps (Assani, 2000). Aux échelles mensuelles et saisonnières, l'analyse en composantes principales des débits a révélé l'existence de trois types des régimes hydrologiques artificialisés (Assani *et al.*, 2004b) :

- le régime artificialisé dit d'inversion. Il est caractérisé par l'occurrence des débits maximums mensuels en hiver et des débits minimums mensuels au printemps au moment de la fonte des neiges. De fait, il y a une inversion totale du cycle hydrologique. Ce régime ne s'observe exclusivement qu'en rive nord (gauche) du fleuve Saint-Laurent. Il est associé aux barrages réservoirs construits généralement en amont des bassins versants pour alimenter les centrales hydroélectriques situés en aval pendant la période froide de novembre à mars) ;
- le régime artificialisé dit d'homogénéisation. Il est caractérisé par une faible variation des débits au cours de l'année. De fait les valeurs des coefficients d'immodération (rapport entre les débits maximums et minimums mensuels) sont proches de 1. Les débits maximums mensuels peuvent être mesurés en hiver mais les débits minimums mensuels ne sont jamais observés au printemps. Ce type de régime est aussi associé aux barrages réservoirs construits sur des grands cours d'eau (> 10 000 km²) ou des réservoirs couplés avec des centrales hydroélectriques ;
- le régime artificialisé dit de type naturel. Ce type de régime se distingue des régimes strictement naturels (non influencés par aucun barrage) par une baisse des débits printaniers et une hausse des hivernaux. La variabilité inter-mensuelle des débits diminue par rapport aux rivières naturelles. Le cycle hydrologique naturel est conservé en aval des barrages. Ce type de régime est généralement associé aux centrales hydroélectriques qui sont alimentés par les réservoirs.

La comparaison des impacts des barrages sur les séries annuelles des débits maximums et minimums dans les trois régimes hydrologiques a révélé que les changements les plus importants sont observés en régime d'inversion (Assani *et al.*, 2004a, 2004c). Ces changements affectent toutes les caractéristiques des débits : la magnitude, la période d'occurrence, la durée et la fréquence des débits. Les conséquences de ces changements ne sont pas encore bien étudiées au Québec. Mais de travaux réalisés dans d'autres pays ont montré que les changements des caractéristiques des débits induits par les

barrages modifient à des degrés divers le fonctionnement, l'intégrité et la biodiversité des écosystèmes fluviaux (Richter *et al.*, 1996 ; Poff *et al.*, 1997 ; Nilsson et Svedmark, 2002). Les changements de la magnitude et de la fréquence des débits peuvent favoriser l'érosion et le lessivage des matières organiques, l'invasion des plantes exotiques, la diminution de la quantité d'eau et des nutriments pour la végétation riparienne ainsi que la dispersion et la régénération des graines. Quant aux changements qui affectent les périodes d'occurrence des débits, elles diminuent la croissance des plantes. La durée prolongée des inondations altèrent les communautés végétales.

Pour compléter ces études déjà réalisées au Québec, la présente note se penche sur les impacts des barrages sur la variabilité inter-annuelle des débits aux échelles annuelle, saisonnière et journalière dans ces trois régimes artificialisés. Du point de vue écologique, la variabilité inter-annuelle des débits joue un rôle majeur dans les écosystèmes fluviaux (Cushman, 1985 ; Poff *et al.*, 1997 ; Richter *et al.*, 1997). Elle influence le volume d'habitat et la quantité de nourriture disponibles pour les organismes aquatiques et semi-aquatiques, et partant l'équilibre de la biodiversité. D'autre part, la succession des périodes humides et sèches influence de manière significative la dynamique des espèces. Ainsi, certaines espèces peuvent proliférer pendant les années humides, d'autres durant les années sèches. Cette variabilité profite au fonctionnement et au maintien de la biodiversité des écosystèmes fluviaux (Poff *et al.*, 1997). C'est ainsi que dans le cas du fleuve Saint-Laurent notamment, on observe une hausse de la biodiversité et de la biomasse végétales notamment durant les années sèches, en raison de l'invasion d'espèces exotiques et/ou agressives, alors que la biodiversité connaît une baisse durant les années humides (Hudon, 1997).

I. MÉTHODOLOGIE

A. Présentation du bassin versant de la rivière Saint-Maurice

Un des principaux affluents du fleuve Saint-Laurent sur la rive nord (rive gauche), la Saint-Maurice draine un bassin versant de 43 427 km² (fig. 1). Sa longueur est d'environ 395 km. Le cours entaille deux formations géologiques de résistance inégale : le Bouclier canadien, constitué de plusieurs variétés de gneiss dont le roches sont dures, imperméables et à tendance acide, et les Basses-Terres de Saint-Laurent, caractérisées par des schistes et des calcaires argileux à tendance nettement alcaline (Laflamme, 1995). Les quatre stations analysées sont toutes situées dans le Bouclier. Le profil en long de la rivière y est jalonné par des brusques ruptures de pente au pied desquelles ont été érigés de barrages et centrales hydroélectriques. Ainsi, la rivière Saint-Maurice est l'une des rivières les plus régularisées au Québec. On dénombre plus de 40 barrages et



Figure 1. Localisation des stations étudiées

digues dans tout le bassin versant, 8 barrages sont construits sur le cours même de la rivière Saint-Maurice. La rivière reçoit plus de 17 affluents. Les principaux sont notamment la Matawin (5 775 km²), la Manouane (4 331 km²), la Trenche (2 629 km²) et la Vermillon (2 551 km²). Le climat est du type subpolaire continental avec une lame d'eau annuelle d'environ 1 000 mm et une température moyenne annuelle de 4°C. Tout le bassin versant est presque couvert par la forêt feuillue constituée essentiellement de l'érablière à bouleau jaune (Doneys et Dubois, 1991 ; Laflamme, 1995). Quant à l'affectation du sol, les activités anthropiques se limitent essentiellement à l'exploitation forestière. L'agriculture est pratiquée seulement dans les Basses-Terres.

B. Choix des stations d'étude

Le choix de la rivière et des stations à analyser a été fondé sur les deux critères suivants : l'existence de

trois régimes hydrologiques artificialisés observés au Québec (Assani, 2000) et la durée des mesures des débits sur une période commune d'au moins 50 ans. Seules les stations situées sur la rivière Saint-Maurice ont satisfait à ces deux critères. Nous n'avons donc retenu que quatre stations. La première station (Gouin) appartient au régime d'inversion, la seconde (Rapide Blanc) au régime d'homogénéisation et les deux dernières (La Tuque et Gabelle), au régime dit du type naturel (fig. 2). Les autres caractéristiques de stations sont consignées dans le tableau 1. Les données de débits sont publiées dans le *Sommaire chronologique de l'écoulement* édité par Environnement Canada (1992). Dans ce sommaire y figurent la magnitude et la date de mesure des débits maximums et minimums annuels, c'est-à-dire le débit le plus élevé et le plus bas enregistrés au cours d'une année à une station donnée ainsi que la magnitude des débits mensuels et annuels.

Station	N ^o fédéral	Superficie (km ²)	Hauteur du barrage (m)	Année de construction	Capacité du réservoir (x10 ⁶ m ³)	Surface du réservoir (km ²)
Gouin	02NA001	9 480	26	1912	8570	1.15
Rapide Blanc	02NC003	22 600	53	1933	6	14.5
Tuque	02NE002	32 100	40	1926	4.8	-
Gabelle	02NG005	42 700	23.5	1923	0.90	-

Tableau 1. Stations analysées

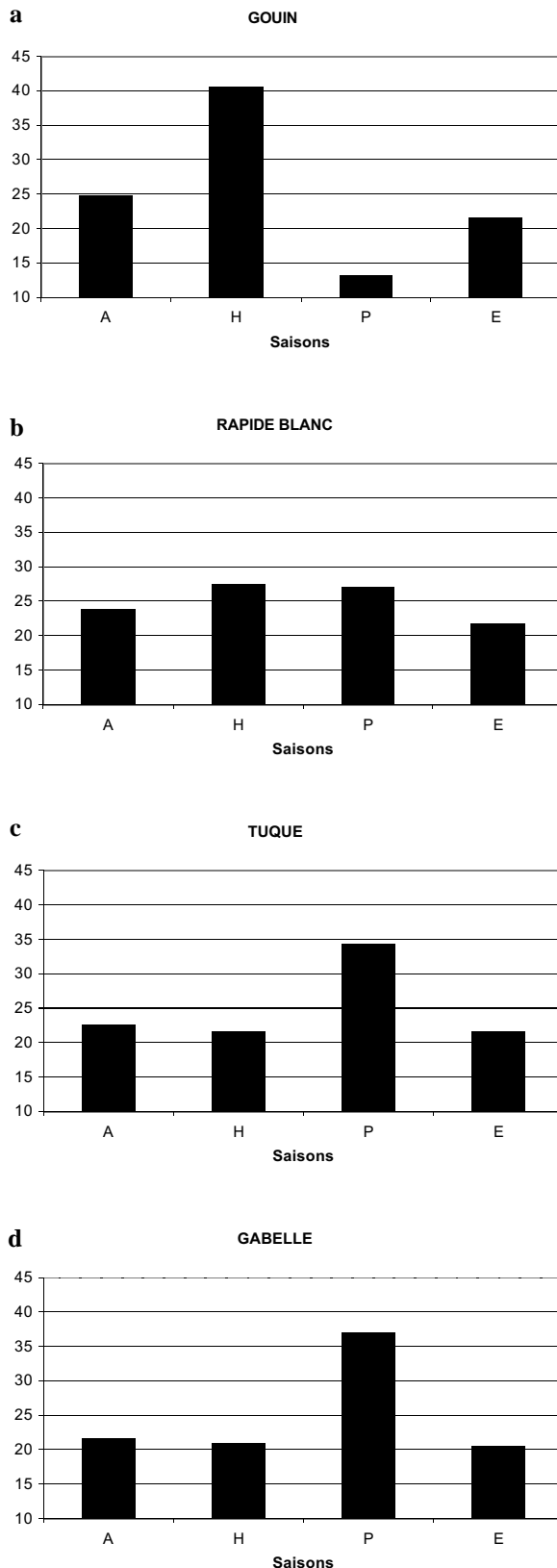


Figure 2. Régimes saisonniers des débits en aval des quatre stations : régimes d'inversion (a), régime d'homogénéisation (b) et régime du type naturel (c et d)

C. Méthodes d'analyse de la variabilité inter-annuelle des débits

Du point de vue écologique, la variabilité inter-annuelle des débits peut être définie par les paramètres suivants :

- l'intensité de la variabilité inter-annuelle qui permet d'évaluer la variabilité globale des débits pendant toute la durée d'observation. Ce paramètre est défini au moyen du coefficient de variation (CV) qui est, rappelons le, le rapport entre l'écart type et la moyenne de la série ;
- l'amplitude de la variabilité inter-annuelle des débits qui définit les limites extrêmes atteintes par les débits pendant toute la période d'observation. Il existe plusieurs indices pour définir cette amplitude. Dans le cadre de ce travail, nous avons retenu deux indices (R_1 et R_2) qui permettent une meilleure comparaison de l'amplitude des débits. Le premier indice R_1 se calcule au moyen de la relation suivante :

$$R_1 = \frac{Q_{\max} - Q_{\min}}{Q_{me}} \quad (1)$$

Q_{\max} et Q_{\min} sont respectivement les débits maximum et minimum mesurés pendant toute la période d'observation. Q_{me} est le débit médian de la série hydrologique et permet une comparaison des indices de stations de différentes superficies. Plus la valeur de cet indice est élevée, plus l'amplitude entre les débits extrêmes et la valeur médiane est forte. En raison de la forte sensibilité de cet indice aux valeurs extrêmes qui sont généralement rares, on utilise un autre indice (R_2) qui tient compte des débits fréquemment observés. Il est calculé au moyen de la relation suivante :

$$R_2 = \frac{Q_{90} - Q_{10}}{Q_{me}} \quad (2)$$

Q_{90} et Q_{10} sont respectivement les centiles 90 et 10 des débits. Cet indice ne tient donc compte ni de 10% des débits les plus élevés ni de 10% des débits les plus faibles, qui sont peu fréquemment observés ;

- la succession des périodes sèches et humides. Pour déterminer cette succession, nous avons calculé le cumul des écarts à la moyenne (CEM) de chaque série hydrologique au moyen de l'expression suivante :

$$CEM = \frac{d_i}{Q_{mo}} \quad (3)$$

$$d_i = Q_i - Q_{mo}$$

Q_i et Q_{mo} sont respectivement le débit de l'année i et la moyenne arithmétique des débits de la série hydrologique. Nous avons choisi la méthode de CEM afin de pouvoir

comparer la variabilité inter-annuelle des débits influencées par les barrages à celle des rivières naturelles étudiées au Québec et au Canada (Ashmore et Church, 2001). Rappelons que cette méthode permet de représenter la succession des périodes sèches, humides et normales. En effet, les années sèches (débits inférieurs à la moyenne de la série hydrologique) correspondent à la partie descendante de la courbe cumulée, et les années humides (débits supérieurs à la moyenne de la série hydrologique) à la partie ascendante de la courbe cumulée. Quant aux années normales (débits proches de la moyenne de la série hydrologique), elles correspondent à la partie « plate » de la courbe cumulée. La comparaison de courbes de plusieurs rivières permet de reconstituer la succession des périodes hydroclimatiques sèches et humides dans une région donnée.

Ces différents paramètres ont été appliqués aux débits annuels, saisonniers et journaliers. Dans le cadre de cette étude nous n'avons pas abordé le problème de stationnarité des séries hydrologiques artificialisées qui feront l'objet d'une autre étude. Notons que cet aspect concerne peu l'écologie des rivières.

Enfin, pour mettre en évidence les impacts de différents types de barrages sur la variabilité inter-annuelle des débits, nous avons comparé la variabilité des débits observés en aval de barrages à celle des débits mesurés en condition naturelle. Ces derniers débits sont jaugés à la station Saint-Michel-des-Saints (1 390 km²) située sur la rivière Matawin en amont du réservoir Taureau (fig. 1).

C'est la seule station qui dispose d'une longue série des mesures de débit en condition naturelle dans le bassin versant de la rivière Saint-Maurice.

II. RÉSULTATS

A. Variabilité inter-annuelle des débits à l'échelle annuelle

Le tableau 2 présente les valeurs des coefficients de variation et les indices R_1 et R_2 . Il ressort de ce tableau que la variabilité inter-annuelle des débits est plus importante en régime d'inversion (23.7%) que dans les deux autres régimes dont les valeurs du coefficient de variation sont presque égales (environ 13%). Quant à l'amplitude de la variabilité, elle est beaucoup plus forte en ce qui concerne les débits extrêmes en régime d'inversion. En revanche pour les débits fréquemment observés, elle est forte en régime d'homogénéisation. Les faibles amplitudes sont observées en régime de type naturel. Toutes ces différences ne peuvent être attribuées à la taille des bassins versants car aucune corrélation n'est observée entre cette variable et les valeurs de trois indices.

La figure 3 présente les valeurs cumulées des écarts à la moyenne pour déterminer la succession des périodes humides et sèches. Elle révèle que cette succession est beaucoup mieux marquée en régime d'inversion que dans les deux autres régimes. En effet, dans le cas de régime d'inversion, la pente de la courbe est très forte ce qui

Station	CV	R_1	R_2
Gouin	23.6	1.01	0.62
Rapide Blanc	13.2	0.71	0.98
Tuque	12.1	0.61	0.28
Gabelle	13.7	0.76	0.32

Tableau 2. Valeurs de coefficients de variation (CV en %) et des indices d'amplitude (R_1 et R_2) à l'échelle annuelle

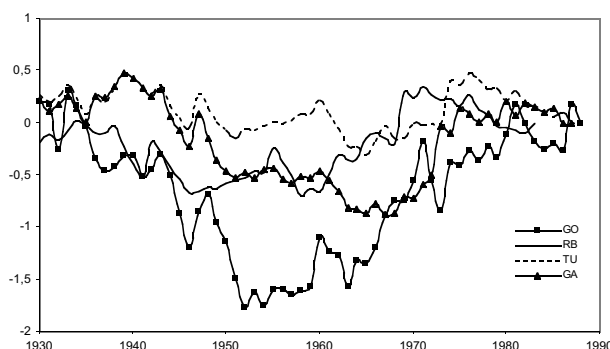


Figure 3. Cumul des écarts à la moyenne des débits moyens annuels en aval de quatre barrages sur la rivière Saint-Maurice (1930-1990). GO = Gouin ; RB = Rapide Blanc ; TU = Tuque ; GA = Gabelle

dénote une forte variabilité des débits par rapport à la moyenne de la série hydrologique. Cette évolution confirme donc la forte variabilité des débits annuels exprimée par la valeur du coefficient de variation qui, rappelons-le, est la plus élevée.

Pendant la période analysée, l'évolution des débits est caractérisée par la succession des périodes hydroclimatiques suivantes :

- une période sèche (courbe descendante) entre 1930 et le début de la décennie 1950 ;
- une période humide (courbe ascendante) entre les décennies 1960 et 1980 ;
- une nouvelle période sèche, relativement plus courte que la précédente depuis le début de la décennie 1980 ;
- une période « normale » intercalée entre les deux longues périodes sèche et humide.

La différence entre les stations se situe au niveau de la durée de ces épisodes. La durée de la première période sèche a été plus longue en aval du dernier barrage (régime de type naturel) alors que celle de la période humide le fut en régime d'inversion.

B. Variabilité inter-annuelle des débits à l'échelle saisonnière

L'année hydrologique, subdivisée en quatre saisons, débute en octobre (début d'automne) et s'achève en septembre (la fin de l'été). Le tableau 3 compare les

valeurs des trois indices calculés pour les quatre saisons. En ce qui concerne la variabilité inter-annuelle globale des débits, exprimée par les valeurs de coefficients de variation, on observe qu'elle est plus importante au printemps que durant les trois autres saisons dans les quatre stations. La saison hivernale est caractérisée par les plus faibles fluctuations inter-annuelles des débits. D'autre part, à l'instar des débits annuels, la variabilité inter-annuelle des débits saisonniers est beaucoup plus importante en régime d'inversion (station de Gouin) que dans les deux autres régimes. En ce qui concerne les amplitudes de fluctuation des débits, la tendance est comparable à celle observée au niveau des coefficients de variation. Les amplitudes des débits sont beaucoup plus fortes au printemps que durant les autres saisons d'une part, et plus fortes en régime d'inversion que dans les deux autres régimes, et ce durant les quatre saisons, d'autre part.

La succession des périodes sèches et humides durant les quatre saisons est présentée à la figure 4. Il ressort de cette figure que cette succession est comparable pour les trois régimes hydrologiques en automne et dans une moindre mesure au printemps et en été. Durant ces trois saisons, on retrouve la succession des périodes sèches et humides observées à l'échelle annuelle. Mais leur durée varie, bien étendu, d'une saison à l'autre. Au printemps, la durée de la période humide est plus longue en régime d'inversion que dans les deux autres régimes. De plus, la période « normale » observée entre 1930 et le milieu de la décennie 1940 dans ces derniers régimes y est absente.

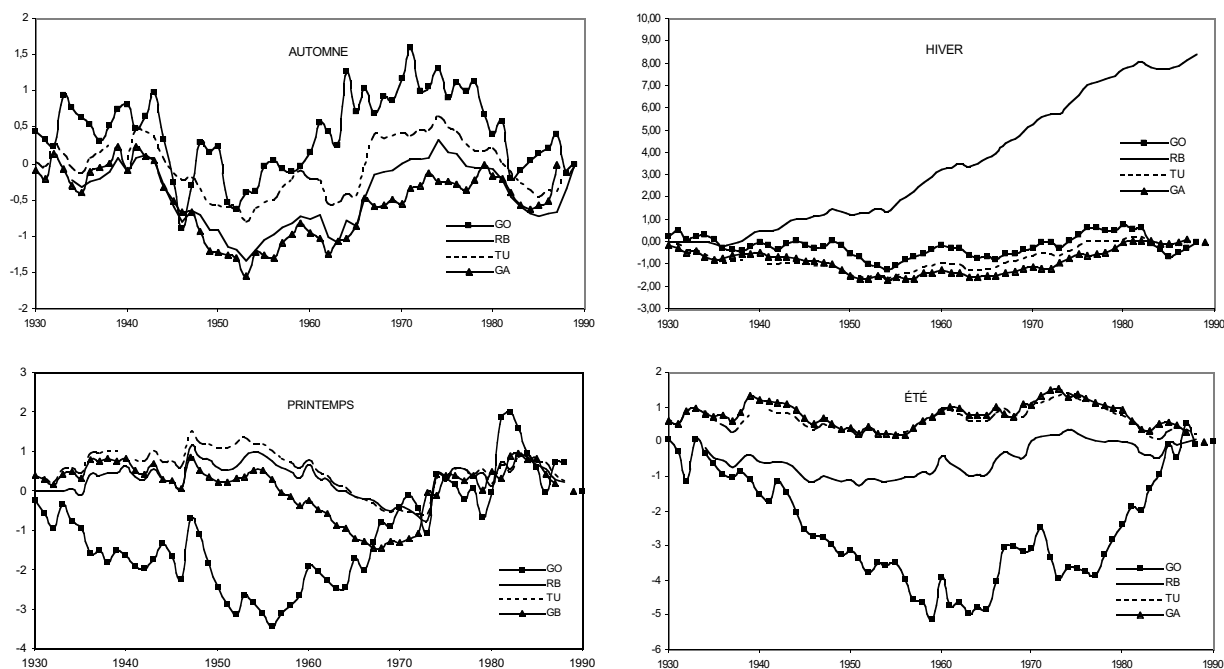


Figure 4. Cumul des écarts à la moyenne des débits moyens saisonniers en aval de quatre barrages sur la rivière Saint-Maurice (1930-1990)

Station	Automne			Hiver			Printemps			Été		
	CV	R ₁	R ₂	CV	R ₁	R ₂	CV	R ₁	R ₂	CV	R ₁	R ₂
Gouin	36.7	1.67	0.89	22.8	1.05	0.55	56.6	3.14	1.61	49.6	2.26	1.32
Rapide Blanc	17.0	0.75	0.44	16.4	0.57	0.37	29.4	1.64	0.59	17.8	0.83	0.42
Tuque	16.7	0.76	0.41	12.9	0.50	0.35	25.6	1.32	0.64	18.5	1.02	0.41
Gabelle	18.8	0.89	0.48	12.8	0.56	0.35	28.2	1.55	0.73	18.8	0.96	0.43

Tableau 3. Valeurs de coefficients de variation (CV en %) et des indices d'amplitude (R₁ et R₂) à l'échelle saisonnière

Station	Débits annuels maximums			Débits annuels minimums		
	CV	R ₁	R ₂	CV	R ₁	R ₂
Gouin	19.4	1.15	0.36	58.7	1.86	1.30
Rapide Blanc	40.5	1.91	1.14	111.1	6.25	4.29
Tuque	30.1	1.59	0.73	40.8	1.60	0.96
Gabelle	32.3	1.99	0.79	32.1	1.25	0.72

Tableau 4. Valeurs de coefficients de variation (CV en %) et des indices d'amplitude (R₁ et R₂) à l'échelle journalière

La différence entre les régimes hydrologiques s'observe surtout en hiver. En effet, en régime d'homogénéisation, on n'observe qu'une seule période humide depuis la construction du barrage alors que dans d'autres régimes, on retrouve la succession habituelle observée durant les autres saisons, c'est-à-dire une succession formée d'une période sèche suivie d'une période humide.

C. Variation inter-annuelle des débits à l'échelle journalière

1. Variabilité inter-annuelle des débits annuels maximums

En ce qui concerne les débits annuels maximums, la variabilité inter-annuelle globale est plus importante en régime d'homogénéisation que dans les deux autres régimes (tableau 4). Contrairement, aux débits annuels et saisonniers, la plus faible variabilité est observée en régime d'inversion. Quant aux amplitudes de fluctuation des débits, elles sont très fortes en régime d'homogénéisation et faibles en régime d'inversion.

La succession des périodes sèches et humides présentées sur la figure 5a révèle une légère différence par rapport à celles observées aux échelles annuelle et saisonnière. En effet, on observe une période humide entre 1930 et le milieu de la décennie 1940. Mais cette période est totalement

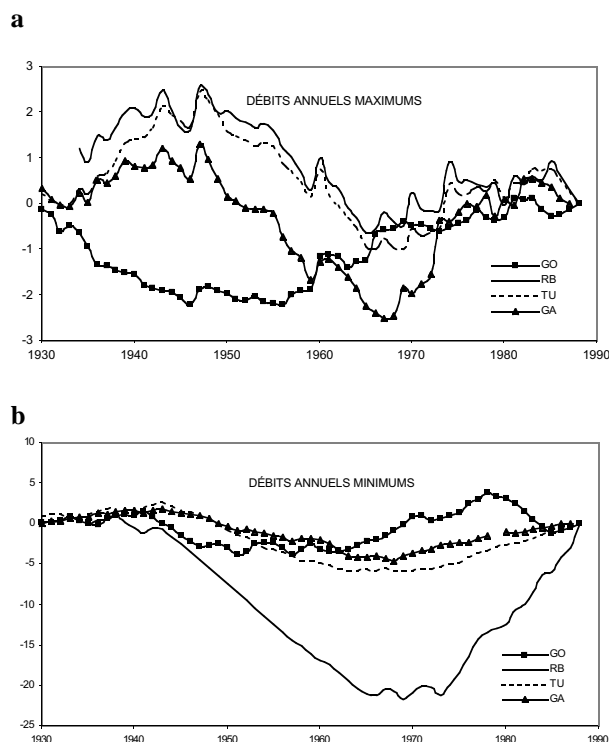


Figure 5. Cumul des écarts à la moyenne des débits annuels maximums (a) et minimums (b) en aval de quatre barrages sur la rivière Saint-Maurice (1930-1990)

absente en régime d'inversion, période pendant laquelle les débits maximums annuels ont diminué.

2. Variabilité inter-annuelle des débits annuels minimums

À l'instar des débits annuels maximums, la plus forte variabilité inter-annuelle des débits est observée en régime d'homogénéisation (111%) et la plus faible en régime du type naturel. Dans le cas de ce dernier régime, la variabilité des débits minimums est comparable à celle des débits maximums. En revanche, en régimes d'homogénéisation et d'inversion, la variabilité des débits minimums est plus forte que celle des débits maximums. Les amplitudes d'oscillation des débits s'inscrivent dans la même tendance.

La figure 5b révèle que la succession des phases humides et sèches est beaucoup mieux marquée en régime d'homogénéisation en raison de la forte variabilité des débits annuels minimums observée dans ce régime hydrologique. La succession de ces phases, bien différente de celle qui affecte les débits maximums annuels, est caractérisée par quatre périodes :

- une période « normale » entre 1930 et le début de la décennie 1940 ;
- une période sèche entre le milieu des décennies 1940 et 1960. La durée de cette période a été plus courte en régime d'homogénéisation que dans les deux autres régimes ;
- une nouvelle période « normale » entre le milieu des décennies 1960 et 1970. Cette période est absente en régime d'inversion ;
- enfin, une période humide depuis. Sa durée a été plus courte en régime d'inversion où elle a été suivie par une nouvelle période sèche vers la fin de la décennie 1970.

D. Comparaison avec les débits mesurés en rivière naturelle

Le tableau 5 présente les valeurs de différents indices pour la rivière Matawin. En les comparant aux valeurs

calculées en aval des barrages, on peut tirer les constatations suivantes :

- les coefficients de variation en aval des barrages sont plus faibles qu'en rivière naturelle à l'échelle annuelle, en hiver, en été et en automne, à l'exception du régime d'inversion. À l'échelle journalière, la différence s'observe surtout avec les régimes d'inversion et d'homogénéisation. Dans le cas du premier régime, la variabilité des débits annuels maximums est moins forte qu'en rivière naturelle alors qu'elle devient plus forte pour les débits annuels minimums. Quant au second régime hydrologique, cette variabilité est plus forte qu'en rivière naturelle pour les deux types de débits ;
- les valeurs de deux indices d'amplitude sont comparables à l'échelle annuelle à l'exception du régime d'inversion. Mais elles deviennent plus faibles en aval des barrages en hiver, en été (excepté le régime d'inversion) et en automne. À l'échelle journalière, elles sont relativement élevées en aval des barrages pour les débits annuels minimums. Quant aux débits annuels maximums, les valeurs varient en fonction de régime hydrologique. En régime d'inversion, les amplitudes sont plus faibles qu'en rivière naturelle alors qu'elles sont plus élevées en régime d'homogénéisation.

En ce qui concerne la variabilité inter-annuelle des débits, la figure 6 révèle que cette variabilité est presque homogène aux échelles annuelles, saisonnières et journalières. Elle est caractérisée par la succession des deux grandes périodes suivantes : une période sèche jusqu'au milieu (échelles annuelle et saisonnière) ou vers la fin (échelles saisonnière et journalière) de la décennie 1960 et une période humide qui s'est achevée au milieu de la décennie 1980. Toutefois, seule la saison d'été a été affectée par une troisième période sèche qui a débuté vers la fin la décennie 1960. Ainsi, la durée de deux autres périodes précédentes est relativement courte par rapport aux autres saisons. À l'échelle annuelle, cette évolution est comparable à celle observée en aval des barrages. À l'échelle saisonnière, on observe des différences en automne (absence de la seconde période sèche observée vers la fin de la décennie 1970), en hiver (différence

Échelle		CV	R ₁	R ₂
Annuelle		17.4	0.76	0.47
Saisonnière	Automne	38.3	1.80	0.95
	Hiver	33.4	1.98	0.72
	Printemps	24.0	1.21	0.53
	Été	41.4	1.76	1.23
Journalière	Maximums	30.0	1.53	0.80
	Minimums	33.9	1.39	0.62

Tableau 5. Valeurs des coefficients de variation (CV en %) et des indices d'amplitude (R₁ et R₂) aux échelles annuelle, saisonnière et journalière à la station de Saint-Michel-des-Saints sur la rivière Matawin

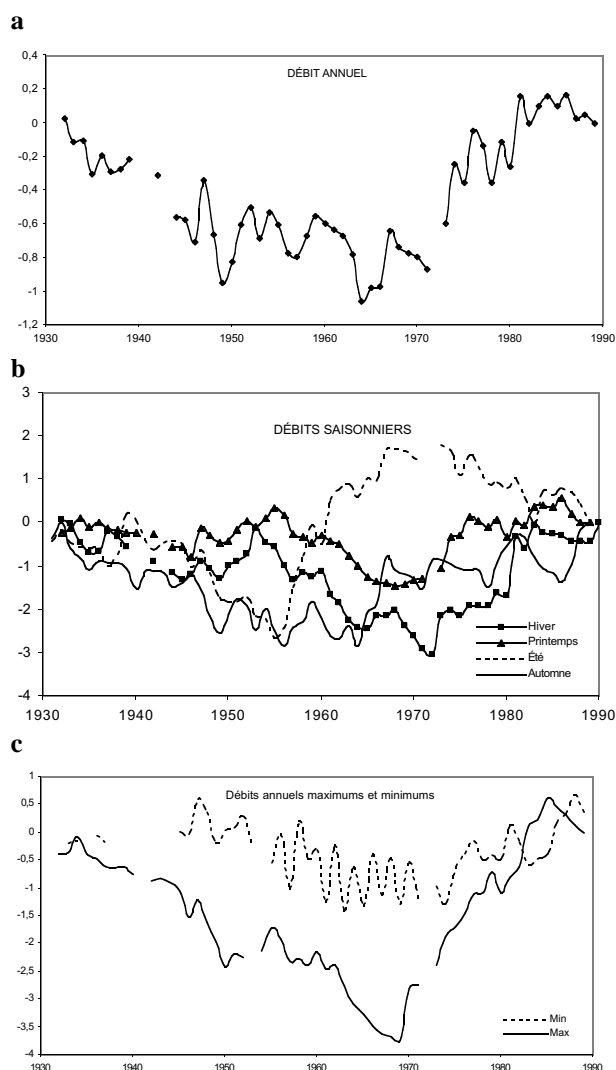


Figure 6. Cumul des écarts à la moyenne des débits moyens annuels (a), saisonniers (b) et journaliers (c) à la station de Saint-Michel-des-Saints (Rivière Matawin)

observée avec le régime d'homogénéisation), au printemps et en été (différence avec le régime d'inversion). À l'échelle journalière, en ce qui concerne les débits maximums, on observe une différence avec les régimes d'homogénéisation et du type naturel (stations de la Tuque et de Gabelle). Quant aux débits annuels minimums, la variabilité des débits est différente de celle observée en régime d'inversion.

III. DISCUSSION ET CONCLUSION

Cette étude révèle que la variabilité inter-annuelle des débits dans un système de complexe de barrages peut être différente, en aval, d'un barrage à un autre aux différentes échelles annuelle, saisonnière et journalière. Cette différence affecte l'intensité et l'amplitude de la variabilité ainsi que la succession et la durée des périodes sèches humides.

En ce qui concerne l'intensité et l'amplitude de la variabilité des débits, nous avons observé qu'en régime

d'inversion, la variabilité des débits est beaucoup plus importante, excepté les débits journaliers, que dans les deux autres régimes. Comme nous l'avons déjà mentionné dans l'introduction, le régime d'inversion est exclusivement associé aux barrages réservoirs qui jouent deux principaux rôles : alimenter les centrales hydroélectriques situés en aval et lutter contre les inondations. Ainsi, au printemps au moment de la fonte des neiges, on remplit le réservoir en stockant de l'eau. En hiver, on lâche l'eau stockée pour alimenter les centrales hydroélectriques. Ce jeu de stockages et destockages de l'eau dépend de plusieurs facteurs : les apports météorologiques, le besoin en énergie hydroélectrique en hiver, le risque des inondations en aval... Tous ces facteurs entraînent une forte variabilité inter-annuelle des débits en aval de ces barrages. C'est ainsi que durant la saison d'hiver, la différence sur la variabilité inter-annuelle des débits est beaucoup marquée entre les barrages.

Si les impacts écologiques des fluctuations des débits aux échelles annuelles et saisonnières ne sont pas encore bien connus, en revanche, ceux liés aux fluctuations brusques des débits journaliers ont été bien documentés. En effet, ces changements brusques de niveau de l'eau ont pour conséquence d'augmenter le stress physiologique des organismes aquatiques à l'origine d'un taux de mortalité particulièrement élevé (Cushman, 1985 ; Petts, 1984). En régime d'homogénéisation, nous avons observé que la variabilité inter-annuelle des débits annuels maximums et minimums est très forte ; ceci peut présupposer une forte variabilité des débits à l'échelle journalière. Par conséquent, le taux de mortalité des organismes aquatiques risque d'être très élevé. En revanche, en régime d'inversion, ce risque serait très atténué en raison des faibles coefficients de variation des débits annuels maximums et minimums. Ces derniers varient peu d'une année à l'autre comparativement aux autres régimes hydrologiques.

Quant à la succession des périodes sèches et humides et leurs durées, il est apparu que cette succession est comparable dans les trois régimes hydrologiques aux échelles annuelle et saisonnière, à l'exception des saisons d'hiver et de printemps. Elle se caractérise par une période sèche entre 1930 et 1970 et une période humide jusqu'au milieu de la décennie 1980. Cette dernière est suivie par une courte période sèche. Le fait le plus important à souligner est l'augmentation des débits en hiver observé en régime d'homogénéisation. Ce type de régime est généralement associé aux réservoirs construits sur les grands bassins versants (> 10 000 km²) qui ne nécessitent pas un stockage important d'eau en hiver (Assani, 2000). En l'absence de données de production d'énergie hydroélectrique, il est difficile d'expliquer cette hausse des débits. Nous pensons qu'elle serait associée à une hausse de la production de cette énergie durant certaines saisons hivernales particulièrement froides. En effet, le barrage-réservoir Rapide Blanc est un réservoir doté aussi d'une centrale hydroélectrique, contrairement au réservoir de Gouin situé en amont. Par conséquent,

en hiver cette centrale est alimentée par les deux réservoirs (Gouin et Rapide Blanc). Lors des hivers rigoureux, on peut ainsi turbiner beaucoup d'eau pour satisfaire une demande anormalement élevée d'énergie hydroélectrique. L'existence de cette centrale hydroélectrique, couplée à un réservoir, pourrait expliquer les fortes fluctuations journalières de niveau d'eau (fortes valeurs de coefficients de variation des débits annuels maximums et minimums) pour de raisons de turbinage. Mais en aval, l'eau lâchée serait progressivement répartie entre les différentes centrales hydroélectriques qui sont dépourvues de réservoirs. Ce qui expliquerait l'absence de la hausse des débits en hiver en aval de ces centrales d'une part, et la variabilité inter-annuelle des débits journaliers relativement faible. Notons que la hausse d'une année à l'autre des débits en hiver a été aussi observée sur le fleuve Rhône en Suisse après la construction de plusieurs barrages sur ses affluents importants (Loizeau et Dominik, 2000).

Enfin, les impacts de barrages sur la variabilité inter-annuelle des débits dépendent du mode de gestion. Selon ce mode de gestion, ces impacts peuvent se traduire soit par une atténuation (régimes d'homogénéisation et du type naturel) ou soit par une amplification (régimes d'inversion et d'homogénéisation) de la variabilité inter-annuelle des débits. Du point de vue écologique, au regard de la forte variabilité inter-annuelle des débits observée en régime d'inversion, on peut donc s'attendre à une variabilité relativement forte dans la dynamique des espèces aquatiques et semi-aquatiques. La diminution de la variabilité inter-annuelle des débits observée en régimes d'homogénéisation et de type naturel peut favoriser notamment l'invasion des espèces exotiques dans les plaines alluviales (Nilsson et Svedmark, 2002).

BIBLIOGRAPHIE

- ASHMORE P. & CHURCH M., 2001. The impact of climate change on rivers and river processes in Canada. Geological Survey Of Canada. Bulletin n° 555, 58 p. + 1 carte.
- ASSANI A.A., 2000. Modélisation des impacts des barrages sur l'hydrologie et la morphologie des cours d'eau au Québec (Canada). I. Impacts des barrages sur les régimes hydrologiques et la variabilité temporelle des débits annuels. Rapport de recherche n° 1, Université de Montréal, 65 p.
- ASSANI A.A., BUFFIN-BÉLANGER T. & ROY A.G., 2002. Analyse d'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., 2004a. Impacts des barrages sur les débits annuels minimums en fonction des régimes hydrologiques artificialisés au Québec (Canada). Soumis au Rev. Sci. Eau (en révision mineure).
- ASSANI A.A., GRAVEL E., BUFFIN-BÉLANGER T. & ROY A.G., 2004a. Classification et caractérisation des régimes hydrologiques des rivières régularisées au Québec (Canada). Application de l'approche écologique. Soumis au Can. Water Res. J.
- ASSANI A.A., STICHELBOU E., ROY A.G. & PETIT F., 2004c. Comparison of impacts of dams on the annual maximum flow characteristics in three artificialised hydrologic regimes in Québec (Canada). Soumis au Rivers Res. Appl.
- ASTRADE L., 1998. La gestion des barrages-réservoirs au Québec : exemples d'enjeux environnementaux. Ann. Géogr., 604, 590-609.
- CUSHMAN R.M., 1985. Review of ecological effects of rapidly varying flows downstream from hydroelectric facilities. N. Amer. J. Fish. Mgmt. 5, 330-339.
- DONEYS E. & DUBOIS L., 1991. Application du modèle d'analyse d'utilisation de l'eau au bassin de la rivière Saint-Maurice. Mémoire déposé au ministère de l'Environnement Canada, 36 p. + annexes.
- ENVIRONNEMENT CANADA 1992. Sommaire chronologique de l'écoulement. Province du Québec. Direction générale des eaux intérieures, Ottawa, 526 p.
- HALEUR G., 2001. Synthèse des connaissances environnementales acquises en milieu nordique de 1970 à 2000. Montréal, Hydro-Québec, 110 p.
- HUDON C., 1997. Impact of water level fluctuation on St-Lawrence River aquatic vegetation. Can. J. Fish. Aquat. Sci. 54, 2853-2865.
- LAFLAMME D., 1995. Qualité des eaux du bassin de la rivière Saint-Maurice, 1979 à 1992. Mémoire déposé au ministère de l'Environnement et de la Faune, province du Québec, Montréal, 87 p. + annexes.
- LOIZEAU J.L. & DOMINIK J., 2000. Evolution of the Upper Rhone River discharge and suspended sediment load during the last 80 years and some implications for lake Geneva. Aquat. Sci., 62, 54-67.
- NILSSON Ch. & SVEDMARK M., 2002. Basic principles and ecological consequences of changing water regimes : riparian plant communities. Env. Mgmt, 30, 468-480.
- PETTS G.E., 1984. Impounded Rivers. Perspective for Ecological Management, Wiley, New York, 326 p.
- POFF F.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.
- 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. A method for assessing hydrologic alterations within ecosystems. Conservation Biology. 10, 1163-1174.

Adresse de l'auteur :

Ali Arkamose ASSANI

Laboratoire d'hydro-climatologie et de Géomorphologie fluviale,

Section de géographie, Université du Québec à Trois-Rivières,

Pavillon Léon-Provencher, 3351, boul. des Forges,

Trois-Rivières (Québec) G9A 5H7.

Ali_Assani@uqtr.ca