

# Classification, caractérisation et facteurs de variabilité spatiale des régimes hydrologiques naturels au Québec (Canada). Approche éco-géographique

## Classification and Characterization of Natural Hydrologic Regimes in Québec (Canada). Factors of Spatial Variability - an Eco-Geographical Approach

A. A. Assani and S. Tardif

Volume 18, Number 2, 2005

URI: <https://id.erudit.org/iderudit/705559ar>

DOI: <https://doi.org/10.7202/705559ar>

[See table of contents](#)

Publisher(s)

Université du Québec - INRS-Eau, Terre et Environnement (INRS-ETE)

ISSN

0992-7158 (print)

1718-8598 (digital)

[Explore this journal](#)

Cite this article

Assani, A. A. & Tardif, S. (2005). Classification, caractérisation et facteurs de variabilité spatiale des régimes hydrologiques naturels au Québec (Canada). Approche éco-géographique. *Revue des sciences de l'eau / Journal of Water Science*, 18(2), 247–266. <https://doi.org/10.7202/705559ar>

### Article abstract

Several classifications of hydrologic regimes have already been proposed in Quebec. However, these classifications are exclusively based upon the magnitude of discharge (annual and monthly discharge, annual maximum and minimum discharge). This hydrologic parameter isn't sufficient to describe the ecological hydrologic regime. Thus, Richter et al. (1996) suggested five fundamental characteristics to describe hydrologic regimes that regulate ecological processes in river ecosystems:

1. The magnitude of the water condition at any given time. It is a measure of the availability or suitability of a habitat. It defines such habitat attributes as wetted area or habitat volume, or the position of the water table relative to wetland or riparian plant rooting zones.
2. The timing of occurrence of particular water conditions can determine whether certain life-cycle requirements can influence the degree of stress or mortality associated with extreme water conditions such as floods or droughts.
3. The frequency of occurrence of specific water conditions such as droughts or floods may be tied to reproduction or mortality events for various species, thereby influencing population dynamics.
4. The duration of time over which a particular life-cycle phase can be completed or the degree to which stressful effects such as inundation or drought can accumulate.
5. The rate of change (range) in water conditions may be related to the stranding of certain organisms along the water's edge, in ponded depressions, or the ability of plant roots to maintain contact with phreatic water supplies.

The application of these characteristics requires a daily discharge time series, but these data are not always available. To overcome this difficulty, we propose eleven new hydrological variables exclusively based upon monthly discharge data. These new variables describe four (magnitude, timing of occurrence, duration of time and the rate of change) of the five characteristics of hydrologic regimes suggested by Richter et al. (1996). The eleven new variables are as follows: seasonal discharge coefficients (%); monthly maximum and minimum discharge coefficients (%); median Julian day of occurrence of maximum monthly discharge; median Julian day of occurrence of monthly minimum discharge; spring and winter seasonal discharge ratios; spring and summer seasonal discharge ratios and monthly maximum and minimum discharge ratios.

We have isolated, using principal component analysis (PCA), three significant principal components after varimax rotation. The first principal component was linked with the magnitude of winter discharge and the timing of monthly maximum and minimum discharge. The second principal component was associated with the magnitude of spring seasonal discharge and the spring and summer seasonal discharge ratio. The third component was linked with the coefficient of immoderation (monthly maximum/minimum discharge ratio) and the magnitude of monthly minimum discharge. The three principal components explain, almost weight for weight, about 83% of the total variance. On the basis of signs of loadings for these three components, 72 rivers were analysed and grouped into eight natural hydrologic regimes that are not geographically contiguous. For example, the first hydrologic regime was characterized by high winter discharge (> 12%), timing of monthly maximum discharge in April, high summer discharge (> 54%), high spring and summer seasonal discharge ratios (> 3.5), high monthly maximum and minimum discharge (> 12) and low monthly minimum discharge (< 3%).

We have also analysed the relation between the six hydrological variables associated with the three principal components and the thirteen environmental factors that can influence the spatial variability of these hydrological variables. The environmental factors were as follows: the drainage area (km<sup>2</sup>); the length of rivers (km); the mean basin slope (%); the forest surface area (%); the swamp and lake surface area (%); the annual precipitation; the seasonal winter (October to March) precipitation (mm); the number of rainy days in the winter; the mean annual precipitation (°C); the mean winter seasonal temperature (°C); the mean summer seasonal temperature (°C) and the number of winter days with temperature > 0°C. The correlation analysis revealed the following mean results:

- The winter seasonal discharge was influenced by the forest surface area (negative correlation) and both annual and seasonal temperature (positive correlation).
- The timing of the monthly maximum discharge was influenced by the length of rivers (positive correlation), the forest and lake surface area (positive correlation) and both annual and seasonal temperatures (negative correlation).
- The spring seasonal discharge was influenced by the length of rivers (negative correlation), the mean basin slope (positive correlation), the forest surface area (positive correlation), the lake surface area (negative correlation), the annual precipitation (negative correlation) and the winter and summer seasonal temperature (negative correlation).
- The spring and summer seasonal discharge ratio was negatively correlated with the drainage basin, the length of rivers, the mean basin drainage, the annual precipitation and the number of winter days with temperature > 0°C, but was positively correlated with annual and seasonal temperature.
- The monthly maximum and minimum discharge was positively correlated with forest surface area but negatively correlated with lake surface area, annual and seasonal temperature.
- The monthly minimum discharge was negatively correlated with forest surface area but positively correlated with annual and seasonal discharge.

From this correlation analysis, it appeared that temperature was the only factor that influenced the spatial variability of all hydrological variables, followed by forest and lake surface area. The influence of precipitation on this spatial variability was very weak.

# **Classification, caractérisation et facteurs de variabilité spatiale des régimes hydrologiques naturels au Québec (Canada). Approche éco-géographique**

Classification and characterization of natural hydrologic regimes in Québec (Canada). Factors of spatial variability – an eco-geographical approach

A.A. ASSANI<sup>1</sup>, S. TARDIF<sup>1</sup>

---

Reçu le 26 novembre 2003, accepté le 3 septembre 2004\*.

## **SUMMARY**

Several classifications of hydrologic regimes have already been proposed in Quebec. However, these classifications are exclusively based upon the magnitude of discharge (annual and monthly discharge, annual maximum and minimum discharge). This hydrologic parameter isn't sufficient to describe the ecological hydrologic regime. Thus, RICHTER *et al.* (1996) suggested five fundamental characteristics to describe hydrologic regimes that regulate ecological processes in river ecosystems:

- 1) The magnitude of the water condition at any given time. It is a measure of the availability or suitability of a habitat. It defines such habitat attributes as wetted area or habitat volume, or the position of the water table relative to wetland or riparian plant rooting zones.
- 2) The timing of occurrence of particular water conditions can determine whether certain life-cycle requirements can influence the degree of stress or mortality associated with extreme water conditions such as flood or droughts.
- 3) The frequency of occurrence of specific water conditions such as droughts or floods may be tied to reproduction or mortality events for various species, thereby influencing population dynamics.
- 4) The duration of time over which a particular life-cycle phase can be completed or the degree to which stressful effects such as inundation or drought can accumulate.

---

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.

\* Correspondance : Ali A. ASSANI, Professeur – 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 ; email : Ali\_Assani@uqtr.ca

\*\* Les commentaires seront reçus jusqu'au 30 avril 2006.

5) The rate of change (range) in water conditions may be related to the stranding of certain organisms along the water's edge, in ponded depressions, or the ability of plant roots to maintain contact with phreatic water supplies.

The application of these characteristics requires a daily discharge time series, but these data are not always available. To overcome this difficulty, we propose eleven new hydrological variables exclusively based upon monthly discharge data. These new variables describe four (magnitude, timing of occurrence, duration of time and the rate of change) of the five characteristics of hydrologic regimes suggested by RICHTER *et al.* (1996). The eleven new variables are as follows: seasonal discharge coefficients (%); monthly maximum and minimum discharge coefficients (%); median Julian day of occurrence of maximum monthly discharge; median Julian day of occurrence of monthly minimum discharge; spring and winter seasonal discharge ratios; spring and summer seasonal discharge ratios and monthly maximum and minimum discharge ratios.

We have isolated, using principal component analysis (PCA), three significant principal components after varimax rotation. The first principal component was linked with the magnitude of winter discharge and the timing of monthly maximum and minimum discharge. The second principal component was associated with the magnitude of spring seasonal discharge and the spring and summer seasonal discharge ratio. The third component was linked with the coefficient of immoderation (monthly maximum/minimum discharge ratio) and the magnitude of monthly minimum discharge. The three principal components explain, almost weight for weight, about 83% of the total variance. On the basis of signs of loadings for these three components, 72 rivers were analysed and grouped into eight natural hydrologic regimes that are not geographically contiguous. For example, the first hydrologic regime was characterized by high winter discharge (> 12%), timing of monthly maximum discharge in April, high summer discharge (> 54%), high spring and summer seasonal discharge ratios (> 3.5), high monthly maximum and minimum discharge (> 12) and low monthly minimum discharge (< 3%).

We have also analysed the relation between the six hydrological variables associated with the three principal components and the thirteen environmental factors that can influence the spatial variability of these hydrological variables. The environmental factors were as follows: the drainage area (km<sup>2</sup>); the length of rivers (km); the mean basin slope (%); the forest surface area (%); the swamp and lake surface area (%); the annual precipitation; the seasonal winter (October to March) precipitation (mm); the number of rainy days in the winter; the mean annual temperature (°C); the mean winter seasonal temperature (°C); the mean summer seasonal temperature (°C) and the number of winter days with temperature > 0°C. The correlation analysis revealed the following mean results:

- The winter seasonal discharge was influenced by the forest surface area (negative correlation) and both annual and seasonal temperature (positive correlation).
- The timing of the monthly maximum discharge was influenced by the length of rivers (positive correlation), the forest and lake surface area (positive correlation) and both annual and seasonal temperatures (negative correlation).
- The spring seasonal discharge was influenced by the length of rivers (negative correlation), the mean basin slope (positive correlation), the forest surface area (positive correlation), the lake surface area (negative correlation), the annual precipitation (negative correlation) and the winter and summer seasonal temperature (negative correlation).

- The spring and summer seasonal discharge ratio was negatively correlated with the drainage basin, the length of rivers, the mean basin drainage, the annual precipitation and the number of winter days with temperature  $>0^{\circ}\text{C}$ , but was positively correlated with annual and seasonal temperature.
- The monthly maximum and minimum discharge was positively correlated with forest surface area but negatively correlated with lake surface area, annual and seasonal temperature.
- The monthly minimum discharge was negatively correlated with forest surface area but positively correlated with annual and seasonal discharge.

From this correlation analysis, it appeared that temperature was the only factor that influenced the spatial variability of all hydrological variables, followed by forest and lake surface area. The influence of precipitation on this spatial variability was very weak.

**Keywords:** *natural hydrologic regimes, characteristics of discharge, seasonal and monthly discharge, environmental factors, principal components analysis, correlation analysis, Quebec*

## RÉSUMÉ

Nous proposons onze nouvelles variables pour classifier, caractériser et analyser les facteurs de variabilité spatiale des régimes hydrologiques des affluents du fleuve Saint-Laurent au Québec. Ces variables se rapportent exclusivement aux débits mensuels et utilisent quatre (volume d'écoulement, période d'occurrence, durée et amplitude de variabilité intra-annuelle des débits) des cinq critères proposés par RICHTER *et al.* (1996) pour caractériser écologiquement les régimes hydrologiques.

L'analyse en composantes principales de ces onze variables hydrologiques a permis d'extraire trois composantes principales significatives après rotation d'axes par la méthode varimax. La première composante principale est associée aux débits saisonniers hivernaux et aux mois d'occurrence des débits mensuels maximums et minimums. La seconde composante est associée aux débits saisonniers printaniers et au rapport entre ces débits et les débits estivaux. Enfin, la dernière composante est associée au coefficient d'immodération (rapport entre les débits mensuels maximums et minimums) et aux débits mensuels minimums. La variance totale expliquée par ces trois composantes, à parts presque égales, est d'environ 83 %. Sur la base des signes de notes factorielles sur les trois composantes principales, les 72 rivières analysées ont été groupées en huit régimes hydrologiques naturels non contigus dans l'espace. Les caractéristiques de chaque régime hydrologique ont été clairement définies.

Quant aux facteurs environnementaux qui influencent la variabilité spatiale des régimes hydrologiques, il est apparu que les six variables hydrologiques associées aux trois composantes principales sont principalement influencées par la température de l'air ainsi que la superficie couverte par les forêts, les lacs et les marais.

**Mots-clés :** *régimes hydrologiques naturels, caractéristiques des débits, débits saisonniers et mensuels, facteurs environnementaux, analyse en composantes principales, analyse de corrélation, Saint-Laurent, Québec.*

## 1 – INTRODUCTION

La morphologie des cours d'eau ainsi que le transport et le calibre des sédiments dépendent des régimes hydrologiques (CHURCH, 1995; HESSE, 1995; PETTS, 1995). Du point de vue écologique, ce facteur joue aussi un rôle majeur sur la composition biotique, la structure et le fonctionnement des écosystèmes aquatiques, humides et ripariens (POFF *et al.*, 1997; POWER *et al.*, 1996; RESH *et al.*, 1988, RICHTER *et al.*, 1996). Ainsi, de nombreux travaux sont consacrés à la caractérisation de la variabilité intra et inter-annuelle des régimes hydrologiques de cours d'eau. Cependant, depuis fort longtemps et à la suite des travaux de PARDÉ (1955), cette caractérisation a été fondée presque exclusivement sur un seul paramètre, à savoir le volume d'écoulement (annuel, saisonnier, mensuel ou journalier). Cette approche a été jugée très simpliste et incomplète sur le plan écologique (POFF, 1996; POFF et WARD, 1989; RICHTER *et al.*, 1996, 1997). Selon RICHTER *et al.* (1996), du point de vue écologique, les régimes hydrologiques de rivières peuvent être définis par cinq caractéristiques suivantes :

- Le volume d'écoulement. Elle permet de déterminer le volume d'habitat disponible pour les espèces aquatiques et semi-aquatiques.
- La période d'occurrence des débits. Cette caractéristique permet de déterminer si certains besoins pour le cycle vital des espèces peuvent être satisfaits. Elle peut aussi influencer le degré de stress ou de mortalité associé aux conditions extrêmes telles que les crues ou la sécheresse.
- La fréquence d'occurrence des débits. Ce paramètre a un impact sur la dynamique de populations en influençant la reproduction et la mortalité de nombreuses espèces.
- La durée des débits détermine si une phase particulière du cycle vital peut être complétée ou si le degré de stress provoqué par les événements extrêmes comme les inondations ou la sécheresse peut durer longtemps ou pas.
- Le taux de variation ou de changement (amplitude) des débits. Cette caractéristique est un indicateur de la variabilité du volume d'habitat disponible pour le déplacement et l'alimentation de nombreuses espèces aquatiques.

Pour caractériser les régimes hydrologiques en fonction de ces cinq paramètres, RICHTER *et al.* (1996) ont proposé 32 variables hydrologiques: douze pour le volume d'écoulement, dix pour la durée, quatre respectivement pour la fréquence et le taux de changement et, enfin, deux pour la période d'occurrence des débits. Ces variables sont connues sous le nom des Indicateurs d'Altération Hydrologique (Indicators of Hydrologic Alteration, IHA) ou IAH du fait qu'elles permettent aussi de détecter et de quantifier les impacts d'origine anthropique sur les régimes hydrologiques. Ces variables sont de plus en plus utilisées pour caractériser les régimes hydrologiques naturels ou artificialisés (CLAUSSEN et BIGGS, 2000; GALAT et LIPKIN, 2000; POFF *et al.*, 1997; RICHTER *et al.*, 1996; 1997). L'utilisation de ces 32 variables rompt ainsi avec l'approche traditionnelle fondée sur un seul paramètre hydrologique, à savoir le volume d'écoulement.

Cependant, sur les 32 variables IAH, 12 seulement concernent les débits mensuels. De plus, toutes ces 12 variables (moyennes mensuelles de débits) se rapportent exclusivement au volume d'écoulement. Il s'ensuit que l'application de la méthode de RICHTER *et al.* (1996) pour caractériser les régimes hydrologiques naturels et aménagés requiert l'utilisation des données journalières de débits, ce qui constitue parfois une contrainte insurmontable lorsqu'on n'en dispose pas. Au Québec, les données journalières de débits naturels mesurées au niveau des barrages par exemple ne peuvent être divulguées au public pour des raisons de concurrence commerciale. D'autre part, dans les annuaires hydrologiques, seules les données mensuelles des débits sont souvent publiées. En l'absence de données des débits journaliers, l'utilisation de ces 32 variables IAH pour caractériser les régimes naturels et régularisés au Québec devient ainsi impossible. Pour contourner cette difficulté, nous proposons de nouvelles variables fondées exclusivement sur les débits mensuels et saisonniers afin de caractériser les régimes hydrologiques naturels au Québec. Ces variables tiennent compte de plusieurs paramètres proposés par RICHTER *et al.* (1996). D'autre part, un régime hydrologique étant généralement défini comme le comportement saisonnier moyen de l'écoulement (KRASOVKAIA et SÆLTHUN, 1997), ce sont les débits mensuels qui sont souvent utilisés pour caractériser ce comportement (HAINES *et al.*, 1988). À cette fin, l'utilisation uniquement des débits mensuels et saisonniers peut donc se justifier. À la lumière de ces considérations, cet article poursuit les deux objectifs suivants :

- classifier et caractériser les régimes hydrologiques naturels dans le bassin versant du fleuve Saint-Laurent au Québec au moyen de nouvelles variables hydrologiques fondées exclusivement sur les débits mensuels et saisonniers. Ces variables tiennent compte de plusieurs paramètres proposés par RICHTER *et al.* (1996) pour caractériser écologiquement les régimes hydrologiques, ce qui constitue une approche différente de celle utilisée jusqu'à présent;
- déterminer les facteurs environnementaux qui influencent la variabilité spatiale des variables des débits qui caractérisent les régimes hydrologiques dans le bassin versant du fleuve Saint-Laurent.

L'approche que nous proposons présente trois intérêts majeurs :

- en écologie aquatique, elle permet de regrouper les rivières en tenant compte de toutes les caractéristiques des débits qui définissent les régimes hydrologiques. En effet, comme l'avaient démontré RICHTER *et al.* (1996), chaque caractéristique des débits contribue au maintien de l'intégrité et de la biodiversité des écosystèmes fluviaux. Tout changement de l'une des caractéristiques peut entraîner la rupture de l'équilibre naturel de ces écosystèmes. C'est ainsi qu'une différence des dates d'occurrence des débits minimums par exemple peut modifier la dynamique et la composition des espèces aquatiques et semi-aquatiques de deux cours d'eau sans pour autant que leurs débits soient significativement différents. Or, cet aspect n'est jamais pris en considération dans les travaux de régionalisation des régimes hydrologiques;
- des points de vue hydrologique et géographique, la classification des régimes hydrologiques proposée est fondée sur un choix rigoureux et objectif des variables hydrologiques qui caractérisent la variabilité spatiale des débits mensuels et saisonniers au Québec;

- enfin, sur le plan de la gestion et de l'aménagement des bassins versants, notre approche permet de déterminer de manière précise les facteurs environnementaux qui influencent la variabilité spatiale des caractéristiques des débits. Il devient ainsi possible de déterminer les caractéristiques des débits mensuels ou saisonniers les plus sensibles à la déforestation ou à un changement des régimes thermiques par exemple. Cet apport n'est donc pas négligeable dans le contexte actuel de réchauffement climatique et de la pression anthropique de plus en plus accrue sur les formations forestières.

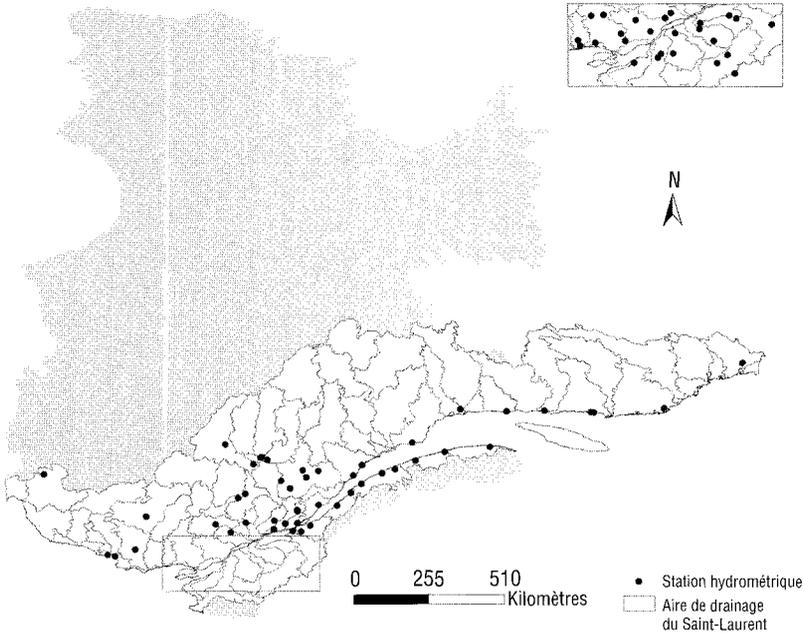
Au Québec, la régionalisation des débits a déjà fait l'objet de nombreux travaux. Mais elle repose jusqu'à présent sur l'utilisation d'un seul paramètre, le volume d'écoulement (ANCTIL *et al.*, 1998; 2000; BELZILE *et al.*, 1997; DAVIAU *et al.*, 2000; DESFORGES et TREMBLAY, 1974; GINGRAS et ADAMOWSKI, 1993; GINGRAS *et al.*, 1994; GREHYS, 1996). Cette approche ne permet ni de caractériser écologiquement les régimes hydrologiques ni de mettre en évidence les facteurs qui influencent leur variabilité spatiale. Elle vise surtout l'estimation des débits. Cet objectif est très éloigné de ceux poursuivis par cette étude.

## 2 – DONNÉES ET MÉTHODES D'ANALYSE

### 2.1 Source des données et choix de stations analysées

Le réseau hydrographique du Québec est divisé en trois grands bassins versants (figure 1): le bassin de Saint-Laurent (673 000 km<sup>2</sup>) et les bassins des Baies d'Ungava (518 000 km<sup>2</sup>) et d'Hudson (492 000 km<sup>2</sup>). Dans le cadre de cette étude, nous nous limiterons seulement au premier bassin versant puisqu'il n'existe pas assez de stations de jaugeage des débits dans les deux autres bassins versants. De plus, la plupart des séries hydrologiques sont incomplètes et/ou de très courte durée (moins de 10 ans). Du point de vue lithologique, le bassin de Saint-Laurent 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 faible étendue, s'étendent le long des 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). Il y est précisé si les valeurs des débits hivernaux ont été corrigées en tenant compte de l'effet de glace. Sont aussi publiées les données sur la surface du bassin versant au droit de la station de mesure, les coordonnées géographiques (latitude et longitude) et le nom du gestionnaire de la station ainsi que l'état (naturel ou régularisé) du cours d'eau. Il convient de préciser que le mot « régularisé » a été utilisé dans son sens le plus large, c'est-à-dire toute modification du courant d'eau d'origine anthropique. Il peut ainsi s'agir d'un simple seuil déversant ou d'un endiguement des berges destiné à contenir l'eau dans le chenal principal. Dans le cadre de cette étude, nous avons retenu toutes les stations de rivières dont l'écoulement est naturel ou très faiblement régularisé et pour lesquelles les mesures des débits s'étendaient sur au moins 20 ans. Au total,

nous avons analysé 72 rivières (figure 1): 31 en rive sud et 41 en rive nord. Sur chaque rivière, nous avons choisi seulement une seule station correspondant à la plus grande superficie du bassin versant. Nous avons ainsi éliminé l'effet d'autocorrélation spatiale dans le calcul des coefficients de corrélation entre les différentes variables.



**Figure 1** Localisation des stations de jaugeage des débits. Les rectangles noirs sont des stations strictement naturelles et les rectangles blancs, les stations très faiblement régularisées. Les chiffres de stations renvoient à notre base de données.

*The location of stations. Black rectangles represent pristine stations and white rectangles represent stations with minimal perturbation.*

## 2.2 Définition des variables et méthodes d'analyse de données

Nous avons analysé 11 variables hydrologiques qui peuvent être groupées en quatre caractéristiques proposées par RICHTER *et al.* (1996). Elles sont définies au tableau 1.

- Les variables relatives aux volumes d'écoulement mensuels et saisonniers: JM, AJ, JS, OD, MAM et MIM. Afin de réduire la dimension de la matrice des données à analyser, nous avons donc préféré grouper les mois en saisons. De plus, ce regroupement permet une meilleure interprétation des résultats d'analyse en composantes principales comme nous le verrons plus tard. Par ailleurs, ces variables sont exprimées en

pourcentage par rapport au débit annuel total. Cette transformation permet une meilleure comparaison des données de bassins de différentes tailles d'une part, et d'éliminer l'influence de la taille des bassins versants sur les coefficients de corrélation et les notes factorielles, d'autre part.

- Les variables qui caractérisent la période d'occurrence des débits mensuels maximums et minimums : DMAM et DMIM. Pour déterminer la période d'occurrence du débit mensuel maximum ou minimum, nous avons considéré le jour julien médian du mois correspondant à la période d'occurrence de ce débit. Par exemple, si le débit moyen mensuel minimum a été observé au mois de janvier au cours d'une année hydrologique (d'octobre à septembre), le jour julien de la période d'occurrence de ce débit correspond donc au 15 janvier. Ensuite, nous avons calculé la moyenne des jours juliens médians sur toute la période d'observation. Il en est de même pour les débits moyens mensuels maximums.
- Les variables qui caractérisent l'amplitude de la variabilité (taux de changement) inter-saisonnière et inter-mensuelle des débits à l'échelle annuelle : AJ/JM, AJ/JS et MAM/MIM. Ces trois variables définissent le caractère contrasté des régimes hydrologiques. Plus ces variables sont élevées, plus la variabilité des débits à l'échelle annuelle est relativement forte.
- La durée des débits. Elle correspond, selon le cas, au mois ou à la saison. Mais elle n'est pas définie par une variable hydrologique spécifique. Par conséquent, elle ne sera pas prise en compte par l'analyse statistique.

Les données mensuelles ne permettent pas de déterminer la fréquence, un dernier critère pour caractériser écologiquement les régimes hydrologiques. Quoiqu'il en soit, à notre avis, les variables retenues suffisent amplement à caractériser écologiquement le comportement saisonnier moyen des débits d'une rivière.

Pour classifier les régimes hydrologiques naturels, nous avons analysé les variables au moyen de la méthode de l'analyse en composantes principales (ACP) couramment utilisée dans la littérature scientifique (CLAUSSEN et BIGGS, 2000; LINS, 1985; OLDEN et POFF, 2003). Le choix de cette méthode se justifie par le fait qu'elle permet de classer et de caractériser les rivières en différents régimes hydrologiques. De plus, elle peut contribuer à déterminer les facteurs qui influencent leur variabilité spatiale. En analyse de composantes principales, la classification des rivières en régimes éco-hydrologiques est généralement fondée sur les deux critères suivants :

- les signes des notes factorielles sur les composantes principales significatives. C'est le critère principal et objectif couramment utilisé. Il n'est pas influencé par le jugement personnel ;
- les valeurs de ces notes factorielles sur les mêmes composantes principales. Ce critère est généralement considéré comme secondaire et souvent subjectif car le regroupement des rivières en fonction des valeurs des notes factorielles peut être influencé par le jugement personnel. En raison de ce caractère subjectif, nous ne l'utiliserons pas pour regrouper les rivières en régimes hydrologiques homogènes.

Sur le plan statistique, rappelons qu'il n'est pas nécessaire d'effectuer une rotation d'axes en analyse en composantes principales (DAGNELIE, 1986). Toutefois, pour des raisons d'interprétation, cette rotation d'axes peut se révéler incontournable. Ce fut le cas dans cette étude. En effet, la rotation d'axes, effec-

tuée par la méthode varimax, a rendu très aisée l'interprétation des variables hydrologiques. Rappelons encore aussi que le choix de la méthode de rotation n'a aucun impact sur le résultat final. Après cette rotation orthogonale, les composantes principales dont les valeurs propres étaient plus grandes ou égales à 1 – critère le plus couramment utilisé – étaient considérées comme significatives.

Pour déterminer les facteurs physiographiques et climatiques qui influencent la variabilité spatiale des variables hydrologiques, nous avons corrélié les variables hydrologiques qui définissent les composantes principales à ces facteurs. Ces derniers sont consignés dans le tableau 2. Leurs valeurs ont été tirées de BELZILE *et al.* (1997) et d'ENVIRONNEMENT CANADA (1991). Précisons que dans le cas des facteurs climatiques, nous avons utilisé les données des stations climatiques les plus proches de stations hydrologiques. Toutefois, pour les grands bassins versants dotés de nombreuses stations climatiques, nous avons appliqué la méthode de Thiessen pour estimer la valeur moyenne de la variable climatique considérée sur l'ensemble du bassin versant. Mais dans tous les cas ces valeurs étaient toujours comparables à celles mesurées aux stations climatiques les plus proches. Ce qui justifiait l'utilisation de ces dernières.

**Tableau 1** Variables hydrologiques utilisées pour caractériser les régimes hydrologiques naturels.

Sigle	Signification	Mode de calcul
JM	Coefficient saisonnier des débits hivernaux	Le rapport entre la moyenne de la somme des débits moyens mensuels de janvier à mars et le débit annuel total
AJ	Coefficient saisonnier des débits printaniers	Le rapport entre la moyenne de la somme des débits moyens mensuels d'avril à juin et le débit annuel total
JS	Coefficient saisonnier des débits estivaux	Le rapport entre la moyenne de la somme des débits moyens mensuels de juillet à septembre et le débit annuel total
OD	Coefficients saisonniers des débits automnaux	Le rapport entre la moyenne de la somme des débits moyens mensuels d'octobre à décembre et le débit annuel total
AJ/JM	Rapport entre les débits printaniers et les débits hivernaux	Quotient de AJ et JM
AJ/JS	Rapport entre les débits printaniers et les débits estivaux	Quotient de AJ et JM
MAM	Coefficient mensuel du débit moyen mensuel maximum	Le rapport entre le débit mensuel maximum et le débit annuel total
MIM	Coefficient mensuel du débit moyen mensuel minimum	Le rapport entre le débit mensuel minimum et le débit annuel total
MAM/MIM	Coefficient d'immodération mensuel	Le rapport entre les débits mensuels maximums et minimums
DMAM	Jour julien moyen du débit mensuel maximum	La moyenne des jours juliens correspondant à la date médiane du débit moyen mensuel maximum
DMIM	Jour julien moyen du débit mensuel minimum	La moyenne des jours juliens correspondant à la date médiane du débit moyen mensuel minimum

NB. Tous les coefficients sont exprimés en %.

**Tableau 2** Facteurs explicatifs de la variabilité spatiale des caractéristiques des débits.

Caractéristiques	Code	Nom de la variable	Unité
Physiographiques	B1	Superficie du bassin versant	km <sup>2</sup>
	B2	Longueur totale du cours d'eau	Km
	B3	Pente moyenne du cours d'eau	m/km
Affectation des sols et végétation	A1	Superficie des forêts	%
	A2	Superficies des lacs et marais	%
Précipitations	P1	Totaux annuels	Mm
	P2	Totaux saisonniers (octobre-mars)	mm
	P3	Nombre de jours pluvieux (octobre-mars)	
Température	T1	Moyenne annuelle	(°C)
	T2	Moyenne saisonnière (octobre-mars)	(°C)
	T3	Moyenne saisonnière (avril-juin)	(°C)
	T4	Moyenne saisonnière (juillet-septembre)	(°C)
	T5	Nombre de jours avec T > 0°C (octobre à mars)	

### 3 – RÉSULTATS

#### 3.1 Interprétation des résultats de l'analyse en composantes principales

Le tableau 3a présente les coefficients de corrélation entre les variables analysées. Le but de cette analyse est de vérifier le caractère redondant des ces variables. En effet, OLDEN et POFF (2003) ont montré que la plupart de variables hydrologiques utilisées pour caractériser les régimes hydrologiques sont souvent très redondantes et apportent ainsi peu d'informations sur la variabilité spatiale des débits. Il ressort de ce tableau que l'ensemble des valeurs de coefficients de corrélation est relativement faible. En effet, la valeur la plus élevée n'excède pas 0,85 (en valeur absolue). Plus de 60 % des coefficients de corrélation sont inférieurs à 0,50. Il s'ensuit que les variables analysées ne sont pas fortement corrélées entre elles. Ce qui réduit significativement la redondance de l'information et justifie du même coup la pertinence dans le choix de variables pour caractériser les régimes hydrologiques.

Dans le tableau 3b sont consignées les valeurs de saturations des variables avant et après la rotation d'axes par la méthode varimax. Seules les composantes principales dont les valeurs propres étaient plus grandes ou égales à 1 ont été considérées comme significatives (BEGUIN, 1979) et ont été soumises à la rotation orthogonale. Seulement les trois premières composantes remplissent cette condition. On peut constater que l'interprétation des composantes, en particulier la troisième, devient plus aisée après la rotation d'axes. D'autre part, cette opération a modifié aussi les valeurs et les signes des saturations sur les composantes principales. Il ressort de ce tableau que ce sont les variables JM (saturation positive), DMAM (saturation négative) et DMIM (saturation positive) qui présentent les valeurs de saturation les plus élevées sur la première composante principale. Ces variables représentent respectivement le volume d'écoulement hivernal (JM) ainsi que les mois d'occurrence des débits

mensuels maximums (DMAM) et minimums (DMIM). Quant à la seconde composante, elle est associée au volume d'écoulement printanier (AJ) et au rapport entre celui-ci et les débits estivaux (AJ/JS). En effet, ces deux variables présentent les saturations les plus élevées pour cette composante. Enfin, la dernière composante principale est fortement associée au coefficient d'immodération (MAM/MIM), indicateur de l'amplitude de variabilité inter-mensuelle des débits et au volume d'écoulement mensuel minimum (MIM).

Quant aux variances expliquées par les composantes principales, il importe de noter qu'après rotation des axes, elles deviennent presque égales pour les trois composantes principales, ce qui souligne l'importance des variables associées à ces composantes dans la différenciation spatiale des régimes hydrologiques au Québec. La variance totale expliquée par les trois composantes principales atteint environ 83 %.

En conclusion, les trois caractéristiques des débits sont bien représentées par les trois composantes principales : la période d'occurrence par la première composante principale, la variabilité des débits par les deux dernières composantes et, enfin, le volume d'écoulement par les trois.

**Tableau 3a** Matrice de corrélation calculées entre les variables hydrologiques analysées.

	JM	AJ	JS	OD	AJ/JM	AJ/JS	MAM	MIM	MAM/MIM	DMAM	DMIM
JM	1										
AJ	<b>-0,407</b>	1									
JS	<b>-0,559</b>	0,007	1								
OD	0,184	-0,051	<b>0,303</b>	1							
AJ/JM	<b>-0,842</b>	<b>0,614</b>	<b>0,417</b>	-0,148	1						
AJ/JS	<b>0,279</b>	<b>0,538</b>	<b>-0,757</b>	-0,233	-0,004	1					
MAM	-0,155	<b>0,736</b>	-0,110	-0,123	<b>0,527</b>	<b>0,511</b>	1				
MIM	<b>0,523</b>	-0,059	-0,220	0,186	<b>-0,637</b>	0,064	-0,233	1			
MAM/MIM	<b>-0,435</b>	<b>0,542</b>	0,091	-0,149	<b>0,800</b>	<b>0,287</b>	<b>0,748</b>	-0,695	1		
DMAM	<b>-0,513</b>	<b>0,544</b>	<b>0,598</b>	<b>0,391</b>	<b>0,538</b>	-0,144	<b>0,265</b>	-0,116	<b>0,293</b>	1	
DMIM	<b>0,609</b>	-0,224	<b>-0,352</b>	-0,033	<b>-0,398</b>	<b>0,275</b>	0,005	0,195	-0,072	<b>-0,435</b>	1

Les coefficients de corrélation significatifs au seuil de 5 % sont soulignés en gras.

**Tableau 3b** Saturations de variables sur les trois premières composantes principales (CP) avant et après rotation orthogonale d'axes par la méthode varimax.

Variables	Avant rotation d'axes			Après rotation d'axes		
	CPI	CPII	CPIII	CPI	CPII	CPIII
JM	<b>-0,860</b>	0,381	0,196	<b>0,863</b>	-0,099	-0,411
AJ	0,752	0,474	-0,406	-0,396	<b>0,844</b>	0,293
JS	0,339	<b>-0,845</b>	0,112	-0,656	-0,607	0,210
OD	-0,411	-0,588	0,342	0,083	-0,782	-0,116
AJ/JM	<b>0,961</b>	-0,073	0,089	-0,599	0,241	0,722
AJ/JS	0,053	<b>0,908</b>	-0,133	0,436	<b>0,807</b>	0,055
MAM	0,614	0,626	0,156	0,067	0,641	0,615
MIM	-0,726	0,064	-0,568	0,203	0,070	<b>-0,899</b>
MAM/MIM	<b>0,805</b>	0,307	0,450	-0,092	0,301	<b>0,916</b>
DMAM	0,607	-0,544	-0,233	<b>-0,819</b>	-0,103	0,189
DMIM	-0,484	0,449	0,477	<b>0,811</b>	-0,048	0,058
Variance expliquée	42,5%	29,5%	10,8%	29,7%	26,7%	26,4%
Variance cumulée	42,5%	72%	82,8%	29,7%	56,4%	82,8%

### 3.2 Classification et caractérisation objectives des régimes hydrologiques naturels au Québec

L'objectivité dans le regroupement des rivières en régimes hydrologiques ou en régions hydrologiques homogènes reste toujours un défi difficile à relever dans les travaux de régionalisation. C'est ainsi que malgré l'utilisation des méthodes statistiques rigoureuses en régionalisation des débits extrêmes, ce regroupement reste encore très subjectif en raison du rejet de certaines rivières lors du processus de régionalisation. À ce propos, ANCTIL *et al.* (1998) notent que « le rejet de stations lors d'un processus de régionalisation n'est pas souhaitable puisque l'on fait alors la preuve que la régionalisation obtenue ne s'appliquera pas à tous les cours d'eau d'une même région pourtant dite homogène. Ce phénomène semble toutefois incontournable ». Pour éviter ce rejet et éliminer par le fait même toute subjectivité lors du processus de regroupement, nous avons choisi de regrouper les rivières en fonction des signes de leurs notes factorielles sur les composantes principales comme nous l'avons déjà mentionné. Ce critère nous paraît être le plus objectif qui soit. D'autre part, l'objectif de notre classification étant de regrouper les rivières en tenant compte de toutes les caractéristiques des débits, nous avons donc retenu toutes les trois composantes significatives car elles sont associées aux trois caractéristiques des débits (volume d'écoulement, période d'occurrence et variabilité inter-mensuelle) analysés. De plus, la variance totale expliquée par ces trois composantes principales étant sensiblement la même, rien ne permet de justifier le rejet de la troisième composante principale au détriment de deux premières comme il est courant dans de nombreux travaux. Nous avons donc tenu compte de toutes les trois composantes principales pour classifier et caractériser les régimes hydrologiques.

Sur la base des signes des notes factorielles sur les trois composantes principales, nous avons défini 8 régimes hydrologiques naturels (tableau 4). Le nombre des rivières varie fortement d'un régime hydrologique à un autre. 26 % des rivières analysées appartiennent au régime hydrologique VII et seulement environ 6 % au régime hydrologique III. Mais dans l'ensemble ce sont les trois derniers régimes hydrologiques qui regroupent plus de la moitié (57 %) des rivières analysées tandis que les trois premiers régimes ne regroupent qu'environ 20 % des rivières.

En ce qui concerne la caractérisation de ces régimes hydrologiques, chaque composante principale permet de définir un seuil plus ou moins fixe des variables hydrologiques auxquelles elle est associée. Ce sont ces seuils qui permettent de caractériser de manière précise les huit régimes hydrologiques.

- La première composante principale différencie les rivières en fonction des valeurs des coefficients saisonniers des débits hivernaux et de la période d'occurrence des débits mensuels maximums. Presque toutes les rivières caractérisées par les coefficients saisonniers des débits hivernaux supérieurs à 12 % et par une occurrence des débits mensuels maximums en avril ont un signe positif sur cette première composante. Les autres rivières ont un signe négatif (figure 2).
- Quant à la seconde composante principale, elle différencie les bassins versants en fonction des valeurs des coefficients saisonniers des débits printaniers et des rapports des débits printaniers et estivaux. Ainsi toutes les rivières caractérisées par des coefficients saisonniers des

débits printaniers supérieurs à 54 % et des rapports des débits saisonniers printaniers et estivaux supérieurs à 3,5 ont un signe positif pour cette composante.

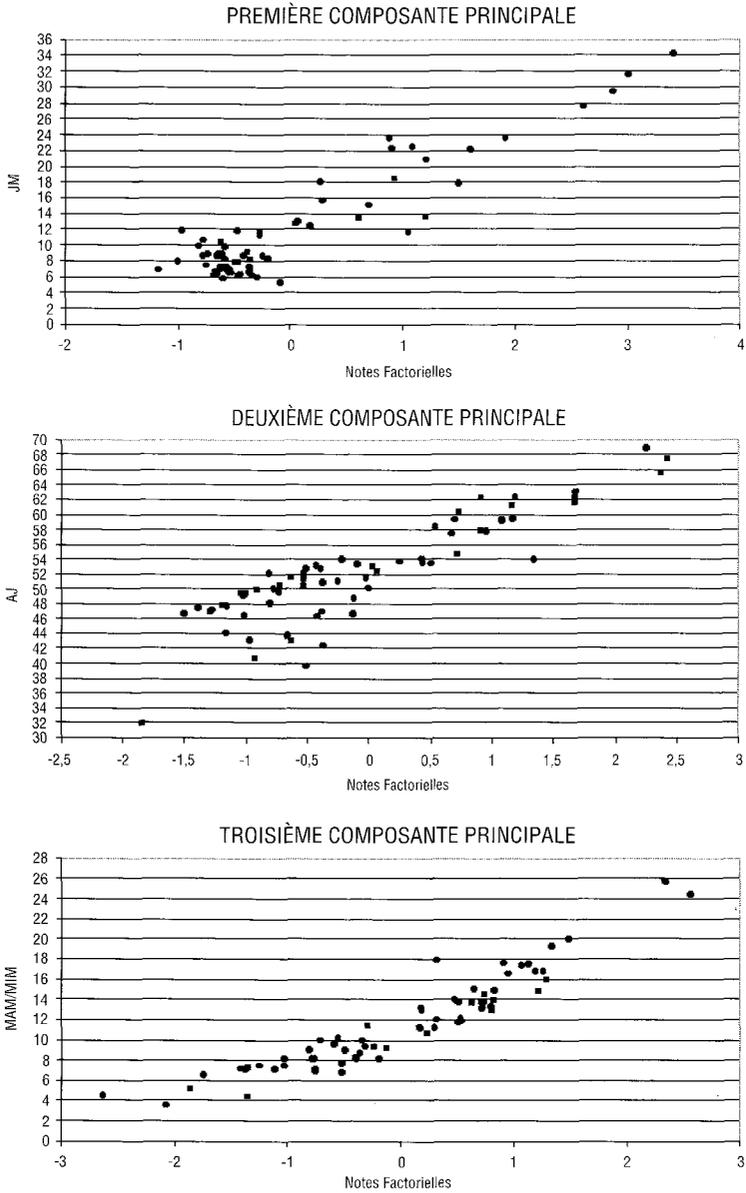
- Enfin, la dernière composante principale permet de différencier les rivières en fonction des rapports des débits mensuels maximums et minimums ainsi que des valeurs des coefficients mensuels des débits minimums. Toutes les rivières caractérisées par des rapports des débits mensuels maximums et minimums supérieurs à 12 et par des coefficients mensuels des débits minimums inférieurs à 3 % ont un signe positif sur cette composante. En fait, cette composante permet de distinguer les rivières en fonction du caractère « contrasté » des régimes hydrologiques. Les rivières caractérisées par un régime très contrasté (valeurs élevées de MAM/MIM) ont un signe positif sur la troisième composante principale.

**Tableau 4** Classification et caractérisation des régimes hydrologiques au Québec au moyen de l'analyse en composantes principales.

Régimes Hydrologiques	Critères de classification				Critères de caractérisation					
	CP I	CP II	CP III	NB*	CP I		CP II		CP III	
					JM	MAM	AJ	AJ/JS	MAM/MIM	MIM
I	+	+	+	5	>12%	Avril	>54%	> 3,5	> 12	≤ 3%
II	+	+	-	6	> 12%	Avril	> 54%	> 3,5	≤ 12	> 3%
III	+	-	+	4	> 12%	Avril	≤ 54%	≤ 3,5	> 12	≤ 3%
IV	+	-	-	7	> 12%	Avril	≤ 54%	≤ 3,5	≤ 12	> 3%
V	-	+	+	9	≤ 12%	Mai Juin	> 54%	> 3,5	> 12	≤ 3%
VI	-	+	-	10	≤ 12%	Mai Juin	> 54%	> 3,5	≤ 12	> 3%
VII	-	-	+	19	≤ 12%	Mai Juin	≤ 54%	≤ 3,5	> 12	≤ 3%
VIII	-	-	-	12	≤ 12%	Mai Juin	≤ 54%	≤ 3,5	≤ 12	> 3%

\* : nombre des rivières analysées. +/- : signes des notes factorielles sur les composantes principales.

À la lumière de ces considérations, on peut donc aisément caractériser les huit régimes hydrologiques en fonction des variables hydrologiques associées aux composantes principales. Par exemple, le régime hydrologique I (signe positif sur les trois composantes principales) est caractérisé par des débits hivernaux et printaniers relativement élevés (première et deuxième composantes principales), l'occurrence en avril des débits maximums mensuels (première composante principale) et un régime hydrologique contrasté (troisième composante principale). En revanche, le régime hydrologique VIII présente des caractéristiques tout à fait opposées à celles du régime I car les signes de notes factorielles des rivières appartenant à ce régime sont négatives sur les trois composantes principales.



**Figure 2** . Relation entre les notes factorielles et les valeurs des variables hydrologiques.  
*Relationships between loadings and values of hydrological variables.*

En ce qui concerne la répartition spatiale de ces régimes hydrologiques, ils ne forment pas des régions contiguës dans l'espace. Par conséquent, la proximité géographique n'influence pas de manière significative les caractéristiques des débits. Toutefois, on peut observer certaines cohérences spatiales. Ainsi, en rive nord (gauche), toutes les rivières du nord et de l'ouest du bassin versant du fleuve Saint-Laurent appartiennent aux régimes hydrologiques VII et VIII. Quant aux rivières du sud et du centre sur la même rive, elles appartiennent au régime hydrologique VI. En rive sud (droite), le régime hydrologique V est composé par presque toutes les rivières situées au nord. Quant aux rivières situées au centre et au sud de la même rive, elles forment les régimes hydrologiques I à IV qui sont ainsi caractérisés par des débits hivernaux relativement élevés et les débits mensuels maximums qui surviennent en avril (signe positif sur la première composante principale). Enfin, signalons qu'il était difficile de représenter cartographiquement les huit régimes hydrologiques en raison de la concentration des stations dans la partie sud et de la faible étendue de certains bassins versants. Cependant, l'avantage de notre classification est le fait qu'elle repose sur des critères précis et faciles à utiliser pour classer et caractériser n'importe quelle rivière du Québec.

### **3.3 Relation entre les variables hydrologiques et les facteurs environnementaux explicatifs de la variabilité spatiale des débits**

L'analyse en composantes principales a permis de sélectionner les six variables hydrologiques qui permettent de différencier et de caractériser les régimes hydrologiques naturels au Québec. Il apparaît donc intéressant de déterminer les facteurs environnementaux qui influencent la variabilité spatiale de ces six variables hydrologiques. Nous avons ainsi effectué une analyse de corrélation entre ces variables et les facteurs explicatifs. Les valeurs des coefficients de corrélation sont présentées au tableau 5. Il ressort de ce tableau les considérations suivantes :

- les débits saisonniers hivernaux sont significativement influencés par la surface couverte par des forêts et les températures annuelles et saisonnières. Les effets de ces deux facteurs sont antagonistes car les signes de leurs coefficients de corrélation avec les débits saisonniers sont opposés ;
- le mois d'occurrence des débits mensuels maximums est influencé par la longueur totale des cours d'eau, la surface couverte par les forêts et les lacs ainsi que les températures annuelles et saisonnières (corrélation négative) ;
- les débits saisonniers printaniers sont influencés par plusieurs facteurs suivants : la longueur totale des cours d'eau, la pente moyenne des bassins versants, la surface couverte par les forêts et les lacs, les précipitations annuelles et les températures saisonnières estivales et hivernales ;
- le rapport des débits saisonniers printaniers et estivaux est corrélé négativement à la superficie des bassins versants, à la longueur totale des cours d'eau, à la pente moyenne des bassins versants, aux précipitations annuelles et au nombre de jours avec des températures supérieures à 0°C. Mais il est positivement corrélé aux températures annuelle et saisonnières ;
- le coefficient d'immodération est influencé par la surface couverte par les forêts et les lacs ainsi que par les températures annuelles et saisonnières ;

– enfin, les débits mensuels minimums sont corrélés négativement à la surface couverte par les forêts mais positivement aux températures annuelles et saisonnières.

Ces résultats révèlent que la température de l'air est le seul facteur qui influence la variabilité spatiale de ces six variables hydrologiques. Elle est suivie par la surface couverte par les forêts et les étendues d'eau (lacs et marais). Ces facteurs influencent cinq de ces six variables. Quant aux précipitations, elles n'influencent que deux variables seulement et ce, de manière très modérée ( $r < 0,300$ ). Sur le plan de la gestion et de l'aménagement des bassins versants, cette étude permet de prévoir les impacts liés aux changements de ces facteurs sur les débits aux échelles mensuelles et saisonnières. C'est ainsi que par exemple, la déforestation des bassins versants se traduira par une hausse des débits saisonniers hivernaux et mensuels minimums. En revanche, elle provoquera une baisse des débits saisonniers printaniers et une occurrence précoce des débits mensuels maximums.

**Tableau 5** Coefficients de corrélation calculés entre les six variables hydrologiques et les treize facteurs environnementaux.

Facteurs	CPI		CPII		CPIII	
	JM	DMAM	AJ	AJ/JS	MAM/MIM	MIM
B1	-0,085	0,162	-0,236	<b>-0,353</b>	-0,111	-0,056
B2	-0,158	<b>0,414</b>	<b>-0,374</b>	<b>-0,532</b>	-0,096	-0,154
B3	-0,119	-0,008	<b>0,423</b>	<b>0,449</b>	0,216	-0,152
A1	<b>-0,744</b>	<b>0,590</b>	<b>0,444</b>	-0,191	<b>0,364</b>	<b>-0,347</b>
A2	-0,087	<b>0,362</b>	<b>-0,417</b>	<b>-0,525</b>	<b>-0,289</b>	0,036
P1	0,008	0,019	<b>-0,266</b>	<b>-0,273</b>	-0,094	0,021
P2	-0,015	0,045	-0,141	-0,138	-0,025	0,007
P3	-0,224	0,214	-0,051	-0,247	-0,103	-0,071
T1	<b>0,720</b>	<b>-0,579</b>	-0,181	<b>0,433</b>	<b>-0,383</b>	<b>0,563</b>
T2	<b>0,622</b>	<b>-0,492</b>	-0,031	<b>0,509</b>	-0,201	<b>0,445</b>
T3	<b>0,670</b>	<b>-0,549</b>	<b>-0,302</b>	<b>0,262</b>	<b>-0,481</b>	<b>0,564</b>
T4	<b>0,702</b>	<b>-0,556</b>	<b>-0,277</b>	<b>0,330</b>	<b>-0,441</b>	<b>0,535</b>
T5	<b>0,679</b>	<b>-0,437</b>	<b>-0,320</b>	<b>-0,540</b>	<b>-0,306</b>	-0,138

Les coefficients de corrélation significatifs au seuil de 5 % apparaissent en gras.

#### 4 – DISCUSSION ET CONCLUSION

Depuis les travaux de PARDÉ (1955), deux critères sont généralement utilisés pour classer les régimes hydrologiques définis comme le comportement saisonnier moyen de l'écoulement : la source de cet écoulement ou le mode d'alimentation des rivières (pluies, neiges et glace) et la distribution mensuelle des débits. C'est ainsi qu'on parle des régimes pluvial, nival et glaciaire et les combinaisons de ces trois modes d'alimentation.

De nombreux reproches ont été formulés à l'endroit de cette approche traditionnelle :

- Selon GOTTSCHALK *et al.* (1979), la classification des régimes hydrologiques fondée sur cette approche traditionnelle est subjective car elle dépend de l'expérience et du jugement de la personne pour grouper les rivières en différents régimes hydrologiques. De plus, elle exige beaucoup de temps d'analyse (HISDAL, 2000).
- Dans certaines régions du monde, il n'est pas toujours facile de déterminer le mode d'alimentation principal des rivières.
- Comme nous l'avons déjà mentionné dans l'introduction, cette approche traditionnelle ne tient compte que d'un seul paramètre, à savoir le volume d'écoulement, pour caractériser les régimes hydrologiques. Ce paramètre ne suffit pas à caractériser le régime hydrologique d'un cours d'eau ni du point de vue hydrologique ni du point de vue écologique.
- En raison de son caractère descriptif, cette méthode traditionnelle accorde la même importance ou mieux le même poids à tous les débits mensuels ou saisonniers dans la classification des régimes hydrologiques. Lorsqu'on opère un choix parmi ces débits, ce choix est généralement subjectif car il n'est fondé sur aucun critère objectif.
- Enfin, cette approche ne permet pas de déterminer de manière précise et objective les facteurs qui influencent la variabilité spatiale des régimes hydrologiques dans une région donnée. Les facteurs climatiques et lithologiques sont généralement considérés *a priori* comme facteurs de variabilité spatiale des régimes hydrologiques sans qu'on puisse être capable de déterminer de manière objective le poids de chacun de ces facteurs dans cette variabilité spatiale.

L'approche que nous proposons dans le cadre de cette étude permet de pallier ces faiblesses. En ce qui concerne la classification des régimes hydrologiques, celle-ci est fondée sur des méthodes statistiques rigoureuses, en l'occurrence l'analyse en composantes principales, d'une part et, sur un grand nombre de variables hydrologiques, d'autre part. Cette méthode d'analyse réduit significativement la part de subjectivité et de l'expérience personnelle dans le regroupement des rivières en régimes hydrologiques par l'utilisation exclusive des signes des notes factorielles sur les composantes principales significatives. D'autre part, le critère principal « source d'écoulement » sur lequel se fonde l'approche traditionnelle, ne peut être utilisé au Québec car dans toutes les régions, les débits proviennent de la fonte de neiges au printemps et des pluies en été et en automne (régime nivéo-pluvial). En ce qui concerne les variables hydrologiques, les onze variables que nous avons analysées représentent quatre (volume d'écoulement, période d'occurrence, variabilité inter-mensuelle des débits et la durée) des cinq paramètres proposés par RICHTER *et al.* (1996) pour caractériser écologiquement les régimes hydrologiques. Ce qui est incontestablement un apport par rapport à l'approche traditionnelle. En outre, grâce à l'analyse en composantes principales, nous avons montré que les trois caractéristiques des débits (volume d'écoulement, période d'occurrence et variabilité inter-mensuelle) contribuent, à part égale, à la différenciation spatiale des régimes hydrologiques au Québec. En ce qui concerne le volume d'écoulement, il ressort de cette analyse que les débits minimums

saisonniers et mensuels jouent un rôle primordial dans la différenciation des régimes hydrologiques. La première composante est associée au volume d'écoulement hivernal et la troisième à celle des débits minimums mensuels. Rappelons qu'au Québec, il existe deux périodes de basses eaux : en hiver et en été (ANCTIL *et al.*, 2000). En hiver, la diminution des débits est attribuable au stockage des précipitations sous forme de neige et en été, elle est provoquée par une diminution des précipitations. De ces deux périodes d'étiages, les étiages hivernaux affectent presque toutes les rivières du Québec, à l'exception de quelques rivières situées à l'extrême sud de la Province en raison de la fonte précoce des neiges (mars). Après les débits minimums, ce sont les débits saisonniers printaniers, associés à la seconde composante, qui rendent compte aussi de la différenciation spatiale des régimes hydrologiques. C'est au printemps que les débits maximums sont enregistrés en raison de la fonte des neiges. Quant à la période d'occurrence des débits, les dates d'occurrence des débits maximums et minimums mensuels contribuent à part égale car les deux variables sont associées à la première composante principale. Toutefois, c'est la période d'occurrence des débits mensuels maximums qui permet de mieux différencier les régimes hydrologiques. Au Québec, les débits mensuels maximums peuvent survenir en avril, en mai et parfois en juin. Enfin, la variabilité inter-mensuelle des débits, associée à la troisième composante principale, permet de définir le caractère « contrasté » des régimes hydrologiques.

Quant aux facteurs qui influencent la variabilité spatiale des régimes hydrologiques, il est apparu que la température de l'air est de loin le principal facteur. Ce facteur climatique influence plus ou moins fortement la variabilité spatiale des trois caractéristiques des débits analysés. D'autres facteurs comme la superficie couverte par les forêts et par les lacs et marais ainsi que la longueur des cours d'eau n'affectent que quelques variables hydrologiques. L'influence des précipitations est très modérée.

L'apport de notre étude est l'utilisation de nombreuses variables basées exclusivement sur les débits mensuels pour classer les régimes hydrologiques et de déterminer les facteurs de leur variabilité spatiale. Enfin, grâce à l'analyse de corrélation, nous avons pu démontrer pour la première fois au Québec que la température est le principal facteur de la variabilité spatiale des régimes hydrologiques. Dans une perspective de la hausse de la température due au changement climatique dans le cadre du réchauffement global, on est en droit de redouter un changement plus ou moins profond des caractéristiques des régimes hydrologiques au Québec. Ce type de changement hydrologique peut ne pas provoquer nécessairement une hausse ou une baisse significative des débits (volume d'écoulement) d'une année à l'autre. Mais il peut influencer le volume d'habitat disponible pour de nombreuses espèces aquatiques en hiver, au printemps et en été. Comme l'ont démontré CUNJAK *et al.*, 1998, le volume d'habitat est un paramètre qui influence significativement la dynamique des populations des espèces aquatiques comme celle du saumon atlantique (*Salmo salar*). En effet, un volume d'habitat plus important en hiver favorise l'abondance de juvéniles en été en raison d'un taux de survie plus élevé d'œufs en hiver. On conçoit ainsi l'intérêt de cette étude dans le suivi des changements éventuels induits par le réchauffement climatique sur les écosystèmes aquatiques au Québec. Ce réchauffement est susceptible d'affecter toutes les variables hydrologiques aux échelles mensuelles et saisonnières.

## BIBLIOGRAPHIE

- ANCTIL F., MARTEL F., HOANG V.D., 1998. Analyse régionale des crues journalières de la province du Québec. *Can. J. Civ. Eng.* 25, 125-146.
- 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.
- BEGUIN H., 1979. *Méthodes d'analyse géographique quantitative*. Litec, Paris, 252p.
- BELZILE L., BÉRUBÉ P., HOANG V.D., LECLERC M., 1997. *Méthode écohydrologique de détermination des débits réservés pour la protection des habitats du poisson dans les rivières du Québec*. Rapport présenté par l'INRS-Eau et le Groupe-conseil Génivar inc. au ministère de l'Environnement et de la Faune et à Pêches et Océans Canada. 83p + 8 annexes.
- CHURCH M., 1995. Geomorphic response to river flow regulation : case studies and time-scales. *Regul. Rivers : Res. Mgmt.* 11, 3-22.
- CLAUSSEN B., BIGGS, B.J.F., 2000. Flow variable for ecological studies in temperature streams : grouping based on covariance. *J. Hydrol.*, 237, 184-197.
- 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. 1986. *Analyse statistique à plusieurs variables*. Les presses agronomiques de Gembloux, Gembloux, 4<sup>e</sup> édition, 362p.
- DAVIAU J.-L., ADAMOWSKI K., PATRY G.G., 2000. Regional flood frequency analysis using GIS, L-moment and geostatistical methods. *Hydrol. Process.*, 14, 2731-2753.
- DESFORGES P., TREMBLAY R., 1974. *Analyse de la fréquence des crues pour le Québec*. Direction générale des eaux, ministère des Richesses naturelles, rapport H.P.-33, 46p.
- ENVIRONNEMENT CANADA, 1991. *Normales climatiques au Canada 1961-1990*. Service de l'environnement atmosphérique. Ottawa. 157p.
- ENVIRONNEMENT CANADA, 1992. *Sommaire chronologique de l'écoulement. Province du Québec*. Direction générale des eaux intérieures, Ottawa, 526p.
- GALAT D.L., LIPKIN R., 2000. Restoring ecological integrity of great rivers : historical hydrographs aid in defining reference conditions for the Missouri River. *Hydrobiologia*, 422/423, 29-48.
- GINGRAS D., ADAMOWSKI K., 1993. Homogeneous region delineation based on annual flood generation mechanisms. *Hydrol. Sci. J.*, 38, 103-121.
- GINGRAS D., ADAMOWSKI K., PILON K., 1994. Regional flood equations for the provinces of Ontario and Quebec. *Water Res. Bull.*, 30, 55-67.
- GOTTSCHALK L., JENSEN J.L., LUNDQUIST D., SOLANIE R., TOLLAN A., 1979. Hydrological regions in nord countries. *Nordic Hydrol.*, 10, 273-276.
- GREHYS, 1996. Inter-comparison of regional flood frequency procedures for Canadian rivers, *Hydrol. J.*, 186, 85-103.
- HAINES A.T., FINLAYSON B.L., McMAHON T.A., 1988. A global classification of river regimes. *Appl. Geogr.*, 8, 255-272.
- HESSE J.W., 1995. Water allocation for ecosystem management of the Missouri River. *Regul. Riv.* 5, 139-158.
- HISDAL H., 2000. Tests for changes in flow regimes. In : Kundzewicz, ZW et Robson, A. Detecting Trend and other changes in hydrological data. WMO/TD-No. 1013, Geneva, WMO, p93-101.
- KRASOVSKAIA I., SÆLTHUN N.R., 1997. Sensitivity of the stability of Scandinavian river flow regimes to a predicted temperature rise. *Hydrol. Sci. J.* 42, 693-711.
- LINS, H.R., 1985. Interannual streamflow variability in the United States bases on Principal Components. *Water Resour. Res.*, 21, 691-701.
- OLDEN J.D., POFF N.L., 2003. Redundancy and the choice of hydrologic indices for characterizing streamflow regimes. *River Res. Applic.*, 19, 101-121.
- PARDÉ M. 1955. *Fleuves et rivières*. Collin, Paris.

- PETTS G.E., 1995. Water allocation to protect river ecosystems. *Regul. Rivers : Res. Mgmt.* 12, 353-365
- POFF N.L., 1996. A hydrogeography of unregulated streams in the United States and an examination of scale-dependance in some hydrological descriptors. *Freshwater Biology*, 36, 71-91.
- POFF N.L., 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 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.
- POWER M.E., DIETRICH W.E., FINLAY J.C., 1996. Dams and downstream aquatic biodiversity: potential food web consequences of hydrologic and geomorphic change. *Environ. Mgmt.* 20, 887-895
- RESH V.H., BROWN AV, COVISH A.P., GURTZ M.E., LI H.W., MINSHALL G.W., REICE S.R., SHELDON A.L., WALLACE J.B., WISSMAR R., 1988. The role of disturbance in stream ecology. *J. N. Am. Benth. Soc.* 7, 433-455.
- RICHTER B.D, BAUMGARTNER J.V., BRAUN D.P., 1996. A method for assessing hydrologic alterations within ecosystems. *Conservation Biology*, 10, 1163-1174.
- RICHTER B.D, BAUMGARTNER J.V., WIGINGTON R., BRAUN D.P., 1997. How much water does a river need? *Freshwater Biology*, 37, 231-249.