

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC

MÉMOIRE PRÉSENTÉ À  
L'UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À TROIS-RIVIÈRES

COMME EXIGENCE PARTIELLE  
DE LA MAÎTRISE EN SCIENCES DE L'ENVIRONNEMENT

PAR  
SIMON TARDIF

**RÉGIONALISATION ET FACTEURS DE VARIABILITÉ SPATIALE  
DES DÉBITS SAISONNIERS ET EXTRÊMES JOURNALIERS  
AU QUÉBEC MÉRIDIONAL**

AVRIL 2005

Université du Québec à Trois-Rivières

Service de la bibliothèque

Avertissement

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

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

## **Tables des matières**

Liste des figures	4
Liste des annexes	4
Liste des tableaux	5
Remerciements	7
Préface	8
<b><u>INTRODUCTION</u></b>	<b>9</b>
I. Introduction	10
I.1 L'approche géographique	10
I.2 L'approche hydrologique	11
I.2.1 La définition des régions homogènes	11
I.2.2 L'estimation régionale	12
I.3 L'approche écologique	13
I.4 Problématique	13
I.5 Objectifs	15
I.6 Méthodologie	15
I.6.1 Source des données, zone d'étude et séries hydrologiques analysées	15
I.6.2 Méthodes de traitement des données	16
I.6.2.1 La définition des variables hydrologiques et des caractéristiques des débits	16
I.6.2.2 L'analyse statistique des données	16
I.7 Résultats	16
I.7.1 Débits saisonniers	16
I.7.2 Débits maximums annuels	18
I.7.3 Débits minimums annuels	19
I.8 Discussion	19
I.9 Bibliographie	23
<b><u>CHAPITRE 1 : ARTICLE SUR LES DÉBITS SAISONNIERS</u></b>	<b>26</b>
1.1. Introduction	29
1.2. Données et méthodes d'analyses	33
1.2.1. Source des données et choix de stations analysées	33
1.2.2. Définition des variables et méthodes d'analyse de données	34
1.3. Résultats	39
1.3.1. Interprétation des résultats de l'analyse en composantes principales	39
1.3.2. Classification et caractérisation objectives des régimes hydrologiques naturels au Québec	41
1.3.3. Relation entre les variables hydrologiques et les facteurs environnementaux explicatifs de la variabilité spatiale des débits	45
1.4. Discussion et conclusion	47
1.5. Bibliographie	51

<b><u>CHAPITRE 2 : ARTICLE SUR LES DÉBITS MAXIMUMS</u></b>	54
2.1. Introduction	57
2.2. Présentation de la méthode éco-géographique	60
2.2.1. Définition des caractéristiques des débits	60
2.2.2. Détermination des caractéristiques majeures et mineures des débits	62
2.2.3. Regroupement des stations en régions hydrologiques homogènes naturelles	63
2.2.4. Recherche des facteurs explicatifs de la variabilité spatiale des caractéristiques des débits	66
2.3. Application de l'approche éco-géographique à la régionalisation des débits maximums annuels au Québec	67
2.3.1. Source des données	68
2.3.2. Définition des caractéristiques des débits maximums annuels	70
2.3.3. Détermination des caractéristiques majeures et mineures des débits maximums annuels	72
2.3.4. Formation et caractérisation des régions hydrologiques homogènes naturelles	74
2.3.5. Détermination des facteurs de la variabilité spatiale des caractéristiques des débits.	76
2.3.5a. Analyse des corrélations simples	76
2.3.5b. Analyse des corrélations canoniques	79
2.4. Discussion et conclusion	82
2.5. Bibliographie	89
<b><u>CHAPITRE 3 : ARTICLE SUR LES DÉBITS MINIMUMS</u></b>	92
3.1. Introduction	95
3.2. Méthodologie	96
3.2.1. Source des données et choix des stations	96
3.2.2. Définition des caractéristiques des débits minimums annuels	101
3.2.3. Méthodes d'analyse de données	104
3.3 Résultats et discussion	104
3.3.1. Analyse en composantes principales de variables hydrologiques	104
3.3.2. Corrélations simples entre les caractéristiques des débits et les facteurs environnementaux	105
3.3.3. Analyse canonique des corrélations	107
3.4. Conclusion	110
3.5. Bibliographie	113

## Liste des figures

### Introduction

Figure I-1 : Approches pour la détermination des régions homogènes. 12

### Chapitre 1

Figure 1.1. Localisation des stations de jaugeage. 34

### Chapitre 2

Figure 2.1. Les quatre étapes d'application de l'approche éco-géographique. 60

Figure 2.2. Localisation des stations de jaugeage. 70

Figure 2.3. Description de l'approche hydrologique de régionalisation. 86

Figure 2.4. Description de l'approche écologique de régionalisation. 87

Figure 2.5. Description de l'approche éco-géographique de régionalisation. 88

### Chapitre 3

Figure 3.1. Localisation des stations de jaugeage. 97

Figure 3.2a. Hydrogramme type d'une rivière avec deux périodes de débits minimums (rivière Chateauguay, Montérégie). 98

Figure 3.2b. Hydrogramme type d'une rivière avec une période de débits minimums (rivière Aguanus, Côte-Nord). 98

## Liste des annexes

Annexe 1 : Répartition des stations selon les régions hydrologiques homogènes définies (débits saisonniers) 116

Annexe 2 : Répartition des stations selon les régions hydrologiques homogènes définies (débits maximums annuels) 117

Annexe 3 : Répartition des stations selon les régions hydrologiques homogènes définies (débits minimums annuels) 118

## Liste des tableaux

### Introduction

Tableau I.1 Synthèse sur les facteurs environnementaux qui influencent les caractéristiques des débits à l'échelle journalière au Québec. 22

### Chapitre 1

Tableau 1.1. Variables hydrologiques utilisées pour caractériser les régimes éco-hydrologiques naturels. 36

Tableau 1.2. Facteurs explicatifs de la variabilité spatiale des caractéristiques des débits. 38

Tableau 1.3a. Matrice de corrélations calculées entre les variables hydrologiques analysées. 39

Tableau 1.3b. Saturations de variables sur les trois premières composantes principales avant et après rotation orthogonale d'axes par la méthode varimax. 41

Tableau 1.4. Classification et caractérisation des régimes hydrologiques au Québec au moyen de l'analyse en composantes principales. 42

Tableau 1.5. Coefficients de corrélation calculés entre les six variables hydrologiques et les treize facteurs environnementaux. 46

### Chapitre 2

Tableau 2.1. Les cinq caractéristiques du débit et leurs rôles écologiques. 62

Tableau 2.2. Facteurs environnementaux de la variabilité spatiale des caractéristiques des débits. 69

Tableau 2.3. Les variables hydrologiques utilisées pour définir les cinq caractéristiques des débits maximums annuels. 72

Tableau 2.4. Les saturations des variables sur les cinq composantes principales après rotation d'axes par la méthode varimax. 73

Tableau 2.5. Regroupement des stations en régions hydrologiques homogènes naturelles en fonction des signes de notes factorielles sur les cinq premières composantes principales. 75

Tableau 2.6. Coefficients de corrélation calculés entre les composantes principales et les facteurs explicatifs. 78

Tableau 2.7. Valeurs des coefficients de corrélation entre les variables canoniques et les variables originales ainsi que les composantes des combinaisons linéaires. 81

Tableau 2.8. Méthode basée sur les variables hydrologiques. Exemples des variables hydrologiques utilisées pour la régionalisation. 84

Tableau 2.9. Caractéristiques hydrologiques et nombre de variables hydrologiques pour les définir. 85

### **Chapitre 3**

Tableau 3.1. Facteurs environnementaux de la variabilité spatiale des caractéristiques des débits. 99

Tableau 3.2. Les cinq caractéristiques des débits et leurs rôles écologiques. 102

Tableau 3.3. Les variables hydrologiques utilisées pour définir les cinq caractéristiques des débits minimums annuels. 103

Tableau 3.4. Saturations des variables sur les cinq composantes principales après rotation orthogonale des axes de type varimax. 104

Tableau 3.5. Coefficients de corrélation calculés entre les notes factorielles des composantes principales et les facteurs environnementaux. 106

Tableau 3.6. Analyse canonique des corrélations. 107

Tableau 3.7a. Corrélations entre les composantes principales (caractéristiques hydrologiques) et les cinq premières racines canoniques. 108

Tableau 3.7b. Corrélation entre les facteurs environnementaux et les cinq premières racines canoniques. 109

## **Remerciements**

Au terme de mon programme de maîtrise en sciences de l'environnement, j'aimerais remercier certaines personnes pour l'aide diverse qu'ils ont pu m'apporter au cours des deux dernières années. M. Ali Assani, mon directeur de recherche, pour l'opportunité qu'il m'a donné, pour sa présence et pour le partage de ses connaissances. M. Mhamed Mesfioui (co-directeur), M. Stéphane Campeau et M. Alain Chalifour (membres de mon comité d'évaluation) pour leur implication dans mon projet ainsi que pour le feedback constructif apporté. J'aimerais aussi remercier l'Université du Québec à Trois-Rivières en elle-même pour le milieu de vie qu'elle procure ainsi que sa fondation pour le soutien financier. Une pensée intense aussi pour parents et amis, leur soutien inconditionnel et leur présence étant essentiels. Merci finalement aux grands esprits qui font de ce monde un monde meilleur, vous serez toujours une source d'inspiration.



## **Préface**

Ce mémoire de maîtrise est basé sur les trois articles suivants, chacun constituant un chapitre respectif.

## **Chapitre 1**

Assani A. A., Tardif S., 2004. Classification, caractérisation et facteurs de variabilité spatiale des régimes hydrologiques naturels au Québec (Canada). *Revue des sciences de l'eau*, sous-presse.

## **Chapitre 2**

Tardif S., Assani A.A., Benseghir S., Mesfioui M., Chalifour A., 2004. Régionalisation et facteurs de variabilité spatiale des caractéristiques des débits maximums annuels au Québec (Canada). Application de la nouvelle approche éco-géographique. *Journal of Hydrology*, soumis en version anglaise en mars 2004.

## **Chapitre 3**

Tardif S., Assani A.A., 2005. Analyse des facteurs de variabilité spatiale des caractéristiques des débits minimums annuels en climat tempéré continental (Québec, Canada). Application du concept de « régime des débits naturels ». Cet article sera traduit et soumis sous peu en version anglaise à la revue *River Research and Applications*.

Nous avisons les lecteurs que la partie méthodologique sera répétée dans les trois articles.

Introduction  
Résumé du mémoire

## I. INTRODUCTION

L'interaction des facteurs morphologiques, géologiques, pédologiques, biologiques, topographiques et climatiques engendre des différences significatives de comportement hydrologique des cours d'eau dans une région géographique donnée. La science « régionale » ou la « régionalisation » s'est ainsi intéressée à regrouper les cours d'eau qui présentent des comportements hydrologiques similaires ou, en d'autres termes, des caractéristiques des débits similaires (détermination des régions hydrologiques homogènes) pour diverses finalités. De nombreuses méthodes de régionalisation furent ainsi développées dans la littérature scientifique afin de délimiter et/ou de caractériser les régions hydrologiques homogènes (Burn, 1988; Dalrymple, 1960; Guillot et Duband, 1967; Tasker, 1982; Gottschalk, 1985; Haines et al., 1988; Hosking et Wallis, 1993; Magillan et Graber, 1996; ; Ouarda et al., 2001; Pardé, 1953; Wiltshire, 1986; Zrinji et Burn, 1994). Ces méthodes diffèrent fondamentalement sur les cinq aspects suivants : le choix des variables hydrologiques à utiliser pour la régionalisation, les méthodes de regroupement des stations en régions hydrologiques homogènes, le choix des lois statistiques adéquates pour estimer les quantiles sur des sites non jaugés ou partiellement jaugés, l'échelle d'analyse des débits pour la régionalisation et, enfin, la finalité de la régionalisation. En fonction du choix des variables hydrologiques à utiliser pour la régionalisation, de l'échelle d'analyse et de la finalité de la régionalisation, on peut regrouper les travaux de régionalisation en trois approches différentes : l'approche géographique, l'approche hydrologique et l'approche écologique.

### I.1 L'APPROCHE GEOGRAPHIQUE

La finalité de l'approche géographique est de pouvoir de déterminer les facteurs de variabilité spatiale des débits des rivières. Elle tient compte de la magnitude des débits mensuels et parfois des périodes d'occurrence des débits mensuels maximums et minimums. Au départ, elle était essentiellement qualitative (Pardé, 1955). Mais plus tard, les débits mensuels furent soumis à plusieurs types de méthodes statistiques de

classification comme l'analyse en composantes principales (Gottschalk, 1985) ou les indices de similarité (Haines et al., 1988) ou encore l'indice de stabilité de l'occurrence des périodes d'étiage et de crues (Krasovskaïa et Gottschalk, 1996). Ce dernier indice repose sur la notion de contenu d'information et d'entropie. Récemment, certains géographes ont utilisé les débits maximums annuels pour la régionalisation des débits (Glaves et Waylen, 1997 ; Magilligan et Graber, 1996).

## **I.2 L'APPROCHE HYDROLOGIQUE**

La finalité de l'approche hydrologique est de pouvoir transférer à l'intérieur d'une même région de l'information des sites jaugés à un site non jaugé ou partiellement jaugé afin d'y estimer les débits correspondant à différentes périodes d'occurrence. Il s'agit d'estimer les débits à des stations qui disposent de peu de mesure de débits ou pas. L'approche s'intéresse surtout à l'analyse des débits maximums annuels. Mais parfois, on tient compte des débits minimums annuels (Anctil et al., 2000). Les variables hydrologiques prises en compte dans la régionalisation sont : la magnitude, la fréquence, les coefficients d'asymétrie et d'aplatissement ou parfois la période d'occurrence. La méthode hydrologique s'effectue en deux étapes (Ouarda et al., 1999) :

### **I.2.1 La définition des régions homogènes**

Cette étape consiste à regrouper les sites qui présentent un comportement hydrologique similaire au moyen de diverses méthodes statistiques. Le choix de la meilleure méthode de regroupement constitue l'un des sujets de controverse. En effet, plusieurs méthodes ont été déjà proposées. Aucune n'a jamais emporté le consensus. En fonction de ces méthodes, il existe trois façons de regrouper les sites en régions hydrologiques homogènes.

- Les régions fixes géographiquement contiguës (fig. I.1a). Ce sont des régions qui résultent du regroupement des sites en fonction de leur proximité spatiale (géographique). Ce regroupement se justifie si les facteurs déterminant le régime hydrologique ont bien une cohérence spatiale, comme la pluie, l'altitude, la lithologie.

- Les régions fixes géographiquement non contiguës (fig. I.1b). Le regroupement des sites en régions hydrologiques homogènes tient compte des caractéristiques physiographiques et climatiques qui influencent les variables hydrologiques. On utilise ainsi les analyses en composantes principales et des méthodes de classification automatiques (GREHYS, 1996).

- Les régions du type voisinage (fig. I.1c). Le principe de la méthode consiste à associer chaque station à son propre voisinage hydrologique. Cette approche se justifie par le fait que les deux approches précédentes ne permettent pas résoudre le cas d'un site qui se trouverait à la limite de deux régions. Ce problème est résolu par la notion du voisinage : chaque station cible définit sa propre région. Deux méthodes sont utilisées pour déterminer ce voisinage : l'analyse canonique des corrélations (Ribeiro-Corréa et al., 1995; Ouarda et al., 2001) et la méthode dite des « régions d'influence » (Burn, 1990).

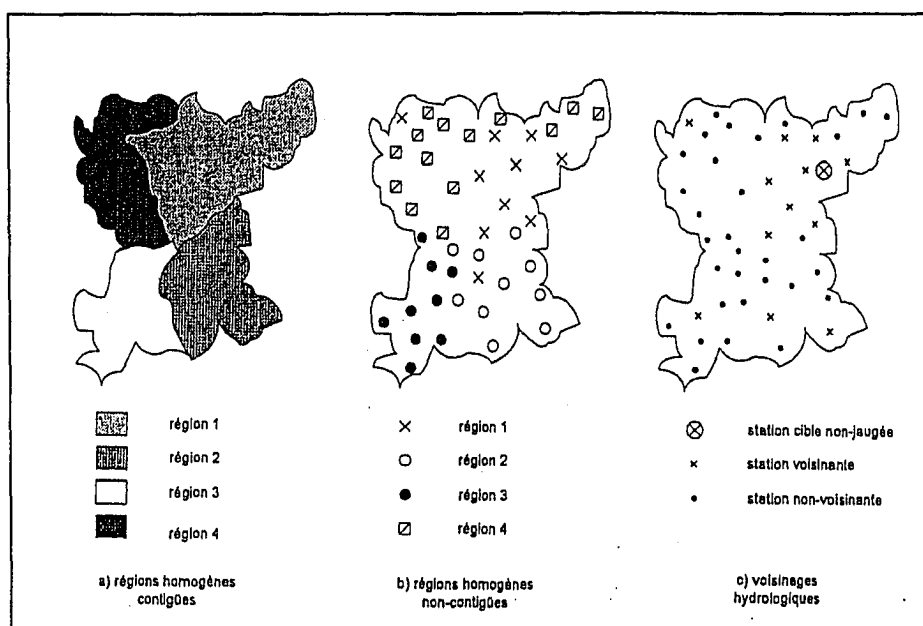


Figure I.1 Approches pour la détermination des régions homogènes. (Ouarda et al., 1999)

### I.2.2 L'estimation régionale

L'estimation régionale peut être réalisée à l'aide de différentes méthodes statistiques comme celle du type stations-années (Stedinger et Tasker, 1985), celle

d'indice de crue (Dalrymple, 1960) ou encore par régression multiple (Pandey et Nguyen, 1999).

### **I.3 L'APPROCHE ÉCOLOGIQUE**

Elle est la plus récente des trois (Claussen et Biggs, 2000 ; Galat et Lipkin, 2000 ; Poff et al., 1997 ; Richter et al., 1996 ; 1997). Elle s'est beaucoup développée avec l'introduction du concept de « régime des débits naturels » en écologie aquatique (Poff, 1996 ; Poff et Ward, 1989 ; Poff et al., 1997 ; Richter et al., 1996). C'est la seule approche qui utilise un concept scientifique précis pour justifier le choix des variables hydrologiques pour la détermination des régions hydrologiques homogènes. La finalité de l'approche écologique est de pouvoir décrire complètement les débits d'un cours d'eau pour expliquer la diversité biologique des écosystèmes aquatiques. Dans la régionalisation des débits, on tient compte de nombreuses variables hydrologiques, mesurées à différentes échelles de temps (échelles annuelle, mensuelle et journalière), qui définissent les cinq caractéristiques fondamentales des débits. Chaque caractéristique joue un rôle écologique précis pour assurer l'intégrité et le fonctionnement des écosystèmes aquatiques (voir tableau 3.2, section 3.2.2). La régionalisation s'effectue finalement par analyse en composantes principales ou classification hiérarchique ascendante (Poff, 1996). Il convient de souligner que les écologistes s'intéressent plus au choix des variables hydrologiques pertinentes pour caractériser les régimes hydrologiques qu'à la régionalisation.

### **I.4 PROBLÉMATIQUE**

Au Québec, la régionalisation des débits a déjà fait l'objet de nombreux travaux (Ancil et al., 1998, 2000 ; Desforges et Tremblay, 1974 ; Ribeiro-Corréa et al., 1995 ; GREHYS, 1996). Ces derniers sont basés sur l'approche hydrologique seulement. Du point de vue écologique ou géographique, cette approche présente plusieurs faiblesses. Elle est fondée sur un choix subjectif de quelques variables hydrologiques pour la régionalisation en raison de l'absence d'un concept scientifique pour justifier ce choix. La conséquence de

ce choix subjectif se répercute sur le nombre de régions hydrologiques homogènes, ce nombre variant en fonction entre autres des variables hydrologiques utilisées pour la régionalisation. Au Québec, le nombre de régions hydrologiques homogènes proposé varie entre 3 et 13. Les régions hydrologiques ainsi définies ne reflètent plus la variabilité des caractéristiques physiographiques des débits qui influencent l'écoulement. La définition du concept même de l'homogénéité devient subjective (Ouarda et al., 1999).

Pour pallier à ces lacunes, nous proposons une nouvelle méthode de régionalisation fondée sur le concept de « régime des débits naturels ». Elle se distingue de l'approche écologique sur trois points fondamentaux suivants :

- La méthode que nous proposons est fondée sur l'utilisation des caractéristiques des débits et non des variables hydrologiques. Ce choix se justifie par le fait qu'il existe une infinité des variables hydrologiques pour définir les cinq caractéristiques fondamentales. Ainsi, il est impossible d'en tenir compte pour la régionalisation. En revanche, comme le nombre des caractéristiques fondamentales est limité, il est donc possible de tenir compte de toutes les caractéristiques des débits. On rencontre ainsi les exigences du concept de « régime des débits naturels ».
- La finalité de la méthode de régionalisation que nous proposons est de rechercher les facteurs physiographiques et climatiques qui expliquent la variabilité spatiale de ces caractéristiques fondamentales. Pour atteindre cette finalité, on doit analyser séparément les échelles de temps (annuelle, mensuelle et journalière) du fait que l'influence des facteurs physiographiques et climatiques peut ne pas nécessairement être mise en évidence à toutes les échelles temporelles. L'influence de certains de ces facteurs peut se manifester à certaines échelles mais disparaître à d'autres.
- L'analyse séparée des échelles de temps permet de définir toutes les caractéristiques des débits associées à chaque échelle. En effet, en analysant simultanément toutes les échelles, on n'arrive pas à définir toutes les caractéristiques des débits associées à chaque échelle. Ainsi par exemple, les variables proposées par Richter et al. (1996) ne définissent qu'une seule caractéristique des débits aux échelles annuelle et mensuelle. Or, pour mettre en évidence tous les facteurs de variabilité des débits à une échelle donnée, il faut tenir compte de toutes les caractéristiques des débits associées à celle-ci.

## **I.5 OBJECTIFS**

Ce travail de mémoire poursuit les deux objectifs suivants :

- 1- Déterminer les régions hydrologiques homogènes des rivières naturelles du Québec méridional en tenant compte de toutes les caractéristiques des débits aux échelles mensuelles et journalières.
- 2- Déterminer les facteurs environnementaux qui influencent la variabilité spatiale des caractéristiques hydrologiques des débits à ces deux échelles.

En raison de cette double finalité, cette nouvelle approche a été désignée par le nom « d'approche éco-géographique » car elle tient compte de la finalité de l'approche géographique et du concept de « régime des débits naturels » sur lequel se fonde l'approche écologique.

## **I.6 MÉTHODOLOGIE**

### **I.6.1 Source des données, zone d'étude et séries hydrologiques analysées**

Les données proviennent du Sommaire hydrologique publié par Environnement Canada (1992). Elles concernent les rivières de la Province de Québec et couvrent la période entre 1910 et 1990. Le Sommaire contient les données de débits annuels, mensuels et les extrêmes journaliers. Pour ces derniers, on indique aussi la date de leurs mesures. Dans le cadre de ce mémoire, nous nous sommes limité aux bassins versants du fleuve Saint-Laurent. Nous avons retenu 72 stations caractérisées par des débits naturels ou faiblement régularisés. Les stations dont les mesures de débits s'étendaient sur une période inférieure à 10 ans étaient exclues. Les données sur les caractéristiques physiographiques de bassins versants ont été tirées de Belzile et al. (1997). Il s'agit de données relatives aux valeurs de pente moyenne et de longueur des cours d'eau, ainsi qu'aux superficies couvertes par les forêts et par les lacs et marais. Les données relatives aux caractéristiques climatiques ont été puisées dans les catalogues climatiques publiés par Environnement Canada (1991).



## **I.6.2 Méthodes de traitement des données**

### **I.6.2.1 La définition des variables hydrologiques et des caractéristiques des débits**

Sur chaque série hydrologique analysée, nous avons défini un certain nombre de variables hydrologiques. Aux échelles mensuelle et journalière, nous avons défini respectivement 13 et 18 variables hydrologiques. Elles sont présentées en détail aux chapitres 1, 2 et 3. Ces variables hydrologiques ont servi à définir, à leur tour, les caractéristiques des débits qui sont au nombre de 4 à l'échelle mensuelle et 6 à l'échelle journalière.

### **I.6.2.2 L'analyse statistique des données**

Nous avons appliqué trois tests statistiques :

- L'analyse en composantes principales pour déterminer les régions hydrologiques homogènes (premier objectif).
- L'analyse des corrélations simples et l'analyse canonique des corrélations pour déterminer les facteurs qui influencent la variabilité spatiale des caractéristiques des débits (second objectif).

## **I.7 RÉSULTATS**

### **I.7.1 Débits saisonniers**

Nous avons défini 13 variables hydrologiques. Trois composantes principales significatives y ont été extraites, pour une variance totale expliquée de 83%. La première composante principale est associée aux débits hivernaux ainsi qu'aux mois d'occurrence des débits mensuels maximums et minimums. La seconde composante principale est corrélée aux débits printaniers et au rapport entre les débits printaniers et estivaux. La dernière composante est associée aux débits mensuels minimums et au rapport entre les

débits mensuels maximums et minimums. En fonction des signes de ces trois composantes principales, nous avons formé 8 régions hydrologiques homogènes dont les caractéristiques hydrologiques ont été définies au moyen des valeurs de 6 variables hydrologiques associées aux composantes principales significatives.

L'analyse des corrélations simples entre les six variables hydrologiques et les facteurs physiographiques et climatiques a révélé les faits suivants :

- La magnitude des débits hivernaux est positivement corrélée aux variables de température et au nombre de jours d'hiver où la température dépasse le point de congélation mais est négativement corrélée au couvert forestier.
- Le mois d'occurrence des débits mensuels maximums est positivement corrélé à la longueur du cours d'eau, au couvert forestier et au couvert de lacs et marais mais est négativement corrélé aux variables de température et au nombre de jours d'hiver où la température dépasse le point de congélation.
- La magnitude des débits printaniers est positivement corrélée à la pente du cours d'eau et au couvert forestier mais est négativement corrélée à la longueur du cours d'eau, au couvert de lacs et marais, aux précipitations totales annuelles, aux températures printanières et estivales et au nombre de jours d'hiver où la température dépasse le point de congélation.
- Le rapport entre les débits printaniers et estivaux est positivement corrélé à la pente du cours d'eau et aux variables de température mais est négativement corrélé à la superficie des bassins versants, à la longueur du cours d'eau, au couvert de lacs et marais et au nombre de jours d'hiver où la température dépasse le point de congélation.
- Le coefficient d'immodération est positivement corrélé au couvert forestier mais est négativement corrélé au couvert de lacs et marais, aux températures annuelles, printanières et estivales et au nombre de jours d'hiver où la température dépasse le point de congélation.
- La magnitude des débits mensuels minimums est positivement corrélée aux variables de température mais est négativement corrélée au couvert forestier.

La signification hydrologique de ces résultats est discutée en détails ultérieurement.

### **I.7.2 Débits maximums annuels**

La série annuelle des débits maximums a été décomposée en 18 variables hydrologiques. Celles-ci ont conduit à l'extraction de cinq composantes principales significatives dont la variance totale expliquée est d'environ 93%. Les cinq composantes principales correspondent chacune à une caractéristique des débits : la première composante est associée à la variabilité interannuelle de la magnitude (25,5% de variance totale expliquée), la seconde à la magnitude-fréquence (23,8%), la troisième principale à la forme de courbe de distribution (17,2%), la quatrième à la période d'occurrence (14,6%) et la cinquième à la variabilité interannuelle de la période d'occurrence (12,5%). Sur la base des signes des notes factorielles sur les cinq composantes, nous avons identifié 23 régions hydrologiques homogènes effectives et 9 régions hydrologiques homogènes fictives, ces dernières n'étant représentées par aucune station dans le bassin versant du fleuve Saint-Laurent. En d'autres termes, aucune station analysée ne présente les caractéristiques hydrologiques qui définissent ces régions.

L'analyse des corrélations simples et l'analyse canonique des corrélations nous ont permis de déterminer les facteurs qui influencent la variabilité spatiale des caractéristiques des débits maximums annuels.

- La variabilité interannuelle de la magnitude est significativement corrélée à la superficie des bassins versants et aux totaux pluviométriques.
- La magnitude-fréquence est influencée par les précipitations hivernales, la superficie couverte par les lacs et marais ainsi que par la longueur des cours d'eau.
- La forme des courbes de distribution est corrélée à la longueur des cours d'eau et à la superficie couverte par les lacs et marais.
- Enfin, la période d'occurrence des débits maximums annuels et sa variabilité interannuelle sont influencées par la latitude, la surface des forêts et la température de l'air.

### **I.7.3 Débits minimums annuels**

À l'instar des débits maximums annuels, la série annuelle des débits minimums a été décomposée en 18 variables hydrologiques desquelles ont été extraites cinq composantes principales significatives associées chacune à une caractéristique des débits : la magnitude-fréquence (23,1% de variance totale expliquée), la variabilité interannuelle de la magnitude (20,3%), la période d'occurrence des débits minimums annuels (17,1%), la forme des courbes de distribution (15,3%) et la variabilité interannuelle de la période d'occurrence (14%). L'analyse des corrélations simples et l'analyse canonique des corrélations ont permis de déterminer les facteurs qui influencent la variabilité spatiale de ces cinq caractéristiques au Québec.

- La magnitude-fréquence est influencée par les superficies couvertes par les forêts, les lacs et les marais ainsi que par le nombre des jours pluvieux pendant la période froide (octobre à mars).

- La variabilité interannuelle de la magnitude est influencée par la superficie des bassins versants, la latitude, la superficie des forêts ainsi que par les températures annuelles et saisonnières (printanière et estivale).

- Les trois autres caractéristiques sont influencées par les facteurs suivantes : la latitude, la longitude, la superficie des forêts ainsi que les températures annuelles et saisonnières.

Cette étude démontre que la superficie des forêts et la latitude sont les deux principaux facteurs qui influencent la variabilité spatiale de toutes les caractéristiques des débits minimums annuels au Québec.

## **I.8 DISCUSSION ET CONCLUSION**

Ce travail de mémoire poursuivait les deux objectifs suivants :

- L'application d'une nouvelle méthode de régionalisation, la « méthode éco-géographique », pour classer et caractériser les rivières du Québec aux échelles saisonnières et journalières.

- La recherche des facteurs environnementaux qui influencent les caractéristiques des débits.

En ce qui concerne la nouvelle méthode de régionalisation proposée, son originalité réside dans l'utilisation des caractéristiques des débits pour la régionalisation, ce qui la différencie fondamentalement des autres approches qui sont fondées sur les variables hydrologiques. Le choix d'utiliser les caractéristiques plutôt que les variables hydrologiques se justifie par le fait que le nombre de caractéristiques des débits est limité alors que celui des variables hydrologiques qui définissent ces caractéristiques semble illimité. Ce nombre « illimité » des variables hydrologiques rend leur choix subjectif. Ainsi, l'homogénéité hydrologique qui en découle devient aussi subjective. Quant aux critères de délimitation des régions hydrologiques homogènes, nous avons opté pour l'utilisation des signes des notes factorielles sur les composantes principales significatives. Ce choix se justifie essentiellement par les deux raisons suivantes :

- Le regroupement des stations en régions hydrologiques homogènes s'effectue dans un espace multidimensionnel. Par conséquent, si on tient compte des autres critères comme la distance, le nombre des régions hydrologiques homogènes sera relativement élevé. De plus, la délimitation des régions sera difficile à réaliser en raison de la difficulté à visualiser les points dans un espace multidimensionnel.
- Le critère retenu exclut tout rejet des stations lors du processus de regroupement. Ce qui n'est pas le cas avec les autres critères de regroupement.
- La méthode permet de définir quantitativement les caractéristiques hydrologiques des régimes.

Quant à la recherche des facteurs qui influencent la variabilité spatiale des caractéristiques des débits, nous avons démontré que l'influence de ces facteurs dépend de l'échelle d'analyse (mensuelle ou journalière). Le tableau I.1 résume les corrélations observées entre les caractéristiques des débits et les facteurs environnementaux ; ces derniers ayant été regroupés en cinq catégories :

- Les facteurs liés à la physiographie du bassin versant (S) : la superficie du bassin, la longueur et la pente moyenne du cours d'eau.
- Les facteurs liés à la localisation géographique (G) : la latitude et la longitude.

- Le mode d'affectation des sols : la superficie des forêts ainsi que celle des lacs et marais.
- Enfin, les facteurs liés au climat : les températures (T) et les précipitations (P) annuelles et saisonnières.

Il ressort du tableau I.1 que le facteur qui influence presque toutes les caractéristiques des débits maximums annuels est sans nul doute la physiographie des bassins versants. En ce qui concerne les débits minimums trois facteurs s'imposent : la localisation géographique, les températures saisonnières et le mode d'affectation des sols. Ces résultats démontrent la pertinence d'analyser séparément les séries hydrologiques, certains facteurs pouvant influencer seulement les débits minimums. Dans cette synthèse, nous n'avons pas considéré les débits mensuels parce que pour cette série, chacune des composantes principales significatives n'est pas associée à une unique caractéristique des débits.

Tableau I.1. Synthèse sur les facteurs environnementaux qui influencent les caractéristiques des débits à l'échelle journalière au Québec.

Caractéristiques des débits	Facteurs environnementaux							
	S	G	E	T		P		
				A	M	A	M	
<b>Débits maximums annuels</b>								
Magnitude-Fréquence	X		X				X	
Variabilité de la magnitude	X					X		
Période d'occurrence	X	X	X	X	X			
Variabilité de la période	X	X	X	X	X			
Forme des courbes de distribution						X		
<b>Débits minimums annuels</b>								
Magnitude-Fréquence			X		X			
Variabilité de la magnitude	X	X	X	X	X			
Période d'occurrence	X	X	X	X	X			
Variabilité de la période		X	X	X	X			
Forme des courbes de distribution		X	X		X			

X = influence ; A = échelle annuelle ; M = échelle saisonnière.

## I.9 BIBLIOGRAPHIE

- Anctil F., Martel F., Hoang V.D., 1998. Analyse régionale des crues journalières de la province du Québec. *Canadian Journal of Civil Engineering*. 25, 125-146.
- Anctil F., Larouche W., Hoang V.D., 2000. Analyse régionale des étiages 7-jours de la province de Québec. *Water Quality Resources Journal of Canada*. 35, 125-146.
- 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. À *Pêches et Océans Canada et au ministère de l'Environnement et de la Faune*, Rapport scientifique n° R494. 83 p + 8 annexes.
- Burn D.H., 1988. Delineation of groups for regional flood frequency analysis. *Journal of hydrology*, 104, 345-361.
- Burn D.H., 1990. Evaluation of regional flood frequency analysis with a region of influence approach. *Water Resources Research*, 26, 2257-2265.
- Burn D.H., 1997. Catchments similarity for regional flood frequency analysis using seasonality measures. *Journal of hydrology*, Vol. 202: 212-230.
- Clausen B., Biggs B.J.F., 2000. Flow variables for ecological studies in temperate streams: grouping based on covariance. *Journal of hydrology*, Vol. 237: 184-197.
- Dalrymple T., 1960. Flood frequency analysis. *US Geological Survey*, Water Supply Pap. 1543-A.
- 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.
- Environnement Canada, 1991. Normales climatiques au Canada 1961-1990. *Service de l'environnement atmosphérique*, Ottawa. 157 p.
- Environnement Canada, 1992. Sommaire chronologique de l'écoulement. Province de 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*, Vol.422/423: 29-48.
- Glaves R. & Waylen P.R., 1997. Regional flood frequency analysis in Southern Ontario using L-moments. *The Canadian Geographer*, Vol.41: 178-193.



- Gottschalk L., 1985. Hydrological regionalization of Sweden. *Hydrological Science Journal*, 30 : 65-83.
- GREHYS, 1996. Presentation and review of some methods for regional flood frequency analysis. *Journal of Hydrology*, Vol.186: 63-84.
- Guillot P. & Duband D., 1967. La méthode du Gradex pour le calcul de la probabilité des crues à partir des pluies. *Colloque international sur les crues et leur évaluation, Leningrad, 15-22 août, IAHS, publication no 84*, 560-569.
- Haines A.T., Finlayson B.L., McMahon T.A., 1988. A global classification of river regimes. *Applied Geographer*, Vol.8: 255-272.
- Hisdal H., 2000. Tests for changes in flow regimes. In : Kundzewicz Z.W. et Robson A. *Detecting Trend and other changes in hydrological data*, WMO/TD-No. 1013, Geneva, WMO, p93-101.
- Hosking J.R.M. & Wallis J.R. 1993. Some statistics useful in regional flood frequency analysis. *Water Resources Research*, 29, 271-281.
- Krasovskaia I., Saelthum N.R., 1997. Sensitivity of the stability of Scandinavian river flow regimes to a predicted temperature rise. *Hydrological Science Journal*, 42, 693-711.
- Magilligan F.J. & Graber B.E., 1996. Hydroclimatological and geomorphic controls on the timing and spatial variability of floods in New England, USA. *Journal of Hydrology*. Vol.178: 159-180.
- Olden J.D. & Poff N.L., 2003. Redundancy and the choice of hydrologic indices for characterizing streamflow regimes. *River Research and Applications*, 19: 101-121.
- Ouarda T.B.M.J., Lang M., Bobée B., Bernier J. & Bois P., 1999. Synthèse de modèles régionaux d'estimation de crue utilisés en France et au Québec. *Revue des Sciences de l' Eau*, Vol.12:155-182.
- Ouarda et al, 2001. Regional flood frequency estimation with canonical correlation analysis. *Journal of hydrology*, 254, 157-173.
- Pandey G.R. & Nguyen V.-T.-V., 1999. A comparison study of regression based methods in regional flood frequency analysis. *Journal of Hydrology*, 225, 92-101
- Pardé M., 1955. *Fleuves et rivières*, Collin, Paris.

- Poff N.L., 1996. A hydrogeography of unregulated streams in the United States and examination of scale-dependance in some hydrological descriptors. *Freshwater Biology*, 36: 71-91.
- Poff N.L. & Ward J.V., 1989. Implications of streamflow variability and predicability for lotic community structure: A regional analysis of streamflow patterns. *Canadian Journal Fisheries & Aquatic Science*, Vol.46 : 1805-1818.
- Poff N.L., Allan J.D., Bain M.B., Karr J.R., Prestegard K.L., Richter B.D., Sparks R.E. and Stromberg J.C., 1997. The natural flow regime: A paradigm for river conservation and restoration. *Bioscience*, Vol. 47, No. 11: 769-784.
- Ribeiro-Corréa J., Cavadias G.S., Clément B. & Rousselle J., 1995. Identification of hydrological neighborhoods using canonical correlations analysis. *Journal of hydrology*, Vol. 173: 71-89.
- Richter B.D., Baumgartner J.V., Powell J. & Braun D.P., 1996. A method for assessing hydrologic alterations within ecosystems. *Conservation Biology*, 10: 1163-1174.
- Richter B.D, Baumgartner J.V., Wiginton R., Braun D.P., 1997. How much water does a river need? *Freshwater Biology*, 37, 231-249.
- Stedinger J.R., Tasker G., 1985. Regional hydrological analysis, 1, ordinary, weighted, and generalized least squares compared. *Water Resources Research*, Vol.21 (9): 1421-1432.
- Tasker, G.D., 1982. Comparing methods of hydrologic regionalization. *Water Resources Bulletin*, 18, 965-970.
- Wiltshire S.W., 1986. Regional flood frequency analysis II: Multivariate classification of drainage basins in Britain. *Hydrological Science Journal*, 31, 335-346.
- Zrinjti Z. Burn D.H., 1994. Flood frequency analysis for ungauged sites using a region of influence approach. *Journal of hydrology*, Vol. 153: 1-21.

# Chapitre 1

Classification, caractérisation et facteurs de  
variabilité spatiale des régimes hydrologiques  
naturels au Québec (Canada).

## **CLASSIFICATION, CARACTÉRISATION ET FACTEURS DE VARIABILITÉ SPATIALE DES RÉGIMES HYDROLOGIQUES NATURELS AU QUÉBEC (Canada).**

Ali A. ASSANI\* & Simon TARDIF\*

\* 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.

### **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 définissent quatre (magnitude, période d'occurrence, durée et l'amplitude de variabilité interannuelle des débits) de 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 la magnitude des débits mensuels minimums. La variance totale expliquée par ces trois composantes, à part presque égale, 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, et dans une moindre mesure par la superficie couverte par les forêts, les lacs et les marais ainsi que la longueur des cours d'eau.

Mots Clés : Régimes hydrologiques naturels, caractéristiques des débits, débits saisonniers et mensuels, Facteurs environnementaux, analyse en composantes principales, analyse de corrélation, Saint-Laurent, Québec.

## 1.1 INTRODUCTION.

Les débits de rivières sont considérés comme la « variable majeure » des écosystèmes fluviaux en raison de leur influence sur la morphologie des cours d'eau ainsi que sur le transport et le calibre des sédiments (CHURCH, 1995 ; HESSE, 1995 ; PETTS, 1995). Du point de vue écologique, ils jouent un rôle majeur sur la composition biotique, la structure et le fonctionnement des écosystèmes aquatiques, humides et ripariens (POWER *et al.*, 1996 ; RESH *et al.*, 1988, RICHTER *et al.*, 1996). En raison de ce rôle majeur, 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 PARDE (1955), cette caractérisation a été fondée presque exclusivement sur un seul paramètre, à savoir la magnitude des débits (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 paramètres ou caractéristiques suivants :

- La magnitude des débits. Elle permet de déterminer le volume d'habitat disponible pour les espèces aquatiques et semi-aquatiques.
- La période d'occurrence des débits. Elle 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. Elle permet de déterminer 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. Ce paramètre 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 : 12 pour la magnitude, 10 pour la durée, 4 respectivement pour la fréquence et le taux de changement et, enfin, 2 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, 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 la magnitude. D'autre part, pour analyser ces 32 variables, on utilise l'analyse statistique multivariée pour caractériser les régimes hydrologiques. Cette approche permet ainsi de déterminer les facteurs qui influencent leur variabilité spatiale.

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 à un seul paramètre, à savoir la magnitude des débits. 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 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 SAELTHUN, 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 et climatiques 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 :

- Du point de vue écologique, 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 RITCHER *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 entraîner celle de la dynamique et de la composition des espèces aquatiques et semi-aquatiques entre deux cours d'eau sans pour autant que leurs débits (magnitude) 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.

- Du point de vue 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 de manière précise 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, à savoir la magnitude des débits (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, 1996b). 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 dans ce travail.

## 1.2 DONNÉES ET MÉTHODES D'ANALYSE.

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

Le réseau hydrographique du Québec est divisé en trois grands bassins versants : le bassin du fleuve 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 courtes durées (> 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 de 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 (fig.1.1) : 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.

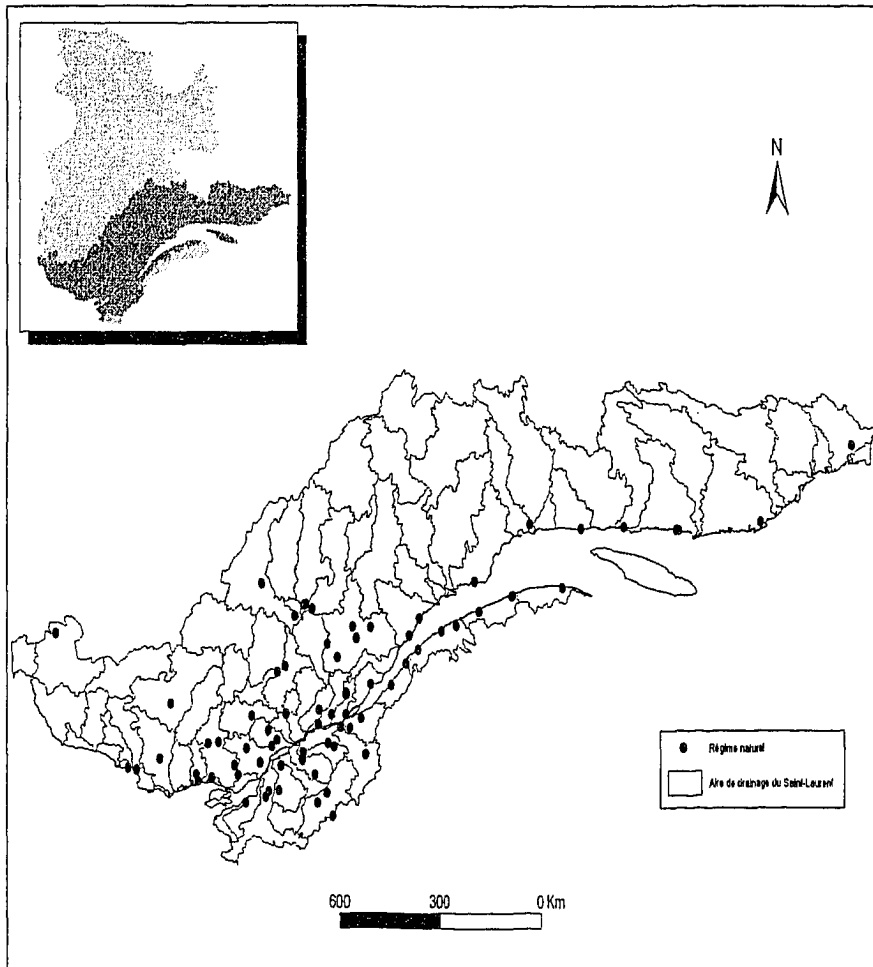


Figure 1.1 : Localisation des stations de jaugeage

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

Nous avons analysé 11 variables hydrologiques qui peuvent être groupées en quatre paramètres ou caractéristiques proposés par Richter *et al.* (1996). Elles sont définies au tableau 1.1.

- Les variables relatives à la magnitude des débits 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 calendaire (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 calendaire de la période d'occurrence de ce débit correspond donc au 15 janvier. Ensuite, nous avons calculé la moyenne des jours calendaires 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) intersaisonnière et intermensuelle des débits à l'échelle annuelle : AJ/JM, AJ/JS et MAM/MIM. Ces deux variables définissent le caractère contrasté des régimes hydrologiques. Plus ces valeurs sont élevées, plus la variabilité des débits mensuels 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.

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.

Tableau 1.1 Variables hydrologiques utilisées pour caractériser les régimes éco-hydrologiques naturels.

Sigle	Signification	Mode de calcul
JM	Coefficient saisonnier des débits hivernaux	$\sum_{i=1}^3 Q(mi) / Q(at) * 100$
AJ	Coefficient saisonnier des débits printaniers	$\sum_{i=4}^6 Q(mi) / Q(at) * 100$
JS	Coefficient saisonnier des débits estivaux	$\sum_{i=6}^9 Q(mi) / Q(at) * 100$
OD	Coefficients saisonniers des débits automnaux	$\sum_{i=10}^{12} Q(mi) / Q(at) * 100$
AJ/JM	Rapport entre les débits printaniers et les débits hivernaux	AJ / JM
AJ/JS	Rapport entre les débits printaniers et les débits estivaux	AJ / JS
MAM	Coefficient mensuel du débit moyen mensuel maximum	$Q(m) \max / Q(at)$
MIM	Coefficient mensuel du débit moyen mensuel minimum	$Q(m) \min / Q(at)$
MAM/MIM	Coefficient d'immodération mensuel	MAM / MIM
DMAM	Jour julien moyen du débit mensuel maximum	JJ moyen de $Q(m) \max$
DMIM	Jour julien moyen du débit mensuel minimum	JJ moyen de $Q(m) \min$

Q (mi) : débits mensuels (1 = janvier, 2 = février,...12 = décembre)

Q (at) : débit annuel total

Tous les coefficients sont exprimés en %

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 permette de classifier 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 en 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.
- Les valeurs de ces notes factorielles sur les mêmes composantes principales. Ce critère est généralement considéré comme secondaire et souvent subjectif. En raison de ce caractère subjectif, nous ne l'utiliserons pas pour regrouper les rivières en régions hydrologiques homogènes.

Sur le plan purement 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, effectuée 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  $\geq 1$  – 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 corrélé les variables hydrologiques qui définissent les composantes principales à ces facteurs. Ces derniers sont consignés dans le tableau 1.2. Leurs valeurs ont été tirées de BELZILE et al. (1997) et de 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. 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 1.2 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)	

## 1.3 RÉSULTATS

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

Le tableau 1.3a 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.

Tableau 1.3a 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>	<b>-0,695</b>	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.

Dans le tableau 1.3b 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  $\geq 1$  ont été considérées comme significatives (BEGUIN, 1979) et ont été soumises à la rotation orthogonale. Ce sont seulement les trois premières



composantes qui ont rempli 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 la magnitude des débits hivernaux (JM) ainsi que les mois d'occurrence des débits mensuels maximums (DMAM) et minimums (DMIM). Quant à la seconde composante, elle est associée à la magnitude des débits printaniers (AJ) et au rapport entre ceux-ci et les débits estivaux (AJ/JS). En effet, ces deux variables présentent les saturations les plus élevées sur 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 à la magnitude des débits mensuels minimums (MIM).

Quant aux variances expliquées par les composantes principales, il importe de noter qu'après rotation d'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, la magnitude par les trois.

Tableau 1.3b 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%

### 1.3.2 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. 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 (magnitude, période d'occurrence et variabilité intermensuelle) 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 composantes comme il est courant dans de nombreux travaux. Nous avons donc tenu compte de toutes les trois composantes principales pour classer et caractériser les régimes hydrologiques.

Tableau 1.4 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	DMAM	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 Mai	≤ 54%	≤ 3,5	≤ 12	> 3%
V	-	+	+	9	≤ 12%	Juin Mai	> 54%	> 3,5	> 12	≤ 3%
VI	-	+	-	10	≤ 12%	Juin Mai	> 54%	> 3,5	≤ 12	> 3%
VII	-	-	+	19	≤ 12%	Juin Mai	≤ 54%	≤ 3,5	> 12	≤ 3%
VIII	-	-	-	12	≤ 12%	Juin	≤ 54%	≤ 3,5	≤ 12	> 3%

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

Sur la base des signes des notes factorielles sur les trois composantes principales, nous avons défini 8 régimes hydrologiques naturels (tableau 1.4). 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 valeurs 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.

- 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 sur 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.

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.

En ce qui concerne la répartition spatiale de ces régimes hydrologiques, ils ne forment pas des régions contiguës. 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 superficie de certains bassins versants. Cependant, l'avantage incontestable 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.

### **1.3.3 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 1.5. 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  $>$  à  $0^{\circ}\text{C}$ , mais est positivement corrélé aux températures annuelles 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.

Tableau 1.5 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% sont soulignés en gras.

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 ( $r < 0,300$ ). Du point de vue 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 versant 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.

#### 1.4 DISCUSSION ET CONCLUSION

Depuis les travaux de PARDE (1955), deux critères sont généralement utilisés pour classifier 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 (magnitude 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 la magnitude des débits, 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 quatre 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). Ainsi, ce critère ne peut être utilisé pour différencier les régimes hydrologiques. En ce qui concerne les variables hydrologiques, les onze variables que nous avons analysées représentent quatre (magnitude, période d'occurrence, variabilité intermensuelle des débits et la durée) de 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 (magnitude, période d'occurrence et

variabilité inter-mensuelle) contribuent, à part égale, à la différenciation spatiale des régimes hydrologiques au Québec. En ce qui concerne la magnitude, 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 à la magnitude des débits hivernaux 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 due 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 intermensuelle 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 analysées, à savoir la magnitude, la variabilité annuelle et la période d'occurrence. 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 n'a pas été démontrée.

L'apport incontestable 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 à composantes principales, nous avons démontré 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'écoulements) 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.

## 1.5 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.
- CLAUSSEN B., BIGGS, B.J.F., 2000. Flow variable for ecological studies in temperate 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.
- CHURCH M., 1995. Geomorphic response to river flow regulation: case studies and time-scales. *Regul. Rivers : Res. Mgmt.* 11, 3-22.
- DAGNELIE P. 1986. *Analyse statistique à plusieurs variables*. Les presses agronomiques de Gembloux, Gembloux, 4<sup>ème</sup> édition, 362p.
- DAVIAU J-L., ADAMOWSKI K., PATRY G.G., 2000. Regional flood frequency analysis using GIS, L-moment and geostatistical methods. *Hydrological processes*, 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 Resources Bulletin*, 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., SAELTHUM 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 Research and Applications*, 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. Mmgt.* 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.

## Chapitre 2

Régionalisation et facteurs de variabilité spatiale des caractéristiques des débits maximums annuels au Québec (Canada). Application de la nouvelle approche éco-géographique.

# REGIONALISATION ET FACTEURS DE VARIABILITÉ SPATIALE DES CARACTÉRISTIQUES DES DÉBITS MAXIMUMS ANNUELS AU QUÉBEC (CANADA). APPLICATION DE LA NOUVELLE APPROCHE ECO-GEOGRAPHIQUE

Simon TARDIF<sup>1</sup>, Ali A. ASSANI<sup>1</sup>, Safia BENSEGHIR<sup>1</sup>, Mhamed Mesfioui<sup>2</sup> &

Alain CHALIFOUR<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 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.

<sup>2</sup> Département de Mathématiques et d'Informatique, Université du Québec à Trois-Rivières, 3351, Boulevard des Forges, Trois-Rivières, Québec, G9A 5H7, Canada.

## Résumé :

Nous proposons une nouvelle approche de régionalisation qui vise les deux finalités suivantes : détermination des régions hydrologiques homogènes « naturelles » en tenant compte de toutes les caractéristiques des débits et recherche des facteurs environnementaux de la variabilité spatiale de ces caractéristiques. Nous l'avons appliquée aux débits maximums annuels au Québec (Canada). En ce qui concerne la régionalisation des débits moyens annuels, cinq composantes principales significatives ont été extraites à partir de 17 variables hydrologiques. Ces cinq composantes représentent adéquatement les cinq caractéristiques hydrologiques suivantes : la variabilité interannuelle de la magnitude (25,5% de variance totale expliquée), la magnitude (23,8%), l'asymétrie et l'aplatissement (17,1%), la date d'occurrence (14,6%) et la variabilité interannuelle des dates d'occurrence (12,5%) des débits maximums annuels. La combinaison des signes des notes factorielles des cinq composantes principales nous a permis d'identifier 23 régions hydrologiques homogènes « naturelles effectives », non contiguës spatialement, et 9 régions hydrologiques homogènes « naturelles fictives ou virtuelles ». Ces dernières ne sont en fait représentées par aucune station analysée.

L'analyse des corrélations entre les composantes principales et les facteurs environnementaux (physiographiques et climatiques) a révélé les résultats suivants :



- La variabilité interannuelle de la magnitude, associée à la première composante principale, est négativement corrélée à la superficie des bassins versants.
- La magnitude (débits spécifiques), associée à la seconde composante principale, est mieux corrélée négativement à la superficie occupée par les lacs et les marais dans un bassin versant.
- L'asymétrie et l'aplatissement, associés à la troisième composante principale, ne sont corrélés à aucun facteur environnemental.
- La date d'occurrence, associée à la quatrième composante principale, est mieux corrélée négativement aux températures printanières et estivales.
- Enfin, la variabilité interannuelle des dates d'occurrence, associée à la dernière composante principale, est mieux corrélée négativement à la superficie couverte par les forêts dans un bassin versant.

Mots clés : Régionalisation, approche éco-géographique, débits maximums annuels, analyse en composantes principales, facteurs physio-climatiques, Québec.

## 2.1 INTRODUCTION

La régionalisation des débits fait l'objet de nombreux travaux, au point qu'on peut la considérer comme une discipline à part entière en hydrologie (voir à ce propos les synthèses de Cunanne, 1988 ; GREHYS, 1996a, 1996b ; Ouarda et al., 1999 ; Tasker, 1982). Cependant, malgré le développement de méthodes de régionalisation, il subsiste encore des divergences plus ou moins profondes entre les hydrologues d'une part, et entre ceux-ci et les spécialistes des autres disciplines (écologie aquatique et géographie physique) intéressées par la régionalisation des débits d'autre part. Ces divergences portent sur les cinq points suivants :

- Le choix des variables hydrologiques à utiliser pour la régionalisation.
- Les méthodes de regroupement des stations en régions hydrologiques homogènes.
- Le choix des lois statistiques adéquates pour estimer les quantiles sur des sites non jaugés ou partiellement jaugés.
- L'échelle d'analyse des débits pour la régionalisation.
- La finalité de la régionalisation.

En fonction du choix des variables hydrologiques à utiliser pour la régionalisation, de l'échelle d'analyse et de la finalité de la régionalisation, on peut regrouper les travaux de régionalisation en deux approches différentes :

- L'approche hydrologique. La majorité de travaux existants utilise cette approche en raison de son intérêt pratique. Elle est fondée sur un choix subjectif de quelques variables hydrologiques pour la régionalisation en raison de l'absence d'un concept scientifique pour justifier ce choix. La conséquence de ce choix subjectif se répercute sur le nombre de régions hydrologiques homogènes. Ce nombre dépend fortement des variables hydrologiques utilisées pour la régionalisation, ainsi au Québec, le nombre des régions hydrologiques homogènes déjà proposées varie entre 3 et 13 en fonction entre autres des variables hydrologiques utilisées. Les régions hydrologiques ainsi définies ne reflètent plus la variabilité des caractéristiques physiographiques des débits qui influencent l'écoulement. La définition du concept même de l'homogénéité devient subjective

(Ouarda et al., 1999). Quant à l'échelle d'analyse, l'approche hydrologique se limite exclusivement aux séries annuelles des débits journaliers et en particulier aux débits maximums journaliers (figure 2.3) en raison de sa finalité qui est de pouvoir estimer les valeurs des quantiles des débits sur des sites non jaugés ou partiellement jaugés. Malgré son intérêt pratique indéniable, l'approche hydrologique n'a que très peu intéressé les spécialistes des autres disciplines, notamment les écologistes (Olden et Poff, 2003). Ce désintérêt s'explique en partie par sa finalité (estimation des débits) et l'échelle d'analyse (limitée seulement aux débits maximums), qui ne répondent pas de manière satisfaisante aux préoccupations des écologistes et des géographes.

- L'approche écologique a été développée par les écologistes pour pallier aux faiblesses de l'approche hydrologique. C'est ainsi que dès le départ, les écologistes se sont particulièrement penchés sur la question du choix des variables pour la régionalisation en tenant compte d'un grand nombre des variables hydrologiques (Hughes et James, 1986 ; Jowett et Duncan, 1990 ; Poff et Ward, 1989). Le choix de nombreuses variables hydrologiques s'est finalement justifié dans le cadre d'un nouveau concept scientifique introduit en écologie aquatique durant les années 90, à savoir le concept du régime des débits naturels. Selon ce concept, pour maintenir entièrement ou partiellement la biodiversité et le fonctionnement des écosystèmes aquatiques et ripariens, il faut tenir compte de toutes les caractéristiques des débits, chaque caractéristique jouant un rôle écologique précis. Richter et al. (1996) ainsi que Poff et al. (1997), entre autres, ont identifié cinq caractéristiques fondamentales qui définissent les régimes hydrologiques des rivières. Pour définir les cinq caractéristiques, il a fallu recourir à de nombreuses variables hydrologiques. C'est ainsi que Richter et al. (1996) proposèrent 33 variables hydrologiques pour les définir. Olden et Poff (2003), après avoir fait un choix parmi 171 variables hydrologiques utilisées dans la littérature au moyen de l'analyse en composantes principales, optèrent pour 26 variables hydrologiques pour définir ces cinq caractéristiques. Il convient de préciser que les écologistes se sont avant tout intéressés au choix des variables pour caractériser écologiquement les rivières ou quantifier les impacts anthropiques sur les régimes des cours d'eau. C'est ainsi qu'il existe encore très peu de travaux de régionalisation basés sur l'approche écologique. Poff (1996) l'a

appliquée aux États-Unis en utilisant seulement 12 variables hydrologiques. Cependant, celles-ci ne décrivaient pas toutes les cinq caractéristiques des débits comme le stipule le concept du régime des débits naturels. Ainsi, même en écologie aquatique, on ne tient pas encore compte de toutes les caractéristiques des débits pour la régionalisation. En ce qui concerne l'échelle d'analyse, l'approche écologique tient compte simultanément de toutes les échelles (annuelle, mensuelle et journalière) et sa finalité est d'expliquer les différences des structures, d'organisation et de la dynamique des communautés biologiques observées entre les écosystèmes aquatiques et ripariens.

L'objectif de cette note est de présenter une nouvelle approche de régionalisation (méthode éco-géographique) qui repose sur le même concept de « régime des débits naturels » mais se distinguant de l'approche écologique sur trois points fondamentaux suivants :

- La méthode que nous proposons est fondée sur l'utilisation des caractéristiques des débits et non des variables hydrologiques. Ce choix se justifie par le fait qu'il existe une infinité de variables hydrologiques pour définir les cinq caractéristiques fondamentales. Ainsi, il est impossible d'en tenir compte pour la régionalisation. En revanche, comme le nombre des caractéristiques fondamentales est limité, il est donc possible de tenir compte de toutes les caractéristiques des débits. On rencontre ainsi les exigences du concept de « régime des débits naturels ».

- La finalité de la méthode de régionalisation que nous proposons est de rechercher les facteurs physiographiques et climatiques qui expliquent la variabilité spatiale de ces caractéristiques fondamentales. Pour atteindre cette finalité, on doit analyser séparément les échelles de temps (annuelle, mensuelle et journalière) du fait que l'influence de ces facteurs physiographiques et climatiques ne peuvent nécessairement pas être mises en évidence à toutes les échelles temporelles. L'influence de certains de ces facteurs peut se manifester à certaines échelles et disparaître à d'autres échelles.

- L'analyse séparée des échelles de temps permet de définir toutes les caractéristiques des débits associées à chaque échelle. En effet, en analysant simultanément toutes les échelles, on n'arrive pas à définir toutes les caractéristiques des débits associées à chaque échelle. Ainsi par exemple, les variables proposées par Richter et al. (1996) ne

définissent qu'une seule caractéristique des débits aux échelles annuelle et mensuelle. Or, pour mettre en évidence tous les facteurs de variabilité des débits à cette échelle donnée, il faut tenir compte de toutes les caractéristiques des débits à cette échelle d'analyse.

Nous allons appliquer cette nouvelle méthode de régionalisation basée sur les caractéristiques des débits aux des débits maximums annuels qui sont couramment utilisées en hydrologie.

## 2.2 PRÉSENTATION DE LA MÉTHODE ÉCO-GÉOGRAPHIQUE

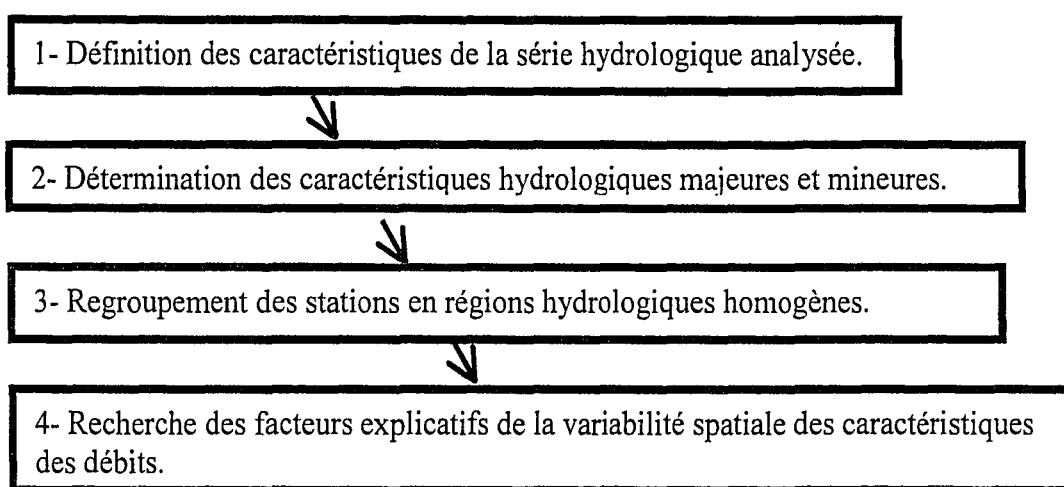


Figure 2.1 Les quatre étapes d'application de l'approche éco-géographique.

### 2.2.1 Définition des caractéristiques des débits.

La première étape de l'approche éco-géographique consiste à définir toutes les caractéristiques des débits associées à la série hydrologique analysée (Assani, 2003). Le concept de « régime des débits naturels » a permis d'établir une différence nette entre une « caractéristique » des débits et une « variable ou indice hydrologique » (Richter et al., 1996; Poff et al., 1997). Ces deux notions ou concepts sont généralement confondus en hydrologie. C'est ainsi qu'il est important de les définir de manière claire car la différence entre la méthode éco-géographique et les deux approches est basée sur ces deux notions. Une « caractéristique » des débits est une composante intrinsèque des débits ou un paramètre qui permet de caractériser les débits d'une rivière. Quant à la « variable ou indice hydrologique », c'est une variable statistique qui sert à définir une

caractéristique des débits. Pour illustrer ces deux définitions, nous donnons l'exemple suivant : la fréquence est une caractéristique des débits. Cette fréquence (caractéristique) peut être définie par une multitude des variables ou indices hydrologiques comme les débits de récurrence de 100 ans, de 50 ans, de 5 ans ou par les percentiles 99, 95, 90, calculés sur une série hydrologique donnée. Le nombre de caractéristiques est limité alors que celui des variables hydrologiques qui les définissent peut être illimité.

Il découle de ces deux notions, les postulats de base sur lesquels se fonde la méthode éco-géographique :

- Une caractéristique des débits peut être définie par un nombre limité des variables hydrologiques car toutes les variables hydrologiques se rapportant à une même caractéristique sont corrélées entre elles.
- Une caractéristique des débits intègre tous les facteurs physiographiques et climatiques qui influencent toutes les variables qui la définissent.
- Le nombre de caractéristiques des débits varie en fonction de l'échelle d'analyse.
- Pour mettre en évidence les facteurs physiographiques de la variabilité spatiale des débits à une échelle d'analyse donnée, il faut tenir compte de toutes les caractéristiques qui définissent les débits à cette échelle.

En écologie aquatique, Richter et al. (1996), entre autres, ont défini cinq caractéristiques des débits et leurs rôles écologiques. Ces rôles sont présentés au tableau 2.1.

Tableau 2.1 Les cinq caractéristiques du débit et leurs rôles écologiques.

Caractéristiques	Rôles écologiques
Magnitude	Mesure du volume d'habitats disponible pour les espèces aquatiques ou semi-aquatiques. Mesure de la position de la nappe par rapport aux systèmes racinaires de la végétation riparienne.
Période d'occurrence	Peut déterminer si certains cycles vitaux seront satisfaits ou non et peut influencer le degré de stress associé aux conditions extrêmes telles les inondations ou les sécheresses.
Fréquence	Peut être reliée à la reproduction et à la mortalité des espèces, influençant ainsi la dynamique des populations.
Durée	Peut déterminer si des phases particulières des cycles vitaux peuvent être complétées ou non. Peut affecter le degré de stress associé aux événements extrêmes comme les inondations ou les sécheresses.
Taux de variation	Indique la variabilité du volume d'habitats disponibles et peut influencer la capacité de la végétation à maintenir un contact avec la nappe phréatique.

(Adapté de Richter et al., 1996)

### 2.2.2 Détermination des caractéristiques majeures et mineures des débits.

En écologie aquatique, chaque caractéristique joue un rôle écologique précis dans le fonctionnement des écosystèmes aquatiques. Toutefois, le rôle de certaines caractéristiques est plus important que celui des autres, malgré leur complémentarité nécessaire au fonctionnement des écosystèmes. De même, on peut concevoir que certaines caractéristiques des débits peuvent mieux refléter l'influence des facteurs physiographiques que d'autres, d'où l'importance de les hiérarchiser. Dans la méthode éco-géographique, cette hiérarchisation est fondée sur le poids (variance expliquée) de chaque caractéristique au moyen de l'analyse en composantes principales. Si toutes les caractéristiques avaient le même poids, la variance totale expliquée (VTE) par chaque composante principale associée à chacune des caractéristiques serait égale. Il s'ensuit

que les caractéristiques dont les variances totales expliquées sont plus élevées peuvent être considérées comme des caractéristiques « majeures » tandis que les autres caractéristiques seront considérées comme « mineures ». Une caractéristique des débits est alors considérée comme « majeure » lorsque elle satisfait à la relation suivante :

$$VTE \geq \frac{100\%}{n} \quad (1)$$

n étant le nombre total des caractéristiques qui définissent la série hydrologique analysée.

Les autres caractéristiques dont la variance totale expliquée ne satisfait pas à cette relation sont dites « mineures ». Les caractéristiques majeures sont celles qui sont généralement associées aux deux ou trois premières composantes principales. Celles-ci permettent une meilleure différenciation et une meilleure caractérisation des régions hydrologiques homogènes.

### **2.2.3 Regroupement des stations en régions hydrologiques homogènes naturelles.**

Il n'existe aucune méthode statistique idéale permettant un regroupement objectif des stations en régions hydrologiques homogènes. Ainsi, les méthodes de regroupement dépendent en partie des données et de la finalité de la régionalisation. Dès lors, il est difficile de généraliser ces méthodes dans toutes les approches de régionalisation. Toutefois, cette question fait l'objet de nombreux débats en hydrologie (approche hydrologique) et plusieurs méthodes de regroupement ont été déjà proposées. Dans son analyse comparative des méthodes, GREHYS (1996b) a recommandé les deux méthodes de regroupement suivantes : la méthode des « régions d'influence » proposée par Burn (1990, 1997) et celle d'analyse des corrélations canoniques introduite par Cavadias (1990) puis améliorée par Ouarda et al. (2001). Cependant, en tenant compte du concept du « régime des débits naturels » sur lequel repose l'approche éco-géographique et de sa finalité, ces deux méthodes de regroupement ne peuvent être appliquées pour les raisons suivantes :



- Elles n'utilisent qu'une ou deux variables hydrologiques. La régionalisation qui en découle ne tient pas compte de toutes les caractéristiques des débits conformément au concept de « régime des débits naturels ».
- Elles incluent les facteurs physiographiques pour regrouper les stations en régions hydrologiques homogènes. Or, la méthode éco-géographique exclut tout facteur physiographique dans le processus de regroupement car l'homogénéité hydrologique ne peut être définie qu'en tenant compte de toutes les caractéristiques des débits exclusivement et non des facteurs physiographiques.
- Elles conduisent parfois au rejet de certaines stations lors du processus de regroupement. À ce propos, Ancil 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 ».
- Elles ne permettent pas de caractériser du point de vue hydrologique les régions homogènes formées.

En écologie aquatique, la question du regroupement des stations n'a jamais fait l'objet des débats comme en hydrologie. La seule méthode utilisée jusqu'à présent est celle des dendrogrammes (Poff, 1996), mais selon GREHYS (1996b), cette approche est très subjective du fait que le nombre de dendrogrammes peut varier d'une personne à une autre: "The notion of set of homogeneous region rather than a method for determining homogeneous regions require subjective choices (e.g. how many clusters should be selected in a cluster analysis, which variables should be used to define similarity, etc.)". Par ailleurs, du point de vue hydrologique, les régions homogènes formées par cette approche ne peuvent être caractérisées.

Pour minimiser l'effet de jugement personnel dans le processus de regroupement des stations en régions hydrologiques homogènes, nous proposons de regrouper les stations selon les signes de leurs notes factorielles sur les composantes principales significatives. Sur la base de ce critère, le nombre des régions hydrologiques homogènes naturelles est déterminé selon la relation suivante :

$$NR = 2^m \quad (2)$$

où NR est le nombre de régions hydrologiques homogènes théoriques et m est le nombre de caractéristiques associées aux composantes principales significatives et où 2 représente les signes + et – que peuvent prendre les notes factorielles des stations sur les composantes principales.

Le choix des signes notes factorielles à la place de leurs valeurs se justifie par les raisons suivantes :

- L'utilisation des signes de notes factorielles permet de tenir compte de toutes les caractéristiques des débits dans le processus de regroupement, conformément au concept du « régime des débits naturels ». Dans le cas des valeurs des notes factorielles, le regroupement devient difficile du fait qu'on travaille dans un espace multidimensionnel difficile à visualiser.
- On peut caractériser du point de vue hydrologique les régions hydrologiques homogènes définies. Le signe d'une note factorielle sur une composante a une signification hydrologique précise du fait qu'il dépend de la valeur de la variable sur cette composante.
- L'utilisation des signes permet de résoudre la question du « voisinage » à laquelle est confrontée de nombreuses méthodes de regroupement, c'est-à-dire le cas des bassins versants qui peuvent être à la limite de deux régions. Par ailleurs, elle ne conduit à aucun rejet des stations lors du processus de regroupement.
- L'utilisation des signes pourra permettre la comparaison de l'importance des différentes classes (régions hydrologiques homogènes) entre les régions climatiques et lithologiques différentes dans le monde du fait que le nombre des caractéristiques des débits d'une série hydrologique étant le même partout dans le monde, le nombre des régions hydrologiques théoriques maximums définies à partir de cette série sera aussi le même partout.

Il découle de l'application de la formule 2 deux types de régions hydrologiques homogènes (classes) : les régions homogènes « effectives » et les régions homogènes « fictives ou virtuelles ». Dans un territoire géographique donné, une région homogène est effective lorsqu'elle contient au moins une station hydrologique. Dans le cas

contraire, elle devient fictive ou virtuelle. L'existence des régions hydrologiques fictives peut paraître étrange à première vue mais en fait, elle traduit l'influence de deux facteurs dans la régionalisation : l'échantillonnage ainsi que les conditions physiographiques et climatiques du territoire analysé.

En ce qui concerne l'échantillonnage, la présence de régions hydrologiques homogènes fictives peut traduire simplement l'absence des stations parmi les stations analysées qui présentent les combinaisons de caractéristiques des débits définissant ces régions hydrologiques. Cette absence se justifie par le fait qu'on ne tient pas compte de toutes les rivières dans la régionalisation des débits, on perd ainsi certaines informations sur les caractéristiques des débits et les facteurs qui les influencent. Quant aux conditions physiographiques et climatiques, l'existence des régions homogènes fictives dans un territoire donné peut être interprétée comme l'absence de l'influence de certains facteurs physiographiques et climatiques sur la variabilité spatio-temporelles des débits dans ce territoire. Ainsi, les facteurs physiographiques et climatiques présents dans un territoire donné permettent l'existence de certaines régions homogènes dont les caractéristiques des débits sont influencées par ces facteurs. Les régions dont les caractéristiques des débits ne sont pas influencées par ces facteurs deviennent dès lors fictives dans ce territoire. À titre d'exemple, la présence d'une roche calcaire peut se traduire par une variabilité intra-annuelle des débits très faible et par conséquent, les régions hydrologiques homogènes caractérisées par une forte variabilité des débits peuvent ne pas exister sur ce territoire. Il s'ensuit que les facteurs physiographiques et climatiques rendent possibles certaines combinaisons de caractéristiques des débits et impossibles d'autres combinaisons.

#### **2.2.4 Recherche des facteurs explicatifs de la variabilité spatiale des caractéristiques des débits**

La finalité de l'approche éco-géographique est de déterminer les facteurs physiographiques et climatiques susceptibles d'expliquer la variabilité spatiale des caractéristiques des débits. Pour déterminer ces facteurs, nous proposons d'utiliser la méthode canonique des corrélations. Celle-ci permet d'analyser simultanément toutes les caractéristiques aux facteurs physiographiques et climatiques tout en maximisant les

valeurs de coefficients de corrélation. L'analyse canonique des corrélations est largement utilisée dans de nombreuses disciplines. Par rapport aux autres méthodes d'analyses multivariées, l'analyse canonique des corrélations tient compte aussi bien des corrélations intragroupes que des corrélations croisées entre variables des deux groupes. En effet, elle crée des facteurs (transformations linéaires des variables, communément appelés variables canoniques) dans le premier groupe (variables dépendantes) simultanément à des facteurs dans le second groupe (variables indépendantes). Elle impose à ces facteurs d'être orthogonaux entre eux au sein d'un même groupe, de sorte qu'ils s'interprètent comme de dimensions indépendantes du phénomène exprimé par un groupe de variables. Ainsi, l'analyse canonique permet de maximiser la corrélation entre le premier facteur du premier groupe et le premier facteur du second groupe ; ensuite entre les seconds facteurs des deux groupes, chacun étant orthogonal aux deux facteurs de la première paire ; ensuite entre les troisièmes facteurs et ainsi de suite. La méthode produit donc des paires de facteurs, un pour chaque groupe de variables, obtenus en maximisant la corrélation entre facteurs d'une même paire et en respectant la condition d'orthogonalité entre facteurs d'un même groupe. Chaque paire de facteurs exprime un type de relation entre variables des deux groupes. L'intensité de la relation d'un type déterminé est mesurée par un coefficient de corrélation dit canonique qui est le coefficient de corrélation entre les facteurs d'une même paire (Beguin, 1979). La description mathématique de cette méthode est exposée dans la plupart des ouvrages classiques traitant des méthodes multivariées (Afifi et Clark, 1996).

### **2.3 APPLICATION DE L'APPROCHE ÉCO-GÉOGRAPHIQUE À LA RÉGIONALISATION DES DÉBITS MAXIMUMS ANNUELS AU QUÉBEC.**

Pour illustrer cette méthode, nous allons l'appliquer aux débits maximums annuels. C'est la série la plus couramment utilisée en hydrologie pour la régionalisation.

### 2.3.1 Source des données

Le réseau hydrographique du Québec est divisé en trois grands bassins versants. Dans le cadre de cette étude, nous nous limiterons seulement au bassin du fleuve Saint-Laurent (673 000 km<sup>2</sup>) puisqu'il n'existe pas assez de stations de jaugeage des débits dans les deux autres bassins versants de Baies d'Ungava (518 000 km<sup>2</sup>) et d'Hudson (492 000 km<sup>2</sup>). Du point de vue lithologique, le bassin du 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 du Saint-Laurent (schistes et carbonates), ces dernières, de faible étendue, longent les deux rives du fleuve dont elles tirent leur nom. Les données des débits analysés sont publiées dans le Sommaire chronologique de l'écoulement au Québec édité par Environnement Canada (1992). Dans le cadre de cette étude, nous avons retenu seulement les stations dont les mesures de débits ont été effectuées entre 1960 et 1990 et qui ne sont pas influencées par les activités anthropiques comme la présence de barrages. En effet, c'est durant cette période qu'on a pu disposer d'un grand nombre de stations hydrologiques et climatiques. De plus, pour pouvoir comparer la variabilité interannuelle des débits d'une rivière à l'autre, il fallait nécessairement travailler sur une période commune de mesure des débits. En tenant compte de toutes ces contraintes, nous avons analysé 62 stations au total dont la superficie des bassins versants varie entre 1,2 et 22000 km<sup>2</sup> (fig.2.2).

En ce qui concerne les facteurs de variabilité spatiale, nous avons retenu 13 facteurs se répartissant en trois catégories (tableau 2.2) :

- Les variables liés aux caractéristiques physiographiques des bassins versants : la superficie, la longueur et la pente moyenne du cours d'eau. Ces données ont été tirées de Belzile et al. (1997).
- Les variables liées aux caractéristiques des types d'affectation du sol et du couvert végétal : % du couvert forestier et % de la superficie occupée par les lacs et marais dans un bassin versant. Ces données ont été aussi tirées de Belzile et al. (1997).
- Les variables qui définissent les conditions pluviométriques et thermiques (facteurs climatiques) d'un bassin versant : les précipitations annuelles totales, les précipitations et

le nombre des jours pluvieux de la saison froide (d'octobre à mars), la température moyenne annuelle, la température moyenne et le nombre de jours avec des températures > 0°C en saison froide, la température moyenne printanière et estivale. Les données climatiques ont été publiées par Environnement Canada (1991). Dans chaque bassin versant, on choisissait la station météorologique la plus proche de la station hydrologique. Pour les grands bassins versants, nous avons tenu d'abord compte de toutes les stations situées dans le bassin versant. Ensuite, nous avons calculé une moyenne globale par la méthode de Thiessen qu'on a comparée à celle mesurée à la station la plus proche. Ces deux moyennes étaient généralement très peu différentes en raison de la faible variabilité topographique des bassins versants au Québec. Par conséquent, le choix de la station la plus proche se justifiait.

Tableau 2.2 Facteurs environnementaux 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 à mars)	mm
	P3	Nombre de jours pluvieux (octobre à mars)	
Température	T1	Moyenne annuelle	(°C)
	T2	Moyenne saisonnière (octobre à mars)	(°C)
	T3	Moyenne saisonnière (avril à juin)	(°C)
	T4	Moyenne saisonnière (juillet à septembre)	(°C)
	T5	Nombre des jours avec T > 0°C en hiver (octobre à mars)	

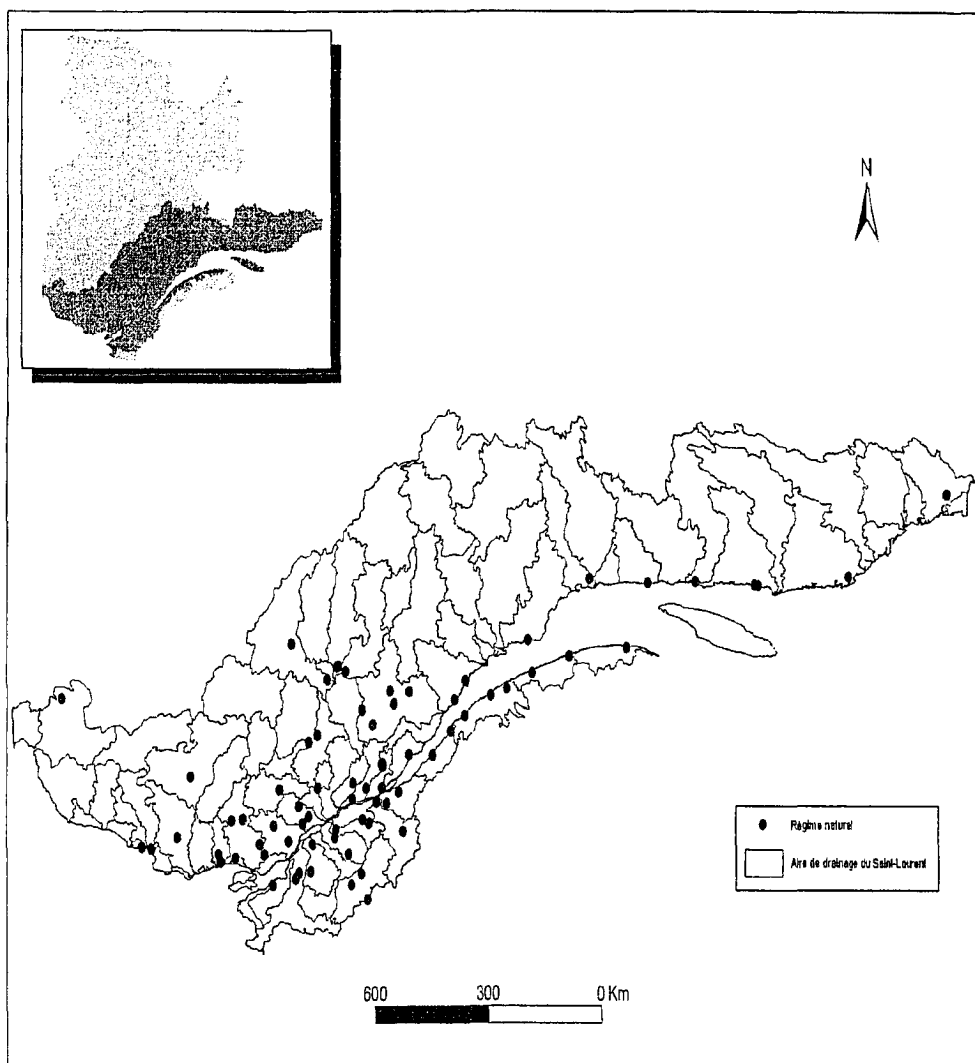


Figure 2.2 Localisation des stations de jaugeage.

### 2.3.2 Définition des caractéristiques des débits maximums annuels

Théoriquement, une série hydrologique des débits maximums annuels ne peut être définie que par cinq caractéristiques : la magnitude, la fréquence, la période d'occurrence, la forme de courbe de distribution et la variabilité interannuelle des débits. Cette dernière caractéristique peut être divisée en deux : la variabilité de la magnitude et celle de la période d'occurrence. Par ailleurs, il est difficile de distinguer la magnitude de la fréquence car les deux caractéristiques peuvent être définies par les mêmes variables du fait que la fréquence d'un débit est définie par une magnitude. Les deux

caractéristiques peuvent donc être fusionnées. En tenant compte de cette fusion, une série hydrologique des débits maximums annuels peut être définie par les cinq caractéristiques suivantes : la magnitude-fréquence et sa variabilité interannuelle, la forme de courbe de distribution ainsi que la période d'occurrence et sa variabilité interannuelle. Il convient de préciser que la caractéristique « forme de courbe de distribution » ne fait pas partie de cinq caractéristiques fondamentales proposées par Richter et al. (1996) mais les variables hydrologiques qui définissent cette caractéristique sont fréquemment utilisées en régionalisation par l'approche hydrologique. C'est le cas notamment de la méthode proposée par Hosking et Wallis (1993). Ces auteurs utilisent seulement les coefficients de symétrie et d'aplatissement pour la régionalisation. Ainsi, il nous semble justifié de tenir compte de cette caractéristique dans la régionalisation des débits.

La caractéristique magnitude-fréquence a été définie par quatre variables statistiques. Pour éviter « l'effet de taille », dû à la différence des aires des bassins versants, sur les valeurs de coefficients de corrélation et sur les notes factorielles, nous avons divisé les valeurs de ces variables par les superficies de bassins versants (pour l'obtention des débits spécifiques). Cette transformation permet ainsi de pouvoir comparer aisément la magnitude des débits entre bassins versants de différentes tailles. Quant à la variabilité inter-annuelle de la magnitude, elle a été définie aussi par quatre variables statistiques dont les valeurs sont indépendantes de la taille des bassins versants. Enfin, la forme de distribution des fréquences des débits a été définie par trois variables dont les coefficients d'asymétrie et d'aplatissement (coefficients de Pearson). Il convient de préciser qu'on pouvait augmenter le nombre des variables statistiques pour définir davantage ces trois caractéristiques, mais cette augmentation n'aurait aucun impact sur les résultats finaux de l'analyse en composantes principales en vertu du second postulat qui stipule que les variables hydrologiques qui définissent une même caractéristique des débits sont généralement corrélées entre elles.



Tableau 2.3 Les variables hydrologiques utilisées pour définir les cinq caractéristiques des débits maximums annuels.

Caractéristiques	Code	Variables statistiques	Signification
Magnitude	V <sub>1</sub>	Mo	Moyenne
	V <sub>2</sub>	Me	Médiane
	V <sub>3</sub>	P <sub>10</sub>	Percentile 10
	V <sub>4</sub>	P <sub>90</sub>	Percentile 90
Variabilité interannuelle De la magnitude	V <sub>5</sub>	$(P_{90}-P_{10})/Me$	
		$D_{max}/D_{min}$	$D_{max}$ = Débit maximum
	V <sub>6</sub>		$D_{min}$ = Débit minimum
	V <sub>7</sub>	CV	Coefficient de variation (%)
	V <sub>8</sub>	$(D_{max}-D_{min})/Me$	
Forme de la courbe de distribution	V <sub>9</sub>	$P_{90}/P_{10}$	
	V <sub>10</sub>	$(Mo-Me)/Me$	
	V <sub>11</sub>	B <sub>1</sub>	Coefficient d'asymétrie
	V <sub>12</sub>	B <sub>2</sub>	Coefficient d'aplatissement
Période d'occurrence (jour julien)	V <sub>13</sub>	M	Mode
	V <sub>14</sub>	Me	Moyenne
	V <sub>15</sub>	Mo	Médiane
Variabilité interannuelle De la période d'occurrence	V <sub>16</sub>	CV	Coefficient de variation (%)
	V <sub>17</sub>	$(P_{90}-P_{10})/Me$	

### 2.3.3 Détermination des caractéristiques majeures et mineures des débits maximums annuels.

Le tableau 2.4 présente les valeurs de saturation des variables hydrologiques sur les cinq composantes principales significatives et la variance totale expliquée par chaque composante après rotation orthogonale varimax. Rappelons que seules les composantes principales dont la valeur propre était supérieure à 1 étaient considérées comme significatives, critère le plus utilisé dans la littérature. Ce tableau révèle que chaque

caractéristique des débits est associée à une composante principale : la variabilité interannuelle de la magnitude à la première composante, la magnitude à la seconde, la forme (asymétrie et aplatissement) des courbes de distribution des débits à la troisième, la date d'occurrence et sa variabilité interannuelle respectivement à la quatrième et à la cinquième. En fonction de la variance expliquée par chaque composante, on observe que la magnitude-fréquence et sa variabilité interannuelle sont les deux caractéristiques des débits les plus importantes car leur variance expliquée totale est d'environ 49%. Par conséquent, les deux caractéristiques peuvent être considérées comme caractéristiques « majeures » en vertu de la relation 1. Les trois autres caractéristiques sont donc mineures et leur variance totale cumulée est de l'ordre de 44%.

Tableau 2.4. Les saturations des variables sur les cinq composantes principales après rotation d'axes par la méthode varimax.

Variabes	CP1	CP2	CP3	CP4	CP5
V1	0,027	<b>0,999</b>	-0,017	-0,001	0,036
V2	0,003	<b>0,999</b>	-0,026	-0,009	0,035
V3	-0,001	<b>0,998</b>	-0,021	0,007	0,032
V4	0,07	<b>0,996</b>	-0,021	0,003	0,038
V5	<b>0,984</b>	0,074	0,019	0,052	0,038
V6	0,755	-0,069	0,479	0,168	-0,128
V7	<b>0,830</b>	0,019	0,466	-0,034	0,029
V8	0,674	-0,054	0,719	0,082	-0,013
V9	<b>0,954</b>	0,117	-0,030	0,078	-0,008
V10	0,775	-0,042	0,295	-0,026	0,056
V11	0,301	-0,004	<b>0,914</b>	0,169	-0,044
V12	0,150	-0,038	<b>0,969</b>	0,065	-0,071
V13	0,094	-0,008	-0,078	<b>0,809</b>	0,487
V14	0,061	0,031	0,087	<b>0,888</b>	0,414
V15	0,063	-0,030	0,268	<b>0,933</b>	-0,187
V16	0,012	-0,155	0,034	-0,306	<b>-0,866</b>
V17	-0,004	0,014	0,075	-0,043	<b>-0,950</b>
Valeurs propres	4,329	4,040	2,921	2,488	2,130
Variance expliquée (%)	25,5	23,8	17,2	14,6	12,5

#### **2.3.4 Formation et caractérisation des régions hydrologiques homogènes naturelles.**

L'application de la formule 2 permet de former 32 régions hydrologiques homogènes naturelles à partir des cinq caractéristiques car chacune d'elles est associée à une composante principale significative. Le tableau 2.5 présente les signes des notes factorielles associés aux cinq composantes principales qui caractérisent les 32 régions hydrologiques homogènes. La dernière colonne du tableau contient le nombre des stations qui composent chaque région hydrologique homogène naturelle. Il ressort de ce tableau qu'il existe 9 régions hydrologiques homogènes fictives, soit 28% des régions hydrologiques homogènes définies, aucune station analysée ne correspondant aux caractéristiques de ces régions. En ce qui concerne les régions hydrologiques homogènes effectives, on remarque une forte dispersion des stations analysées, aucune région ne contenant plus de 5 stations. Cette dispersion signifie que si on considère toutes les caractéristiques des débits maximums annuels, il existe très peu de stations qui présentent les mêmes caractéristiques. Si on tient compte seulement de deux caractéristiques majeures associées aux deux premières composantes principales, on peut définir ainsi 4 régions hydrologiques homogènes « relatives ». Les deux premières régions sont caractérisées par un signe positif sur la première composante principale et les deux dernières par un signe négatif. La répartition des stations suivant ces quatre régions révèle que seulement 32 % des stations appartiennent aux deux premières régions hydrologiques relatives caractérisées par des notes factorielles positives sur la première composante principale.

La cartographie de ces régions hydrologiques homogènes révèle qu'elles ne sont pas géographiquement contiguës ; deux bassins versants géographiquement contiguës ne présentant pas forcément les mêmes caractéristiques de débits, comme l'avaient déjà noté plusieurs auteurs (Acreman et Wiltshire, 1987 ; Burn, 1990). En raison du nombre élevé des régions hydrologiques homogènes, il a été impossible de les cartographier.

Tableau 2.5 Regroupement des stations en régions hydrologiques homogènes naturelles en fonction des signes de notes factorielles sur les cinq premières composantes principales.

Régions Hydrologiques	CP1	CP2	CP3	CP4	CP5	Nombre de stations
I	+	+	+	+	+	0
II	+	+	+	+	-	3
III	+	+	+	-	+	0
IV	+	+	+	-	-	0
V	+	+	-	+	+	3
VI	+	+	-	+	-	1
VII	+	+	-	-	+	2
VIII	+	+	-	-	-	2
IX	+	-	+	+	+	2
X	+	-	+	+	-	1
XI	+	-	+	-	+	0
XII	+	-	+	-	-	4
XIII	+	-	-	+	+	0
XIV	+	-	-	+	-	3
XV	+	-	-	-	+	3
XVI	+	-	-	-	-	2
XVII	-	+	+	+	+	0
XVIII	-	+	+	+	-	4
XIX	-	+	+	-	+	4
XX	-	+	+	-	-	1
XXI	-	+	-	+	+	3
XXII	-	+	-	+	-	2
XXIII	-	+	-	-	+	1
XXIV	-	+	-	-	-	2
XXV	-	-	+	+	+	0
XXVI	-	-	+	+	-	0
XXVII	-	-	+	-	+	1
XXVIII	-	-	+	-	-	5
XXIX	-	-	-	+	+	5
XXX	-	-	-	+	-	5
XXXI	-	-	-	-	+	0
XXXII	-	-	-	-	-	3

### **2.3.5 Recherche des facteurs explicatifs de la variabilité spatiale des caractéristiques des débits.**

#### **2.3.5a Analyse des corrélations simples**

Nous avons corrélé les composantes principales (notes factorielles des stations) aux facteurs environnementaux susceptibles de rendre compte de la variabilité spatiale de ces caractéristiques (Tableau 2.6). Cette corrélation se justifie dans la mesure où chaque composante principale est associée à une caractéristique hydrologique définie elle-même par un certain nombre des variables statistiques. Donc, les cinq composantes principales remplacent les 17 variables statistiques initiales et du point de vue statistique, cette approche présente deux avantages majeurs :

- L'élimination de l'auto-corrélation spatiale qui affecte les variables hydrologiques initiales. Ainsi, les valeurs des notes factorielles de deux stations géographiquement contiguës ne sont pas nécessairement proches sur une même composante principale.
- L'élimination de « l'effet de taille » sur les coefficients de corrélation. Par la transformation des débits en débits spécifiques, on élimine de facto l'influence de la taille des bassins versants sur les valeurs des notes factorielle des stations sur les composantes principales.

Les coefficients de corrélation calculés entre les caractéristiques des débits associées aux composantes principales et les variables explicatives sont consignés dans le tableau 2.6 qui révèle les faits significatifs suivants :

- La première composante principale, associée à la variabilité interannuelle de la magnitude des débits maximums annuels, est négativement corrélée aux facteurs physiographiques seulement (superficie du bassin versant et longueur du cours d'eau). En effet, la variabilité interannuelle de la magnitude des débits maximums annuels diminue avec l'augmentation de la superficie des bassins versants. Notons que la longueur du cours d'eau est directement proportionnelle à cette superficie.

- La seconde composante principale, associée à la magnitude des débits, est négativement corrélée à la superficie des bassins versants, à la longueur des cours d'eau et à la superficie occupée par les lacs et marais mais positivement corrélée aux précipitations hivernales et au nombre des jours pluvieux en hiver ainsi qu'à la pente moyenne des bassins versants. La corrélation la plus élevée a été observée entre la superficie occupée par les marais et les lacs ; or on sait que la présence de ces plans d'eau a pour effet de stocker l'eau du ruissellement provoquant ainsi l'écrêtement des crues.

- La troisième composante principale, associée à la forme (asymétrie et aplatissement) des courbes de distribution des débits, n'est influencée par aucun facteur.

- La quatrième composante principale, associée à la date d'occurrence des débits maximums annuels, est positivement corrélée à la longueur des cours d'eau et à la superficie couverte par les forêts mais négativement corrélée aux températures moyennes annuelles et saisonnières ainsi qu'au nombre de jours avec des températures supérieures à 0°C en hiver. Ce résultat révèle l'influence déterminante de la température, en particulier la température printanière, sur la date d'occurrence des débits maximums annuels. En effet, lorsque les températures hivernales, printanières et estivales sont élevées, la date d'occurrence des débits maximums annuels survient tôt dans l'année (corrélation négative) en raison de la fonte précoce des neiges. En revanche, la présence d'une couverture forestière importante dans un bassin versant donné tend à retarder l'occurrence des débits maximums annuels (corrélation positive) en retardant la fonte des neiges. Ainsi, la principale conséquence de la déforestation au Québec serait d'avancer la date d'occurrence des débits maximums annuels. Quant à la longueur des cours d'eau ; les débits maximums annuels dans les grands bassins versants surviennent tard, probablement en raison d'un long temps de réponse par rapport aux petits bassins versants.

- Enfin, la cinquième composante principale associée à la variabilité interannuelle des dates d'occurrence est négativement corrélée à la superficie couverte par les forêts mais positivement corrélée aux températures annuelles et saisonnières (hiver, printemps et été), ainsi qu'au nombre des jours avec des températures > 0°C en hiver. Ces résultats révèlent que la présence d'une couverture forestière atténue la variabilité interannuelle

des dates d'occurrence des débits maximums annuels. Par contre, l'augmentation de la température tend à amplifier cette variabilité.

Tableau 2.6 Coefficients de corrélation calculés entre les composantes principales et les facteurs explicatifs.

Facteurs explicatifs	CP1	CP2	CP3	CP4	CP5
B1 (62)	<b>-0,281</b>	<b>-0,419</b>	-0,097	0,220	-0,184
B2 (45)	<b>-0,322</b>	<b>-0,482</b>	-0,194	0,326	-0,256
B3 (45)	0,248	<b>0,361</b>	0,0002	0,080	0,087
A1 (45)	-0,110	0,027	0,147	0,354	<b>-0,567</b>
A2 (45)	-0,169	<b>-0,633</b>	-0,027	0,210	-0,108
P1 (62)	-0,137	<b>0,445</b>	-0,143	0,094	0,049
P2 (62)	-0,095	<b>0,396</b>	-0,092	0,161	0,017
P3 (62)	-0,223	<b>0,256</b>	-0,065	0,219	-0,130
T1 (62)	0,040	-0,113	-0,132	<b>-0,623</b>	<b>0,380</b>
T2 (62)	0,094	0,0002	-0,025	<b>-0,437</b>	<b>0,392</b>
T3 (62)	-0,023	-0,183	-0,194	<b>-0,705</b>	<b>0,282</b>
T4 (62)	0,013	-0,155	-0,210	<b>-0,668</b>	<b>0,301</b>
T5 (56)	0,043	-0,209	-0,020	<b>-0,453</b>	<b>0,359</b>

En gras : significatif au seuil de 5%. ( ) : nombre de rivières

Ces résultats révèlent que les caractéristiques des débits maximums annuels peuvent être expliquées par des données climatiques annuelles et saisonnières. Cependant, les coefficients de corrélation ne peuvent pas rendre compte de tous les facteurs susceptibles d'influencer la variabilité spatiale des caractéristiques des débits ; il est donc important de compléter cette analyse de corrélation par celle des notes factorielles sur les composantes principales. Dans notre cas, nous allons nous limiter aux deux premières composantes principales parce que chacune est associée à une caractéristique majeure. Nous avons représenté les notes factorielles de stations sur les deux composantes dans un plan euclidien en prenant soin de séparer les stations de la rive

sud (rive droite) de celles de la rive nord (rive gauche) du fleuve Saint-Laurent, dans le but de mettre en évidence l'influence éventuelle de la lithologie sur les caractéristiques des débits. Rappelons que la lithologie diffère sur les deux rives. Cependant, nous n'avons observé aucune cohérence spatiale entre les stations des deux rives, ainsi, nous n'avons pas pu identifier l'influence des autres facteurs qui n'ont pas été analysés par la méthode de corrélation.

### **2.3.5b Analyse des corrélations canoniques**

Le tableau 2.7 présente les valeurs des coefficients de corrélation entre les variables canoniques et les variables originales ainsi que les composantes des combinaisons linéaires. On perçoit l'avantage de l'approche éco-géographique qui consiste à synthétiser l'information en utilisant les caractéristiques des débits et non les variables hydrologiques de départ. Les coefficients de corrélation canonique pour l'ensemble des données sont respectivement de  $\lambda_1 = 0,9573$  ;  $\lambda_2 = 0,8866$  ;  $\lambda_3 = 0,6849$  ;  $\lambda_4 = 0,6094$  et  $\lambda_5 = 0,4801$ . Le degré de liaison de l'ensemble des variables est très élevé car la valeur du premier coefficient excède 0,900. Si l'échantillon n'est pas probabiliste, seules les deux premières corrélations canoniques seraient significatives car les valeurs de  $\alpha$  ( $Pr < F$ ) sont respectivement de 0.0001 et 0.0005. Le tableau 7 révèle qu'en ce qui concerne les caractéristiques des débits, la première variable canonique (V1) est positivement corrélée à la quatrième composante principale associée à la période d'occurrence des débits maximums annuels tandis que la seconde variable canonique est corrélée à la seconde composante principale associée à la magnitude-fréquence. Quant à la troisième variable canonique, elle est négativement corrélée à la variabilité interannuelle de la magnitude-fréquence associée à la première composante principale. Les deux dernières variables canoniques sont modérément corrélées à la forme de courbe de distribution ; celle-ci est négativement corrélée à la quatrième variable canonique mais positivement à la cinquième variable. Quant aux facteurs physiographiques, ils sont modérément corrélés aux variables canoniques comparativement aux caractéristiques hydrologiques. La première variable canonique (W1) est corrélée positivement à la superficie occupée par les forêts mais négativement aux températures moyennes annuelles, printanières et estivales. La seconde variable canonique est corrélée



positivement à la pente moyenne des cours d'eau mais négativement à leur longueur totale et à la superficie occupée par les lacs et marais. Les trois dernières variables canoniques sont faiblement liées aux facteurs physiographiques. Il découle des valeurs des caractéristiques des débits et des facteurs physiographiques les faits suivants :

- La période d'occurrence des débits maximums annuels est influencée par la superficie occupée par les forêts, et par les températures moyennes annuelles, printanières et estivales. L'influence de la superficie occupée par les forêts n'a été mise en évidence par les corrélations simples.
- La magnitude-fréquence est influencée par la superficie occupée par les lacs et marais ainsi que la pente et la longueur des cours d'eau. L'influence de tous ces facteurs a été mise en évidence par l'analyse des corrélations simples. Quant aux trois autres caractéristiques (variabilité interannuelle de la magnitude et de la période d'occurrence des débits ainsi que la forme des courbes de distribution), l'analyse canonique des corrélations n'a pas pu mettre en évidence un quelconque lien entre ces caractéristiques et les facteurs physiographiques analysés. Néanmoins, en ce qui concerne la variabilité de la magnitude, un lien relativement faible semble exister avec le nombre de jours pluvieux en hiver. À la lumière de ces considérations, l'analyse canonique des corrélations ne confirme qu'en partie les résultats obtenus par l'analyse des corrélations simples.

Enfin, la redondance totale des caractéristiques des débits ( $R_d$ ), qui exprime la part de variance totale des caractéristiques des débits dont les variables physiographiques rendent compte, atteint 55%. Cette valeur nous autorise à conclure que les caractéristiques des débits sont liées aux variables physiographiques.

Tableau 2.7 Valeurs des coefficients de corrélation entre les variables canoniques et les variables originales ainsi que les composantes des combinaisons linéaires.

	V1	V2	V3	V4	V5	W1	W2	W3	W4	W5
CPI	-0,144	0,018	<b>-0,935</b>	0,060	0,317	-0,138	0,016	<b>-0,641</b>	0,037	0,152
CPII	-0,057	<b>0,910</b>	-0,096	-0,243	-0,316	-0,055	<b>0,807</b>	-0,066	-0,148	-0,152
CPIII	0,052	0,033	0,156	<b>-0,762</b>	<b>0,625</b>	0,050	0,029	0,107	-0,165	0,300
CPIV	<b>0,838</b>	0,261	0,011	0,344	0,333	<b>0,803</b>	0,232	0,007	0,209	0,160
CPV	-0,520	0,319	0,303	0,488	0,546	-0,500	-0,498	0,283	0,207	0,297
B1	0,316	<b>-0,611</b>	0,214	0,345	0,355	0,303	-0,542	0,147	0,210	0,170
B2	0,439	<b>-0,629</b>	0,253	0,403	-0,003	0,420	<b>-0,557</b>	0,174	0,246	-0,002
B3	0,016	<b>0,709</b>	-0,362	0,204	-0,033	0,016	<b>0,628</b>	-0,248	0,124	-0,016
A1	<b>0,665</b>	-0,043	-0,103	<b>-0,517</b>	-0,241	<b>0,637</b>	-0,038	-0,070	-0,315	-0,116
A2	0,267	-0,657	0,347	0,363	0,100	0,255	<b>-0,582</b>	0,238	0,221	0,0480
P1	0,007	0,392	0,389	0,217	<b>-0,543</b>	0,007	0,350	0,267	0,132	-0,261
P2	0,192	0,389	0,349	0,236	-0,526	0,183	0,345	0,239	0,144	-0,252
P3	0,139	0,120	<b>0,613</b>	-0,093	-0,203	0,133	0,107	<b>0,420</b>	-0,057	-0,097
T1	<b>-0,715</b>	-0,048	0,0003	0,149	-0,017	<b>-0,684</b>	-0,043	0,000	0,091	-0,008
T2	-0,461	0,191	-0,030	0,147	0,110	-0,442	0,169	-0,021	0,090	0,053
T3	<b>-0,802</b>	-0,238	0,049	0,078	-0,142	<b>-0,768</b>	-0,211	0,033	0,047	-0,068
T4	<b>-0,752</b>	-0,186	0,006	0,142	-0,049	<b>-0,720</b>	-0,165	0,004	0,087	-0,024
T5	-0,487	-0,094	0,123	0,220	0,111	-0,466	-0,083	0,084	0,134	0,053
VE	0,200	0,200	0,200	0,200	0,200	0,2332	0,1665	0,0843	0,0732	0,0656
Rd	0,1833	0,1572	0,0938	0,0743	0,0461	0,2140	0,131	0,040	0,0270	0,0150

VE = variance totale expliquée par une variable canonique ; Rd = redondance associée à une variable canonique.

## 2.4 DISCUSSION ET CONCLUSION.

Les figures 2.3, 2.4 et 2.5 comparent les deux méthodes de régionalisation des débits utilisées actuellement dans la littérature scientifique avec la nouvelle méthode éco-géographique qui se distingue de deux autres méthodes sur deux points importants : le choix des variables à régionaliser et la finalité de la régionalisation.

En ce qui concerne le choix des variables pour la régionalisation, les approches hydrologique et écologique, sont fondées exclusivement sur les variables hydrologiques. En ce qui concerne l'approche hydrologique, ce choix est arbitraire et ne concerne souvent que quelques variables hydrologiques comme le révèle le tableau 2.8. Ce choix arbitraire doit être attribué à l'absence d'un concept scientifique ou d'une théorie pour le justifier ; ainsi, chaque auteur est libre de choisir les variables qui lui conviennent en fonction de ses objectifs. La comparaison des travaux de régionalisation devient ainsi difficile car les variables hydrologiques ne sont pas les mêmes, il s'ensuit que le nombre de régions hydrologiques homogènes est fortement influencé entre autres par le choix des variables. Au Québec, par exemple, le nombre des régions hydrologiques homogènes obtenu au moyen de l'approche hydrologique, varie entre 3 et 13. La définition même du concept de l'homogénéité devient alors subjective. Par ailleurs, malgré une infinité de variables hydrologiques pour définir les caractéristiques des débits, l'approche hydrologique n'utilise tout au plus que deux ou trois variables hydrologiques dans la régionalisation. Ces variables ne définissent que quelques caractéristiques des débits ; ce qui ne permet pas l'application du concept du « régime des débits naturels » à la régionalisation.

Quant à l'approche écologique, son avantage par rapport à l'approche hydrologique réside dans le choix d'un plus grand nombre des variables hydrologiques (tableau 2.9). Cependant, malgré l'utilisation d'un grand nombre des variables hydrologiques, le choix des variables hydrologiques reste encore arbitraire du fait que chaque auteur peut choisir les variables qui lui conviennent. Ainsi, la définition du concept d'homogénéité reste encore subjective et le nombre de régions hydrologiques

homogènes dépend encore en partie du nombre et du type de variables hydrologiques utilisées pour la régionalisation. Par ailleurs, malgré le choix d'un grand nombre des variables, on ne tient pas compte de toutes les caractéristiques des débits dans la régionalisation (Poff, 1996). La contribution majeure de l'approche éco-géographique est de proposer l'utilisation des caractéristiques des débits pour la régionalisation, cette utilisation présente les deux avantages majeurs suivants :

- Le nombre de caractéristiques des débits étant limité par rapport à celui des variables hydrologiques, il devient donc possible de tenir compte de toutes les caractéristiques dans la régionalisation. Pour une série hydrologique donnée, ces caractéristiques restent les mêmes partout ; ainsi, l'homogénéité hydrologique définie à partir de toutes les caractéristiques des débits devient objective car sa définition ne dépend plus du nombre et du type de caractéristiques des débits. De même, le nombre des régions hydrologiques homogènes n'est plus influencé par le choix des caractéristiques des débits.

- En tenant compte de toutes les caractéristiques des débits pour la régionalisation pour une série hydrologique donnée, l'approche éco-géographique est la seule qui applique de manière intégrale le concept de « régime des débits naturels » en régionalisation.

En ce qui concerne la finalité de la régionalisation, l'approche éco-géographique vise à déterminer les facteurs physiographiques et climatiques qui influencent la variabilité spatiale des caractéristiques des débits dans un territoire géographique. Cette préoccupation ne ressort pas des deux autres approches. Dans le cas de l'approche hydrologique, on tient parfois compte des facteurs physiographiques pour la délimitation des régions hydrologiques homogènes. Cependant, comme nous l'avons souligné, l'utilisation de quelques variables hydrologiques dans la régionalisation par l'approche hydrologique ne permet pas de déterminer tous les facteurs physiographiques susceptibles d'influencer la variabilité spatiale des caractéristiques des débits. La connaissance de ces facteurs est importante pour une meilleure gestion des écosystèmes aquatiques. Il devient par exemple intéressant de déterminer les caractéristiques des débits qui dépendent de la couverture forestière ou de la température de l'air dans la mesure où elles

peuvent ainsi être utilisées pour déterminer les impacts hydrologiques induits par des variations de ces facteurs. L'approche éco-géographique apparaît ainsi comme un outil de gestion pour un meilleur suivi des régimes hydrologiques face aux perturbations environnementales induites par les activités anthropiques ou par les modifications du climat. Dans le cas du Québec, la température influence la période d'occurrence et sa variabilité interannuelle tandis que la magnitude-fréquence est influencée par les caractéristiques physiographiques, la superficie des lacs et marais, ainsi que par les précipitations.

Tableau 2.8 Méthode basée sur les variables hydrologiques. Exemples des variables hydrologiques utilisées pour la régionalisation.

Auteurs	Pays (Province)	Série hydrologique	Variables hydrologiques
Anctil et al. (2000)	Canada (Québec)	Am	CSM et CKM
Anctil et al. (1998)	Canada (Québec)	AM	Idem
Burn (1997)	Canada (Manitoba)	AM	MT
Burn (1988)	Canada (Manitoba)	AM	CVM
Cunderlik & Burn (2003)	Great Britain	AM	MT
Daviau et al. (2000)	Canada (Québec et Ontario)	AM	MT, CVT, MM, CVM, CSM
GREHYS (1996)	Canada (Québec et Ontario)	AM	CVM, MM
Mkhandi et al. (2000)	Afrique australe	AM	CVM et CSM
Ribeiro-Corréa et al. (1995)	Canada (Québec)	AM	Q <sub>2</sub> , Q <sub>100</sub>
Ouarda et al. (2001)	Canada (Ontario)	AM	Q <sub>2</sub> , Q <sub>100</sub>

Am = série annuelle des débits minimums, AM = série annuelle des débits maximums, SM = série des débits mensuels; CSM = coefficient d'asymétrie des débits annuels maximums; CKM= coefficient d'aplatissement des débits annuels maximums; MT = moyenne des dates d'occurrence des débits annuels maximums; CVT = coefficient de variation des dates d'occurrence des débits annuels maximums; MM = moyenne des débits annuels maximums; CVM = coefficient de variation des débits annuels maximums; Q<sub>2</sub> = débit de récurrence de deux ans; Q<sub>100</sub> = débit de récurrence de 100 ans.

Tableau 2.9 Caractéristiques hydrologiques et nombre de variables hydrologiques pour les définir.

Caractéristiques	Nombre de variables hydrologiques (Richter et al., 1996)	Nombre de variables hydrologiques (Olden et Poff, 2003).
Magnitude	12	12
Fréquence	4	8
Durée	10	8
Période d'occurrence	2	4
Variabilité	4	4

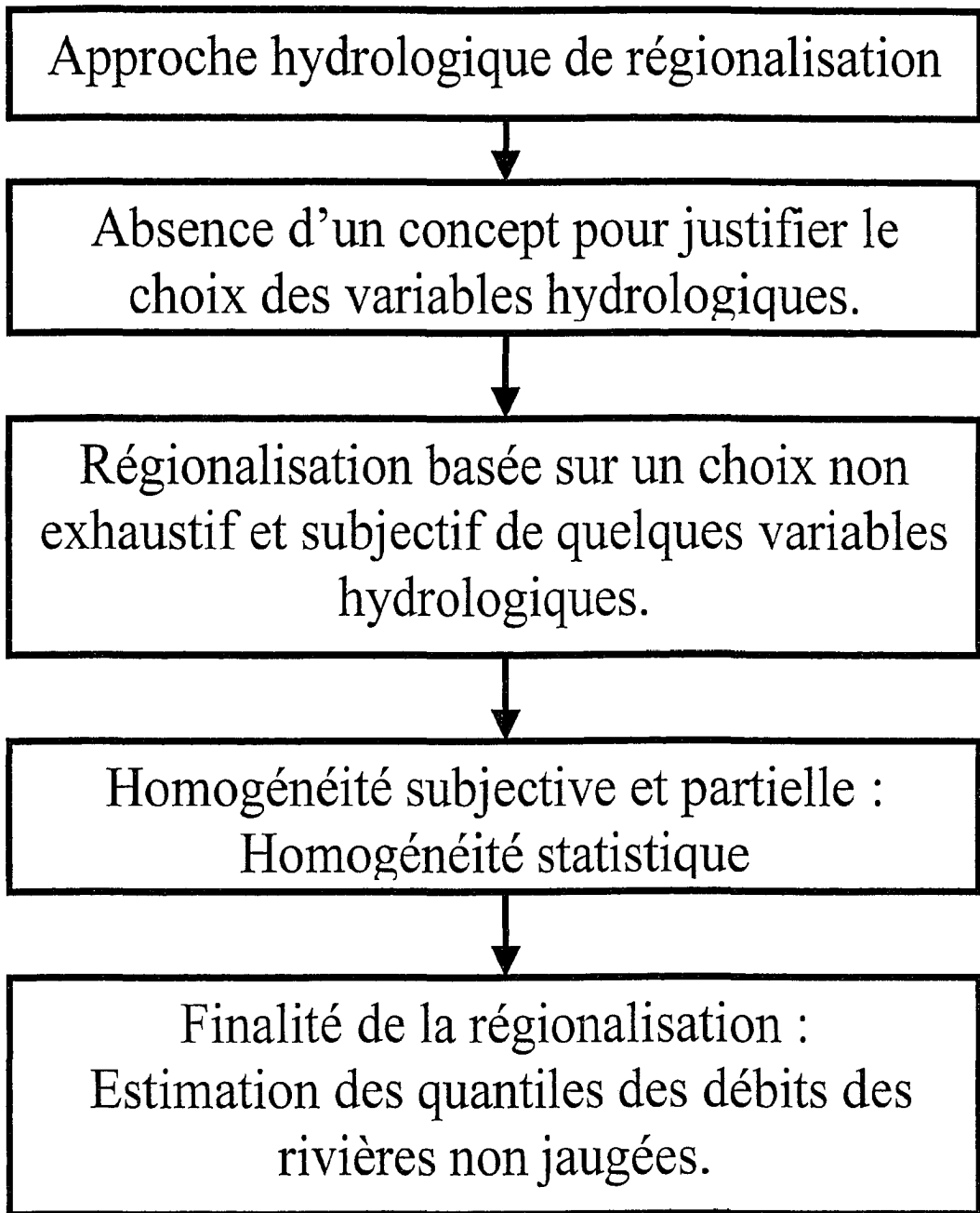


Figure 2.3 Description de l'approche hydrologique de régionalisation

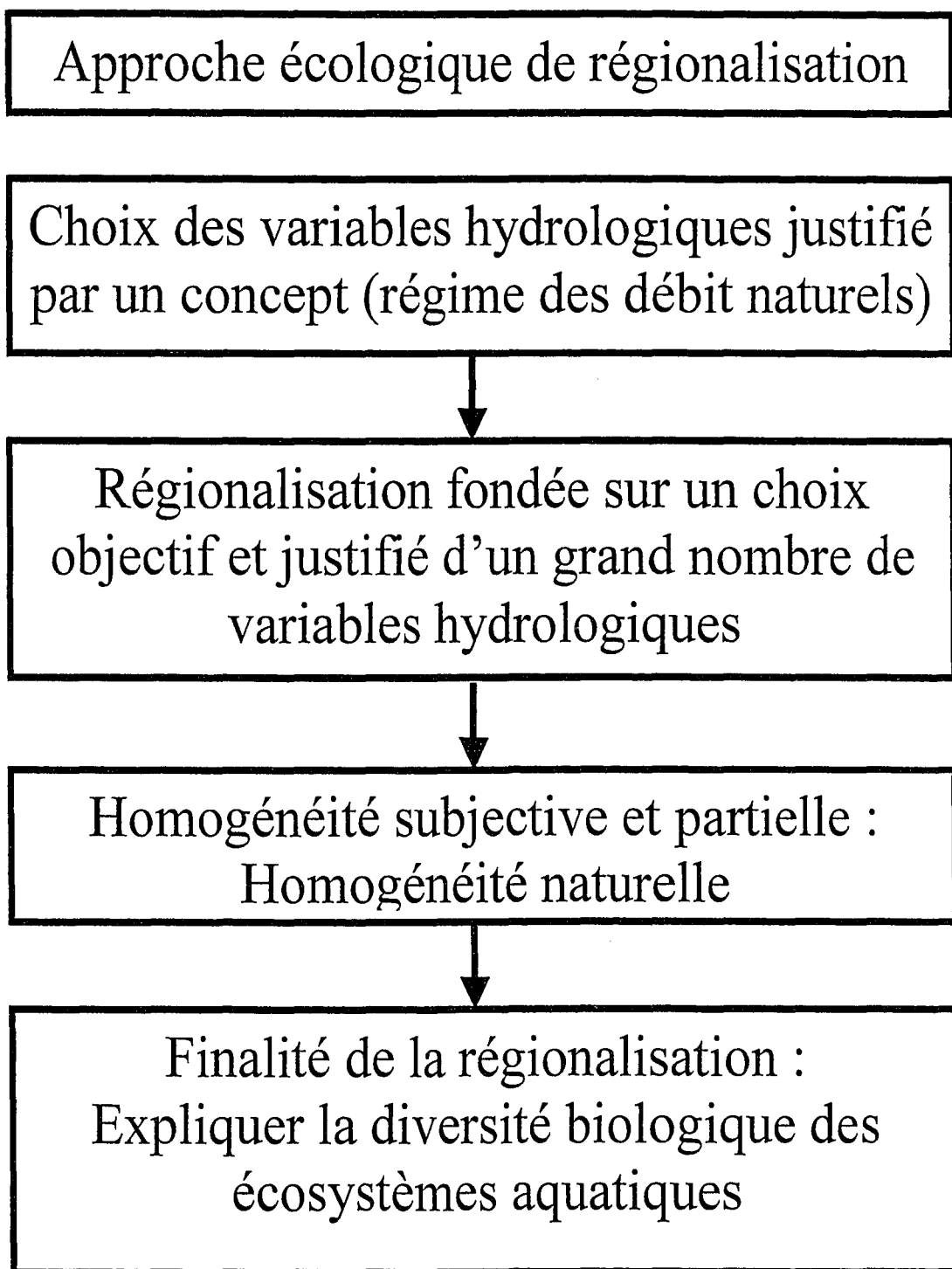


Figure 2.4 Description de l'approche écologique de régionalisation



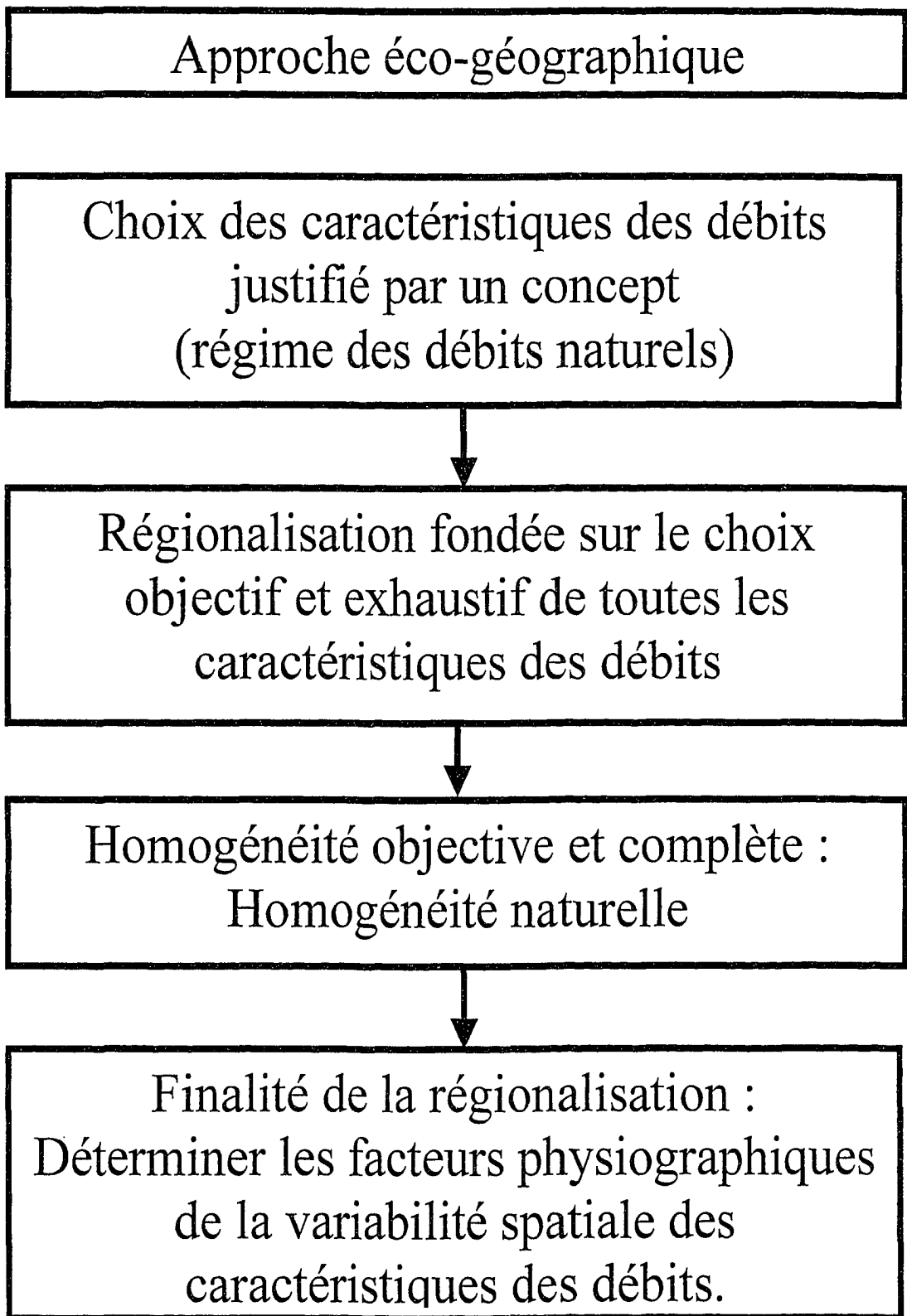


Figure 2.5 Description de l'approche éco-géographique de régionalisation

## 2.5 BIBLIOGRAPHIE

- Acreman, M.C. & Wiltshire, S.E. 1987. Identification of regions for regional flood frequency analysis. *EOS* 68, **44**, 1262 (abstract).
- Afifi, A.A. and Clark, V. 1996. Computer-aided multivariate analysis 3<sup>rd</sup> edition. Chapman and Hall. New York. 505p.
- Ancil, F., Martel, N. & Hoang, V.D. 1998. Analyse régionale des crues journalières de la province de Québec. *Can. J. Civ. Eng.*, **25**, 360-369.
- Ancil 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.
- Assani, A.A. 2003. Nouvelle théorie de la régionalisation des débits : la théorie éco-géographique. Notes de recherche no 01/03, Laboratoire d'hydro-climatologie et de géomorphologie fluviale, UQTR, 10p.
- Beguïn 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.
- Burn, D.H. 1988. Delineation of groups for regional flood frequency analysis. *J. hydrolog.*, **104**, 345-361.
- Burn, D.H. 1990. Evaluation of regional flood frequency analysis with a region of influence approach. *Water Resour. Research*, **26**, 2257-2265.
- Burn D.H., 1997. Catchments similarity for regional flood frequency analysis using seasonality measures. *J. hydrology*, **202**: 212-230.
- Cavadias, G.S. 1990. The canonical correlation approach to regional flood estimations. *Proc. Symp. Regionalization in Hydrology. Lyubljana. April 1990 IAHS, Wallingford*, pp. 171-178.
- Claussen, B., Biggs, B.J.F. 2000. Flow variables for ecological studies in temperate streams : grouping based on covariance. *J. Hydrol.*, **237**, 184-197.
- Cunderlik J.M & Burn D.H (2003). Analysis of the linkage between rain and flood regime and its application to regional flood frequency estimation. *J. Hydrol.*, **261**, 115-131

- Cunnane, C. 1988. Methods and merits of regional flood frequency analysis. *J. Hydrol.*, **100**, 269-290.
- Environnement Canada. 1991. Normales climatiques au Canada 1961-1990. Service de l'environnement atmosphérique. Ottawa. 157p.
- Environnement Canada. 1992. Sommaire chronologique de l'écoulement des eaux. Province du Québec. Direction générale des eaux intérieures, Ottawa, 526p.
- Grehys. 1996a. Presentation and review of some methods for regional flood frequency analysis. *J. Hydrol.*, **186**, 63-84.
- Grehys. 1996b. Inter-comparison of regional flood frequency procedures for Canadian rivers, *J. Hydrol.*, **186**, 85-103.
- Hosking, J.R.M. & Wallis, J.R. 1993. Some statistics useful in regional flood frequency analysis. *Water Resour. Res.*, **29**, 271-281.
- Hughes JMR et James B. 1989. A hydrological regionalization of stream in Victoria, Australia, with implication for stream ecology. *Australian Journal of Marine and Freshwater Research*, **40** : 303-326
- Jowett I.G. et Duncan M.J. 1990. Flow variability in New Zealand rivers and its relationship to in-stream habitat and biota. *New Zealand Journal of Marine and Freshwater Research* **24**, 305-317.
- Mkhandi S.H., R.K. Kachroo et T.A.G. Gunasereka (2000). Flood frequency analysis of southern Africa : II. Identification of regional distributions. *Hydrol. Sci. J.*, **45**, 449-464.
- Olden, J.D. & Poff, N.L., 2003. Redundancy and the choice of hydrologic indices for characterizing streamflow regimes. *River Res. Appl.*, **19**, 101-121.
- Ouarda, T.B.M.J, Lang, M., Bobée, B., Bernier, J. & Bois, P. 1999. Synthèse de modèles régionaux d'estimation de crue utilisés en France et au Québec. *Rev. Sci. Eau* **12**, 155-182.
- Ouarda et al, 2001. Regional flood frequency estimation with canonical correlation analysis. *J. Hydrol.*, **254**, 157-173.
- Poff, N.L. 1996. A hydrogeography of unregulated streams in the United States and examination of scale-dependance in some hydrological descriptors. *Freshwater Biology*, **36**, 71-91.
- Poff, N.L. & Ward, J.V. 1989. Implications of streamflow variability and predictability for lotic community structure : A regional analysis of streamflow patterns. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.*, **46**, 1805-1818.

- Poff, N.L., Allan J.D., Bain M.B., Karr J.R., Prestegard 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 alterations within ecosystems. *Conservation Biology*, **10**, 1163-1174.
- Tasker, G.D. 1982. Comparing methods of hydrologic regionalization. *Water Resources Bulletin*, **18**, 965-970.

## Chapitre 3

Analyse des facteurs de variabilité spatiale des caractéristiques des débits minimums annuels en climat tempéré continental (Québec, Canada).  
Application du concept de « régime des débits naturels »

# ANALYSE DES FACTEURS DE VARIABILITÉ SPATIALE DES CARACTÉRISTIQUES DES DÉBITS MINIMUMS ANNUELS EN CLIMAT TEMPÉRÉ CONTINENTAL FROID (QUÉBEC, Canada). APPLICATION DU CONCEPT DE « RÉGIME DES DÉBITS NATURELS »

Simon TARDIF<sup>1</sup> & Ali A. ASSANI<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Laboratoire d'hydro-climatologie et de géomorphologie fluviale, section de géographie, Université du Québec à Trois-Rivières.

## Adresse de correspondance :

Ali A. ASSANI

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.

Tel. : (819) 376-5011 ; Fax : (819) 376-5179 ; Email : Ali\_Assani@uqtr.ca

## **Résumé :**

L'application du nouveau concept du « régime des débits naturels » a permis de définir 18 variables hydrologiques sur les séries annuelles des débits minimums de 41 rivières naturelles au Québec. Cinq composantes principales significatives ont été extraites de ces 18 variables hydrologiques. Elles correspondent chacune aux cinq caractéristiques des débits : la magnitude-fréquence (23,1% de variance totale expliquée), la variabilité interannuelle de la magnitude (20,3%), la période d'occurrence des débits minimums annuels (17,1%), la forme des courbes de distribution (15,3%) et la variabilité interannuelle de la période d'occurrence (14%). L'analyse des corrélations simples et l'analyse canonique des corrélations ont permis de déterminer les facteurs qui influencent la variabilité spatiale de ces cinq caractéristiques au Québec.

- La magnitude-fréquence est influencée par les superficies couvertes par les forêts, les lacs et les marais ainsi que le nombre de jours pluvieux pendant la période froide (octobre à mars).
- La variabilité interannuelle de la magnitude est influencée par la superficie des bassins versants, la latitude, la superficie des forêts ainsi que les températures annuelles et saisonnières (printanière et estivale).
- Les trois autres caractéristiques sont influencées par les facteurs suivantes : la latitude, la longitude, la superficie des forêts ainsi que les températures annuelles et saisonnières.

Cette étude démontre que la superficie des forêts et la latitude sont les deux principaux facteurs qui influencent la variabilité spatiale de toutes les caractéristiques des débits minimums annuels au Québec.

Mots clés : débits minimums annuels, caractéristiques des débits, variables hydrologiques, analyse en composantes principales, analyse des corrélations simples, analyse canonique des corrélations, Québec.

### 3.1 INTRODUCTION

Nos connaissances sur les facteurs de variabilité spatiale des caractéristiques des débits minimums restent encore très fragmentaires comme l'a souligné Smakthin (2001) dans son excellente synthèse. La plupart des études consacrées à ce sujet se limitent à l'analyse de l'influence de la géologie (geologic rock categories) sur une seule caractéristique, à savoir la magnitude. Ainsi, l'influence des autres facteurs sur les autres caractéristiques des débits minimums est encore très peu étudiée (FRIEND, 1989 ; Hopkinson and Young, 1998 ; Janowicz, 1990 ; Whitehouse et al., 1983). Pourtant, toutes les caractéristiques des débits minimums jouent un rôle crucial dans le fonctionnement des écosystèmes fluviaux en influençant notamment le cycle de vie des organismes aquatiques et semi-aquatiques, en général, et des poissons, en particulier (Frenette et al., 1984 ; Gibson and Myers, 1988 ; Poff and Ward, 1989 ; Petts 1995 ; Power et al., 1996 ; Stanford et al., 1996 ; Cunjak, 1996 ; Richter et al., 1996 ; Cunjak et al., 1998 ; Cazaubon and Giudicelli, 1999 ; Ward et al., 2001 ; Olden and Poff, 2003). Elles déterminent le volume d'habitat minimum disponible nécessaire pour la survie des nombreuses communautés aquatiques en période de basses eaux. À titre d'exemple, la durée prolongée et/ou le changement des dates d'occurrence des débits minimums peuvent entraîner une diminution du couvert végétal et de la diversité spécifique (Busch and Smith, 1995 ; Stromberg et al., 1992) ainsi que l'augmentation du stress physiologique à l'origine de la diminution du taux de croissance, de la hausse du taux de mortalité et du changement morphologique des plantes (Reily and Johnsson, 1982 ; Kondolf and Curry, 1986 ; Stromberg et al., 1996). Par ailleurs, la qualité de l'eau dépend des débits minimums en raison de leur influence sur la dilution des polluants en période d'étiage (Anctil et al., 2000). La connaissance des régimes des débits minimums est aussi requise pour la conception de certains aménagements hydrauliques ainsi que pour le transport fluvial. C'est ainsi que depuis longtemps, le débit minimum est souvent la seule variable hydrologique prise en compte pour protéger les écosystèmes fluviaux (Petts, 1995 ; Poff et al., 1997).

Ces multiples rôles justifient l'approfondissement de nos connaissances sur les facteurs qui influencent la variabilité spatiale des caractéristiques des débits minimums,



pour mieux gérer les ressources hydriques ainsi que pour assurer le bon fonctionnement et l'intégrité des écosystèmes aquatiques. L'objectif de notre travail est de proposer une méthode d'analyse basée sur le concept du « régime des débits naturels » introduit récemment en écologie aquatique (Richter et al., 1996 ; Poff et al., 1997) et qui permet de définir les caractéristiques des débits minimums et de déterminer les facteurs physiographiques et climatiques qui influencent la variabilité spatiale de chacune de celles-ci.

## **3.2 METHODOLOGIE**

### **3.2.1 Source des données et choix des stations**

Cette étude se limite seulement au bassin du fleuve Saint-Laurent (673 000 km<sup>2</sup>) puisqu'il n'existe pas assez de stations de jaugeage des débits dans les deux autres bassins versants des Baies d'Ungava (518 000 km<sup>2</sup>) et d'Hudson (492 000 km<sup>2</sup>). De plus, la plupart des séries hydrologiques sur ces bassins sont incomplètes et/ou de très courtes durées (moins de 10 ans). Du point de vue lithologique, le bassin du 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 du Saint-Laurent (schistes et carbonates). Ces dernières, de faible étendue, longent les deux rives du fleuve dont elles tirent leur nom. Les données de débits analysés sont publiées dans le Sommaire chronologique de l'écoulement au Québec édité par Environnement Canada (1992). Les données publiées sont les débits mensuels, annuels ainsi que les débits extrêmes journaliers avec leurs dates d'occurrence. Dans le cadre de cette étude, nous avons retenu toutes les stations de rivières naturelles ou très faiblement régularisées, dont les mesures de débits s'étendaient sur au moins 20 ans. Nous avons analysé au total 41 stations (fig. 3.1). La superficie des bassins versants de ces stations varie entre 1,2 et 22 000 km<sup>2</sup>. Cette étude se fonde exclusivement sur l'analyse des débits minimums annuels, c'est-à-dire le débit le plus faible mesuré au cours d'une année. C'est la seule donnée relative aux débits minimums publiée dans le Sommaire chronologique. Le régime hydrologique du Québec est caractérisé par deux périodes de débits minimums (Anctil et al., 2000 ; Assani et Tardif,

2004) : en hiver lorsque les précipitations tombent sous forme de neige et en été en raison de la diminution des totaux pluviométriques et de la forte évapotranspiration consécutive à la hausse de la température (fig.3.2a et 3.2b). Le minimum estival est surtout prononcé dans la partie la plus méridionale de la province.

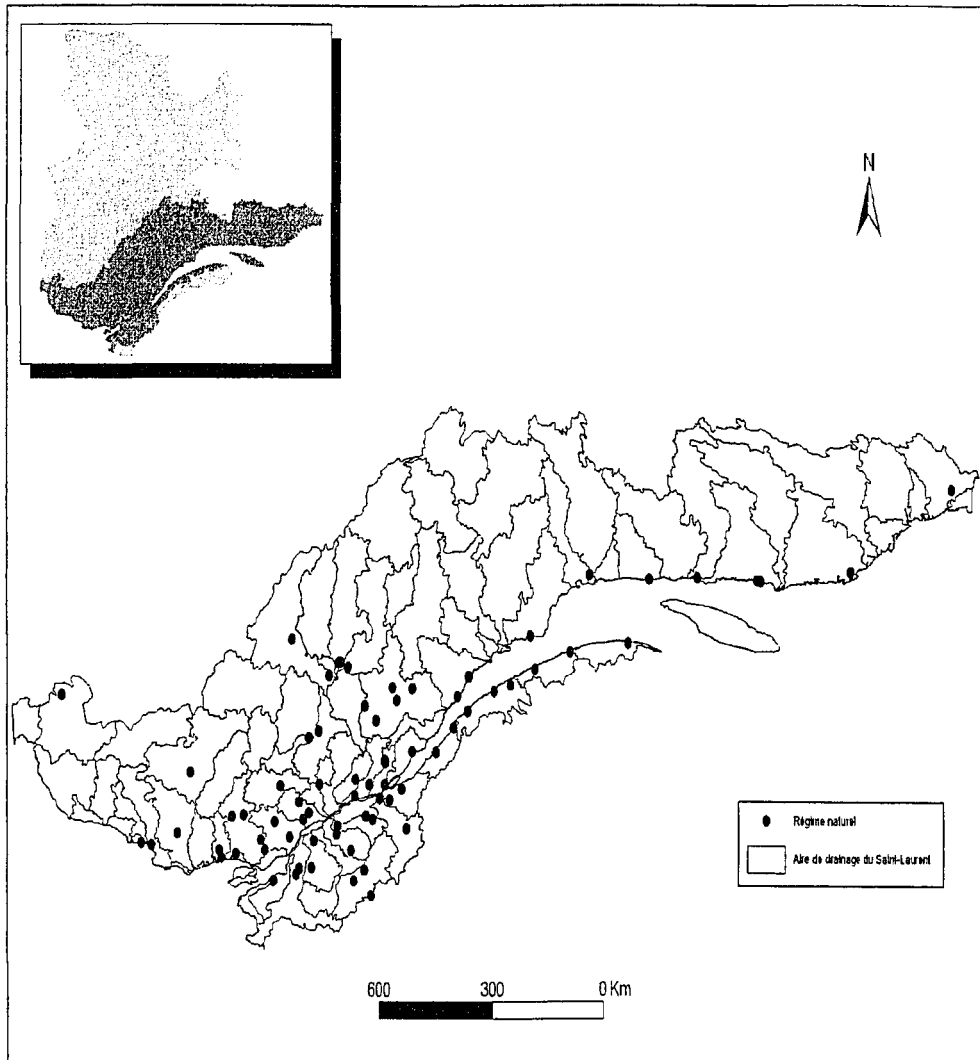


Figure 3.1 Localisation des stations de jaugeage.

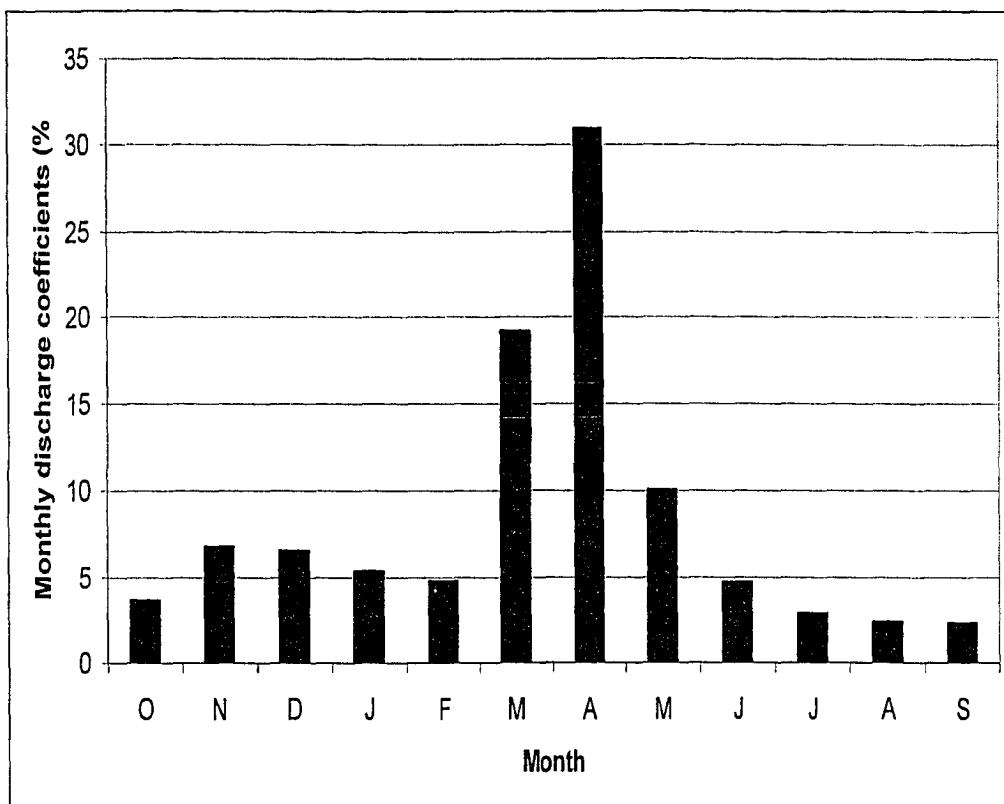


Figure 3.2a Hydrogramme type d'une rivière avec deux périodes de débits minimums (rivière Chateauguay, Montérégie).

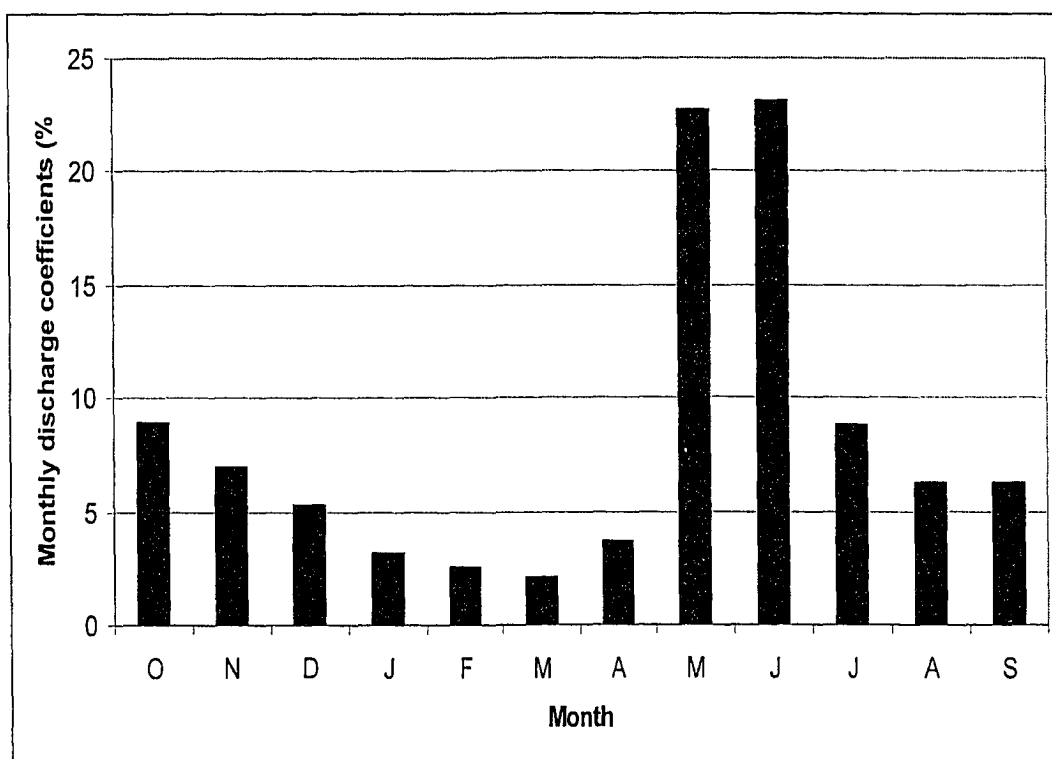


Figure 3.2b Hydrogramme type d'une rivière avec une période de débits minimums (rivière Aguanus, Côte-Nord)

En ce qui concerne les facteurs physiographiques et climatiques, dans le cadre de cette étude, nous avons retenu 15 facteurs qui se répartissent en cinq catégories (tableau 3.1) :

Tableau 3.1 Facteurs environnementaux de la variabilité spatiale des caractéristiques des débits.

Facteurs	Code	Nom de la variable	Unit
Physiographiques	B1	Superficie du bassin	km <sup>2</sup>
	B2	Longueur totale du cours d'eau	Km
	B3	Pente moyenne du cours d'eau	M/km
Localisation	G1	Latitude	Degré (log)
	G2	Longitude	Degré (log)
Utilisation du sol	A1	Superficie en forêts	%
	A2	Superficie en lacs et marais	%
Précipitations	P1	Totaux annuels	Mm
	P2	Totaux saisonniers (Octobre-Mars)	Mm
	P3	Nombre de jours de précipitations (Octobre-Mars)	
Température	T1	Moyenne annuelle	(°C)
	T2	Moyenne hivernale (Octobre-Mars)	(°C)
	T3	Moyenne printannière (Avril-Juin)	(°C)
	T4	Moyenne estivale (Juillet-Septembre)	(°C)
	T5	Nombre de jours avec T > 0°C (Octobre-Mars)	

- Les variables liés aux caractéristiques physiographiques des bassins versants : la superficie des bassins, la longueur et la pente moyenne des cours d'eau ainsi que les coordonnées géographiques des stations hydrométriques (latitude et longitude). Ces données sont issues de Belzile et al. (1997).

- Les variables liées aux caractéristiques des types d'affectation du sol et du couvert végétal : % du couvert forestier et % de la superficie occupée par les lacs et marais dans un bassin versant. Ces données sont également issues de Belzile et al. (1997).

- Les variables qui définissent les conditions climatiques d'un bassin versant : les précipitations annuelles et saisonnières ainsi que le nombre des jours pluvieux de la saison froide (d'octobre à mars), la température moyenne annuelle, la température moyenne et le nombre de jours avec des températures  $> 0^{\circ}\text{C}$  en saison froide (d'octobre à mars), la température moyenne printanière (d'avril à juin) et estivale (de juillet à septembre). Les données climatiques ont été publiées par Environnement Canada (1991). Nous avons utilisé les données climatiques mensuelles en raison du manque de données journalières pour l'ensemble de stations. Dans chaque bassin versant, on choisissait la station météorologique la plus proche de la station hydrologique. Pour les grands bassins versants, nous avons tenu compte d'abord de toutes les stations situées dans le bassin versant puis nous avons calculé une moyenne globale par la méthode de Thiessen que l'on a ensuite comparée à celle mesurée à la station la plus proche. Ces deux moyennes étaient généralement très peu différentes en raison de la faible variabilité topographique des bassins versants au Québec, ce qui justifiait le choix de la station la plus proche.
- Enfin, en raison de l'absence de données sur les surfaces occupées par les différents types de lithologie dans un bassin versant, cette variable ne sera pas prise en compte malgré son influence sur les débits minimums (Smakthin, 2001).

### 3.2.2 Définition des caractéristiques de débits minimums annuels et méthodes d'analyse.

Nous nous sommes basés sur le nouveau concept de “the natural flow regime” (Richter et al., 1996 ; Poff et al., 1997) pour définir les caractéristiques des débits minimums annuels. Ce concept a permis d'établir une différence claire et nette entre une « caractéristique » des débits et une « variable ou indice hydrologique » (Richter et al., 1996 ; Poff et al., 1997). Ces deux notions ou concepts sont généralement confondus en hydrologie. Une « caractéristique » des débits est une composante intrinsèque des débits ou un paramètre qui permet de caractériser les débits d'une rivière. Quant à la « variable ou indice hydrologique », c'est une variable statistique qui sert à définir une caractéristique des débits. Pour illustrer ces deux définitions, nous donnons l'exemple suivant : la fréquence est une caractéristique des débits. Cette fréquence peut être définie par une multitude des variables ou indices hydrologiques comme les débits de récurrence de 100 ans, de 50 ans, de 5 ans, etc. ou par les percentiles 99, 95, 90, etc. calculés sur une série hydrologique donnée. Ainsi, le nombre de caractéristiques est limité alors que celui des variables hydrologiques qui les définissent est pratiquement illimité. Richter et al. (1996), entre autres, avaient proposé cinq caractéristiques fondamentales pour décrire les débits d'une rivière : la magnitude, la période d'occurrence, la fréquence, la durée des débits et la variabilité intra ou interannuelle des débits. Un exemple du rôle écologique de chacune de ces caractéristiques est présenté au tableau 3.2. Ces cinq caractéristiques ont été définies par 32 variables connues sous le nom d'Indicateurs d'Altération Hydrologique (IAH). Olden et Poff (2003) ont recensé 171 variables hydrologiques utilisées en hydrologie pour définir ces cinq caractéristiques des débits. Comme le nombre de caractéristiques des débits est limité, la recherche des facteurs qui les influencent devient plus aisée que celle des facteurs qui influencent les variables hydrologiques. Par ailleurs, une caractéristique des débits peut être complètement définie par un nombre minimal de variables hydrologiques choisies pour leur redondance minimale.

Tableau 3.2 Les cinq caractéristiques des débits et leurs rôles écologiques.

Caractéristiques	Rôles écologiques
Magnitude	Mesure du volume d'habitats disponible pour les espèces aquatiques ou semi-aquatiques. Mesure de la position de la nappe par rapport aux systèmes racinaires de la végétation riparienne.
Période d'occurrence	Peut déterminer si certains cycles vitaux seront satisfaits ou non et peut influencer le degré de stress associé aux conditions extrêmes telles les inondations ou les sécheresses.
Fréquence	Peut être reliée à la reproduction et à la mortalité des espèces, influençant ainsi la dynamique des populations.
Durée	Peut déterminer si des phases particulières des cycles vitaux peuvent être complétées ou non. Peut affecter le degré de stress associé aux événements extrêmes comme les inondations ou les sécheresses.
Taux de variation	Indique la variabilité du volume d'habitats disponibles et peut influencer la capacité de la végétation à maintenir un contact avec la nappe phréatique.

(Adapté de Richter et al, 1996)

Ainsi, sur la série annuelle des débits minimums, nous avons défini six caractéristiques au moyen de 18 variables statistiques (tableau 3.3), en ajoutant ainsi une nouvelle caractéristique (asymétrie-aplatissement) non proposée par Richter et al. (1996). Chaque caractéristique a été définie par au moins deux variables hydrologiques. Les valeurs de magnitude ont été transformées en débit spécifique (rapport entre débit et superficie du bassin versant) afin d'éviter l'effet de taille sur les valeurs des coefficients de corrélation et sur les notes factorielles. Quant aux dates d'occurrence, elles ont été transformées en jour julien pour le besoin de calcul.

Tableau 3.3 Les variables hydrologiques utilisées pour définir les cinq caractéristiques des débits minimums annuels.

Caractéristiques	Code	Variable statistique	Signification
Magnitude-Fréquence	MF <sub>1</sub>	Mo	Moyenne
	MF <sub>2</sub>	Me	Médiane
	MF <sub>3</sub>	P <sub>10</sub>	Percentile 10
	MF <sub>4</sub>	P <sub>90</sub>	Percentile 90
Variabilité interannuelle de la magnitude	VMF <sub>5</sub>	$(P_{90}-P_{10})/Me$ $D_{max}/D_{min}$	$D_{max}$ = Débit maximum $D_{min}$ = Débit minimum
	VMF <sub>6</sub>		
	VMF <sub>7</sub>	CV	Coefficient de variation (%)
	VMF <sub>8</sub>	$(D_{max}-D_{min})/Me$	
	VMF <sub>9</sub>	$P_{90}/P_{10}$	
Forme de la courbe de distribution	F <sub>10</sub>	$(Mo-Me)/Me$	
	F <sub>11</sub>	B <sub>1</sub>	Coefficient d'asymétrie
	F <sub>12</sub>	B <sub>2</sub>	Coefficient d'aplatissement
Période d'occurrence (jour julien)	O <sub>13</sub>	M	Mode
	O <sub>14</sub>	Me	Médiane
	O <sub>15</sub>	P <sub>90</sub>	Percentile 10
	O <sub>16</sub>	P <sub>10</sub>	Percentile 90
Variabilité interannuelle de la période d'occurrence	VO <sub>17</sub>	CV	Coefficient de variation (%)
	VO <sub>18</sub>	$(P_{90}-P_{10})/Me$	

Les 18 variables ont été soumises à l'analyse en composantes principales afin de produire de nouvelles variables non auto-corrélées après rotation orthogonale d'axes par la méthode varimax. L'analyse en composantes principales a été réalisée à partir de la matrice des coefficients de corrélation qui est moins sensible aux valeurs extrêmes. Au moyen de l'analyse canonique des corrélations, nous avons corrélé les composantes principales significatives représentant le deux groupes de variables.



### 3.3 RÉSULTATS

#### 3.3.1 L'analyse en composantes principales de variables hydrologiques.

Le tableau 3.4 présente les saturations des 18 variables hydrologiques sur les cinq composantes principales significatives (valeur propre > 1) après rotation d'axes par la méthode varimax. La variance totale expliquée par ces cinq composantes principales atteint 90% environ dont près de la moitié est due aux deux premières.

Tableau 3.4 Saturations des variables sur les cinq composantes principales après rotation orthogonale des axes de type varimax.

Composantes	CP1	CP2	CP3	CP4	CP5
MF <sub>1</sub>	<b>-0,941</b>	-0,247	-0,159	-0,092	-0,133
MF <sub>2</sub>	<b>-0,922</b>	-0,270	-0,166	-0,153	-0,126
MF <sub>3</sub>	<b>-0,832</b>	-0,317	-0,358	-0,039	-0,172
MF <sub>4</sub>	<b>-0,962</b>	-0,123	-0,022	-0,088	-0,107
VMF <sub>5</sub>	0,399	<b>0,774</b>	0,289	0,219	0,221
VMF <sub>6</sub>	0,250	0,517	0,065	0,674	0,124
VMF <sub>7</sub>	0,230	<b>0,830</b>	0,184	0,051	0,107
VMF <sub>8</sub>	0,436	<b>0,704</b>	0,388	0,295	0,172
VMF <sub>9</sub>	0,368	0,573	0,366	0,555	0,174
F <sub>10</sub>	0,098	<b>0,815</b>	0,007	-0,136	0,083
F <sub>11</sub>	0,102	0,047	-0,026	<b>0,961</b>	-0,022
F <sub>12</sub>	0,007	-0,122	0,054	<b>0,926</b>	-0,075
O <sub>13</sub>	0,194	0,148	<b>0,848</b>	0,059	0,414
O <sub>14</sub>	0,214	0,223	<b>0,895</b>	0,038	0,292
O <sub>15</sub>	0,232	0,461	0,275	-0,026	0,533
O <sub>16</sub>	0,122	0,161	<b>0,922</b>	0,032	-0,282
VO <sub>17</sub>	-0,143	-0,181	-0,197	0,069	<b>-0,882</b>
VO <sub>18</sub>	-0,131	-0,080	0,048	-0,057	<b>-0,943</b>
Valeurs propres	4,16	3,66	3,08	2,76	2,51
Variance cumulée	23,1%	43,4%	60,5%	75,8%	89,8%

Les valeurs des saturations révèlent que chaque caractéristique est associée à une composante principale. Les deux premières composantes sont associées à la magnitude-fréquence et sa variabilité interannuelle, la troisième aux dates d'occurrence des débits minimums annuels. Notons que la variable D<sub>12</sub> présente une forte saturation sur la seconde composante du fait que cette variable mesure la forme en plus de la variabilité interannuelle de la magnitude. Les deux dernières composantes sont associées

respectivement à la forme de la courbe de distribution et à la variabilité interannuelle des dates d'occurrence.

Le fait que toutes les caractéristiques soient associées à des composantes principales significatives nous incite à les prendre toutes en considération pour déterminer les facteurs qui influencent la variabilité spatiale de chacune d'elles.

### **3.3.2 Analyse des corrélations entre les facteurs environnementaux et les caractéristiques des débits minimums annuels.**

Le tableau 3.5 présente les valeurs des coefficients de corrélation simples calculées entre les caractéristiques des débits représentées par les cinq composantes principales et 15 facteurs environnementaux. Il ressort de ce tableau les faits saillants suivants :

- La magnitude, associée à la première composante principale, est négativement corrélée aux superficies couvertes par les forêts, d'une part, et celles couvertes par les lacs et marais d'autre part.
- La variabilité interannuelle de la magnitude est positivement corrélée à la taille des bassins versants, la longueur des cours d'eau, la latitude et la superficie couverte par les forêts mais négativement corrélée aux températures annuelles et printanières. Ce sont les mêmes facteurs qui influencent aussi les dates d'occurrence des débits minimums, associées à la troisième composante principale, les signes de corrélation étant cependant inversés par rapport à la caractéristique précédente.
- La forme des courbes de distribution (coefficients d'asymétrie et d'aplatissement), associée à la quatrième composante principale, est positivement corrélée à la longitude et aux températures annuelles et saisonnières. En revanche, elle est négativement corrélée à la latitude et à la superficie couverte par les forêts.
- Enfin, la dernière composante, qui représente la variabilité interannuelle des dates d'occurrence des débits minimums annuels, est positivement corrélée à la latitude et à la superficie couverte par les forêts mais négativement corrélée à la longitude et à la température hivernale.

Il ressort de l'analyse des corrélations simples que trois facteurs influencent de manière significative presque toutes les caractéristiques des débits : la superficie couverte par les forêts dans un bassin versant, la latitude et la température. Nous n'avons observé aucune influence des précipitations. Enfin, la magnitude-fréquence est influencée seulement par la superficie des forêts ainsi que celle lacs et marais.

Tableau 3.5 Coefficients de corrélation calculés entre les notes factorielles des composantes principales et les facteurs environnementaux.

Facteurs	CP1	CP2	CP3	CP4	CP5
B1	-0,2370	-0,1918	<b>-0,2731</b>	-0,0474	0,2004
B2	<b>-0,3208</b>	-0,2203	-0,2927	-0,0898	0,1695
B3	<b>0,3305</b>	-0,1220	-0,0077	0,1075	-0,2399
G1	-0,0169	-0,2141	<b>-0,7043</b>	-0,0902	<b>-0,2741</b>
G2	-0,2098	-0,0075	<b>0,4474</b>	-0,0788	<b>0,4398</b>
A1	<b>-0,3315</b>	-0,2702	-0,2650	-0,0400	<b>-0,3542</b>
A2	<b>-0,4513</b>	-0,0552	-0,0394	0,0392	<b>0,3365</b>
P1	-0,2463	0,2258	-0,0179	0,0523	-0,0576
P2	<b>-0,2586</b>	0,2187	0,0189	0,1061	-0,1153
P3	<b>-0,4843</b>	0,0573	-0,1410	-0,1611	0,1559
T1	0,2250	0,2502	<b>0,6737</b>	0,2003	0,0729
T2	<b>0,2958</b>	<b>0,2713</b>	<b>0,5831</b>	<b>0,2612</b>	-0,1387
T3	0,0867	0,1838	<b>0,6331</b>	0,1034	<b>0,2863</b>
T4	0,1751	0,2513	<b>0,6123</b>	0,1261	0,2124
T5	0,1898	0,2309	<b>0,4960</b>	<b>0,3083</b>	0,0446

En gras : significatif au seuil de 5%. ( ) : nombre de rivières

Les corrélations simples ne tiennent pas compte des liens qui peuvent exister entre les variables indépendantes, ce qui peut rendre l'information très redondante. Il devient ainsi difficile de cerner l'influence précise de chaque facteur sur les caractéristiques des débits, ce qui a mené à l'utilisation de l'analyse canonique des corrélations.

### 3.3.3 Analyse canonique des corrélations

L'analyse canonique des corrélations permet de surmonter ce problème car elle tient compte à la fois des liens à l'intérieur d'un groupe de variables et entre deux groupes de variables. Il faut cependant garder à l'esprit que les résultats de l'analyse canonique des corrélations sont plus difficiles à interpréter que ceux de corrélations simples. Le tableau 3.6 présente les cinq coefficients des corrélations canoniques extraites des deux groupes de variables.

Tableau 3.6 Analyse canonique des corrélations.

Racine canonique	Corrélation canonique	Pr > F	Variance (proportions)*	Redondance (proportions)*
1	0,8577	0,0138	0,4980	0,3663
2	0,8102	0,1529	0,1619	0,1063
3	0,6688	0,5988	0,1037	0,0464
4	0,5678	0,7494	0,0816	0,0263
5	0,4820	0,7373	0,1547	0,0359

\* = variance et redondance pour les caractéristiques hydrologiques

Les valeurs des coefficients obtenues sont toutes inférieures à 0,90, ce qui traduit un faible lien entre les deux groupes de variables comme cela a été déjà suggéré par l'analyse des corrélations simples. Si on considère que l'échantillon n'est pas probabiliste, seul le premier coefficient de corrélation canonique serait statistiquement significatif, celui-ci expliquant près de la moitié (49,8%) de la variance totale des caractéristiques des débits minimums annuels. Ainsi, la part de la variance des caractéristiques des débits, exprimée par la valeur de la redondance, dont le premier facteur environnemental rend compte est d'environ 37%. Le tableau 3.7a révèle que la première corrélation canonique est représentée par quatre caractéristiques : la période d'occurrence et sa variabilité interannuelle ainsi que la forme des courbes de distribution (coefficients d'asymétrie et d'aplatissement) et, dans une moindre mesure, la variabilité

inter-annuelle de la magnitude-fréquence. La variabilité inter-annuelle des dates d'occurrence des débits minimums annuels est aussi bien représentée par la cinquième corrélation canonique. Il convient de noter aussi que les températures printanières et estivales présentent aussi des valeurs relativement élevées avec la première corrélation canonique. Les deuxièmes et troisièmes corrélations canoniques sont corrélées respectivement à la magnitude-fréquence et à sa variabilité inter-annuelle. La première caractéristique est corrélée à la cinquième corrélation canonique.

Tableau 3.7a Corrélations entre les composantes principales (caractéristiques hydrologiques) et les cinq premières racines canoniques.

	V1	V2	V3	V4	V5	W1	W2	W3	W4	W5
PCI	-0,363	<b>-0,716</b>	-0,295	-0,121	<b>0,505</b>	-0,312	-0,580	-0,197	-0,069	0,243
PCII	<b>0,569</b>	0,252	<b>0,649</b>	-0,260	0,352	0,488	0,204	0,434	-0,148	0,170
PCIII	<b>-0,879</b>	-0,445	-0,091	-0,051	-0,137	-0,754	-0,361	-0,061	-0,029	-0,066
PCIV	<b>-0,831</b>	0,065	-0,002	0,552	0,031	-0,712	0,053	-0,001	0,312	0,015
PCV	<b>0,757</b>	-0,178	-0,049	0,136	<b>-0,612</b>	0,649	-0,145	-0,033	0,077	-0,295

Concernant les facteurs environnementaux, la première corrélation canonique est associée à la latitude et à la surface couverte par les forêts dans un bassin versant (tableau 3.7b). La seconde corrélation canonique est corrélée à la superficie couverte par les lacs et marais, au nombre total des jours pluvieux en hiver et à la pente moyenne des rivières. À la lumière de ces résultats, la période d'occurrence et la forme des courbes de distribution sont corrélées négativement à la latitude et à la surface totale occupée par les forêts. En revanche, la variabilité inter-annuelle de cette période d'occurrence et celle de la magnitude sont positivement corrélées à ces deux facteurs. Ceci corrobore les résultats obtenus au moyen des corrélations simples. Quant à la magnitude-fréquence, elle est négativement corrélée à la superficie des lacs et marais ainsi qu'au nombre total des jours pluvieux en hiver. L'influence de la superficie occupée par les forêts sur cette caractéristique n'a pas été clairement mise en évidence par la seconde corrélation canonique. Néanmoins, si on tient compte de la cinquième corrélation canonique du groupe des facteurs environnementaux, on s'aperçoit que la superficie des forêts est le

seul facteur environnemental qui présente une valeur de coefficient de corrélation relativement élevée, ce qui traduit une influence possible de ce facteur sur la magnitude-fréquence comme l'a démontré l'analyse des corrélations simples.

Tableau 3.7b Corrélation entre les facteurs environnementaux et les cinq premières racines canoniques.

Facteurs	W1	W2	W3	W4	W5	V1	V2	V3	V4	V5
B1	0,1384	0,0437	0,3439	-0,443	0,1983	0,119	0,035	0,230	-0,251	0,096
B2	0,2937	0,3424	0,3731	-0,216	0,2806	0,252	0,277	0,250	-0,123	0,135
B3	0,189	-0,570	-0,192	0,277	-0,144	0,162	-0,462	-0,129	0,157	-0,069
G1	<b>0,6144</b>	0,0730	-0,109	-0,449	-0,089	0,527	0,059	-0,073	-0,255	-0,043
G2	-0,424	0,2437	0,1640	0,2756	0,2661	-0,364	0,198	0,110	0,156	0,128
A1	<b>0,628</b>	0,269	0,116	0,094	<b>-0,442</b>	0,538	0,218	0,077	0,053	-0,213
A2	-0,109	<b>0,602</b>	0,326	-0,208	0,110	-0,093	0,488	0,218	-0,118	0,053
P1	-0,160	0,248	0,036	-0,107	-0,132	-0,137	0,201	0,024	-0,061	-0,063
P2	-0,010	0,226	0,133	-0,118	-0,303	-0,086	0,183	0,089	-0,067	-0,146
P3	-0,176	<b>0,608</b>	-0,024	-0,343	-0,370	-0,151	0,493	-0,016	-0,195	-0,179
T1	-0,500	-0,345	0,0708	0,6307	0,0276	-0,428	-0,279	0,047	0,358	0,013
T2	-0,338	-0,488	-0,052	0,6396	-0,144	-0,290	-0,395	-0,035	0,363	-0,070
T3	<b>-0,557</b>	-0,141	0,162	0,525	0,158	-0,480	-0,114	0,109	0,298	0,076
T4	<b>-0,530</b>	-0,243	0,117	0,532	0,115	-0,454	-0,197	0,079	0,302	0,055
T5	-0,357	-0,209	0,027	0,541	-0,138	-0,306	-0,170	0,018	0,307	-0,066

### 3.4 DISCUSSION ET CONCLUSION

La variabilité spatiale des débits minimums dans une région donnée dépend de l'interaction de nombreux facteurs. Cependant, toutes les études consacrées à ce sujet se limitent seulement à l'analyse des facteurs qui influencent la magnitude des débits minimums, ne pouvant ainsi déterminer les autres facteurs qui n'influencent pas cette caractéristique. Pourtant l'identification de tous les facteurs susceptible d'influencer la variabilité spatiale des débits minimums est importante, notamment pour une meilleure gestion des ressources hydriques. L'application du nouveau concept de « régime des débits naturels » a rendu cette identification possible. Dans le cas du Québec, l'application de ce nouveau concept a permis de définir 18 variables hydrologiques à partir desquelles ont été extraites cinq composantes principales significatives où chacune est associée à une caractéristique des débits minimums. Les cinq caractéristiques identifiées sont les suivantes : la magnitude-fréquence (23,1% de variance totale expliquée), la variabilité inter-annuelle de la magnitude (20,3%), la période d'occurrence des débits minimums annuels (17,1%), la forme des courbes de distribution (15,3%) et la variabilité inter-annuelle de la période d'occurrence (14%).

La définition de ces cinq caractéristiques a rendu aisée la recherche des facteurs qui influencent la variabilité spatiale de chacune d'elle. Cette recherche a été effectuée au moyen de l'analyse des corrélations simples et de l'analyse canonique des corrélations. Ces analyses ont permis de déterminer les facteurs qui influencent chaque caractéristique des débits minimums annuels au Québec.

- La caractéristique magnitude-fréquence est influencée significativement par la superficie couverte par les forêts, les lacs et les marais ainsi que le nombre de jours pluvieux pendant la saison froide d'octobre à mars. Au Québec, la magnitude est négativement corrélée à ces facteurs. Lorsque les lacs et les marais alimentent les rivières en période d'étiage, ils contribuent à la hausse de la magnitude des débits minimums (FRIEND, 1989). Mais dans le cas contraire, ils diminuent l'infiltration de l'eau dans les nappes provoquant ainsi une diminution des débits minimums; c'est ce qui se passe au Québec. Quant aux forêts, leur influence sur la magnitude des débits minimums se manifeste en été et en automne par l'interception et l'évapotranspiration

(Smakhtin, 2001), qui diminuent l'infiltration d'eau dans le sol. Enfin, pendant la période froide (d'octobre à mars), les précipitations tombent presque exclusivement sous forme de neige au Québec. Ainsi, si le nombre de jours avec précipitations sous forme de neige augmente, en particulier en octobre et en novembre, la magnitude des débits minimums diminue en hiver parce que les nappes ne sont pas alimentées. Mais si le nombre de jours avec précipitations sous forme de pluie augmente, la magnitude des débits en hiver augmente en hiver du fait que la quantité d'eau dans les nappes sera relativement importante pour maintenir haut les débits d'étiage lorsque les précipitations tombent sous forme de neige pendant le reste de la saison. Mais la quantité totale des précipitations tombée pendant cette période froide ne joue aucune influence sur la magnitude des débits minimums car une grande partie tombe sous forme de neige. Enfin, nous n'avons pas observé l'influence de la latitude et de la continentalité sur la magnitude des débits minimums comme ce fut le cas au Yukon, région située au nord-ouest du Canada (Janowicz, 1990).

- Les dates d'occurrence des débits minimums annuels et leur variabilité inter-annuelle ainsi que les formes des courbes de distribution sont influencées par les mêmes facteurs suivants : la latitude, la superficie des forêts ainsi que les températures annuelles et saisonnières. Il convient de préciser d'emblée qu'au Québec, les températures annuelles et saisonnières sont fortement influencées par la latitude. Selon le signe de corrélation, les dates moyennes d'occurrence des débits minimums surviennent de plus en plus tôt dans l'année lorsque la latitude augmente. Ceci s'explique par le fait que les débits minimums sont enregistrés à la fin de l'hiver au nord mais fréquemment à la fin de l'été au sud de la province. La variabilité inter-annuelle des dates d'occurrence des débits minimums annuels diminue avec la latitude mais augmente avec la longitude. Cette variabilité peut être associée à la date de fonte des neiges qui est plus régulière au nord qu'au sud de la province. Ainsi, la date d'occurrence des débits minimums varie beaucoup moins d'une année à l'autre au nord qu'au sud de la province. En ce qui concerne l'influence de la forêt sur les dates d'occurrence des débits minimums annuels, en raison de l'évapotranspiration et de l'interception des précipitations en été et en hiver, les débits minimums annuels surviennent tôt dans l'année lorsque la superficie occupée par les forêts augmente dans un bassin versant. Par ailleurs, en raison des activités



anthropiques, la couverture forestière dans des bassins versants est plus importante au nord qu'au sud de la province. En effet, plus de 95% de la population est concentrée dans la partie méridionale. Quant aux coefficients d'asymétrie et d'aplatissement, leurs valeurs sont plus faibles au sud qu'au nord de la province.

- La variabilité inter-annuelle de la magnitude est influencée par les facteurs suivants : la superficie des bassins versants, la superficie occupée par les forêts, la latitude ainsi que les températures annuelles et saisonnières. La variabilité inter-annuelle de la magnitude des débits augmente avec la taille des bassins versants en raison de l'hétérogénéité spatiale des caractéristiques physiographiques et climatiques. Cette hétérogénéité augmente la variabilité de la magnitude des débits minimums d'une année à l'autre. Quant à l'influence de la latitude, la plupart des grands bassins versants analysés sont situés vers le nord de la province, ce qui expliquerait l'influence de ce facteur sur la variabilité inter-annuelle de la magnitude.

Cette étude démontre que la variabilité spatiale des débits minimums est influencée par de nombreux facteurs. Leur mise en évidence a cependant nécessité la prise en compte de toutes les caractéristiques qui définissent les séries annuelles des débits minimums. Ainsi, cette étude a permis de déterminer pour la première fois les différents facteurs qui influencent chaque caractéristique des débits minimums annuels au Québec. Toutefois, d'autres facteurs susceptibles d'influencer les différentes caractéristiques n'ont pas été analysés dans cette étude faute des données, notamment la nature lithologique des roches dont l'influence sur la magnitude a été mise en évidence ailleurs (Smakhtin, 2001). Cette étude révèle que le lien entre les caractéristiques des débits minimums annuels et les facteurs environnementaux n'est pas très élevé. En effet, la valeur du premier coefficient de corrélation canonique n'a pas atteint 0,900. Ceci s'explique en partie par le fait qu'en ce qui concerne les facteurs climatiques, les valeurs utilisées concernent les échelles annuelles et saisonnières. Ce résultat démontre malgré tout que l'influence de ces facteurs sur les débits minimums peut être détectée même en utilisant les données mensuelles et annuelles.

### 3.5 BIBLIOGRAPHIE

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.

Assani, A.A. et Tardif, S. 2004. Analyse statistique des régimes hydrologiques naturels au Québec., *Revue des sciences de l'eau*. Sous-presse.

Assani, A.A., 2003. Nouvelle théorie de la régionalisation des débits: la théorie éco-géographique. *Notes de recherche no 01/03, Laboratoire d'hydro-climatologie et de géomorphologie fluviale*, UQTR, 10 pp.

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

Busch, D.E, and S.D., Smith. 1995. Mechanisms associated with decline of woody species in riparian ecosystems of the southwestern U.S. *Ecological Monographs*, **65**, 347-370.

Cazaubon, A. and J. Giudicelli, 1999. Impact of the residual flow on the physical characteristics and benthic community (algae, invertebrates) of a regulated Mediterranean river: The Durance, France. *Regul. Rivers Res. Mgmt*, **15**, 441-461.

Cunjak, 1996. Winter habitat of selected stream fishes and potential impacts from land-use activity. *Can. J. Aquat. Sci.* **53** (Suppl.1), 267-282.

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

Eaton, B., Church, M. and Hann, D., 2002. Scaling and regionalization of flood flows in British Columbia, Canada. *Hydrol. Process*, **16**, pp. 3245-3263.

Environnement Canada, 1991. Normales climatiques au Canada 1961-1990. *Service de l'environnement atmosphérique*. Ottawa. 157 p.

Environnement Canada, 1992. Sommaire chronologique de l'écoulement. Province du Québec. *Inland Water Directorate*, Ottawa, 526 pp.

FREND, 1989. *Flow regimes from International Experimental and Network Data, 1989. I : Hydrological studies; II : Hydrological Data*, Wallingford, UK.

Frenette, M., Caron, M., Julien, P., and Gibson, R.J. 1984. Interaction entre le débit et les populations de tacons (*Salmo salar*) de la rivière Matamec, Québec. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.* **41**, 954–963.

Gibson, R.J., and R.A. Myers. 1988. Influence of seasonal river discharge on survival of juvenile Atlantic salmon, *Salmo salar*. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.* **45**: 344-348.

Hopkinson, C., Young, G.J., 1998. The effect of glacier wastage on the flow of the Bow River at Banff, Alberta, 1951-1993. *Hydrol. Processes*, **12**, 1745-1762.

Janowicz JR. 1990. Regionalization of low flows in Yukon Territory. In *Northern Hydrology: Selected Perspectives*, Prowse TD , Ommanney CSL (eds). Proceedings of the Northern Hydrology Symposium, 10-12 July, 1990, National Hydrology Research Institute: Saskatoon; 141-150.

Kondolf, G.M., and R.R., Curry. 1986. Channel erosion along the Carmel River, Monterey County, California. *Earth Surface Processes and Landforms*, **11**, 307-319.

Olden, J.D. and Poff, N.L., 2003. Redundancy and the choice of hydrologic indices for characterizing streamflow regimes. *River Res. Appl.*, **19**, pp. 101-121.

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 examination of scale-dependance in some hydrological descriptors. *Freshwater Biology*, **36**, 71-91.

Poff, N.L., Allan, J.D., Bain, M.B., Karr, J.R., Prestegard, K.L., Richter, B.D., Sparks, R.E. and Stromberg, J.C., 1997. The natural flow regime: A paradigm for river conservation and restoration. *Bioscience*, Vol. 47, No. 11: 769-784.

Poff N.L. & Ward J.V., 1989. Implications of streamflow variability and predicability for lotic community structure: A regional analysis of streamflow patterns. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.* **46**, 1805-1818.

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. Mngt*, **20**, 887-895.

Richter, B.D., Baumgartner, J.V., Powell, J. and Braun, D.P., 1996. A method for assessing hydrologic alterations within ecosystems. *Conserv. Biol*, **10**, pp. 1163-1174.

Richter B.D, Baumgartner J.V., Wiginton R., Braun D.P., 1997. How much water does a river need? *Freshwater Biology*, **37**, 231-249.

- Reily, P., Johnson, P.W., 1982. The effects of altered hydrologic regime on tree growth along the Missouri river in North Dakota. *Canadian Journal of Botany*, **60**, 2410-2423.
- Smakhtin, V.U., 2001. Low flow hydrology: a review. *Journal of hydrology*. **240**, pp. 147-186.
- Stanford, J.A., Ward, J.V., Liss, W.J., Frissel, C.A., Williams, R.N., Lichatowich, J.A., Coutant, C.C., 1996. A general protocol for restoration of regulated rivers. *Regul. Rivers : Res. Mgmt*, **12**, 391-413.
- Stromberg, J.C., J.A. Tress, S.D., Wilkins, and S. Clark. 1992. Response of velvet mesquite to groundwater decline. *Journal of Arid Environments*, **23**, 45-58.
- Stromberg, J.C., Tiller, R., Richter, B. 1996. Effects of ground water decline on riparian vegetation of semiarid regions : the San Pedro River, Arizona, USA. *Ecological Applications*, **6**, 113-131.
- Ward J.V., Tockner , K., Schiemer, F. 1999. Biodiversity of floodplain river ecosystems : ecotones and connectivity. *Regulated Rivers : Research and Management*, **11**, 105-119.
- Whitehouse, I.E., McSaveney, M.J., Horrel, G.A., 1983. Spatial variability of low flows across a portion of the central southern Alps, New Zealand. *J. Hydrol*, **22**, 123-137.

### Annexe 1

Répartition des stations selon les régions hydrologiques homogènes définies. (débits saisonniers)

Régions hydrologiques	CP1	CP2	CP3	NR	Stations en rive sud	Stations en rive nord
I	+	+	+	5	Beaurivage, Blanche, Chateauguay, Dartmouth	Neigette
II	+	+	-	6	Etchemin, Nicolet sud-ouest, Sud	Doncaster, Nord, Picanoc
III	+	-	+	4	David, Famine, Hurons	Mascouche
IV	+	-	-	7	Bécancour, Coaticook, Eaton, Hall, Nicolet, Richelieu	Noire
V	-	+	+	9	Bonaventure, Cap Chat, Madeleine, Matane, Nouvelle, Rimouski	Escoumins, Grande rivière ouest, Godbout
VI	-	+	-	10	Matapédia, Trois-Pistoles	Coulonge, du Loup, Gouffre, Ha Ha, l'Assomption, Maskinongé, Petite Nation, Saint-Louis
VII	-	-	+	19	Cascapédia, Ouelle	Aguanus, Aulnaies, Aulnaies ouest, Chamouchouane, Eaux volées, Écores, Megiscane, Mistassibi, Mistassini, Moisie, Montmorency, Nabisipi, Péribonca, Pikauba, Romaine, St-Paul, Tonnerre, Valin
VIII	-	-	-	11		Croche, Étamamiou, Gatineau, Jacques Cartier, Kinojevis, Matawin, Mékinac, Port Neuf, Rouge, Ste-Anne bras nord, Vermillon

(+/-) : Signes des notes factorielles, NR : nombre de rivières dans chaque région hydrologique homogène

## Annexe 2

Répartition des stations selon les régions hydrologiques homogènes définies.  
(débits maximums annuels)

CP1	CP2	CP3	CP4	CP5	NR5	NR4	NR3	NR2	Stations en rive sud	Stations en rive nord
+	+	+	+	+	0					
+	+	+	+	-	3	3			Dartmouth, Madeleine	Eaux volées
+	+	+	-	+	0					
+	+	+	-	-	0	0	3			
+	+	-	+	+	3				Beaurivage, Sud	Saint-Louis
+	+	-	+	-	1	4				Aulnaies ouest
+	+	-	-	+	2				Nicolet, Noire	
+	+	-	-	-	2	4	8	11	Bécancour (a), Trois-Pistoles	
+	-	+	+	+	2				Ouelle	Tonnerre
+	-	+	+	-	1	3			Cascapédia	
+	-	+	-	+	0					
+	-	+	-	-	4	4	7		Rimouski	Coulonge, Matawin, Vermillon
+	-	-	+	+	0					
+	-	-	+	-	3	3				Gouffre, St-Paul, Mékinac
+	-	-	-	+	3				Chateauguay, Bécancour (b)	l'Assomption (a)
+	-	-	-	-	2	5	8	15	Du Loup	Petite Nation (a)
-	+	+	+	+	0					
-	+	+	+	-	4	4			Matane, Cap Chat, York	Jacques Cartier
-	+	+	-	+	4				Eaton, Hall, Nicolet sud-ouest, Yamaska	
-	+	+	-	-	1	5	9			Doncaster
-	+	-	+	+	3				Etchemin, Famine	Montmorency
-	+	-	+	-	2	5			Nouvelle	Eaux volées
-	+	-	-	+	1					Port Neuf
-	+	-	-	-	2	3	8	17	David	Ste-Anne bras nord
-	-	+	+	+	0					
-	-	+	+	-	0	0				
-	-	+	-	+	1					Petite Nation (b)
-	-	+	-	-	5	6	6			Kinojevis, Noire, Nord, Rouge (a), Picanoc
-	-	-	+	+	5					l'Assomption (b), Maskinongé, Nabisipi, du Loup (a, b)
-	-	-	+	-	5	10				Chamouchouane, Mistassibi, Mistassini, Romaine, Moisie
-	-	-	-	+	0					
-	-	-	-	-	3	3	13	19	Richelieu	Rouge (b), Croche

(+/-) : Signes des notes factorielles, (a) stations amont, (b) stations aval, NRn : nombre de rivières dans les régions en considérant les n<sup>èmes</sup> premières composantes principales.

### Annexe 3

Répartition des stations selon les régions hydrologiques homogènes définies. (débits minimums annuels)

CP1	CP2	CP3	CP4	CP5	NR5	NR4	NR3	NR2	Stations en rive sud	Stations en rive nord
+	+	+	+	+	0					
+	+	+	+	-	6	6			Bécancour (a, b), Nicolet, Rimouski,	Maskinongé, Mékinac,
+	+	+	-	+	1				York,	
+	+	+	-	-	1	2	8		Etchemin,	
+	+	-	+	+	0					
+	+	-	+	-	1	1			Eaton,	
+	+	-	-	+	2				Cascapédia, Madelaine,	
+	+	-	-	-	1	3	4	12	Nouvelle,	
+	-	+	+	+	0					
+	-	+	+	-	8	8			Beaurivage, Chateauguay, Hall, Nicolet SW, Sud, Trois-Pistoles, du Loup, Ouelle	
+	-	+	-	+	1				Coaticook,	
+	-	+	-	-	0	1	9			
+	-	-	+	+	1				Dartmouth,	
+	-	-	+	-	0	1				
+	-	-	-	+	0					
+	-	-	-	-	0	0	1	10		
-	+	+	+	+	0					
-	+	+	+	-	0	0				
-	+	+	-	+	0					
-	+	+	-	-	0	0	0			
-	+	-	+	+	3					Coulonge, Rouge (b), Vermillon,
-	+	-	+	-	2	5				Rouge (a), Ste-Anne bras nord,
-	+	-	-	+	5				Matane, Cap Chat,	Gouffre, Croche, Montmorency,
-	+	-	-	-	4	9	14	14		Kinojevis, Romaine, St-Paul, Moisie,
-	-	+	+	+	1					Doncaster,
-	-	+	+	-	3	4			Richelieu,	Petite Nation, Picanoc,
-	-	+	-	+	0					
-	-	+	-	-	0	0	4			
-	-	-	+	+	0					
-	-	-	+	-	0	0				
-	-	-	-	+	1					Nabisipi,
-	-	-	-	-	0	1	1	5		

(+/-) : Signes des notes factorielles, (a) stations amont, (b) stations aval, NRn : nombre de rivières dans les régions en considérant les n<sup>èmes</sup> premières composantes principales.