

# Etude des variations saisonnières des crues par le modèle de dépassement

## Study of seasonal trends in flood data with the partial duration series model

F. Ashkar, N. El-Jabi and T. B.M.J. Ouarda

Volume 6, Number 2, 1993

URI: <https://id.erudit.org/iderudit/705170ar>

DOI: <https://doi.org/10.7202/705170ar>

[See table of contents](#)

Publisher(s)

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

ISSN

0992-7158 (print)

1718-8598 (digital)

[Explore this journal](#)

Cite this article

Ashkar, F., El-Jabi, N. & Ouarda, T. B. (1993). Etude des variations saisonnières des crues par le modèle de dépassement. *Revue des sciences de l'eau / Journal of Water Science*, 6(2), 131–152. <https://doi.org/10.7202/705170ar>

### Article abstract

The partial duration series (pds) method for flood frequency estimation analyzes all flood peaks above a certain base level, or truncation level,  $Q_B$ , along with the times of occurrence of these flood « exceedances ». It has been shown that seasonal trends in river-flow processes have a significant effect on the distribution of flood exceedances. Two pds models have been presented in the literature for studying these seasonal variations in flood magnitude. The first, which can be called the « discrete seasonal pds model », divides the year into  $n$  seasons and determines  $n$  different distribution functions to fit the exceedances in each of these seasons. The second, which can be called the « continuous seasonal pds model », accounts for seasonal flood variations by modeling flood magnitude as a continuous time-dependent random variable. The discrete seasonal model makes a few assumptions concerning flood characteristics, but the statistical estimation of its parameters is considerably less complex than in the case of the continuous seasonal model. Results of a study using the discrete seasonal pds model are presented in this paper, along with two important applications of this model in hydrology.

The model is applied to 34 gaging stations in the province of Quebec and 28 stations in the province of New-Brunswick, Canada. Knowing the base level,  $Q_B$ , is essential for applying this model, but there is no universal technique for determining this truncation level. In this study, a technique is proposed that uses multiple regression for estimating  $Q_B$ . Regression equations, using one or more transformed or untransformed independent variables, are derived. Results for the province of Quebec show that the two-year flood estimate QDA explains 92.5 % of the variability of the base flow  $Q_B$ , and the drainage basin area SD explains 83 % of  $Q_B$  variability. The existence of a strong correlation between  $Q_B$  and SD suggests that it is possible to determine the base flow at sites where no historical record is available, by using the physical characteristics of the basin.

A graphical procedure associated with the partial duration series model is proposed to study the seasonal trends in flood data at the selected gaging stations. The study deals specifically with the choice of seasons to be entered into the pds model. It is particularly emphasized that the seasons should be determined on the basis of the data on hand, instead of taking the four usual seasons (winter, spring, summer, and fall). Two different forms of the graphical procedure are applied to the gaging stations in the provinces of Quebec and New Brunswick. The first, applied to the province of Quebec, consists of plotting the mean number of exceedances  $A(t)$  in a time interval  $(0, t)$  equal to one year, against the time  $t$ , for each station, and for a number of increasing base levels. The behavior of these  $A(t)$  plots (change at slope, piecewise linearity, etc.) indicates the significant seasons for each station. The second form of the graphical procedure, applied to stations in the province of New-Brunswick, is slightly different from the procedure mentioned above. For each station of the province, a relatively high base level is selected, corresponding to a mean number of exceedances per year in the order of 0.3 to 1.0. The times of occurrence of these exceedances are used to define the significant hydrological seasons in the year, which are then presented in graphical form. Varying the base level gives a fine seasonal partitioning of the year for each station, and allows grouping the stations into geographical regions that are homogeneous in seasonal flood distribution. Both versions of the graphical procedure are based on the same idea, and call for careful graphical examination of the seasonal behavior of floods at different gaging stations.

An appropriate partitioning of the year into seasons is obtained for different parts of the two provinces. For both provinces, and for all the stations that were investigated, no more than two significant seasons were found necessary for modeling seasonal flood variations. Based on the seasons determined for each station, and the geographical distribution of these stations, a geographical regionalization of seasonality is obtained for the provinces of Quebec and New-Brunswick. Each province is divided into four homogeneous regions, and appropriate seasons for each region are proposed.

The discrete seasonal model was found adequate and sufficient for the study of the seasonal behavior of floods in the provinces of Quebec and New-Brunswick. However, more detailed studies would be necessary to determine with more certainty if the continuous seasonal model is more appropriate in some cases. In all cases, a graphical examination of the empirical distribution function of flood magnitudes occurring in various periods of the year may help either in identifying homogeneous periods within which flood magnitudes may be considered as identically distributed, or in indicating a need for modeling flood magnitude as a random variable whose distribution varies continuously with time.

## Etude des variations saisonnières des crues par le modèle de dépassement

Study of seasonal trends in flood data  
with the partial duration series model

F. ASHKARI<sup>1</sup>, N. EL-JABI<sup>2</sup> et T. B.M.J. OUARDA<sup>3</sup>

Reçu le 11 juin 1992, accepté pour publication le 19 janvier 1993\*.

### SUMMARY

The partial duration series (pds) method for flood frequency estimation analyzes all flood peaks above a certain base level, or truncation level,  $Q_b$ , along with the times of occurrence of these flood « exceedances ». It has been shown that seasonal trends in river-flow processes have a significant effect on the distribution of flood exceedances. Two pds models have been presented in the literature for studying these seasonal variations in flood magnitude. The first, which can be called the « discrete seasonal pds model », divides the year into  $n$  seasons and determines  $n$  different distribution functions to fit the exceedances in each of these  $n$  seasons. The second, which can be called the « continuous seasonal pds model », accounts for seasonal flood variations by modeling flood magnitude as a continuous time-dependent random variable. The discrete seasonal model makes a few assumptions concerning flood characteristics, but the statistical estimation of its parameters is considerably less complex than in the case of the continuous seasonal model. Results of a study using the discrete seasonal pds model are presented in this paper, along with two important applications of this model in hydrology.

The model is applied to 34 gaging stations in the province of Québec and 28 stations in the province of New-Brunswick, Canada. Knowing the base level,  $Q_b$ , is essential for applying this model, but there is no universal technique for determining this truncation level. In this study, a technique is proposed that uses multiple regression for estimating  $Q_b$ . Regression equations, using one or more transformed or untransformed independent variables, are derived. Results for the province of Québec show that the two-year flood estimate QDA

1. Prof., Dépt. de Mathématiques, Univ. de Moncton, Moncton, NB E1A 3E9, Canada, Tél. (506) 858-4312.
2. Prof., Ecole de Génie, Univ. de Moncton, Moncton, NB E1A 3E9, Canada, Tél. (506) 858-4296.
3. Attaché de rech., Ecole de Génie, Univ. de Moncton, Moncton, NB E1A 3E9, Canada, Tél. (506) 858-4542.

\* Les commentaires seront reçus jusqu'au 21 décembre 1993.

explains 92.5 % of the variability of the base flow  $Q_B$ , and the drainage basin area SD explains 83 % of  $Q_B$  variability. The existence of a strong correlation between  $Q_B$  and SD suggests that it is possible to determine the base flow at sites where no historical record is available, by using the physical characteristics of the basin.

A graphical procedure associated with the partial duration series model is proposed to study the seasonal trends in flood data at the selected gaging stations. The study deals specifically with the choice of seasons to be entered into the pds model. It is particularly emphasized that the seasons should be determined on the basis of the data on hand, instead of taking the four usual seasons (winter, spring, summer, and fall). Two different forms of the graphical procedure are applied to the gaging stations in the provinces of Québec and New Brunswick. The first, applied to the province of Québec, consists of plotting the mean number of exceedances  $\Lambda(t)$  in a time interval  $(0, t^*]$  equal to one year, against the time  $t$ , for each station, and for a number of increasing base levels. The behaviour of these  $\Lambda(t)$  plots (change of slope, piecewise linearity, etc.) indicates the significant seasons for each station. The second form of the graphical procedure, applied to stations in the province of New-Brunswick, is slightly different from the procedure mentioned above. For each station of the province, a relatively high base level is selected, corresponding to a mean number of exceedances per year in the order of 0.3 to 1.0. The times of occurrence of these exceedances are used to define the significant hydrological seasons in the year, which are then presented in graphical form. Varying the base level gives a fine seasonal partitioning of the year for each station, and allows grouping the stations into geographical regions that are homogeneous in seasonal flood distribution. Both versions of the graphical procedure are based on the same idea, and call for careful graphical examination of the seasonal behaviour of floods at different gaging stations.

An appropriate partitioning of the year into seasons is obtained for different parts of the two provinces. For both provinces, and for all the stations that were investigated, no more than two significant seasons were found necessary for modeling seasonal flood variations. Based on the seasons determined for each station, and the geographical distribution of these stations, a geographical regionalization of seasonality is obtained for the provinces of Québec and New-Brunswick. Each province is divided into four homogeneous regions, and appropriate seasons for each region are proposed.

The discrete seasonal model was found adequate and sufficient for the study of the seasonal behaviour of floods in the provinces of Québec and New-Brunswick. However, more detailed studies would be necessary to determine with more certitude if the continuous seasonal model is more appropriate in some cases. In all cases, a graphical examination of the empirical distribution function of flood magnitudes occurring in various periods of the year may help either in identifying homogeneous periods within which flood magnitudes may be considered as identically distributed, or in indicating a need for modeling flood magnitude as a random variable whose distribution varies continuously with time.

**Key-words :** *Flood, partial duration series model, stochastic model, base flow, regionalization, seasonal model.*

## RÉSUMÉ

Cet article présente les résultats d'une étude traitant de deux aspects importants de l'application du modèle de dépassement en hydrologie. Ce modèle a été utilisé pour l'étude des variations saisonnières des débits des rivières du Québec et du Nouveau-Brunswick. Ces variations ont

généralement un effet important sur l'homogénéité des débits dans différentes périodes de l'année. Les modèles de dépassement sont capables de prendre ces variations saisonnières en considération en tenant compte des dépassements qui ne sont pas identiquement distribués lorsqu'ils proviennent de différentes saisons. L'étude traite spécialement le problème du choix de saisons à entrer dans le modèle. Particulièrement, on souligne l'importance de déterminer les saisons en se basant sur les données disponibles au lieu de se limiter aux quatre saisons habituelles : hiver, printemps, été et automne. On propose une procédure graphique qui, associée au modèle de dépassement, permet de délimiter les saisons dans les stations hydrologiques étudiées. La procédure est appliquée, sous deux formes différentes, à des stations de jaugeage dans les provinces du Québec et du Nouveau-Brunswick. Ceci nous a permis de diviser l'année convenablement en saisons dans différentes parties des deux provinces. Cette partition a été basée uniquement sur les débits de crues dans chaque station, et sans donner aucune considération à la location géographique de ces stations, mais il s'est avéré ultérieurement que cette subdivision des deux provinces représente en fait une partition géographique des stations hydrologiques.

L'évaluation du débit de base représente un point d'une importance majeure dans l'application du modèle de dépassement. Une estimation du débit de base est proposée dans ce travail en utilisant l'analyse de régression multiple. Une approche basée sur l'ajustement du nombre de dépassements à une loi de Poisson a été suivie pour la détermination de ce niveau de base dans chaque station de jaugeage. Une forte corrélation est détectée entre le débit de base et la surface drainée, impliquant qu'il est possible de calculer le débit de base dans une station qui ne contient pas d'enregistrements.

Les résultats de la régionalisation géographique de la saisonnalité sont analysés pour détecter et interpréter les liens entre les régions déterminées et les caractéristiques physiques et climatologiques des zones étudiées dans les deux provinces. Une association est démontrée entre ces deux paramètres qui semble être justifiable du point de vue hydrologique et climatologique. En conclusion, les résultats de cet article montrent la faisabilité technique et l'efficacité du modèle proposé pour l'étude des variations saisonnières des crues.

**Mots clés :** *crue, modèle stochastique de dépassement, débit de base, régionalisation, transfert d'information, modèle saisonnier, loi de Poisson, régression multiple.*

## 1 - INTRODUCTION

L'accroissement des activités humaines dans les régions inondables nécessite souvent la réalisation de programmes d'aménagement des rives qui consistent surtout en la construction d'ouvrages d'art. Ces programmes ne sont pas toujours faciles à implémenter, donc on est souvent obligé d'introduire un moyen administratif pour contrôler les crues par un aménagement rationnel des plaines inondables.

Parmi les composantes de ce moyen de contrôle, on cite, par exemple, le zonage qui consiste à contrôler le développement des régions inondables en

les séparant en des régions liées chacune à un risque d'inondation donné. Ceci implique la réalisation d'une relation entre l'intervalle de récurrence ou l'occurrence d'une crue quelconque et le débit d'inondation, et la détermination de classes de conséquences des inondations. Pour ce faire, l'approche probabiliste d'estimation de ces débits est souvent utilisée.

Au Québec, les analyses de fréquence de crue ont porté principalement sur des bassins de superficie supérieure à 500 km<sup>2</sup>. Une étude de HOANG (1978) utilisant les lois normale, log-normale, Gumbel, Pearson type III et log-Pearson type III tentait de déterminer le meilleur ajustement statistique des débits journaliers maxima annuels pour tout le Québec. En 1977, ce même auteur avait déjà employé la distribution log-Pearson type III pour l'estimation des débits journaliers maxima de crue printanière pour les rivières du Québec méridional alors que DESFORGES et TREMBLAY (1974) utilisèrent la distribution de Gumbel pour tout le Québec. Plus récemment, une analyse stochastique des débits de crue fut réalisée à l'aide du modèle de dépassement pour 237 stations hydrométriques au Canada (CAISSIE et EL-JABI, 1991). C'est également ce modèle qui sera utilisé dans cette étude.

Tout d'abord, on présente les résultats obtenus, suite à l'application du modèle de dépassement sur les débits de crue au Québec, pour la détermination du débit de base par régression multiple. Ensuite, le modèle de dépassement sera associé avec une procédure graphique pour la détermination des saisons, avec application numérique au Québec et au Nouveau-Brunswick. Les saisons déterminées ainsi que la distribution géographique des stations sont utilisées comme base pour effectuer une régionalisation géographique des deux provinces étudiées.

## 2 - LE MODÈLE

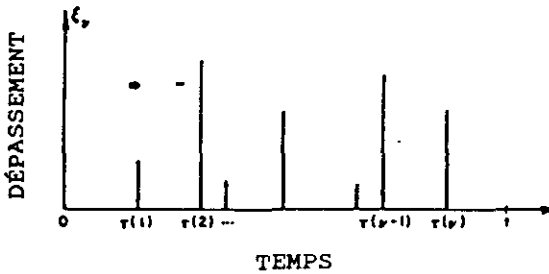
Étant donné la discontinuité dans le temps du phénomène d'inondations, les dépassements ou débits au-dessus d'un certain niveau de base peuvent être obtenus en appliquant sur l'hydrogramme de la rivière le modèle suivant (TODOROVIC et ZELENHASIC, 1970) :

$$\xi_v = \begin{cases} 0 & ; Q_v \leq Q_B \\ Q_v - Q_B & ; Q_v > Q_B \end{cases} \quad (1)$$

où  $Q_B$  est le débit de base,  $Q_v$  est le débit de crue au temps  $\tau(v)$ , et  $\xi_v$  est le dépassement au temps  $\tau(v)$ .

Le débit de base  $Q_B$ , que l'on peut aussi associer à une hauteur d'eau, peut être défini de plusieurs façons. Du point de vue physique, ce débit exprime la mesure de l'écoulement maximal d'une rivière sans qu'il y ait débordement sur les rives. Du point de vue ingénieur, il peut être défini comme étant le débit maximal de dommage zéro dans les plaines inondables. Finalement, ce débit peut être défini du point de vue mathématique tel que

utilisé dans cet article et présenté ultérieurement. En considérant seulement les événements au-dessus du débit de base, on réalise un processus stochastique discret et non négatif des dépassements dans l'intervalle de temps  $(0, t]$  (voir fig. 1).



**Figure 1** Réalisation du processus stochastique discret et non négatif des dépassements  $\{\xi, v \geq 1\}$  dans l'intervalle de temps  $[0, t]$ .

*Stochastic process representing exceedances and their times of occurrence  $\{\xi, v \geq 1\}$  in the time interval  $[0, t]$ .*

Ce processus stochastique discret  $\xi_v$  représente la base du modèle d'évaluation du débit des crues. Ce modèle de dépassement est basé sur la théorie des valeurs extrêmes et du nombre aléatoire des variables aléatoires présenté par TODOROVIC (1970) et étudié par ZELENHASIC (1970), ROUSSELLE (1972), MIQUEL (1984) et dernièrement par ASHKAR *et al.* (1991), et CAISSIE et EL-JABI (1992). TODOROVIC et ROUSSELLE (1971) ont présenté un modèle de dépassement où l'année est divisée en  $n$  saisons  $(T_{k-1}, T_k]$ ,  $k = 1, \dots, n$ ;  $T_0 = 0$ , et les dépassements ont été considérés comme indépendants et identiquement distribués dans chacune de ces saisons. Sous l'hypothèse que les dépassements se produisent selon un processus de Poisson, la fonction de répartition du dépassement maximal dans un intervalle de temps  $(0, t]$  ( $t$  appartenant à la  $k^e$  saison  $(T_{k-1}, T_k]$ ) est exprimée par :

$$F_t(X) = \exp \left\{ \sum_{i=1}^{k-1} [\Lambda(T_i) - \Lambda(T_{i-1})][1 - H_i(X)] - [\Lambda(t) - \Lambda(T_{k-1})][1 - H_k(X)] \right\} \quad (2)$$

$k = 1, 2, \dots, n$

où  $\Lambda(t)$  est le nombre moyen des dépassements dans l'intervalle  $(0, t]$ , et  $H_i(x)$  est la fonction de répartition de la valeur des dépassements dans la  $i^e$  saison, i. e.  $H_i(x) = P\{\xi \leq x\}$  avec  $\xi$  ayant lieu durant l'intervalle de temps  $(T_{i-1}, T_i]$ . Cette fonction  $H_i(x)$  peut être représentée par une loi statistique (exponentielle, Paréto généralisée, Weibull, etc.), dépendant des caractéristiques hydro-météorologiques de la rivière ou de la région en question.

## 2.1 Analyse des variations saisonnières

TODOROVIC et ZELENHASIC (1970) ont montré qu'à certaines stations de jaugeage, les débits dépassant un niveau de base quelconque, peuvent avec une précision raisonnable, être identiquement distribués quelque soit le temps d'occurrence de l'événement, à l'intérieur d'une année. Ceci correspond au modèle saisonnier (TODOROVIC et ROUSSELLE, 1971) avec un nombre de saisons  $n$  égal à un. Cependant, des études plus récentes (ASHKAR et ROUSSELLE, 1985) ont montré qu'en général, les variations saisonnières du débit des rivières ont un effet considérable sur la distribution des dépassements. Avec la présence de telles variations saisonnières, l'année peut être divisée en  $n$  saisons ( $n \neq 1$ ) comme c'était décrit auparavant. Alors avec  $n$  saisons, on obtient  $n$  fonctions de répartition  $H_i(x)$  différentes (Equation 2) qui correspondent aux dépassements mesurés.

Les variations saisonnières pour les débits de crue peuvent également être prises en considération en utilisant comme modèle pour le débit une variable aléatoire qui varie de façon continue avec le temps (NORTH, 1980) de la même manière qu'un processus de Poisson non-homogène (processus qui varie avec le temps) serait habituellement utilisé pour la fréquence des crues.

Le premier des modèles mentionnés (TODOROVIC et ROUSSELLE, 1971) peut se nommer « modèle saisonnier discret », alors que le modèle de NORTH (1980) peut se nommer « modèle saisonnier continu ». Le modèle saisonnier discret a été développé en se basant sur deux hypothèses ; (1) que les différents types d'orage produisent différentes caractéristiques de crue d'une saison à l'autre, et (2) qu'à l'intérieur de chaque saison, les variations des débits sont négligeables.

Le modèle saisonnier continu évite les discontinuités du modèle discret mais l'estimation statistique de ses paramètres est considérablement plus complexe. Le calcul d'intervalles de confiance pour les événements de période de récurrence  $T$  est également beaucoup plus difficile dans le cas d'un modèle saisonnier continu que dans le cas d'un modèle saisonnier discret.

## 2.2 Modèle saisonnier discret

ROUSSELLE (1972) a montré que la fonction de répartition exponentielle s'applique d'une façon satisfaisante pour décrire la distribution des dépassements dans plusieurs cas d'inondations :

$$H(x) = 1 - e^{-\beta x}, \beta \geq 0 \quad \text{avec} \quad \beta = \{E(\xi)\}^{-1} \quad (3)$$

où  $E$  est l'expression de l'espérance mathématique.

Ainsi, deux cas sont à considérer :

i) les dépassements  $\xi$  sont indépendants et identiquement distribués dans l'intervalle d'une année et se produisent selon un processus de Poisson (ZELENHASIC, 1970) ; dans ce cas la fonction de répartition du dépassement maximal annuel sera :

$$F_{t^*}(x) = \exp \{- \Lambda(t^*) e^{-\beta x}\} \quad (4)$$

où  $\Lambda(t^*)$  est le nombre moyen de dépassements par intervalle de temps  $(0, t^*)$  égal à une année, et  $\beta$  est le paramètre de la distribution exponentielle.

ii) les dépassements  $\xi$  sont indépendants et identiquement distribués dans l'intervalle d'une saison et se produisent également selon un processus de Poisson (ROUSSELLE, 1972) ; dans ce cas, en assumant par exemple que l'année est divisée en quatre saisons, la fonction de répartition du dépassement maximal annuel sera :

$$F_t(x) = \exp \{- \Lambda(T_1) e^{-\beta_1 x} - [\Lambda(T_2) - \Lambda(T_1)] e^{-\beta_2 x} - [\Lambda(T_3) - \Lambda(T_2)] e^{-\beta_3 x} - [\Lambda(T_4) - \Lambda(T_3)] e^{-\beta_4 x}\} \quad (5)$$

avec  $\Lambda(T_1)$ ,  $[\Lambda(T_2) - \Lambda(T_1)]$ ,  $[\Lambda(T_3) - \Lambda(T_2)]$  et  $[\Lambda(T_4) - \Lambda(T_3)]$  le nombre moyen de dépassements pour chaque saison et  $\beta_1$ ,  $\beta_2$ ,  $\beta_3$  et  $\beta_4$ , les paramètres de la loi exponentielle pour chaque saison.

### 3 - APPLICATION NUMÉRIQUE

Cette partie de l'étude tentera d'examiner l'applicabilité du modèle de dépassement et des variations saisonnières discrètes de crue pour les provinces du Québec et du Nouveau-Brunswick (N.-B.), Canada (fig. 2).

#### 3.1 Québec

Une série de 34 stations hydrométriques a été retenue pour entreprendre les analyses que nous allons décrire dans les sections suivantes. La figure 2 illustre l'emplacement de ces stations. L'information complète concernant les caractéristiques de ces stations est présentée dans EL-JABI *et al.* (1982) et ASHKAR et ROUSSELLE (1987). L'analyse numérique des débits d'écoulement des stations hydrométriques retenues a nécessité l'élaboration d'une méthodologie systématique pour le choix du débit de base ( $Q_B$ ).

L'évaluation de ce débit représente un point important dans l'application du modèle de dépassement. Son évaluation peut se faire en utilisant une approche basée sur la loi de Poisson, telle que discutée dans ASHKAR et ROUSSELLE (1987). Il est recommandé en pratique d'appliquer cette approche en surveillant en même temps l'ajustement des dépassements à une loi particulière telle que l'exponentielle ou Paréto généralisée. Ce choix du débit de base  $Q_B$  peut être considéré comme étant partiellement subjectif et donc nécessite une vérification plus objective de la loi de Poisson qui régit la répartition du nombre de dépassements dans un intervalle de temps  $(0, t]$ . Une telle vérification peut être effectuée à l'aide d'un test statistique comme le Khi-deux. Cependant, la vérification stricte de l'hypothèse d'une loi de Poisson



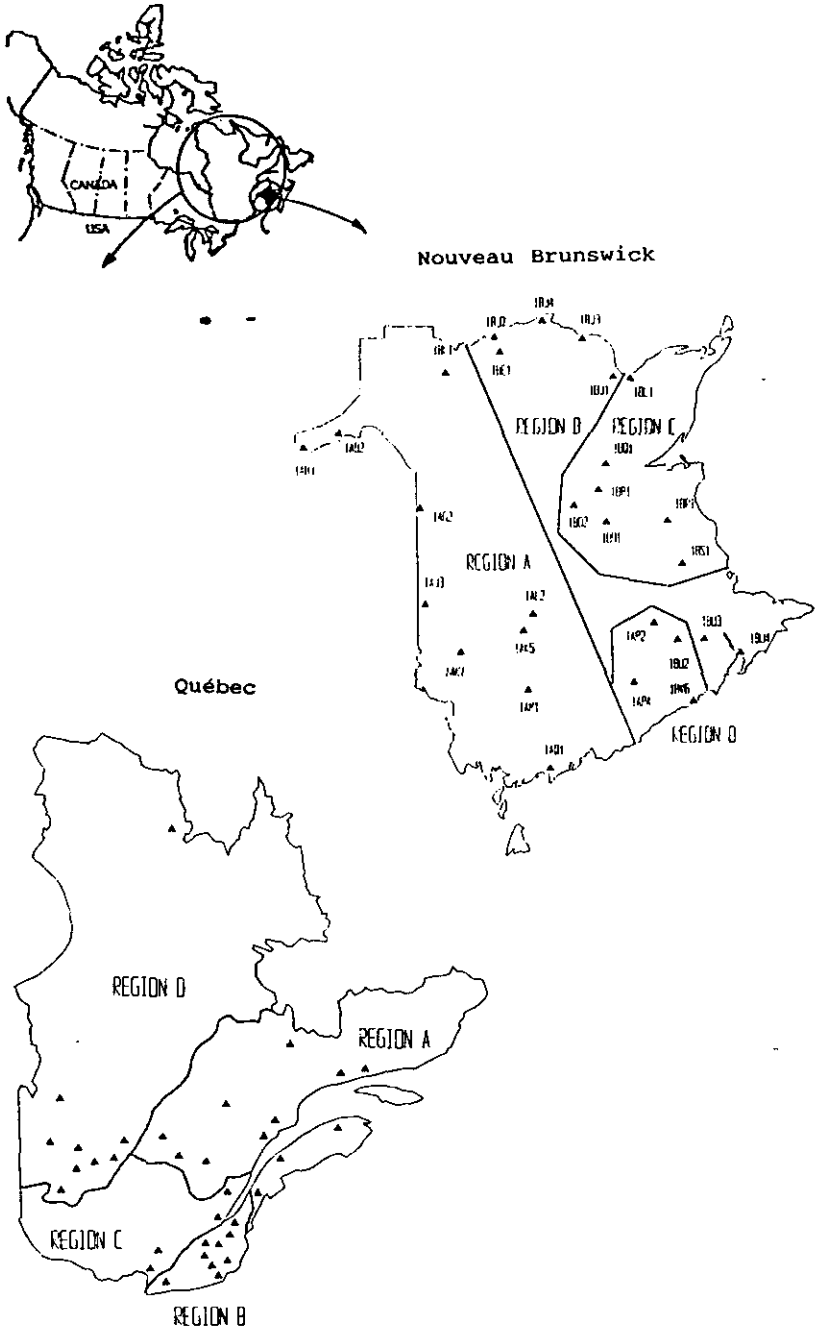


Figure 2 Location géographique des régions homogènes au Québec et au N.B.  
Geographic location of homogeneous regions in Québec and N.B.

n'est probablement pas très critique car, en effet, le calcul d'un débit associé à une grande période de récurrence  $T$  est moins sensible aux déviations à partir de cette loi qu'aux déviations face au choix de la fonction de répartition des valeurs des dépassements  $\xi_v$  (exponentielle, Paréto, lognormale, etc.). Dans ce qui suit, on présentera une méthode pour le choix du débit de base par l'entremise d'une régression multiple en se servant des résultats obtenus par l'étude des 34 stations hydrométriques du Québec.

### 3.1.1 Évaluation du débit de base par régression multiple

Le débit de base  $Q_B$  peut être estimé en développant une équation de régression entre la variable dépendante  $Q_B$  ( $m^3/s$ ) et les paramètres physiographiques des bassins de drainage. Dans cette étude nous avons considéré les paramètres suivants :

- QDA : débit de deux ans selon la loi log-Pearson type III ( $m^3/s$ )
- QMA : débit moyen annuel ( $m^3/s$ )
- NAE : nombre d'années d'enregistrement
- NAM : nombre d'années utilisé pour le calcul du débit moyen annuel
- SD : surface drainée ( $Km^2$ )
- PSD : rapport (surface drainée/surface du bassin)
- LAT : latitude (grade)
- LON : longitude (grade)
- DP : densité de population

Les débits de base pour les 34 stations du Québec ont été déterminés sur la base de l'ajustement du nombre de dépassements par année à une loi de Poisson, comme proposé par ASHKAR et ROUSSELLE (1987). L'ajustement est vérifié par la suite par un test Khi-deux. Cette approche ne favorise pas une distribution particulière pour l'ajustement des débits de dépassement ; par conséquent, l'ajustement des distributions adéquates aux débits de dépassements de chaque station reste la tâche du praticien qui se servira des débits de base.

Avant de procéder à l'établissement d'une équation de régression, on a analysé graphiquement la dépendance linéaire entre la variable dépendante  $Q_B$  et les autres variables explicatives séparément. De cette analyse, on a remarqué une forte corrélation entre  $Q_B$  et les variables QDA, QMA et SD. Cette constatation est confirmée par la matrice de corrélation de la figure 3. La corrélation entre  $Q_B$  et SD est d'une signification et intérêts particuliers. SD, à la différence de QDA et QMA, ne représente pas un débit et n'a pas besoin d'enregistrements historiques pour être calculée. L'existence d'une corrélation entre  $Q_B$  et SD implique qu'il est possible de calculer le débit de base dans une station qui ne contient pas d'enregistrements. L'intérêt de cette constatation est évident dans le cas de stations non jaugées. Les trois équations de régression suivantes, de  $Q_B$  en fonction de QDA, QMA et SD, ont générés des coefficients d'explication assez élevés :

$$Q_B = 0,481 QDA - 1,095 QMA + 0,018 SD + 46,980 \quad (6)$$

$$Q_B = \left[ 0,760 \sqrt{QDA} - 0,027 QMA + 0,0003 SD + 0,745 \right]^2 \quad (7)$$

$$Q_B = \exp\{1,003 \text{LN}(QDA) - 0,131 \text{LN}(QMA) + 0,061 \text{LN}(SD) - 0,527\} \quad (8)$$

	NAE	QMA	NAM	QDA	SD	PSD	LAT	LON	DP	QB
NAE	1.000									
QMA	-0.152	1.000								
NAM	0.883	-0.134	1.000							
QDA	-0.154	0.907	-0.214	1.000						
SD	-0.154	0.966	-0.179	0.881	1.000					
PSD	0.111	0.098	0.023	0.317	0.101	1.000				
LAT	-0.221	0.307	-0.250	0.277	0.355	-0.176	1.000			
LON	0.021	0.139	0.077	-0.152	0.194	-0.406	-0.153	1.000		
DP	0.132	-0.468	0.156	-0.398	-0.514	-0.167	-0.491	-0.195	1.000	
QB	-0.077	0.820	-0.212	0.925	0.830	0.354	0.267	-0.139	-0.394	1.000

Figure 3 Matrice de corrélation pour les variables utilisées dans la régression multiple.

*Variable correlation matrix used in multiple regression analysis.*

La première équation donne  $Q_B$  en fonction de QDA, sans transformation, la deuxième utilise la racine carrée de QDA, et la troisième utilise le logarithme népérien de QDA, QMA et SD. Les coefficients d'explication obtenus pour les trois équations de régression sont respectivement 0,934, 0,949 et 0,945, donc aucune de ces trois équations n'a un avantage considérable par rapport aux deux autres.

Cependant, il doit être mentionné que les trois variables « indépendantes » incluses dans ces trois équations sont fortement intercorrélées. Ceci engendre un problème de multicollinéarité qui résulte en une grande variance d'estimation des paramètres. Ce problème peut être à l'origine du signe négatif associé aux coefficients de QMA dans les trois équations de régression. ABRAHAM et LEDOLTER (1983) affirment que la multicollinéarité cause des difficultés sévères dans l'évaluation de l'effet de chacune des variables indépendantes, cependant, ils déclarent que ceci n'est pas un problème sérieux si le but principal du modèle de régression est de tirer des conclusions sur la variable réponse ( $Q_B$  dans notre cas). En d'autres mots, si les déductions sur la variable réponse  $Q_B$  sont faites pour des variables indépendantes qui sont du même ordre de grandeur que les échantillons de données disponibles (i. e. si on ne fait pas d'extrapolation à l'extérieur de la gamme de valeurs observées de l'échantillon), la multicollinéarité ne représentera pas un problème majeur.

Il reste à mentionner que, dans le cas de cette étude, le QDA à lui seul a expliqué 92,5 % de la variabilité de  $Q_B$ , et la surface drainée SD a expliqué 83 % de cette variabilité. Chacune de ces deux variables pourrait donc être utilisée comme variable de prédiction de  $Q_B$ , ce qui donne les deux équations de régression suivantes :

$$Q_B = 0.4154 QDA + 62.0222 \quad (9)$$

$$Q_B = 0.0287 SD + 120.6533 \quad (10)$$

Ces deux équations (9) et (10) sont plus adaptées à l'extrapolation que les équations (6) à (8), et ne contiennent pas de coefficients de régression négatifs, donc elles ne posent aucun problème en ce qui concerne la stabilité

des paramètres. De plus, l'équation (10) peut être utilisée sans avoir recours à des enregistrements, et est par conséquent utile dans le cas de sites non jaugés.

### 3.1.2 Analyse de la variation saisonnière

On a souligné l'importance de déterminer les saisons en se basant sur les données disponibles au lieu de se limiter aux quatre saisons habituelles : hiver, printemps, été et automne. Nous proposerons dans ce qui suit une procédure graphique simple, mais qui demande un certain degré de jugement de la part de l'utilisateur, pour délimiter les saisons. Cette procédure est illustrée à la figure 4. Quatre stations dans la province du Québec sont choisies pour illustrer la méthode. Le nombre moyen de dépassements dans un intervalle de temps  $(0, t]$  est reproduit pour différents niveaux du débit de base  $Q_B$ . Dans la figure 4, le niveau du débit de base le plus bas (qu'on a dénoté  $Q_b$ ) est suivi d'un nombre d'autres valeurs supérieures.

En se référant à la figure 4, et en se concentrant sur l'une des stations ; la station 051001 par exemple, deux remarques intéressantes peuvent être faites. La première est que les quatre courbes changent de pente approximativement aux mêmes dates ; plus spécifiquement, autour du 29 novembre, 18 avril et du 31 mai. La deuxième remarque est que les courbes sont plus ou moins linéaires à l'intérieur des trois périodes : 29 Novembre au 18 avril, 18 avril au 31 mai et 31 mai au 29 novembre.

Ce genre de comportement de la courbe  $\Lambda(t)$  suggère que, pour la station 051001, trois saisons peuvent être distinguées, et que le modèle saisonnier discret peut être convenable pour cette station. Dans la figure 4, on appelle ces saisons : saison I, II et III. En fait, seulement deux saisons ont besoin d'être considérées : La saison I peut être négligée à cause de l'absence de crues enregistrées durant cette saison (saison « sèche »). Il est évident qu'une augmentation du débit de base engendre une diminution de la pente de la courbe  $\Lambda(t)$ . Ceci explique le changement de pente entre les courbes  $\Lambda(t)$  dans la figure 4.

Du point de vue mathématique, il n'est pas nécessaire que les courbes  $\Lambda(t)$  soient linéaires à l'intérieur d'un intervalle pour que les amplitudes des crues soient identiquement distribuées à l'intérieur du même intervalle ; cependant, une condition nécessaire est que tous changements dans les pentes de ces courbes  $\Lambda(t)$  doivent avoir lieu au même temps pour toutes les courbes correspondant aux différents débits de base. La figure 4 montre que, pour toutes les stations considérées, et pour toutes les courbes  $\Lambda(t)$ , les changements de pente ont lieu sensiblement au même temps. Cette condition de changement de pente est une condition nécessaire mais pas suffisante ; cependant, l'insuffisance de cette condition ne nous a pas empêché d'aboutir à des conclusions assez intéressantes concernant le comportement saisonnier des crues du Québec.

Nous avons suggéré dans la discussion précédente que, pour chaque station, un certain nombre de saisons serait adéquat. Cependant, on ne doit pas oublier que deux saisons distinctes peuvent posséder des distributions peu différentes. Dans ce cas, et afin de réduire le nombre de paramètres à

estimer, il serait recommandable d'effectuer un test d'homogénéité pour les deux saisons afin de vérifier si elles peuvent être combinées en une seule saison. La présente étude n'est pas destinée à adresser ces détails pour toutes les stations et les saisons.

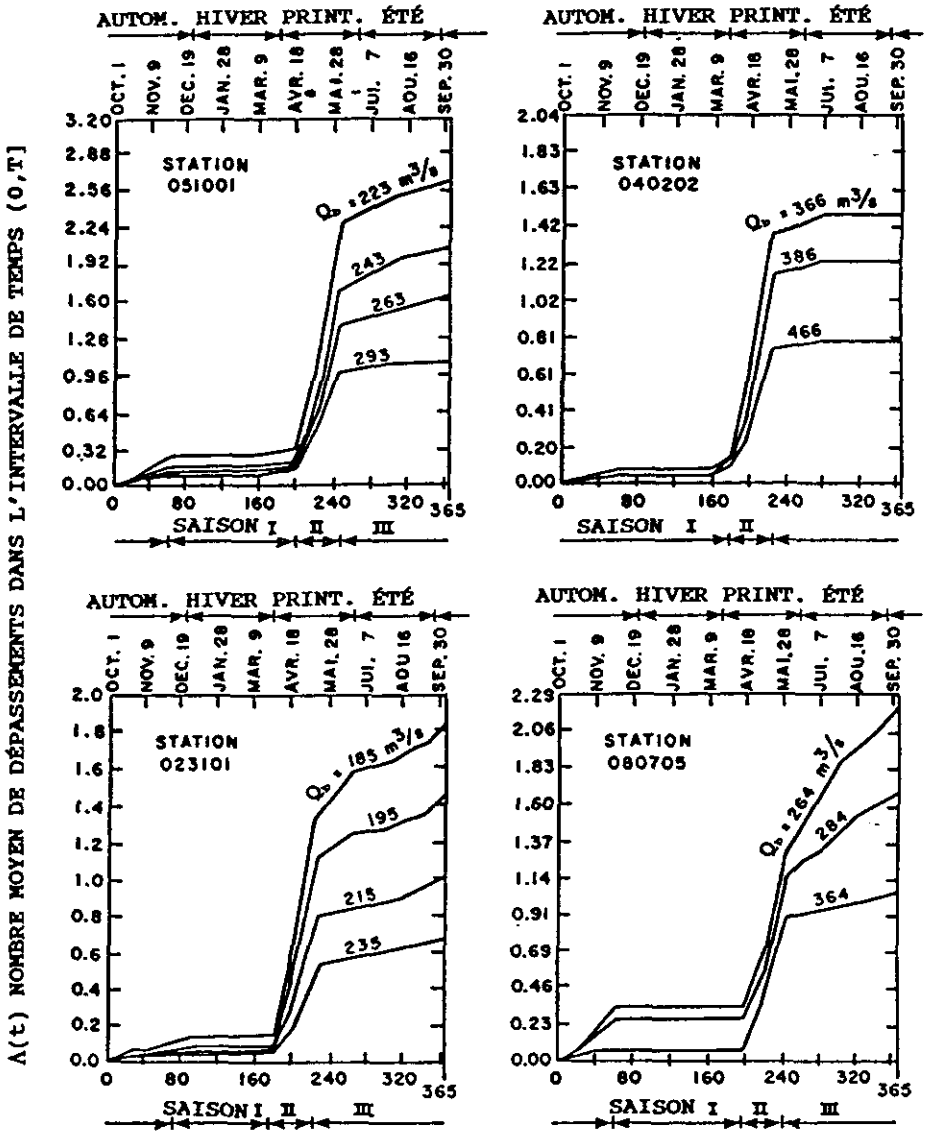


Figure 4 Illustration de la méthode graphique pour le Québec.  
 Illustration of the graphical method for the province of Québec.

La propriété de linéarité par sections pour les courbes  $\Lambda(t)$  n'était pas limitée aux stations représentées dans la figure 4 mais s'étendait aux 34 séries que nous avons précisées auparavant. Pour toutes les 34 séries, le modèle saisonnier discret a été jugé convenable et a été employé avec succès. Cependant, une étude plus détaillée serait peut être nécessaire pour déterminer avec plus de certitude si un modèle saisonnier continu sera plus approprié qu'un modèle saisonnier discret. La figure 4 montre que, pour toutes les 4 stations considérées, la saison I contient très peu ou pas de crues. Quand cette saison est négligée, deux saisons seulement restent pour chacune des stations 051001, 028101 et 080705, et toute l'année peut être considérée comme une seule saison pour la station 040202. En fait, pour toutes les 34 stations étudiées dans la province du Québec, pas plus que deux saisons significatives ont été jugées nécessaires pour modéliser les variations saisonnières dans le comportement de leurs crues. Ceci suggère que dans la province du Québec, il n'est pas nécessaire d'aller au-delà de deux saisons pour l'analyse fréquentielle des crues.

Il est intéressant de noter qu'en se basant sur les saisons déterminées pour chaque station, une régionalisation géographique de la saisonnalité a pu être achevée pour le Québec. La province a pu être divisée en quatre régions « homogènes » (du point de vue saisonnalité) après avoir examiné et comparé attentivement la partition de l'année en saisons dans différentes parties de la province. Il est à noter que pour des buts de régionalisation de ce genre, le modèle saisonnier discret paraît plus avantageux que le modèle saisonnier continu. Le tableau 1 représente les quatre régions homogènes (A, B, C et D) proposées pour la province du Québec et les saisons à utiliser dans chaque région. La figure 2 spécifie la location géographique de chaque région. Dans le tableau 1, et pour décrire les quatre régions homogènes, on utilise la subdivision de la province proposée par le ministère de l'Environnement du Québec (1990) [ces subdivisions sont notées de 1 à 10].

**Tableau 1** Les 4 régions homogènes pour le Québec.

**Table 1** The 4 homogeneous regions for the province of Québec.

Région	Localisation géographique*	Partition saisonnière proposée	
<b>A</b>	Divisions 1, 6, 7 et Division 2 à l'est de la longitude 70°	I	avril 18-juin 22
		II	juin 22-avril 18
<b>B</b>	Division 3 et Division 2 à l'ouest de la longitude 70°	I	mars 14-mai 13
		II	mai 13-mars 14
<b>C</b>	Divisions 4 et 5	I	avril 3-mai 28
		II	mai 28-avril 3
<b>D</b>	Divisions 8, 9 et 10	I	avril 18-mai 28
		II	mai 28-avril 18

\* Les divisions 1-10 sont décrites dans le rapport du ministère de l'Environnement du Québec (1990).

Il est à noter que cette partition de la province a été menée de façon objective en analysant les débits de chaque station uniquement à l'aide de

diagrammes comme ceux présentés dans la figure 4, et sans donner aucune considération à la location géographique des stations. Il s'est avéré ultérieurement que cette subdivision de la province représente en fait une partition géographique des stations hydrologiques comme décrit auparavant. La région A couvre principalement la péninsule de la Gaspésie et les régions de Duplessis et Manicouagan. Cette région est surtout influencée par la présence du fleuve et du golfe du Saint-Laurent. La région B représente la zone sud-est du Québec (Chaudière, Estrie et Montérégie). Cette région est surtout influencée par la présence des montagnes appalachiennes. La région C couvre essentiellement le plateau Laurentien (les Outaouais, Laurentides, Lanaudière, Cœur du Québec et Charlevoix). La région D s'étend surtout sur la vaste zone du grand-Nord et de l'Abitibi-Témiscamingue. Cette région est surtout influencée par les baies d'Hudson et d'Ungava, et est caractérisée par une fonte de neige retardée par rapport au reste du Québec.

### 3.2 Nouveau-Brunswick

Une autre forme de procédure graphique basée sur la même idée que celle appliquée à la province du Québec peut être démontrée en l'appliquant pour le Nouveau-Brunswick. Cette deuxième forme de la procédure graphique est illustrée à la figure 5, où on a 28 stations avec une échelle qui représente les jours de l'année. Pour les stations de la figure 5, le débit de base a été choisi pour que le nombre moyen de dépassements par année ( $\lambda$ ) soit supérieur à 0.300 et inférieur à 1.000 ( $0.3 < \lambda < 1$ ), ce qui veut dire que le niveau de base considéré ( $Q_B$ ) est assez élevé, et que notre concentration est sur les crues les plus importantes de l'année. Le choix de ce niveau de base  $Q_B$  est relativement subjectif, mais a été fait avec une grande considération pour les données de crues pour les différentes stations, en examinant les courbes  $\Lambda(t)$  pour toutes les stations et pour différents niveaux de base. On voit les périodes « sèches » (sans crues) et les périodes « humides » (avec crues) rencontrés durant l'année, ainsi que la période humide printanière, située généralement entre les jours 60 et 160. Cette dernière période nous a servi pour diviser ces stations en groupes et nous a permis d'obtenir, en premier lieu, une régionalisation géographique assez grossière pour le N.B. Les autres périodes humides de l'année sont venues, dans un deuxième lieu, pour aider à obtenir une division géographique plus raffinée de la province.

En se référant à la figure 5, donc sans changer le débit de base choisi, nous avons remarqué déjà que la saison printanière se situe en majorité entre les jours 60 et 160, mais on a 11 périodes distinctes parmi les 28 stations. Alors pour minimiser le nombre de périodes distinctes, il a suffi de faire changer le débit de base  $Q_B$  afin de trouver les différentes périodes possibles pour chaque station (tableau 2), la valeur de  $\lambda$  toujours entre 0.3 et 1.0, et en tenant compte des périodes presque sèches qui pourraient être considérées comme sèches.

On trouve alors six périodes distinctes qu'on peut ensuite réduire à quatre (tableau 3). Ces quatre groupes sont ensuite représentés sous forme graphique dans la figure 6. Les données utilisées dans la figure 6 sont résumées dans le tableau 4. Comme dans le cas du Québec, cette partition du

Nouveau-Brunswick est aussi menée sans aucune considération de la location géographique des stations. Les figures 6a, 6b et 6c représentent les trois régions principales (régions A, B et C) qui couvrent respectivement la partie ouest de la province, la région côtière de l'est et la partie nord-est, tandis que la figure 6d représente une petite région (région D) qui se situe dans le sud-est de la province.

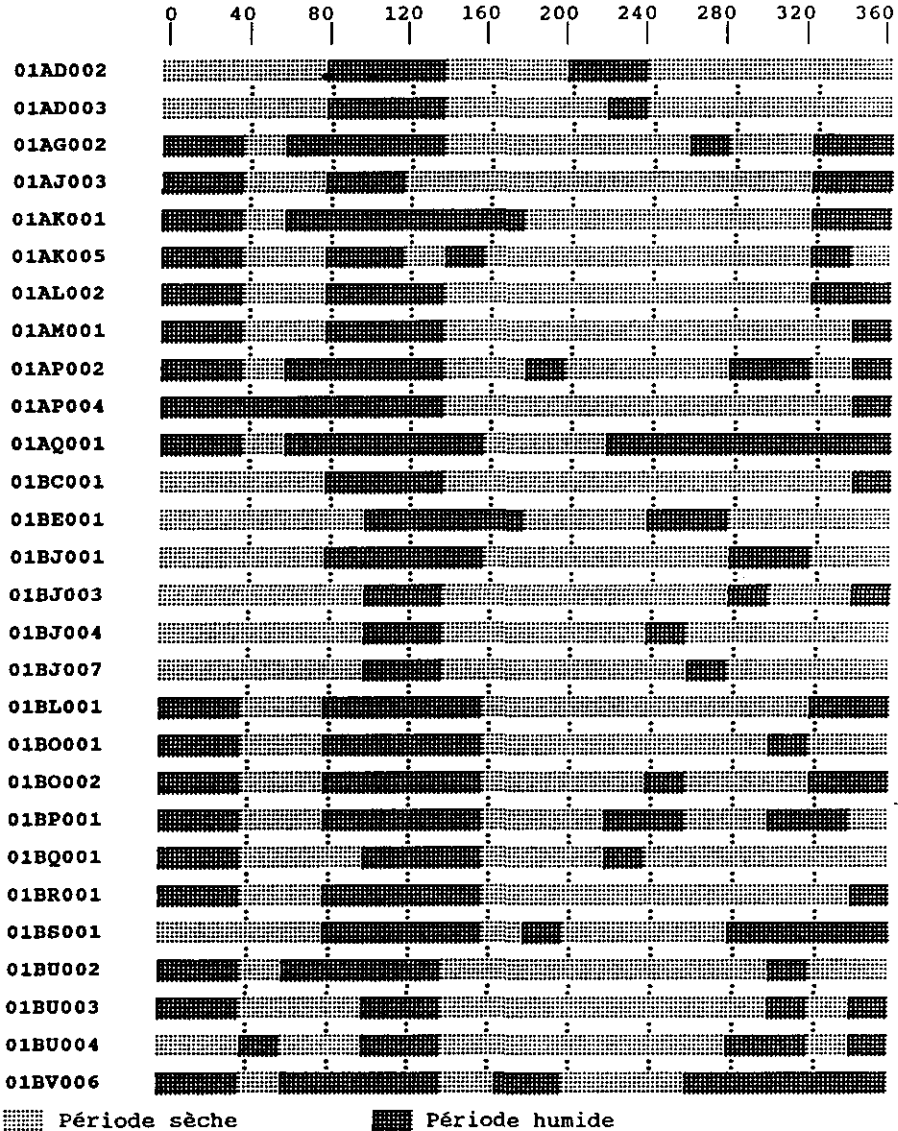


Figure 5 Illustration de la méthode graphique pour le N.B.  
 Illustration of the graphical method for the province of N.B.



**Tableau 2** Périodes humides printanières possible pour le N.B.**Table 2** Possible wet spring seasons for the province of N.B.

Période	Stations	Période	Stations
60-120 ou 80-140	01AG002	80-140 ou 80-160	01AL002 01BL001 01BR001 01BS001
60-140	01BV006		
60-140 ou 80-140	01AP004 01BU002	80-140 ou 80-160 ou 100-140 ou 100-160	01B0002
60-140 ou 80-140 ou 100-140	01AP002	80-140 ou 100-140	01BJ007 01BU003
60-160 ou 80-120 ou 80-140	01AQ001	80-160 ou 100-140	01BJ001
60-180 ou 80-140 ou 80-160	01AK001	80-160 ou 100-140 ou 100-160	01BQ001
80-120	01AJ003	80-160 ou 100-160	01B0001 01BP001
80-120 ou 80-140	01AM001	100-140 ou 100-160	01BJ003
80-120 ou 80-160	01AK005	100-140 ou 100-160 ou 100-180	01BE001
80-140	01AD002 01AD003 01BC001		

**Tableau 3** Division possible des périodes humides printanières pour le N.B.**Table 3** Possible partitioning of the wet spring seasons for the province of N.B.

Périodes humides printanières				
	80-140	100-140	80-160	60-140
Stations	01AD002	01BE001	01B0001	01AP002
	01AD003	01BJ001	01B0002	01AP004
	01AG002	01BJ003	01BL001	01BU002
	01AJ003*	01BJ004	01BR001	01BV006
	01AK001	01BJ007	01BS001	
	01AK005*	01BU003	01BP001	
	01AL002	01BU004	01BQ001**	
	01AM001			
	01AQ001			
	01BC001			

\* La période humide printanière de ces stations se situe entre les jours 80 et 120.

\*\* La période humide printanière de cette station se situe entre les jours 100 et 160.

**Tableau 4** Données utilisées pour la province du N.B.**Table 4** Data used for the province of N.B.

Station	Nombre d'années d'observations	Superficie (km <sup>2</sup> )	$\lambda$
01AD002	62	14 700.0	0.484
01AD003	37	1 350.0	0.730
01AG002	21	199.0	0.810
01AJ003	21	1 210.0	0.429
01AK001	67	234.0	0.597
01AK005	23	26.9	0.391
01AL002	27	1 450.0	0.556
01AM001	26	557.0	0.423
01AP002	41	668.0	0.415
01AP004	27	1 100.0	0.815
01AQ001	70	239.0	0.957
01BC001	26	3 160.0	0.654
01BE001	59	2 270.0	0.305
01BJ001	47	363.0	0.532
01BJ003	24	510.0	0.292
01BJ004	15	88.6	0.867
01BJ007	19	7 740.0	0.737
01BL001	23	175.0	0.826
01BO001	41	5 050.0	0.415
01BO002	23	611.0	0.696
01BP001	37	1 340.0	0.919
01BQ001	27	948.0	0.407
01BR001	20	177.0	0.850
01BS001	24	166.0	0.792
01BU002	27	391.0	0.407
01BU003	26	129.0	0.308
01BU004	18	34.2	0.444
01BV006	24	130.0	0.958

La figure 6a, montre que la période humide printanière de la majorité des stations du groupe A se situe entre les jours 80 et 140. On appellera cette période Saison I. Cependant, deux stations de ce groupe ont leur période humide printanière entre les jours 80 et 120 (marquées par un astérisque dans le tableau 3). En prenant comme exemple la station 01AL002, la saison I est suivie par une période sèche (141-320), qu'on appellera Saison II. Après la saison II on a une période humide (321-40) qui devient Saison III. Enfin, on a une deuxième période sèche (41-80), Saison IV. Mais seulement deux saisons ont besoin d'être considérées, car lors des saisons II et IV, il n'y a aucun dépassement, donc ces deux saisons peuvent être négligées. Par conséquent, la station 01AL002 ainsi que les autres stations de la région A représentées dans la figure 6a ont la partition suivante des saisons :

- Saison I : 80-140
- Saison II : 140-80.

De même façon, les stations de la région B à la figure 6b sont divisées comme suit :

- Saison I : 100-140
- Saison II : 140-100.

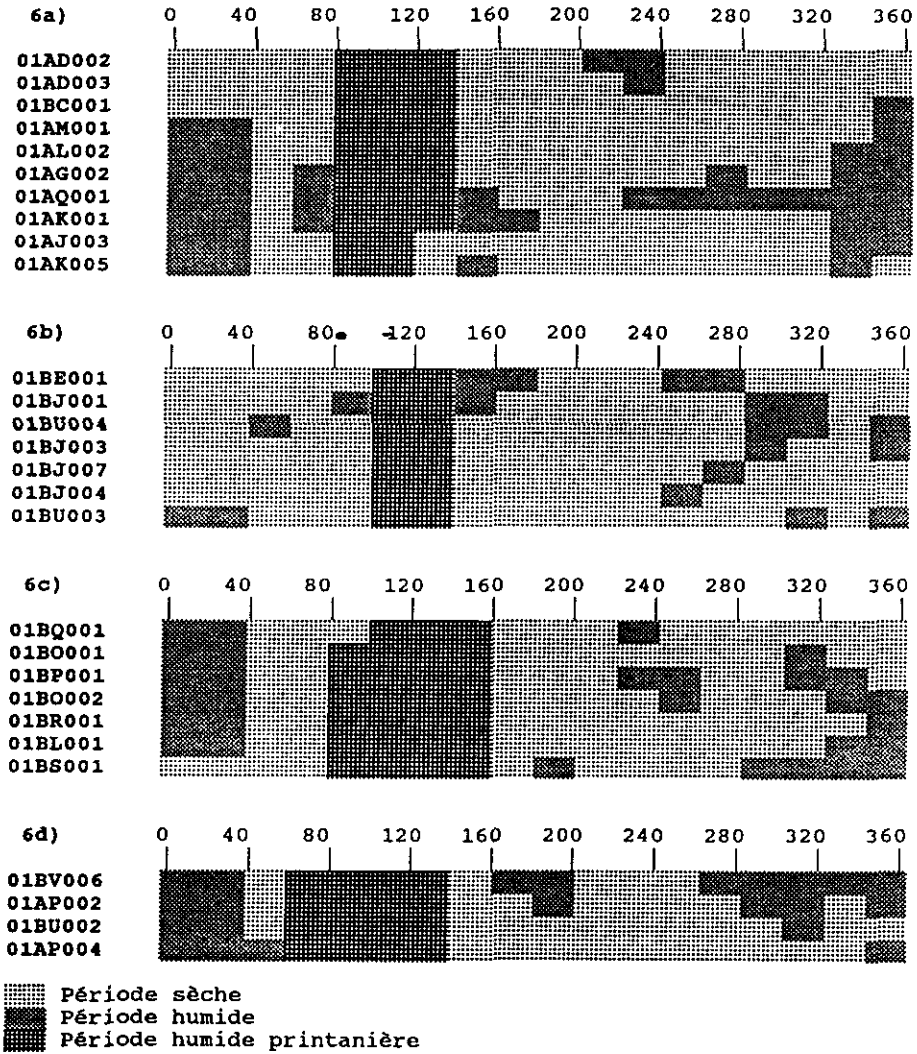


Figure 6 Illustration des régions homogènes du N.B.  
*Illustration of the homogeneous regions for N.B.*

Les stations des figures 6c (région C) et 6d (région D) ont respectivement comme partition :

- |                                |                                |
|--------------------------------|--------------------------------|
| Région C : – Saison I : 80-160 | Région D : – Saison I : 60-140 |
| – Saison II : 160-80           | – Saison II : 140-60           |

Une station de la région C (représentée par une dague dans le tableau 3) a une période humide printanière située entre les jours 100 et 160.

Malgré le caractère subjectif de certains aspects de cette méthode graphique, elle s'est prouvée très utile pour la subdivision de la province du

Nouveau-Brunswick en des régions homogènes dans le sens de la saisonnalité. La province a pu être divisée en deux régions homogènes principales après avoir examiné et comparé attentivement la partition de l'année en saisons dans différentes parties de la province. Le tableau 5 présente les deux régions homogènes principales et les deux petites régions homogènes proposées pour le N.B. et les saisons à utiliser dans chaque région. La figure 2 montre la location géographique de ces régions homogènes et les stations utilisées dans l'étude. Un rapport détaillé des données utilisées et des résultats obtenus est présenté dans ASHKAR et ARSENAULT (1992).

**Tableau 5** Les 4 régions homogènes proposées pour le N.B.

*Table 5 The 4 homogeneous regions for the province of N.B.*

Région	Localisation géographique*	Partition saisonnière proposée
A	45.2033-47.6667° lat 66.4667-68.9569° long	Saison I : 21 mars-20 mai Saison II : 20 mai-21 mars
B	45.8872-47.8978° lat 64.5164-66.8817° long	Saison I : 10 avril-20 mai Saison II : 20 mai-10 avril
C	46.4436-47.6500° lat 65.0653-66.1147° long	Saison I : 10 avril-9 juin Saison II : 9 juin-10 avril
D	45.5589-46.0719° lat 65.0172-65.6013° long	Saison I : 1 mars-20 mai Saison II : 20 mai-1 mars

\* Les divisions 1-10 sont décrites dans le rapport du ministère de l'Environnement du Québec (1990).

La région A représente la zone intérieure du N.B. où l'influence des vents côtiers est minimale. La région B représente la deuxième région homogène principale et couvre la majorité du reste de la province. L'influence côtière est plus importante dans cette région. La région C couvre essentiellement la zone côtière du bassin versant de la rivière de la Miramichi, et la région D représente une petite zone du sud, influencée principalement par la présence de la Baie Fundy. Les régions C et D sont caractérisées par une période humide printanière assez longue. Cette partition saisonnière du N.-B. ressemble partiellement aux résultats d'études précédentes concentrant sur d'autres aspects des caractéristiques hydrologiques de la province (Acres Consulting Services Ltd., 1977 ; Environnement Canada et MAMENB, 1987 ; GINGRAS et ADAMOWSKI, 1992). Une régionalisation saisonnière plus détaillée de la province nécessiterait l'analyse de plus de stations hydrométriques et résulterait probablement à la partition de la région B en deux régions séparées : La première au sud, où les précipitations sont composées surtout de pluies ; et la deuxième au nord, où les crues résultent surtout du phénomène de fonte de neige.

#### 4 - DISCUSSIONS ET CONCLUSION

L'approche stochastique d'estimation des débits de crue comporte les propriétés suivantes : i) La flexibilité dans le choix de l'intervalle de temps  $(0, t]$  dans lequel les crues sont observées, qui peut varier d'une journée jusqu'à un an. De ce fait, une analyse saisonnière peut être entreprise selon le comportement climatique des bassins versants ; et ii) La capacité de combiner la valeur des dépassements et leur nombre d'occurrences dans l'intervalle  $(0, t]$  dans la représentation de la répartition du dépassement maximal dans l'intervalle  $(0, t]$ .

Quant à l'analyse des différentes régressions multiples, nous pouvons constater que le débit de deux ans du modèle log-Pearson type III permet à lui seul d'expliquer la variable « débit de base » à 93 %. Les autres variables comme le débit moyen annuel, la surface drainée, la longitude, la latitude ajoutent très peu d'information et peuvent être négligées lors de la détermination du débit de base. Cependant la surface drainée SD est un paramètre d'importance particulière. L'existence d'une corrélation entre  $Q_B$  et SD implique qu'il est possible de calculer le débit de base pour des stations non jaugées.

Quant à l'analyse saisonnière par approche graphique, elle nous a permis de délimiter les saisons en se basant sur les débits observés au lieu de se limiter aux quatre saisons habituelles : hiver, printemps, été et automne. La simplicité de cette approche graphique a été démontrée, et son utilité a été prouvée pour deux provinces d'échelles (tailles) différentes.

Pour toutes les 34 stations étudiées au Québec, pas plus que deux saisons significatives ont été jugées nécessaires pour modeler les variations saisonnières dans le comportement des crues. La régionalisation géographique du Québec a abouti à la partition de la province en quatre régions homogènes. Pour les 28 stations du Nouveau-Brunswick, il a été jugé que deux saisons seulement ont besoin d'être considérées, et la province est divisée en deux régions homogènes principales et deux petites régions homogènes supplémentaires.

L'utilité des modèles de dépassement non stationnaires est démontrée dans cet article à travers cette application pour l'étude de la saisonnalité. Cependant, les bases du modèle peuvent être changées, et de diverses améliorations peuvent être introduites dans les applications futures. En gardant les mêmes notations, on peut représenter le nombre moyen de dépassements supérieurs à une valeur  $x$  par unité de temps par :

$$\lambda(t, x) = \lambda(t) H_j(x) \quad (11)$$

Le nombre moyen des dépassements (pour un niveau  $x$  donné) est alors l'intégrale de  $\lambda(t, x)$  par rapport au temps  $t$ . Ainsi, si la fonction de répartition  $H_j(x)$  des crues ne dépend pas du temps, les nombres moyens des dépassements sont affines entre deux  $x$ . La linéarité par sections des courbes  $\Lambda(t)$  indique que les taux  $\lambda(t, x)$  sont constants dans le temps. Le rapport des ordonnées de points sur ces courbes fournit alors une estimation du rapport

des  $H_i(x)$ . La comparaison de ces rapports avec ceux des fonctions de répartition estimées par section peut être un outil de validation assez utile dans ce cas.

L'analyse effectuée en utilisant la courbe des nombres de dépassement cumulés est une approche saisonnière continue et approximative. Il serait possible d'améliorer cette approche en utilisant la distribution de densité dont la fonction de répartition est :

$$G_1(X) = \frac{\Lambda(t,x)}{\int_{t_0}^T \lambda(t,x) dt} \quad (12)$$

Les fonctions de répartition empiriques estimant les distributions  $G_i(x)$  sont définis par les courbes de dépassements cumulés rapportées au nombre total de dépassements (intégrale sur  $(t_0, T]$  de  $\lambda(t, x)$ ). Une propriété intéressante du processus de Poisson est que les dates de dépassement observées sur un intervalle  $(t_0, T]$  forment un échantillon indépendant de la distribution de densité  $G_i(x)$ . Il est alors possible de leur appliquer :

- des tests de comparaison du type Kolmogoroff-Smirnoff ou autres pour les comparaisons inter-stations.
- des tests d'adéquation du type Kolmogoroff, Anderson Darling ou autres pour la validation des modèles (choix des saisons par exemple).
- des méthodes d'estimation non paramétriques plus précises comme les méthodes de noyaux. Ce type d'estimation peut s'avérer nécessaire si le nombre de dépassements totaux observés sont assez petits pour de nombreuses stations.

Ces améliorations peuvent être incorporées dans le modèle de dépassement dans un travail futur pour représenter la base d'un modèle plus raffiné.

## REMERCIEMENTS

Le soutien financier pour cette étude fut partiellement accordé par le Conseil de Recherches en Sciences Naturelles et en Génie du Canada, par le programme de coopération entre le Nouveau-Brunswick et le Québec et par la Faculté des Études Supérieures et de Recherche de l'Université de Moncton. Les auteurs désirent remercier M. Michel Arsenault, assistant de recherche au département de Mathématiques de l'Université de Moncton, pour son aide durant la réalisation de certaines étapes du travail. Les auteurs tiennent aussi à remercier les réviseurs de cet article pour leurs commentaires judicieux.

## RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- ABRAHAM, B. ET LEDOLTER, J., 1983. *Statistical Methods for Forecasting*, John Wiley & sons, New York, N.Y., 445 p.
- ACRES CONSULTING SERVICES LTD., 1977. *Regional Flood Frequency Analysis*, Programme fédéral-provincial visant la réduction des dégâts causés par les inondations, 141 p.
- ASHKAR, F. et ARSENAULT, M., 1992. *Étude des variations saisonnières dans les débits des rivières du Nouveau-Brunswick*. Rapport de Recherche : STAT-9, Université De Moncton, Nouveau-Brunswick, Canada, 52 p.
- ASHKAR, F., EL-JABI, N. et SARRAF, S., 1991. Study of Hydrological Phenomena by Extreme Value Theory, *Natural Hazards*, 4, 373-388.
- ASHKAR, F. et ROUSSELLE, J., 1987. Partial Duration Series Modeling Under the Assumption of a Poissonian Flood Count, *J. of Hydrol.*, 90, 135-144.
- ASHKAR, F. et ROUSSELLE, J., 1985. A Look at Seasonal Trends in Flood Data at Some Gaging Sites in Québec With Spécial Effort Towards Their Incorporation Into a Probabilistic Model. Ecole polytechnique de Montreal, 12 p.
- CAISSIE, D. et EL-JABI, N., 1992. Etude Sur le Choix du Seuil de Troncature en Analyse des Séries de Durées Partielles : Application au Canada, *Revue Des Sciences de l'Eau*, 5, 291-307.
- CAISSIE, D. et EL-JABI, N., 1991. A Stochastic Study of Floods in Canada : Frequency Analysis and Regionalization, *Can J. Civ. Eng.*, 18, 225-236.
- DESFORGES, P. et TREMBLAY, R., 1974. *Analyse de la Fréquence de Crues Pour le Québec*, Ministère des Richesses Naturelles du Québec, H.P. 33, 46 p.
- ENVIRONNEMENT CANADA et MINISTÈRE DES AFFAIRES MUNICIPALES ET DE L'ENVIRONNEMENT DU NOUVEAU-BRUNSWICK, 1987. *Analyses de la Fréquence des Crues au Nouveau-Brunswick*, un Guide Pour l'Estimation des Débits de Crues des Rivières de Cours d'Eau du Nouveau-Brunswick, 59 p.
- EL-JABI, N., RICHARD, D., ASHKAR, F. et ROUSSELLE, J., 1982. *Analyse Stochastique des Débits de Crue Pour la Province du Québec*. CDT p 698, Ecole Polytechnique, 71 p.
- GINGRAS, D. ET ADAMOWSKI, K., 1992. Coupling of Nonparametric Frequency and L-Moment Analyses for Mixed Distribution Identification. *Water Resources Bulletin*, 28 (2) : 263-272.
- HOANG, V.D., 1978. Meilleurs Ajustements Statistiques aux Débits Journaliers de Crue et d'Étiage des Rivières du Québec, Ministère des Richesses Naturelles du Québec, H.P. 47, 28p.
- HOANG, V.D., 1977. Estimation des Débits Journaliers de Crues Printanières des Rivières du Québec Méridional, Ministère des Richesses Naturelles du Québec, H.P. 40, 43 p.
- MINISTÈRE DE L'ENVIRONNEMENT DU QUÉBEC, 1990. *Les Ressources Hydriques au Québec et Leur Abondance Relative*, 17 p.
- MIQUEL, J., 1984. *Guide Pratique d'Estimation des Probabilités de Crues*, Direction des Etudes et Recherche d'Electricité de France, Edit. Eyrolles, Paris, France, 160 p.
- NORTH, M., 1980. Time-dependant Stochastic Model of Floods, *J. Hydraul. Div. Am. Soc. Civ. Eng.*, 106 (HY5), 649-665.
- ROUSSELLE, J., 1972. *On Some Problems of Flood Analysis*, Ph. D. Thesis, Colorado State Univ., 226 p.
- TODOROVIC, P., et ROUSSELLE, J., 1971. Some Problems of Flood Analysis, *Water Resour. Res.*, 7 (5), 1144-1150.
- TODOROVIC, P., 1970. « On Some Problems Involving Random Number of Random Variables », *Ann. Math. Statist.*, 41 (3) : pp. 1059-1063.
- TODOROVIC, P., et ZELENHASIC, E., 1970. A Stochastic Model for Flood Analysis, *Water Resour. Res.*, 6 (6), 1641-1648.
- ZELENHASIC, E., 1970. Theoretical Probability Distributions for Flood Peaks, Colorado State Univ., *Hydrol. Paper no 42*, 35p.