

RAPPORT FINAL POUR LE PROJET PARDE

DÉVELOPPEMENT D'UN MODÈLE HYDROLOGIQUE
VISANT L'ESTIMATION DES DÉBITS D'ÉTIAGE
POUR LE QUÉBEC HABITÉ

NOVEMBRE 2005

RAPPORT DE RECHERCHE N° 684-F1



RAPPORT FINAL POUR LE PROJET PARDE

DÉVELOPPEMENT D'UN MODÈLE HYDROLOGIQUE VISANT L'ESTIMATION DES DÉBITS D'ÉTIAGE POUR LE QUÉBEC HABITÉ

Rapport préparé à l'attention de :

Madame Marthe Côté
Coordination des programmes d'aide à la recherche
Direction des affaires intergouvernementales et des études économiques

Ministère de l'Environnement
675, boul. René-Lévesque Est
29e étage, boîte 97
Québec (Québec) G1R 5V7

par:

Taha B.M.J. Ouarda

Véronique Jourdain

Nicolas Gignac

Hugo Gingras

Edgar Herrera

Bernard Bobée

Chaire de recherche du Canada en estimation des variables hydrologiques,
INRS-ETE, 490, de la Couronne, Québec(Québec), G1K 9A9

Novembre 2005

ÉQUIPE DE RECHERCHE

ONT PARTICIPÉ À LA RÉALISATION DE CETTE ÉTUDE :

Chaire en Hydrologie Statistique

Institut National de la Recherche Scientifique, INRS-ETE

Taha B.M.J. Ouarda

Véronique Jourdain

Nicolas Gignac

Hugo Gingras

Edgar Herrera

Karem Chokmani

Aziz Kouider

Bernard Bobée

Ministère de l'Environnement du Québec

Van Diem Hoang

William Larouche

André Thibault

Lucie Wilson

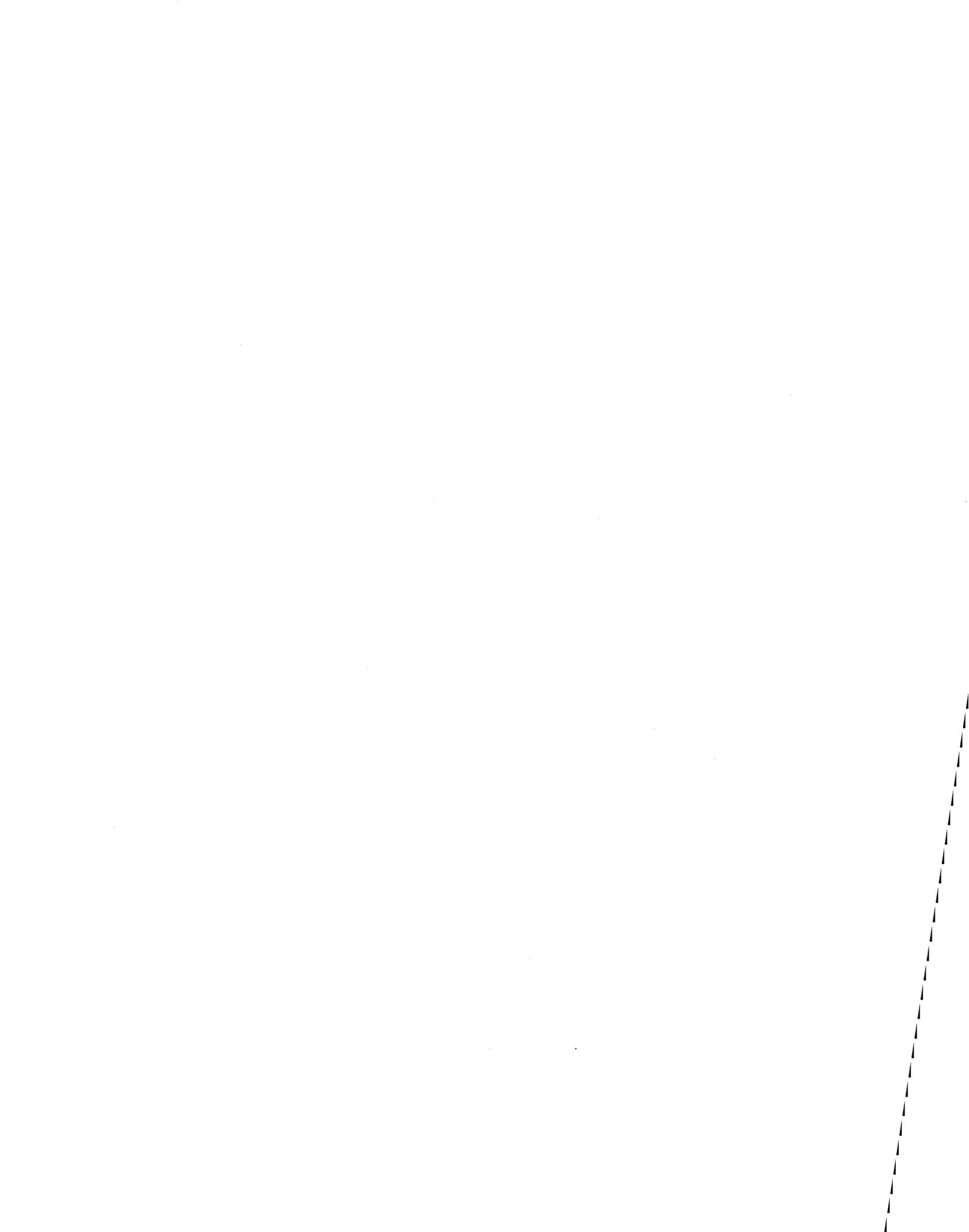


TABLE DES MATIÈRES

TABLE DES MATIÈRES	v
LISTE DES TABLEAUX.....	vii
LISTE DES FIGURES	ix
AVANT-PROPOS	xi
1 APPROCHE MÉTHODOLOGIQUE	1
1.1 PROBLÉMATIQUE.....	1
1.2 ANALYSE FRÉQUENTIELLE LOCALE.....	1
1.3 ANALYSE RÉGIONALE.....	3
1.4 OBJECTIFS	4
2 MÉTHODES DE RÉGIONALISATION DES ÉTIAGES À COMPARER ET À DÉVELOPPER POUR LE QUÉBEC	5
2.1 INTRODUCTION.....	5
2.2 RÉGIONALISATION DES ÉTIAGES PAR LA MÉTHODE DES L-MOMENTS	6
2.2.1 <i>Inspection des données</i>	8
2.2.2 <i>Identification des régions homogènes</i>	10
2.2.3 <i>Choix de la fonction de distribution</i>	11
2.2.4 <i>Estimation des paramètres de la distribution de fréquences</i>	12
2.3 MÉTHODES DE DÉTERMINATION DES RÉGIONS HOMOGENES	12
2.3.1 <i>Classification ascendante hiérarchique</i>	12
2.3.2 <i>Analyse canonique des corrélations</i>	14
2.4 MÉTHODES D'ESTIMATION RÉGIONALE.....	17
2.4.1 <i>Méthode de régression multiple</i>	17
2.4.2 <i>Méthode de l'indice d'étiage</i>	21
2.5 CONCEPTION DE L'OUTIL GÉOMATIQUE.....	22
3 APPLICATION AUX BASSINS DU QUÉBEC HABITÉ	25
3.1 CONSTRUCTION DE LA BASE DE DONNÉES.....	25
3.1.1 <i>Choix des stations hydrométriques</i>	25
3.1.1.1 <i>Tests statistiques</i>	26
3.1.2 <i>Variables physiographiques et météorologiques</i>	32
3.1.2.1 <i>Extraction des variables physiographiques et météorologiques</i>	32
3.1.2.2 <i>Choix des variables explicatives</i>	35

3.2	APPLICATION DE L'ANALYSE CANONIQUE DES CORRÉLATIONS COMBINÉE À LA RÉGRESSION MULTIPLE AUX BASSINS DU QUÉBEC HABITÉ	40
3.3	APPLICATION DE LA CLASSIFICATION ASCENDANTE HIÉRARCHIQUE COMBINÉE À LA RÉGRESSION MULTIPLE AUX BASSINS DU QUÉBEC HABITÉ.....	48
3.4	APPLICATION DE LA MÉTHODE DES L-MOMENTS AUX BASSINS DU QUÉBEC HABITÉ	50
4	DÉVELOPPEMENT DE L'OUTIL GÉOMATIQUE	55
4.1	STRUCTURE DE DONNÉES	56
4.2	PROTOTYPE DE RÉGIONALISATION	60
	4.2.1 <i>Procédure d'estimation</i>	62
	4.2.2 <i>Délimitation automatique du bassin versant</i>	65
5	CONCLUSIONS.....	69
	RÉFÉRENCES.....	75
	ANNEXES	81

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 2-1 : Études de régression régionale qui utilisent les paramètres du bassin versant pour estimer les indicateurs d'étiage	17
Tableau 3-1 : Stations n'ayant pas passé les tests de stationnarité et/ou d'indépendance	27
Tableau 3-2 : Stations éliminées	27
Tableau 3-3 : Stations problématiques éliminées	28
Tableau 3-4 : Nombre de stations disponibles selon la période et la durée	31
Tableau 3-5 : Variables physiographiques et météorologiques	32
Tableau 3-6 : Numéro de courbe moyen selon les caractéristiques du bassin	33
Tableau 3-7 : Variable et nombre de stations météorologiques utilisées.....	34
Tableau 3-8 : Statistiques descriptives des variables physiographiques et météorologiques	36
Tableau 3-9 : Transformation à appliquer dans le but de normaliser les variables.....	37
Tableau 3-10 : Corrélation des différents quantiles avec la variable BV (en coordonnées logarithmiques).....	37
Tableau 3-11 : Corrélations entre les variables physiographiques et météorologiques	38
Tableau 3-12 : Corrélations entre les variables physiographiques et météorologiques et les quantiles spécifiques pour les périodes annuelle, estivale et hivernale	39
Tableau 3-13 : BRM et EQRM pour les estimations des quantiles d'intérêt par l'ACC-RM	42
Tableau 3-14 : BRM et EQRM pour les estimations des quantiles d'intérêt par la CAH-RM.....	49
Tableau 3-15 : Exemple d'application de l'algorithme de partitionnement objectif	51

Tableau 3-16 : Valeurs de la statistique D du test de discordance pour les stations du Tableau 3-15.....	52
Tableau 3-17 : Valeurs de la statistique H du test d'homogénéité pour les régions du Tableau 3-15.....	53
Tableau 4-1 : Inventaire des données vectorielles	57
Tableau 4-2 : Inventaire des données matricielles	58
Tableau 4-3 : Table des données pour les sites cibles non-jaugés	58

LISTE DES FIGURES

Figure 3-1 : $Q_{10,7}$ local pour la période estivale en fonction de la superficie du bassin versant (échelle logarithmique).....	29
Figure 3-2 : $Q_{10,7}$ local pour la période annuelle en fonction de la superficie du bassin versant (échelle logarithmique).....	30
Figure 3-3 : $Q_{10,7}$ local pour la période hivernale en fonction de la superficie du bassin versant (échelle logarithmique).....	31
Figure 3-4 : Erreur d'estimation (BR) en % de l'ACC-RM pour les étiages estivaux en fonction de la superficie (T=10, d=7).....	43
Figure 3-5 : Erreur d'estimation (BR) en % de l'ACC-RM pour les étiages hivernaux en fonction de la superficie (T=10, d=7).....	44
Figure 3-6 : Erreur d'estimation (BR) en % de l'ACC-RM pour les étiages annuels en fonction de la superficie (T=10, d=7).....	44
Figure 3-7 : Erreur d'estimation (BR) en % de l'ACC-RM pour les étiages estivaux en fonction de la superficie (T=2, d=7).....	45
Figure 3-8 : Erreur d'estimation (BR) en % de l'ACC-RM pour les étiages hivernaux en fonction de la superficie (T=2, d=7).....	45
Figure 3-9 : Erreur d'estimation (BR) en % de l'ACC-RM pour les étiages annuels en fonction de la superficie (T=2, d=7).....	46
Figure 3-10 : Erreur d'estimation (BR) en % de l'ACC-RM pour les étiages estivaux en fonction de la superficie (T=5, d=30).....	46
Figure 3-11 : Erreur d'estimation (BR) en % de l'ACC-RM pour les étiages hivernaux en fonction de la superficie (T=5, d=30).....	47

Figure 3-12 : Erreur d'estimation (BR) en % de l'ACC-RM pour les étiages annuels en fonction de la superficie (T=5, d=30)	47
Figure 4-1 : Exemple d'un modèle numérique d'altitude (MNA).....	56
Figure 4-2 : Représentation cartographique de la table des sites cibles non-jaugés	59
Figure 4-3 : Menus intégrés dans l'interface principale d'ArcView.....	61
Figure 4-4 : Programme de régionalisation appelé par le SIG	61
Figure 4-5 : Détermination cartographique du site cible à analyser.....	62
Figure 4-6 :Organigramme de la méthodologie de régionalisation.....	64
Figure 4-7 : Exemple d'une matrice d'élévation	65
Figure 4-8 : Illustration de l'algorithme D8 pour déterminer l'écoulement avec le MNA	66

AVANT-PROPOS

Le Centre d'expertise hydrique du Québec (CEHQ), agence du Ministère de l'Environnement du Québec (MENV), et la Chaire en Hydrologie statistique (Hydro-Québec/CRSNG/ALCAN) à l'INRS-ETE ont établi l'étude intitulée « Développement d'un modèle hydrologique visant l'estimation des débits d'étiage pour le Québec habité » dans le cadre du projet PARDE. Cet outil hydrologique/statistique permettra d'estimer les débits d'étiage pour la région du Québec habité (entre le 45e et le 55e parallèle) selon une procédure objective, rapide et efficace. Et cela autant pour des sites jaugés que pour des sites partiellement jaugés ou non-jaugés.

Cette étude a été divisée selon les trois volets suivants :

1. L'analyse fréquentielle locale (Herrera et al., 2003), qui consiste à estimer les débits d'étiage $Q_{2,7}$ (minimum sur 7 jours consécutifs ayant une période de retour de 2 ans), $Q_{10,7}$ (minimum sur 7 jours consécutifs ayant une période de retour de 10 ans) et $Q_{5,30}$ (minimum sur 30 jours consécutifs ayant une période de retour de 5 ans). Ces estimations sont effectuées à partir du réseau des stations hydrométriques du MENV pour les périodes annuelle, estivale et hivernale.
2. La régionalisation des débits d'étiage pour les sites où l'on ne dispose pas de suffisamment d'informations en utilisant les données d'écoulement disponibles pour d'autres stations appartenant à une même région hydrologique. L'estimation des quantiles est faite en deux étapes : 1) définition et détermination des régions hydrologiquement homogènes, et 2) estimation régionale.
3. L'aspect géomatique, où l'on procèdera à la préparation des cartes de résultats qui permettront à l'utilisateur d'estimer les équations régionales des quantiles de débits d'étiage pour n'importe quel bassin du Québec habité.

Ce rapport présente les résultats des deuxième et troisième étapes du projet, soit la régionalisation des débits d'étiages en vue de procéder à leur cartographie. Il est divisé en cinq chapitres. L'approche méthodologique constitue le premier chapitre et donne une description des

étapes suivies pour obtenir les estimations régionales des débits d'étiage. Le deuxième chapitre présente les méthodes de régionalisation des débits d'étiage déjà existantes et qui seront comparées dans le but d'obtenir la meilleure procédure d'estimation. Le troisième chapitre présente les différentes étapes qui ont mené à la construction de la base de données en plus de présenter les résultats de l'analyse comparative des différentes approches de régionalisation. Le quatrième chapitre est consacré au développement de l'outil géomatique, tandis que les conclusions et recommandations sont présentées au cinquième et dernier chapitre.

1 APPROCHE MÉTHODOLOGIQUE

1.1 Problématique

La compréhension de la fréquence et de la durée des débits d'étiage est critique pour la bonne gestion des ressources en eau. Les statistiques sur les débits d'étiage sont utiles spécialement dans un contexte où la conservation de l'eau est un enjeu important, de même que pour la gestion de la qualité de l'eau et des systèmes d'irrigation, pour l'analyse de l'impact des sécheresses sur les écosystèmes aquatiques et pour des fins de récréation.

En 1976, l'ASCE (*American Society of Civil Engineers*) a mis sur pied le Comité Hydrologique des Eaux Superficielles pour déterminer l'information nécessaire dans l'évaluation des débits d'étiage, ainsi que pour décrire les méthodes d'analyse et d'échantillonnage disponibles. Cependant, il existe encore une certaine ambiguïté dans la procédure d'estimation statistique des débits d'étiage, et ce, autant pour les sites jaugés que non-jaugés (Kroll et Vogel, 2002).

1.2 Analyse Fréquentielle Locale

Quand on dispose de suffisamment de données au site d'intérêt, il est possible d'extraire les indicateurs d'étiage à l'aide de la technique d'analyse fréquentielle. L'objectif principal de l'analyse fréquentielle en hydrologie est de relier l'amplitude des événements extrêmes à leur fréquence d'occurrence au moyen de l'utilisation de distributions de probabilité. En hydrologie, on s'intéresse généralement à l'ensemble des valeurs extrêmes au cours d'une année, telles que les crues (maximum du débit moyen quotidien par année ou par saison) et les étiages. Pour les étiages, la durée de la valeur extrême (par année ou par saison) est normalement considérée sur une période de plusieurs jours. Il est important d'utiliser des périodes plus longues si l'on souhaite observer les impacts des faibles débits sur des phénomènes observables seulement après plusieurs jours, tel que l'effet sur les poissons (Loganathan et al., 1985) ou sur la gestion des eaux de déchets vers les eaux superficielles (Ries III et Friesz, 2000).

Dans la plupart des études, on utilise différents types de fonctions de distribution théoriques pour extrapoler au-delà des limites imposées par le nombre d'observations disponibles et améliorer

l'exactitude de l'estimation des débits d'étiage. La vraie distribution de probabilité étant inconnue en pratique, le problème réside donc dans l'identification d'une fonction de distribution raisonnable et dans l'ajustement de ses paramètres. La procédure consiste tout d'abord en l'ajustement de plusieurs fonctions de distribution théoriques aux données d'étiages observés. Ensuite, il faut procéder au choix de la distribution s'ajustant le mieux aux données à l'aide de tests statistiques et de graphiques. Dans ce projet, on a estimé pour chacune des stations étudiées, les quantiles correspondants aux périodes de retour d'intérêt identifiées par le MENV, soit 2, 5 et 10 ans.

L'estimation de ces quantiles s'est faite selon l'approche suivante :

1. caractérisation des échantillons (détermination de l'information apportée sur la valeur centrale, la dispersion, la forme et la concentration) ;
2. tests d'hypothèses sur les séries de données (stationnarité, indépendance et homogénéité);
3. ajustement de différentes distributions statistiques ;
4. estimation des paramètres de chaque distribution ;
5. choix de la meilleure loi ajustée aux données ;
6. estimation des quantiles correspondants aux périodes de retour identifiées.

Les quantiles pour les périodes annuelle, hivernale et estivale suivantes considérés dans la présente étude sont :

- $Q_{10,7}$, qui correspond au minimum sur 7 jours consécutifs ayant une période de retour de 10 ans ;
- $Q_{2,7}$, qui correspond au minimum sur 7 jours consécutifs ayant une période de retour de 2 ans ;
- $Q_{5,30}$, qui correspond au minimum sur 30 jours consécutifs ayant une période de retour de 5 ans.

1.3 Analyse Régionale

Pour appliquer la méthode d'analyse fréquentielle, il est nécessaire de disposer d'une banque de données de mesures de débit. Malheureusement, il est impossible d'avoir un réseau de stations couvrant tous les bassins versants d'un territoire donné. Alors, on doit utiliser une autre méthode pour traiter les bassins non-jaugés ou partiellement jaugés. Parmi les méthodes les plus utilisées pour l'estimation des débits d'étiage pour des bassins versants non-jaugés ou partiellement jaugés, on trouve les méthodes mathématiques. Ces méthodes sont utilisées pour faire la prédiction des indices spécifiques d'étiage ou la mesure d'étiages composés en utilisant des techniques de régionalisation hydrologique.

Les méthodes de régionalisation ont été d'abord développées pour l'analyse des crues, dans laquelle on trouve une problématique statistique similaire à celle des étiages. La régionalisation est la méthode qui consiste à transférer les résultats de l'analyse fréquentielle pour les sites jaugés vers les sites non-jaugés ou partiellement jaugés où l'on a besoin d'une estimation de certains événements hydrologiques. Avec cette méthode, on tient compte de plus d'information que seulement une série de données pour un site jaugé, ce qui permet d'obtenir une plus grande exactitude dans l'estimation des quantiles (Lettenmaier et Potter, 1985; Lettenmaier et al., 1987; Hosking et Wallis, 1988; Potter et Lettenmaier, 1990). De plus, on obtient une procédure d'estimation statistique physiquement significative (Nathan et McMahon, 1992; Smakhtin, 2001).

Parmi les différentes techniques de régionalisation, on peut faire la distinction entre deux types d'analyse régionale (Durrans et Tomic, 1996) :

1. Dans le premier type d'analyse régionale, on a pour but de faire l'estimation de certaines caractéristiques des débits comme les indicateurs d'étiage pour les sites non-jaugés.
2. Le second type de régionalisation a pour but d'améliorer les estimations aux sites jaugés à l'aide de l'information provenant d'autres sites jaugés.

Les principales étapes des différentes méthodes d'analyse régionale sont les suivantes (e.g. Hosking et Wallis, 1997; Durrans et Tomic, 1996) :

1. identification des régions hydrologiquement homogènes ;
2. estimation régionale.

1.4 Objectifs

L'objectif principal de cette étape du projet est de développer une méthode d'estimation régionale des étiages aux sites non-jaugés ou partiellement jaugés, et qui sera éventuellement intégrée dans un outil informatique convivial.

Ainsi, les objectifs plus spécifiques sont :

- Faire une analyse comparative des méthodes d'estimation régionale existantes.
- Appliquer la méthodologie développée à la province de Québec.
- Produire des conclusions et des recommandations générales concernant l'estimation régionale des débits d'étiage.

2 MÉTHODES DE RÉGIONALISATION DES ÉTIAGES À COMPARER ET À DÉVELOPPER POUR LE QUÉBEC

2.1 Introduction

La régionalisation permet le transfert de l'information disponible à l'intérieur d'une région hydrologiquement homogène vers des sites partiellement jaugés ou non-jaugés. Dans le cas des étiages, la méthode régionale proposée a comme but ultime l'obtention d'une estimation de débits $Q_{T,d}$ de durée d jours et de période de retour T pour des sites cibles où les données hydrométriques sont insuffisantes ou pour lesquels aucune mesure de débit n'existe.

Les principales étapes de la méthode d'analyse régionale sont les suivantes :

1. détermination des stations hydrométriques jaugées qui seront étudiées et construction de la base de données physiographiques et météorologiques de référence ;
2. identification des variables physiographiques et météorologiques indépendantes permettant de discriminer les groupes de stations homogènes ;
3. délimitation et détermination des groupes de stations homogènes ayant un comportement hydrologique semblable ;
4. application d'une technique d'estimation régionale ;
5. production d'équations régionales, utilisant la relation entre les variables physiographiques et météorologiques et les débits pour toutes les durées et les périodes de retour d'intérêt ;
6. application de la méthodologie aux stations non-jaugées.

Une méthode de régionalisation complète des étiages, la méthode des L-moments, sera tout d'abord présentée. Ensuite, deux méthodes de détermination des régions homogènes seront décrites, soit la classification ascendante hiérarchique et l'analyse canonique des corrélations. Dans le but d'effectuer une analyse régionale complète, ces deux méthodes seront combinées à la régression multiple, technique permettant d'obtenir les estimations régionales.

En somme, les trois méthodes suivantes de régionalisation des étiages seront présentées et développées :

1. méthode des L-moments ;
2. classification ascendante hiérarchique combinée à la régression multiple ;
3. analyse canonique des corrélations combinée à la régression multiple.

2.2 Régionalisation des étiages par la méthode des L-moments

Les L-moments sont obtenus historiquement à partir des modifications aux moments pondérés de probabilité de Greenwood et al. (1979). Ils sont analogues aux moments ordinaires (donnant une mesure de position, de dispersion, d'asymétrie, d'aplatissement, et d'autres aspects de la forme des distributions de probabilité). Les L-moments sont calculés à partir des combinaisons linéaires des statistiques d'ordre des données (c'est la raison du préfixe L).

Les L-moments présentent les avantages suivants par rapport aux moments ordinaires (Hosking, 1990) :

1. Les propriétés d'existence et d'unicité. Si la moyenne de la distribution est finie alors tous les L-moments existent et sont uniques à la distribution en question.
2. Pour que l'erreur des L-moments soit finie, il suffit seulement que la variance de la distribution soit finie.
3. Bien que les rapports de moments puissent être arbitrairement grands, les rapports des moments de l'échantillon ont des limites algébriques (Dalen, 1987), alors que les rapports entre les L-moments de l'échantillon peuvent prendre toutes les valeurs que peuvent prendre les rapports de L-moments de la population.

Les L-moments peuvent être estimés à partir d'un échantillon. L'estimation est basée sur les moments pondérés d'un échantillon de taille n dont les données sont classées en ordre croissant $x_{1:n} \leq x_{2:n} \leq \dots \leq x_{n:n}$. Un estimateur non-biaisé des moments pondérés est donné par (Landwehr et al., 1979) :

$$b_r = n^{-1} \binom{n-1}{r}^{-1} \sum_{j=r+1}^n \binom{j-1}{r} x_{j:n} = n^{-1} \sum_{j=r+1}^n \frac{(j-1)(j-2)\cdots(j-r)}{(n-1)(n-2)\cdots(n-r)} x_{j:n} \quad (1)$$

Ainsi, les quatre premiers estimateurs des moments pondérés de l'échantillon sont :

$$b_0 = n^{-1} \sum_{j=1}^n x_{j:n} \quad (2)$$

$$b_1 = n^{-1} \sum_{j=2}^n \frac{(j-1)}{(n-1)} x_{j:n} \quad (3)$$

$$b_2 = n^{-1} \sum_{j=3}^n \frac{(j-1)(j-2)}{(n-1)(n-2)} x_{j:n} \quad (4)$$

$$b_3 = n^{-1} \sum_{j=4}^n \frac{(j-1)(j-2)(j-3)}{(n-1)(n-2)(n-3)} x_{j:n} \quad (5)$$

Les L-moments de l'échantillon sont définis comme suit:

$$\ell_{r+1} = \sum_{k=0}^r p_{r,k}^* b_k \quad (6)$$

$$\text{où } p_{r,k}^* = (-1)^{r-k} \binom{r}{k} \binom{r+k}{k} = \frac{(-1)^{r-k} (r+k)!}{(k!)^2 (r-k)!}$$

Ainsi, les estimateurs des quatre premiers L-moments de l'échantillon sont donnés par :

$$\ell_1 = b_0 \quad (7)$$

$$\ell_2 = 2b_1 - b_0 \quad (8)$$

$$\ell_3 = 6b_2 - 6b_1 + b_0 \quad (9)$$

$$\ell_4 = 20b_3 - 30b_2 + 12b_1 - b_0 \quad (10)$$

De façon analogue aux moments ordinaires, on définit les rapports entre L-moments, pour mesurer la forme de la distribution de manière indépendante à son échelle de mesure, de la façon suivante :

$$\tau_r = \begin{cases} \ell_2 / \ell_1, & \text{Si } r = 2 \\ \ell_r / \ell_2, & \text{Si } r = 3, 4, \dots \end{cases} \quad (11)$$

Le premier L-moment, ℓ_1 , est simplement la valeur moyenne de la série. Le deuxième L-moment, ℓ_2 , est une mesure de la dispersion des données par rapport à la moyenne. Les rapports, τ_r , entre les L-moments sont dénotés de la façon suivante :

$$L-CV = \tau_2 = \ell_2 / \ell_1, \text{ le coefficient de L-variation,}$$

$$L-CS = \tau_3 = \ell_3 / \ell_2, \text{ le coefficient de L-asymétrie, et}$$

$$L-CK = \tau_4 = \ell_4 / \ell_2, \text{ le coefficient de L-aplatissement.}$$

Relativement à l'analyse fréquentielle régionale, la procédure des L-moments consiste en quatre étapes :

1. inspection des données ;
2. identification des régions homogènes ;
3. choix de la fonction de distribution ;
4. estimation des paramètres de la fonction de distribution.

2.2.1 Inspection des données

Avant d'appliquer la technique d'analyse fréquentielle, il faut tout d'abord s'assurer que les mesures de débits disponibles pour un site soient homogènes. C'est-à-dire que l'hypothèse que

toutes les données sont indépendantes et proviennent de la même distribution statistique doit être satisfaite. L'inspection des données (i.e. à l'aide de tests statistiques) est donc utilisée pour vérifier l'hypothèse d'homogénéité des données.

Avec les L-moments, cette hypothèse est vérifiée à l'aide d'un test statistique proposé par Hosking et Wallis (1993). Dans ce test, on mesure la discordance entre les séries de débits des différents sites. Cette procédure est connue sous le nom de *test de discordance*.

De façon générale, le test de discordance fait une comparaison entre les rapports des L-moments de l'échantillon pour détecter les séries de débits dont les caractéristiques statistiques sont différentes par rapport aux autres séries d'un même groupe.

Géométriquement, le test correspond à la représentation dans l'espace en trois dimensions des rapports de L-moments, dont les coordonnées sont les coefficients de L-variation (*L-CV*), de L-asymétrie (*L-CS*) et de L-aplatissement (*L-CK*). L'identification des sites discordants est faite en identifiant les sites les plus éloignés du groupe. Le centre du nuage de points est la moyenne de chacun des coefficients.

Analytiquement, on forme avec les N sites du groupe la matrice de coefficients $\boldsymbol{\mu}_i = [\tau_2^i \quad \tau_3^i \quad \tau_4^i]^T$, où τ_2 , τ_3 et τ_4 sont les valeurs des coefficients au site i , et T indique la fonction de transposition. La matrice moyenne :

$$\bar{\boldsymbol{\mu}} = N^{-1} \sum_{i=1}^N \boldsymbol{\mu}_i \quad (12)$$

et la matrice de covariance :

$$\mathbf{S} = (N-1)^{-1} \sum_{i=1}^N (\boldsymbol{\mu}_i - \bar{\boldsymbol{\mu}})(\boldsymbol{\mu}_i - \bar{\boldsymbol{\mu}})^T \quad (13)$$

permettent de définir la mesure de discordance pour le site i comme étant :

$$\mathbf{D}_i = \frac{N}{3(N-1)} (\boldsymbol{\mu}_i - \bar{\boldsymbol{\mu}})^T \mathbf{S}^{-1} (\boldsymbol{\mu}_i - \bar{\boldsymbol{\mu}}) \quad (14)$$

Ainsi, le site i est discordant pour des valeurs de \mathbf{D}_i plus grandes qu'une certaine valeur critique. Hoskings et Wallis (1993) proposent des valeurs critiques en fonction du nombre de sites dans une même région; cette valeur critique augmente jusqu'à 3.0 lorsque $N \geq 15$.

2.2.2 Identification des régions homogènes

Le test proposé par Hosking et Wallis (1993) pour mesurer le degré d'hétérogénéité d'un groupe de stations est basé sur la similarité des L-coefficients. Ce test assume que tous les sites appartenant à une région homogène ont les mêmes rapports de L-moments. Dans le test, on utilise la distribution kappa à quatre paramètres. Cette distribution comprend comme cas particuliers les distributions de Pareto généralisée (PG), de valeurs extrêmes généralisées (GEV) et la logistique généralisée (GLO).

Pour vérifier si une région est homogène, on considère une région composée de N sites, où n_i représente le nombre d'années d'observations pour le site i . Les moyennes régionales normalisées τ_2^R , τ_3^R et τ_4^R sont évaluées selon la formule suivante :

$$\tau_r^R = \frac{\sum_{i=1}^N n_i \tau_r^i}{\sum_{i=1}^N n_i} \quad (15)$$

Pour l'ordre 1, on définit $\tau_1^R = 1$. L'écart-type du coefficient de L-variation est donné par :

$$V = \left(\frac{\sum_{i=1}^N n_i (\tau_2^i - \tau_2^R)^2}{\sum_{i=1}^N n_i} \right)^{1/2} \quad (16)$$

Ensuite, on fait l'ajustement de la fonction kappa($1, \tau_2^R, \tau_3^R, \tau_4^R$) avec les rapports des L-moments régionaux moyens. On fait la simulation des N sites de la région homogène en ajustant cette distribution kappa. Pour chaque simulation, on calcule V , pour ensuite calculer la moyenne des

valeurs de V sur l'ensemble des simulations, μ_v , de même que l'écart-type, σ_v . La mesure d'hétérogénéité se calcule alors à l'aide de la formule suivante :

$$H = \frac{V - \mu_v}{\sigma_v} \quad (17)$$

Hosking et Wallis (1997), proposent que pour $H < 1$, la région est homogène. Si $1 \leq H < 2$, la région est potentiellement hétérogène. Si $H \geq 2$, la région est hétérogène.

2.2.3 Choix de la fonction de distribution

L'analyse régionale a pour but d'ajuster une distribution statistique aux données provenant de toute la région homogène. Or, la distribution choisie doit permettre de faire l'estimation des quantiles des valeurs futures tels que les quantiles d'événements extrêmes. Lorsque plusieurs distributions s'ajustent bien aux données, le meilleur choix est la distribution la plus robuste, c'est-à-dire celle qui permet d'obtenir une bonne estimation des quantiles d'événements extrêmes même si les données proviennent en fait d'une distribution différente de celle retenue.

La qualité des ajustements est évaluée avec le test Z de Hosking et Wallis (1997). Dans ce test, on considère une région composée de N sites, où n_i représente le nombre d'années d'observations pour le site i . Les moyennes régionales normalisées τ_2^R , τ_3^R et τ_4^R sont évaluées. Un ensemble de distributions à trois paramètres est choisi et ajusté en fonction des paramètres régionaux $(1, \tau_2^R, \tau_3^R)$. Le rapport τ_4 est calculé pour chaque distribution, τ_4^{DIST} . La qualité de l'ajustement est alors mesurée par la statistique suivante :

$$Z^{DIST} = \frac{(\tau_4^{DIST} - \tau_4^R + B_4)}{\sigma_4} \quad (18)$$

où B_4 est le biais de τ_4^R et σ_4 son écart-type. Ces derniers paramètres sont déterminés par la simulation d'une loi kappa($1, \tau_2^R, \tau_3^R, \tau_4^R$).

2.2.4 Estimation des paramètres de la distribution de fréquences

La distribution statistique est ajustée par la méthode des L-moments. Les paramètres de la distribution statistique sont estimés en égalisant les L-moments de la distribution de la population avec les L-moments de l'échantillon. Lorsqu'on utilise la technique des L-moments, on suppose que toutes les stations forment une région homogène, de même que les données sont indépendantes et identiquement distribuées. Ainsi, les rapports entre les L-moments calculés pour les données des différents sites peuvent être combinés pour obtenir les rapports de L-moments moyens.

2.3 Méthodes de détermination des régions homogènes

Le but principal de la détermination des régions homogènes est de regrouper les sites ayant un comportement hydrologique semblable. Cette homogénéité doit être présente dans les caractéristiques physiographiques, hydrologiques et météorologiques du bassin versant où se trouve le site. Étape préliminaire à l'estimation régionale, la détermination des régions homogènes est donc très importante, puisqu'elle aura d'énormes répercussions sur les phases subséquentes de la régionalisation. Des méthodes de détermination des régions homogènes seront comparées dans le but de déterminer la meilleure méthode à appliquer dans le cas de l'estimation des débits d'étiages au Québec. La description de ces méthodes fait donc l'objet du présent chapitre. Tout d'abord, la classification ascendante hiérarchique sera présentée, puis suivra l'analyse canonique des corrélations.

2.3.1 Classification ascendante hiérarchique

La classification ascendante hiérarchique (CAH) est utilisée pour constituer des groupes d'individus similaires (classes) sur la base de leur description par un ensemble de variables quantitatives.

La CAH consiste à agréger progressivement les individus selon leur ressemblance, mesurée à l'aide d'un indice de similarité ou de dissimilarité. L'algorithme commence par rassembler les couples d'individus les plus ressemblants, puis à agréger progressivement les autres individus ou groupes d'individus en fonction de leur ressemblance, jusqu'à ce que la totalité des individus ne

forme plus qu'un seul groupe. La CAH produit un dendrogramme (arbre binaire de classification), dont la racine correspond à la classe regroupant l'ensemble des individus. Ce dendrogramme représente une hiérarchie de partitions, l'axe vertical donnant l'échelle pour mesurer la distance ou dissimilarité entre deux individus regroupés. Une partition est obtenue par la coupure du dendrogramme à un certain niveau de ressemblance. La partition comporte alors de moins en moins de classes à mesure que la coupe s'effectue vers le haut (i.e. vers la racine) du dendrogramme, puis inversement en tronquant vers le bas. À la limite, une coupure effectuée en dessous du premier nœud de l'arbre conduit à ce que chaque classe ne contienne qu'un seul individu et une coupure effectuée à la limite de l'axe vertical du dendrogramme conduit à une seule classe contenant tous les individus.

Il existe de nombreuses mesures de ressemblances (similarités ou dissimilarités), et plusieurs méthodes pour recalculer la ressemblance lorsque l'algorithme forme des groupes (critères d'agrégation). Cette comparaison des éléments à classifier peut se ramener à une distance. Les mesures de distances sont décrites par une métrique, $d(x,y)$, qui doit posséder les propriétés suivantes :

$$\begin{cases} d(x, y) \geq 0; d(x, x) = 0 \\ d(x, y) = d(y, x) \\ d(x, y) \leq d(x, z) + d(z, y) \\ x, y, z \in \mathfrak{R}^n \end{cases} \quad (19)$$

On appelle groupe un ensemble d'une ou plusieurs observations rassemblées par la méthode de classification. L'algorithme de base est le suivant :

- i. a-t-on plus d'un groupe? Sinon, la procédure s'arrête à cette étape.
- ii. calculer les "ressemblances" entre toutes les paires de groupes.
- iii. fusionner les deux groupes montrant la plus grande ressemblance (similarité) ou la plus faible dissemblance (dissimilarité).

La méthode de classification hiérarchique comprend quelques variantes selon le choix du critère de ressemblance et la façon de mesurer les ressemblances entre un nouveau groupe fusionné et

les autres inchangés. Les formules les plus couramment employées pour les distances sont : l'eulidienne, la χ^2 , de Manhattan, de Mahalanobis, de Bhattacharya, de Chebychev, de Canberra, de la corde, le carré de la distance de la corde et la géodésique.

2.3.2 Analyse canonique des corrélations

L'analyse canonique des corrélations est une méthode d'analyse statistique multivariée qui permet de décrire la relation de dépendance existant entre deux ensembles de variables aléatoires. Une description générale de cette méthode peut être trouvée dans Muirhead (1982) ou Ouarda et al. (2001). Cette approche consiste en la détermination de paires de combinaisons linéaires de chaque ensemble de variables. Ces combinaisons sont appelées *variables canoniques* et présentent la caractéristique que la corrélation entre chaque paire de variables canoniques est maximisée tandis que la corrélation entre les variables canoniques provenant de paires différentes est nulle.

Cette procédure permet d'obtenir un ensemble de variables canoniques pour les deux ensembles de variables aléatoires, lesquelles sont associées à différents coefficients de corrélation canonique. Ainsi, on a une transformation de l'espace physique dans l'espace canonique des variables et cela permet d'inférer sur les variables canoniques d'un ensemble connaissant les variables canoniques de l'autre ensemble. De même, on peut calculer une distance entre deux variables canoniques pour déterminer les voisinages hydrologiques. Par exemple, avec la distance de Mahalanobis (1936), le voisinage d'un site est déterminé en identifiant les stations les plus rapprochées du site cible dans l'espace canonique des variables.

La méthode d'analyse canonique des corrélations se déroule de la façon suivante. On considère p variables hydrologiques $Y' = (Y_1, \dots, Y_p)$ et q variables caractérisant la physiographie et la météorologie $X' = (X_1, \dots, X_q)$, respectivement, des bassins versants. Une fois que les vecteurs dans l'espace physique sont identifiés, on génère les vecteurs W pour les variables canoniques hydrologiques et V pour les variables physiographiques et météorologiques. Ces vecteurs sont donnés par les combinaisons linéaires suivantes :

$$\begin{aligned} W &= \alpha_1 X_1 + \dots + \alpha_p X_p = \alpha X \\ V &= \beta_1 Y_1 + \dots + \beta_p Y_p = \beta Y \end{aligned} \quad (20)$$

où α et β sont choisis de telle sorte que :

$$\begin{cases} \text{maximiser } \text{Corr}(W_i, V_i) = \lambda_i, & i = 1, \dots, p \\ \text{Corr}(W_i, V_j) = 0, & i \neq j \\ \text{Var}(W_i) = \text{Var}(V_i), & i = 1, \dots, p \end{cases}$$

Ainsi, on obtient la matrice diagonale Λ formée des coefficients de corrélation canoniques $(\lambda_1, \dots, \lambda_p)$. On suppose que les vecteurs de variables canoniques W et V suivent une distribution multi-normale, ce qui fait en sorte que la distribution conditionnelle de W étant donné V est p -normale. De cette façon, des bassins avec un vecteur canonique physiographique commun V sont répartis autour de la position moyenne AV dans l'espace canonique hydrologique. La distance à cette position moyenne est représentée par une distance de Mahalanobis dont la distribution statistique est donnée par une khi-deux à p degrés de liberté (Muirhead, 1982).

Ainsi, le voisinage d'un bassin jaugé à un niveau de confiance $(1 - \alpha)$ est défini comme l'ensemble des bassins dont la position W dans l'espace canonique hydrologique vérifie la relation :

$$(W - W_0)'(I_p - \Lambda\Lambda')^{-1}(W - W_0) \leq \chi_{\alpha, p}^2 \quad (21)$$

où I_p est la matrice identité d'ordre p et W_0 est le vecteur canonique hydrologique observé (puisque le bassin est jaugé). Pour un bassin non jaugé, la position moyenne dans l'espace hydrologique est déterminée en utilisant une estimation de AV , i.e. AV_0 , où V_0 est le vecteur canonique physiographique – météorologique observé. Donc, dans le cas d'un bassin non-jaugé, le voisinage à un niveau de confiance $(1 - \alpha)$ est défini par l'ensemble des bassins dont la position W dans l'espace canonique hydrologique vérifie la relation suivante:

$$(W - \Lambda V_0)'(I_p - \Lambda\Lambda')^{-1}(W - \Lambda V_0) \leq \chi_{\alpha, p}^2 \quad (22)$$

Le paramètre α contrôle la taille du voisinage et doit être choisi de façon à maximiser la probabilité d'inclure des sites similaires au site cible dans le voisinage tout en minimisant à la fois la probabilité d'inclure des sites dissimilaires au site cible dans le voisinage.

Or, le choix d'un paramètre α optimal constitue le principal problème relié à l'application de cette méthode. En effet, il n'existe pas de cadre mathématique à l'intérieur de la méthodologie d'analyse canonique des corrélations permettant de guider l'utilisateur dans le choix d'une valeur adéquate pour le paramètre α . Des méthodes de ré-échantillonnage telles le « jackknife » et le « bootstrap » ont déjà été utilisées (Ouarda et al., 1998) afin d'identifier des valeurs optimales dans le sens où elles minimisent certains critères d'erreur. Toutefois, ces procédures numériques ne sont que partiellement satisfaisantes puisqu'elles peuvent prendre beaucoup de temps à exécuter en plus de ne pas cadrer particulièrement bien dans le développement théorique de la méthode d'analyse canonique.

Par ailleurs, une définition révisée d'un voisinage hydrologique homogène a été décrite par Girard et al. (2000) afin de contourner ce problème. Effectivement, cette méthode permet la détermination du voisinage en se basant sur une règle dérivée de la théorie de la classification, c'est-à-dire en reformulant le problème de détermination du voisinage comme en étant un d'assignation d'une observation W (score canonique) à la population multi-normale appropriée. En somme, la nouvelle approche permet de tenir compte de toute l'information disponible lors de la détermination des régions homogènes tout en palliant à la difficulté associée à l'assignation d'un α optimal.

C'est cette approche qui sera utilisée dans ce projet. Elle peut se résumer sous la forme mathématique suivante, où l'on assignera une observation W au voisinage du site cible (dont la position dans l'espace physiographique est donnée par V_0) si et seulement si (Girard et al., 2000) :

$$(W - \Lambda V_0)'(I_p - \Lambda \Lambda')^{-1}(W - \Lambda V_0) \leq (W - 0)'I_p^{-1}(W - 0) + \ln \left(\frac{|I_p|}{|I_p - \Lambda \Lambda'|} \right) \quad (23)$$

2.4 Méthodes d'estimation régionale

2.4.1 Méthode de régression multiple

L'analyse de régression régionale utilise les données de débits d'un certain nombre de bassins versants et suppose que la réponse hydrologique de ces différents bassins est régie par la même fonction de distribution statistique (Hosking et Wallis, 1993). Cette technique a été utilisée au Canada et aux États-unis (voir Tableau 2.1). L'objectif de ces études est le développement des modèles de prédiction des débits d'étiage. Dans le Tableau 2.1, on trouve les quantiles étudiées par les modèles ainsi que certains indicateurs de la qualité des ajustements, comme le coefficient de détermination, R^2 , et l'écart-type, σ . Ces indicateurs nous montrent la performance des modèles, laquelle varie selon l'aire de la région d'étude. Ainsi, il y a une meilleure corrélation quand les grandes aires d'étude sont divisées en domaines plus petits que lorsque le modèle est appliqué sur toute la région (Rifai, 2000).

Tableau 2-1 : Études de régression régionale qui utilisent les paramètres du bassin versant pour estimer les indicateurs d'étiage

Référence	Année	Localisation	Indicateur	Prédicteurs	R^2 (%)	σ	No. b.v.
Rifai et al.	2000	Texas	$Q_{2,7}$, $Q_{10,7}$	D, T, C	32	N/D	63
Dingman et Lawlor	1995	NH et Vermont	$Q_{10,7}$	D, G, C	93	0.25	47
Vogel et Kroll	1992	Massachusetts	$Q_{2,7}$, $Q_{10,7}$	D, T, G	93-97	0.27-0.44	23
Vogel et Kroll	1990	Massachusetts	$Q_{2,7}$	D, T	96	0.34	23
Chang et Boyer	1977	Virginie de l'Ouest	$Q_{10,7}$	D, C	99	30	12

N/D : Non disponible

R^2 : Coefficient de détermination

σ : Écart-type

D : Paramètres de dimension

T : Paramètres topographiques

G : Paramètres géologiques

L : Paramètres de la forme du sol

C : Paramètres climatiques

Vogel et Kroll (1990) ont effectué la régionalisation hydrologique en utilisant la régression des moindres carrés. Ils ont développé des équations de régression régionale généralisées pour estimer les étiages de durée d jours et de période de retour T années. Chang et Boyer (1977) ont

réalisé l'estimation d'étiages 7-jours de période de retour 10 ans pour l'ouest de la Virginie à partir des paramètres climatiques (la température et les précipitations) et de ceux des bassins versants (périmètre du bassin, variabilité spatiale, longueur du cours d'eau principal, latitude et altitude).

Comme modèle de régression, ils ont proposé la fonction suivante (Vogel et Kroll, 1990, 1992; Thomas et Benson, 1970; et Wright, 1970) :

$$Q_{T,d} = a\varepsilon \prod X_i^{b_i} \quad (24)$$

où $Q_{T,d}$ est le quantile de débit d'étiage sur d jours consécutifs et de période de retour T années obtenu à partir des sites jaugés, X_i est une caractéristique de drainage mesurable du bassin versant, les b_i sont les coefficients du modèle et ε peut être vu comme étant une erreur multiplicative. Cette erreur peut aussi être supposée additive, et la fonction devient donc :

$$Q_{T,d} = a \prod X_i^{b_i} + \varepsilon \quad (25)$$

Les modèles de régression constituent la méthode d'estimation régionale la plus utilisée autant pour les étiages que pour les crues (Vogel et Kroll, 1992). Dans le cas où l'erreur est multiplicative, la fonction peut être linéarisée à l'aide d'une transformation logarithmique :

$$\ln Q_{T,d} = \ln a + \sum b_i \ln X_i + \varepsilon \quad (26)$$

Cette transformation permet d'obtenir une relation approximativement linéaire entre l'écoulement et les caractéristiques du bassin versant (Thomas et Benson, 1970). Cependant, un inconvénient de la transformation logarithmique est que les observations les plus petites obtiennent un grand poids. L'estimation des paramètres est alors biaisée dans l'espace des débits, même si dans l'espace log-débit elle ne l'est pas (McCuen et al., 1990).

Fetter (1994) montre que les résultats obtenus avec la régression régionale ont une plus grande précision lorsque la région est divisée en deux sous-régions ou plus et lorsque différents modèles de régression sont développés pour chaque sous-région.

Les caractéristiques des bassins versants (physiographiques, climatiques, etc.) sont utilisées comme prédicteurs dans les équations de régression pour estimer les caractéristiques statistiques des étiages (e.g. la moyenne, la médiane, les quantiles, etc.). Bien que le choix des variables physiographiques et météorologiques peut parfois sembler évident, on trouve certaines contradictions dans la littérature à ce propos. Par exemple, Zecharieas et Brutsaert (1988) affirment qu'un bassin versant situé dans une petite section d'une région physiographique aura, en général, des caractéristiques géomorphologiques similaires. Alors que Farvolden (1963) affirme que dans une telle région les différences hydrologiques sont dues aux différences géomorphologiques (géologiques, topographiques, utilisation du sol et végétation). Vogel et Kroll (1992) indiquent que les débits d'étiage sont influencés par l'hydrogéologie des bassins versants. Zecharias et Brutsaert (1988) affirment qu'il est nécessaire d'introduire des simplifications pour réduire le nombre de paramètres prédictifs et ainsi obtenir des conclusions physiquement significatives, pour ensuite établir des relations applicables en pratique. Gregory et Walling (1973) mentionnent que le champ des observations et les considérations théoriques révèlent que ce ne sont pas tous les paramètres morphologiques qui sont reliés au processus hydrologique d'un bassin, et que même pour les paramètres qui le sont, ils le sont parfois à un niveau différent d'importance en termes du contrôle qu'ils exercent sur le processus. Ainsi, Zecharias et Brutsaert (1988) concluent que pour décrire les caractéristiques physiques d'un bassin, seulement quelques paramètres sont utiles. Ainsi, il est préférable d'utiliser des variables qui peuvent être facilement obtenues et ayant une erreur minimale d'estimation.

Parmi les paramètres les plus utilisés dans les études, on retrouve les catégories suivantes :

- **Paramètres géométriques:** La géométrie des bassins est définie par des paramètres comme l'aire (A) de drainage, la longueur du cours d'eau principal (L), la pente et le coefficient de forme (L^2/A). Rifai et al. (2000), utilisent la longueur du cours d'eau principal, la pente et le coefficient de forme. Chang et Boyer (1977) utilisent aussi le périmètre du bassin versant.
- **Paramètres topographiques:** Parmi les paramètres topographiques utilisés comme indicateurs d'étiages, on trouve le relief du bassin (Vogel et Kroll, 1990 et 1992), défini comme la différence entre l'élévation du sommet du bassin et celle de la station de

mesure. On retrouve aussi la pente du canal principal (Rifai, 2000) et la pente moyenne du bassin (Vogel et Kroll, 1990 et 1992).

- **Paramètres géologiques:** Les paramètres géologiques influencent les étiages, car les propriétés du sol sont déterminées par la composition des couches de sol (tourbe, roche, sable, gravier, argile, etc.). Dingman et Lawlor (1995) utilisent comme paramètre la fraction du bassin couverte par des dépôts de sable et de gravier, tandis que Vogel et Kroll (1992) utilisent la constante de récession du débit de base, paramètre pouvant remplacer la porosité efficace du sol et la conductivité hydraulique du bassin.
- **Paramètres de couverture du sol:** La couverture du sol est une variable complexe qui affecte les taux d'interception, d'évaporation et de transpiration de l'eau. Celle-ci affecte le stockage d'eau d'un bassin.
- **Paramètres climatiques:** Parmi les variables climatiques, les plus utilisées sont la précipitation moyenne annuelle (Chang et Boyer, 1977) et le ruissellement annuel moyen. En plus de ces variables, on utilise aussi des indicateurs comme la température maximum atteinte sur une période de sept jours consécutifs avec une période de retour de 10 ans (Chang et Boyer, 1977). La précipitation de 24 heures-2 ans de chaque bassin (Rifai et al., 2000) fait aussi partie des indicateurs météorologiques utilisés.

Les paramètres des modèles de régression régionale sont normalement estimés par l'utilisation de moindres carrés ordinaires (MCO; Thomas et Benson, 1970). Cette estimation est faite en supposant que l'erreur résiduelle associée aux observations individuelles doit être indépendante et homoscedastiquement (variance constante) distribuée. Cependant, puisque la longueur des séries de données hydrologiques varie, cela fait en sorte que l'on obtient un modèle hétéroscédastique.

Tasker (1980) utilise la méthode des moindres carrés pondérés (MCP) pour l'estimation des paramètres des modèles de régression régionale dans le but de considérer l'hétérogénéité des variances. Stedinger et Tasker (1985) ainsi que Kroll et Stedinger (1998) développent la méthode des moindres carrés généralisés (MCG) pour considérer la multicollinéarité et l'hétéroscédasticité. Stedinger et Tasker (1985, 1986) comparent les différentes méthodes d'estimation des paramètres du modèle (c'est-à-dire MCO, MCP et MCG). Ils concluent que les

MCG donnent la meilleure estimation des paramètres des modèles statistiques hydrologiques en fonction des caractéristiques de drainage des bassins versants.

2.4.2 Méthode de l'indice d'étiage

Cette méthode, initialement proposée par Dalrymple (1960) pour l'estimation régionale des crues, repose sur l'hypothèse de base que les données aux différents sites d'une région homogène sont indépendantes et suivent la même distribution statistique à un facteur d'échelle près. Conséquemment, on suppose alors que certaines caractéristiques statistiques (tel que le coefficient de variation ou le coefficient d'asymétrie) sont constantes à l'intérieur d'une même région. La méthode de l'indice d'étiage est composée des étapes suivantes :

1. **Standardisation des données:** À chaque site i . et pour chaque année t , les données d'étiages Q'_i sont standardisées en les divisant par un indicateur de tendance centrale (l'indice d'étiage). La moyenne \overline{Q}_i est habituellement utilisée comme indice d'étiage, quoique d'autres indicateurs tels que la médiane peuvent être utilisés.

$$X'_i = Q'_i / \overline{Q}_i \quad (27)$$

2. **Calage des paramètres de la distribution régionale:** La distribution "moyenne" standardisée de la région, $F_r(x)$, est alors déterminée en regroupant les données standardisées des différents sites, puis le quantile adimensionnel $X_r(T)$ de la distribution de X_r est estimé par :

$$\hat{X}(T) = F_r^{-1}(1 - 1/T; \hat{\theta}) \quad (28)$$

où T est la période de retour, et $\hat{\theta}$ est le vecteur des paramètres estimés pour la distribution choisie.

3. **Estimation des quantiles de la distribution régionale en un point non jaugé:** La moyenne \overline{Q}_S au site cible S est estimée par régression sur les caractéristiques physiographiques/météorologiques des bassins (e.g. l'aire de drainage), et le quantile

désiré $Q_s(T)$ au site cible est obtenu en multipliant la moyenne estimée avec le quantile standardisé correspondant :

$$Q_s(T) = X(T) \cdot \overline{Q_s} \quad (29)$$

Habituellement, on constate que c'est la superficie du bassin versant qui est le facteur le plus important pour expliquer la relation d'échelle entre les données des différents sites. Cette méthode a toutefois été abandonnée pendant un certain nombre d'années, principalement en raison du fait qu'il a été démontré que l'aire de drainage influe non seulement sur l'ordre de grandeur des débits mais aussi sur d'autres caractéristiques de la distribution, comme le coefficient de variation et le coefficient d'asymétrie, qui selon l'hypothèse de départ sont considérées comme constantes. La méthode a néanmoins connu un regain de popularité au cours des dernières années et est maintenant réputée pour être l'une des méthodes d'estimation régionale les plus efficace. Il a été démontré d'ailleurs que la méthode donne des résultats très comparables à ceux obtenus à l'aide de la technique de régression multiple (GREHYS, 1996). En conséquence, il a été convenu qu'elle ne sera pas appliquée au chapitre suivant comparant les diverses approches de régionalisation, c'est-à-dire que l'on s'en tiendra à la régression multiple (puisque l'on considère les deux méthodes à toutes fins pratiques comme équivalentes).

2.5 Conception de l'outil géomatique

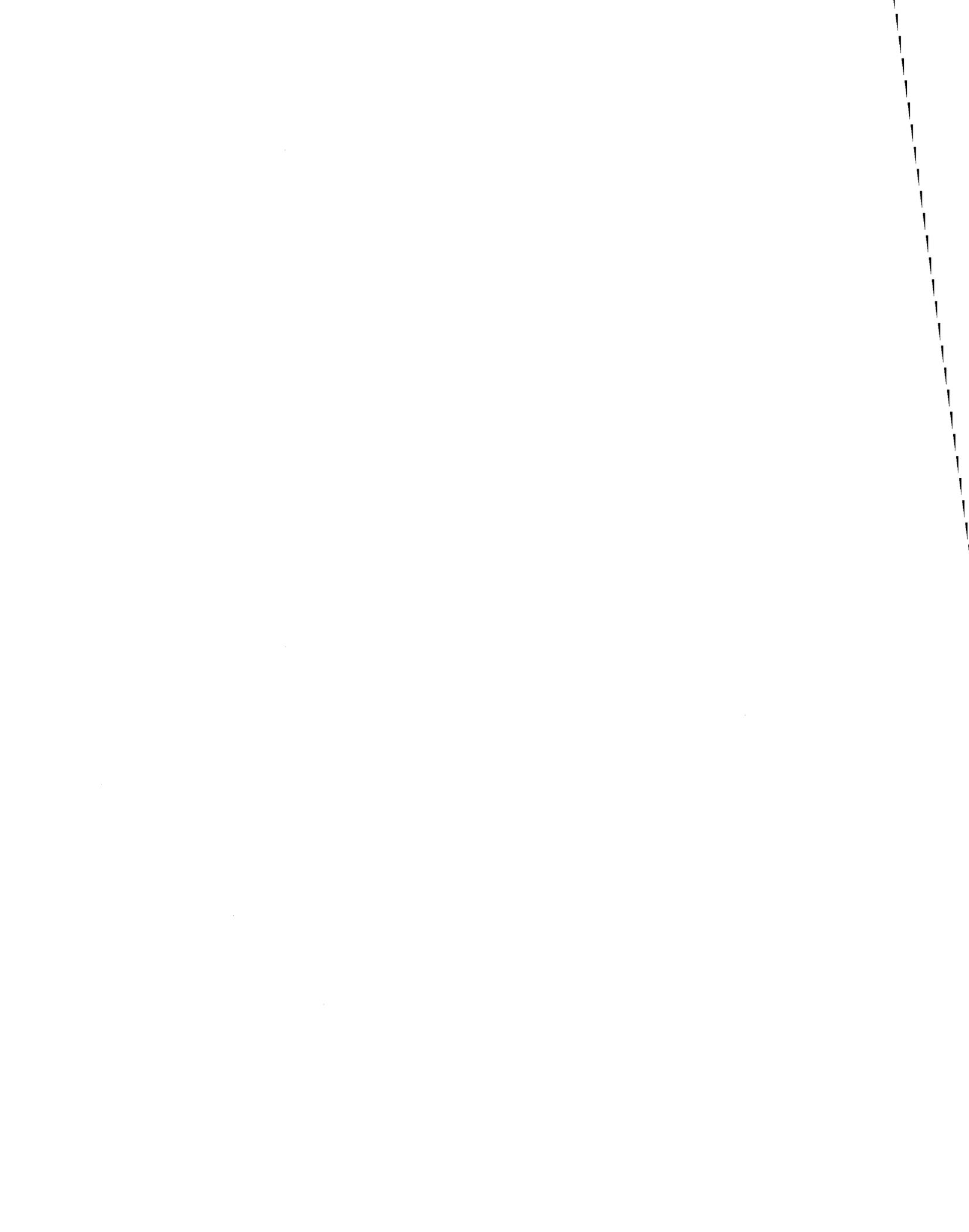
L'estimation régionale devient intéressante lorsqu'on veut obtenir des valeurs hydrologiques pour des sites non-jaugés. Ainsi, lorsqu'il y a absence d'information hydrologique pour un site cible non-jaugé, il faut procéder à une assignation régionale pour que ce dernier puisse être pris en compte et qu'une estimation de l'écoulement soit obtenue.

Un outil qui intègre plusieurs fonctionnalités, permettant l'analyse régionale pour tout bassin non-jaugé sur le territoire d'étude, a donc sa raison d'être dans un projet de régionalisation. La démarche d'exécution d'un tel outil est la suivante :

1. identification des coordonnées géographiques du site cible en question et des limites du bassin versant (procédure automatisée ou manuelle) ;

2. extraction des variables météorologiques et physiographiques demandées pour la régionalisation ;
3. affectation du site cible à une région homogène et assignation du ou des paramètres utilisés dans les équations régionales ;
4. estimation régionale pour le site cible ;
5. sauvegarde des résultats.

Cette démarche implantée au sein du CEHQ sera expliquée plus en détail au chapitre 4 du présent rapport. En effet, pour mieux répondre aux besoins du MENV, une approche « géomatisée » par prototypage a été élaborée mettant en liaison les bases de données, les éléments cartographiques, le modèle statistique de régionalisation et la représentation graphique des résultats de l'estimation régionale.



3 APPLICATION AUX BASSINS DU QUÉBEC HABITÉ

La régionalisation des étiages appliquée aux bassins du Québec habité a été réalisée pour les étiages estivaux, hivernaux et annuels. Les quantiles d'étiages de période de retour 2, 5 et 10 ans et d'une durée de 7 ou 30 jours ont été étudiés. À l'aide d'une base de données de référence (dont la construction est décrite à la section 3.1), une méthodologie semblable a été développée pour les différentes périodes. Effectivement, seules les variables physiographiques et météorologiques utilisées pour décrire le phénomène hydrologique diffèrent d'une période à l'autre. La procédure ayant conduit aux choix de ces variables est présentée à la section 3.1.2, tandis que les résultats obtenus à l'aide des méthodologies retenues, soient l'ACC, la classification ascendante hiérarchique (CAH) ainsi que l'approche par les L-moments sont reportés aux sections 3.2, 3.3 et 3.4 respectivement.

3.1 Construction de la base de données

Le processus de régionalisation débute avec la construction d'une base de données de référence. Cette étape consiste tout d'abord en l'acquisition des variables physiographiques et météorologiques associées à une liste de stations hydrométriques parmi lesquelles on peut en retrouver quelques-unes qui sont problématiques. L'étape suivante consiste donc en l'élimination de ces stations dans le but d'obtenir une base de données fiable et représentative du phénomène observé sur le territoire étudié.

3.1.1 Choix des stations hydrométriques

La base de données pour l'étape de régionalisation de ce projet a été obtenue à partir des stations utilisées lors de l'analyse fréquentielle locale (Herrera et al., 2003). On a donc considéré 189 stations (voir Annexe 1). Parmi ces 189 stations, 28 stations ont été combinées puisqu'elles étaient localisées dans un environnement physiographique, hydrologique et météorologique semblable. Les stations utilisées devaient répondre aux critères suivants :

- 1) La localisation géographique, restreinte aux zones du Québec habitées (entre le 45° et le 55° parallèle, correspondant aux régions hydrologiques 01 à 09).
- 2) Les stations à retenir doivent être situées sur des cours d'eau où le régime hydrologique est le plus proche possible du régime naturel.
- 3) Pour assurer la fiabilité des études fréquentielles, le nombre d'années d'observations disponibles doit être supérieur à un seuil minimal, fixé à 10 années d'observation.

3.1.1.1 Tests statistiques

Lors de l'analyse fréquentielle locale, des tests d'indépendance (test de Wald-Wolfowitz) et de stationnarité (test de Kendall) ont été effectués pour vérifier si les stations disponibles respectaient les hypothèses à la base des analyses. Il a été convenu que les stations ne passant pas les tests d'indépendance et/ou de stationnarité ne seraient pas utilisées à l'étape de régionalisation des étiages pour ce projet, car ces stations sont associées à un risque plus élevé d'erreur d'estimation.

Les stations n'ayant pas passé les tests d'indépendance et/ou de stationnarité diffèrent selon la durée et la saison. Par exemple, comme on peut le voir au Tableau 3-1, la station 030316 ne sera pas utilisée lors de l'estimation de $Q_{T,30}$ pour la période hivernale, mais elle le sera pour $Q_{T,30}$ pour les périodes estivale et annuelle et pour les trois périodes (estivale, hivernale et annuelle) pour $Q_{T,7}$.

On retrouve 37 stations différentes n'ayant pas passé au moins un des deux tests et la liste de ces stations, selon la durée et la saison, est présentée au Tableau 3-1.

Des stations restantes, 23 stations ont dû être éliminées avant de procéder aux analyses. Les raisons des éliminations ainsi que les stations concernées sont reportées au Tableau 3-2. On remarque, entre autre, que pour les stations situées aux frontières des États-Unis ou du Nouveau-Brunswick, les données physiographiques et météorologiques étaient souvent manquantes, ce qui empêchait l'extraction des variables nécessaires à l'estimation des débits d'étiage.

Tableau 3-1 : Stations n’ayant pas passé les tests de stationnarité et/ou d’indépendance

Q _{T,30}			Q _{T,7}		
Estivale	Hivernale	Annuelle	Estivale	Hivernale	Annuelle
010801/010802	011001/011003	030215	010801/010802	011001/011003	011001/011003
020401/020404	021701/021702	030309	020401/020404	021701/021702	022003
021601	030309	041903	021601	030215	022701/022704
022701/022704	030316	052601	022701/022704	030309	030215
030215	061602	061602	030214/030234	061901	030242
030309	061901	061901	030215	072301	030309
040401/040406	076601	072301	030309	073502/073503	051006
050409	090605	072302	040212	074903	061901
051001	090606	076601	040401/040406	076601	072301
051002	052806	090606	050117/050135	090605	073502/073503
051003			051001	090606	074903
051005			051002		076601
061901			051003		090606
061906			051005		
072301			052202/052219		
			052203/052212		
			061020		
			061022		
			061901		
			061906		
			072301		

Tableau 3-2 : Stations éliminées

Raisons	Stations
Données manquantes (frontière États-Unis / Canada)	030286, 030401, 030402/030403
Données manquantes (frontière Québec / Nouveau Brunswick)	011601
Séries de débits avec moins de 10 ans de données	040115, 040402, 043008, 043202, 050118, 050402, 052201, 052801, 070201, 072502, 076201, 080703
Données physiographiques / météorologiques ou hydrologiques incomplètes	073802, 075701/075702, 075703, 075704, 076101, 074901
Effet de laminage	042607

Par ailleurs, suite à l'obtention des résultats préliminaires présentés dans le rapport remis au ministère de l'Environnement du Québec en juin 2004, plusieurs stations jaugées ont également été éliminées de la base de données de référence. Ces stations problématiques sont présentées au Tableau 3-3.

Tableau 3-3 : Stations problématiques éliminées

Station	Rivière	Situation géographique	Type d'anomalie
021701/021702	Blanche	À 3,5 km en amont du pont-route 132	Régime hydrologique particulier
022301	Trois-Pistoles	À 2,1 km en amont du pont-route 132	
023422	Famine	À 6,3 km en amont du pont-route 173 à Saint-Georges	
030242	Eaton	En aval du pont-route 210 à Sawyerville	
030304	Noire	À 7,6 km de la Yamaska	
030314	Yamaska Sud	Au pont-route 202 à Cowansville	
030339	Noire	À 4,1 km en amont du ruisseau Runnels	
030343	Yamaska Nord	À 0,1 km en aval du barrage du lac Waterloo	
030420	Aux Brochets	À 0,7 km en aval du ruisseau Groat	
030421	De l'Acadie	À 3,0 km en amont du pont de l'autoroute 10	
030907	Des Anglais	À 1,1 km en aval du pont-route à Riverfield	
042103	Maganasipi	À la sortie du lac Johnson	
052806	Décharge du lac Sacacomie	En amont du lac Rouge	
080104	Turgeon	À 14,3 km en amont de l'Harricana	Pourcentage de lac
081101	Pontax	À 60,4 km de l'embouchure	Pourcentage de lac

Il faut noter que les stations 081101 et 080104, situées dans la zone de développement hydroélectrique au Québec, n'avaient pas été utilisées pour la régionalisation des crues (Gignac et al., 2003), car il avait été noté qu'il y avait un problème avec la variable pourcentage de lac (données mesurées avant et après la construction de barrage). Il est donc logique de les retrouver parmi les stations problématiques pour la régionalisation des étiages.

En ce qui concerne les autres stations, plusieurs hypothèses peuvent être émises. On peut supposer qu'il existe des erreurs dans les données associées à ces stations. De plus, il est possible que malgré l'utilisation de variables caractérisant la température et le sol, un phénomène particulier se produisant dans cette région ne soit pas représenté par les variables utilisées. En effet, ces stations ont probablement un comportement hydrologique particulier, car on remarque, sur les figures suivantes, de faibles valeurs d'étiages pour ces stations. Il est à noter que les valeurs locales représentées dans ces figures sont tirées de Herrera et al. (2003), où la procédure d'analyse fréquentielle ayant mené au choix des distributions statistiques et à l'estimation des différents quantiles d'étiage (i.e selon la période de retour T et la durée d considérées, de même que selon la saison) y est décrite de façon exhaustive.

Figure 3-1 : $Q_{10,7}$ local pour la période estivale en fonction de la superficie du bassin versant (échelle logarithmique)

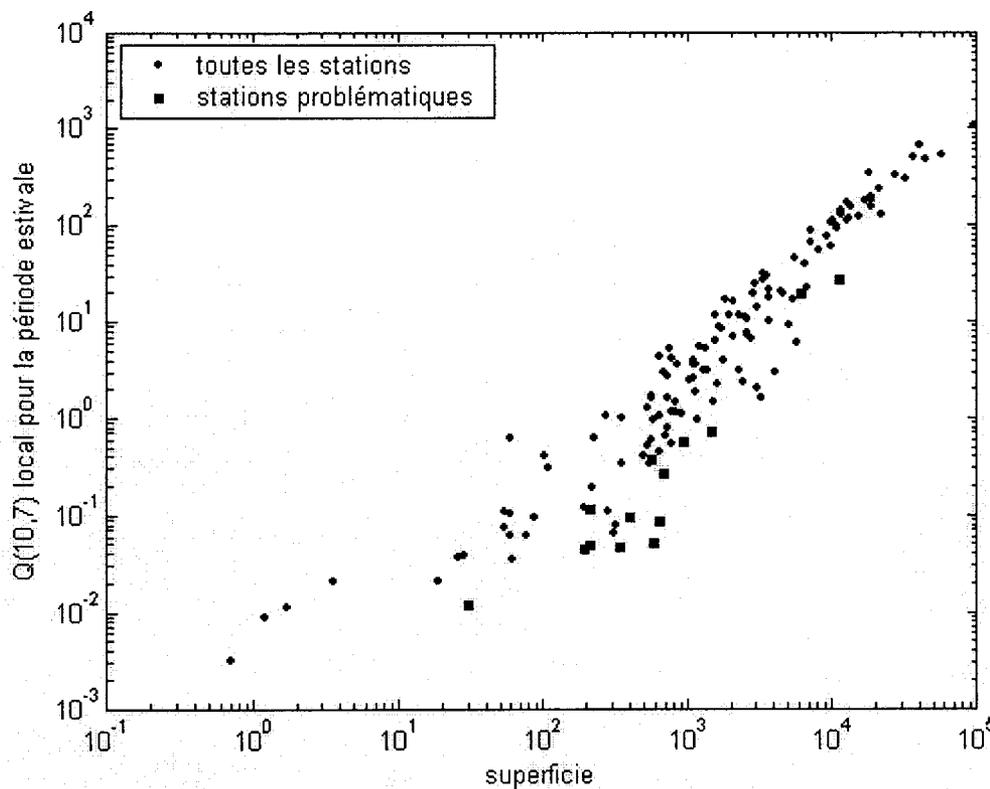


Figure 3-2 : $Q_{10,7}$ local pour la période annuelle en fonction de la superficie du bassin versant (échelle logarithmique)

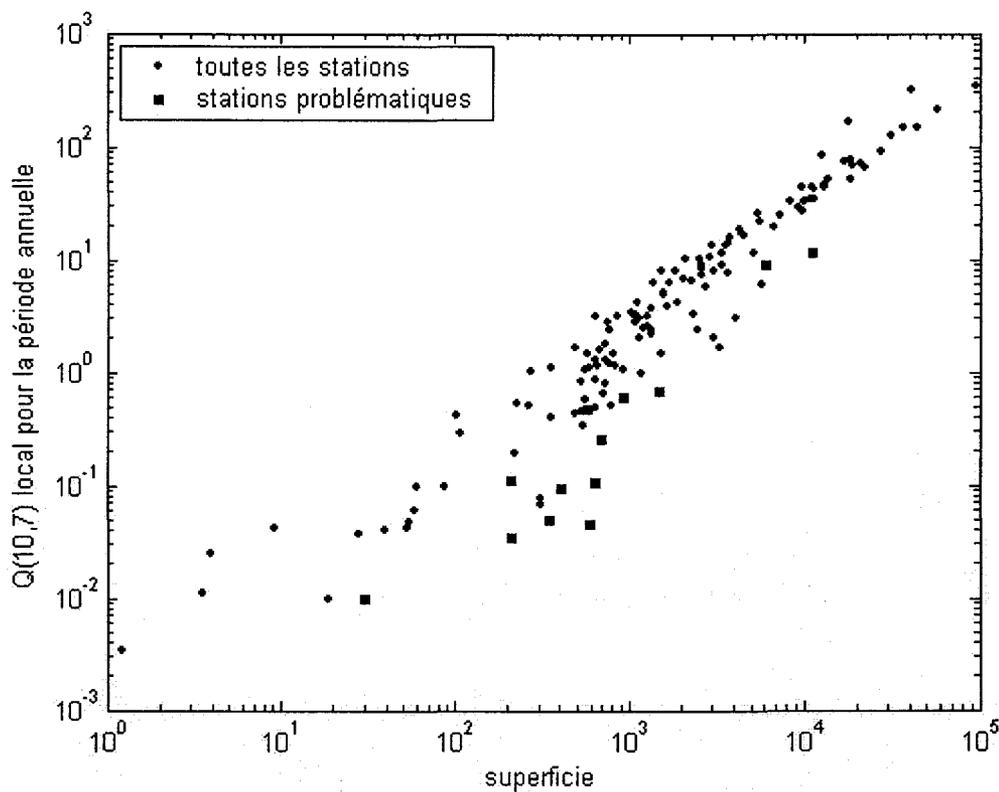
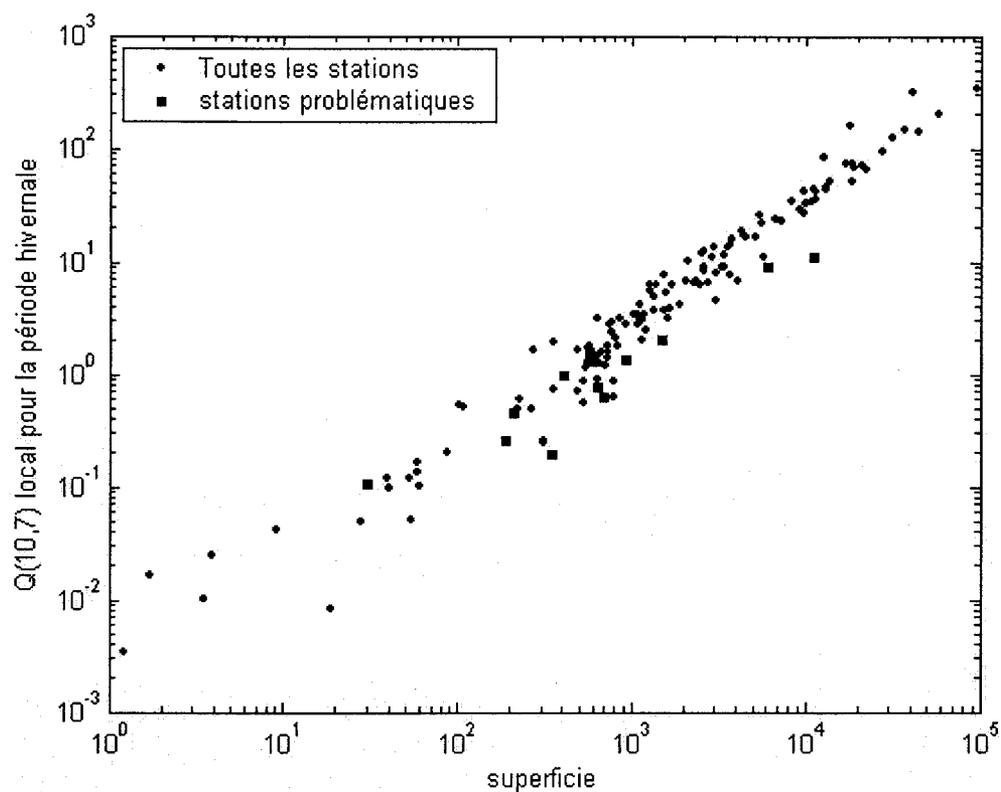


Figure 3-3 : $Q_{10,7}$ local pour la période hivernale en fonction de la superficie du bassin versant (échelle logarithmique)



Finalement, la base de données de référence contient les nombres de stations (variant selon la durée et la saison) donnés au Tableau 3-4.

Tableau 3-4 : Nombre de stations disponibles selon la période et la durée

$Q_{T,30}$			$Q_{T,7}$		
Estivale	Hivernale	Annuelle	Estivale	Hivernale	Annuelle
134	135	131	129	133	129

3.1.2 Variables physiographiques et météorologiques

Pour chacune des stations jaugées, onze variables, dont six physiographiques et cinq météorologiques, ont été compilées pour caractériser la topographie, la morphologie, l'occupation du sol et la climatologie du bassin versant (voir Tableau 3-5). On considère donc que la réponse hydrologique dépendra de ces paramètres.

Tableau 3-5 : Variables physiographiques et météorologiques

Variable	Unité	Notation
Superficie du bassin versant	km ²	BV
Pente moyenne du bassin versant	°	PMBV
Latitude de la station	°	LAT
Pourcentage de superficie de forêt	%	PFOR
Pourcentage de superficie de lac (comprenant les marais)	%	PLAC
Précipitation totale (solide et liquide) moyenne annuelle	mm	PTMA
Précipitation liquide moyenne pour la saison d'été-automne (juillet-décembre)	mm	PLME
Degré-jour moyen annuel < 0°	dgr-jr	DJBZ
Degré-jour moyen annuel > 13°	dgr-jr	DJH13
Nombre de jours où la température est > 27 °	nb de jours	NJH27
Numéro de courbe moyen	-	NCM

3.1.2.1 Extraction des variables physiographiques et météorologiques

La méthode employée pour extraire toutes les variables physiographiques et météorologiques est expliquée en détails à l'Annexe 3. Une variable (latitude de la station), représentant la localisation géographique de la station hydrométrique, a été extraite de la banque de données hydriques (BDH) du MENV (Ministère de l'Environnement du Québec, 2002). Deux variables, la superficie du bassin versant et la pente moyenne du bassin versant, caractérisent la

configuration du bassin versant. La première a été récoltée par l'entremise de la BDH et la deuxième a été acquise suite à un calcul de pente moyenne sur le bassin de drainage à partir d'un modèle numérique d'altitude (MNA) ayant une résolution de 1 km² (Ministère des Ressources Naturelles du Canada, 2001). Enfin, trois autres variables, touchant à l'occupation et la caractéristique du sol de l'aire de drainage (pourcentage de forêt, pourcentage de lac, numéro de courbe moyen), ont également été prises en compte. Les variables représentant le pourcentage de lacs et de forêts ont été extraites dans Belzile et al. (1997) ou à partir de couches numériques des lacs à l'échelle du 1 : 1 000 000 (Ministère des Ressources Naturelles du Canada, 2002) et de la forêt à l'échelle du 1 : 1 000 000 (Ministère des Ressources Naturelles du Canada, 2002). Le numéro de courbe moyen a été obtenu pour chaque station à partir d'une classification des caractéristiques du sol du bassin concerné. En fait, un numéro de courbe moyen a été attribué à chaque station selon les caractéristiques du sol du bassin versant. Avec la collaboration des gens du Ministère de l'Environnement, une classification américaine (Département d'Agriculture des États-unis d'Amérique, 2004) des caractéristiques du sol a été adaptée pour la transposer au cas du Québec. Le Tableau 3-6 montre quelles sont les propriétés qui sont tenues en compte par cette variable et décrit aussi l'adaptation qui a été faite à partir de la classification américaine (Département d'Agriculture des États-unis d'Amérique, 2004). On retrouve en caractères gras la classification canadienne (Ministère de l'agriculture et de l'agroalimentaire du Canada, 1998) et en caractères italiques la classification américaine. La description de ces diverses classifications est présentée en annexe (Annexes 7, 8 et 9).

Tableau 3-6 : Numéro de courbe moyen selon les caractéristiques du bassin

Classe d'utilisation du sol	Classe de végétation	Classe de drainage du sol			
		<i>A</i>	<i>B</i>	<i>C</i>	<i>D</i>
		E,R	W,M	I, P	V
<i>Agriculture</i>	A	64	75	82	85
<i>Forêt</i>	C, D, M, S	30	55	70	77
<i>Herbe, pâturage</i>	G, P, TA, TH, TM, TL, TB	39	61	74	80
<i>eau, terres et milieux humides</i>	B, F, R, SP, W	0	0	0	0
<i>aucune donnée</i>	H, L, U, #,	-	-	-	-

En somme, la plupart de ces six variables physiographiques (BV, PMBV, LAT, PFOR, PLAC, NCM) peuvent être recueillies de façon quasi-instantanée à l'aide d'un SIG ou directement de la BDH du ministère (voir Annexe 3). D'autre part, l'extension « *Spatial Analyst* » développée par ESRI (2002) est de mise pour optimiser la modélisation du jeu de données dans *ArcView*. Toutes les couches numériques utilisées pour la suite du projet seront structurées et remises au MENV, afin qu'il puisse effectuer sur d'autres bassins versants ses propres analyses spatiales.

D'autre part, les cinq variables météorologiques (précipitation totale moyenne annuelle, précipitation liquide moyenne pour la saison d'été/automne, degré-jour moyen inférieur à 0°, degré-jour moyen supérieur à 13°, nombre de jours moyen où la température est supérieure à 27°) ont été tirées d'une interpolation spatiale des données météorologiques du MENV (voir Annexe 3). La méthode d'interpolation numérique employée est le krigeage universel linéaire sans cokrigeage. Pour faire ces estimations sur le bassin versant de la station, le potentiel d'analyse spatiale d'un SIG a été utilisé. En utilisant la localisation géographique de chaque station météorologique (latitude, longitude), une interpolation des isovaleurs pour tout le Québec a été produite à une échelle de 1 : 1 000 000. Cette interpolation des valeurs ponctuelles météorologiques a été faite à l'aide d'une extension dans *ArcView* appelée « *Kriging Interpolating* ». Cette technique requiert également l'ajout de l'utilitaire « *Spatial Analyst* » (ESRI, 2002).

Les stations météorologiques qui ont été choisies avaient plus de 15 années de données compilées et les valeurs mesurées étaient ultérieures à l'année 1940. Les données mensuelles de ces stations provenaient de la banque de données météorologiques du MENV (Ministère de l'Environnement du Québec, 2001). Le nombre de stations climatologiques retenues pour chaque variable météorologique est exprimé dans le Tableau 3-7.

Tableau 3-7 : Variable et nombre de stations météorologiques utilisées.

Variable météorologique	Précipitation totale moyenne annuelle	Précipitation liquide moyenne en été/automne	Degré-jour moyen annuel < 0 °C	Degré-jour moyen annuel > 13 °C	Nombre de jour moyen > 27 °C
Nombre de stations météorologiques	449	439	416	426	632

Les grilles résultantes représentant les isovaleurs météorologiques des moyens et grands bassins ont une taille de pixel régulière à 1km², une projection cartographique Conique conforme de Lambert pour le Québec et des dimensions de 1826 rangées par 1637 colonnes uniformes couvrant tout le Québec.

Une fois les objets ponctuels interpolés sur des surfaces continues, les valeurs devaient être ramenées à l'ensemble du bassin versant cible. Une méthode d'extraction de type matriciel (grille régulière ou maillage) a été utilisée. Comme le but de l'étude est l'analyse régionale, la structure vectorielle a été laissée de côté. La procédure matricielle est plus rapide, simple et s'effectue sur des grilles homogènes ayant des pixels de 1 km². Cette structure de fichier s'arrime bien à la présente démarche régionale.

En fait, il s'agit de sélectionner le bassin cible, faire l'extraction des différentes couches (météorologique ou physiographique) et de calculer la moyenne arithmétique des pixels sur la totalité du bassin. Par contre, cette démarche requiert l'ajout de l'extension « *Grid Analyst Extension (Ver. 1.1)* » d'*ArcView* pour accéder à ces outils d'extraction (ESRI, 2002). Cette méthode d'intégration a également inspiré le calcul des valeurs physiographiques calculées sur le bassin de drainage, comme le pourcentage des lacs (PLAC), le numéro de courbe moyen (NCM) et le pourcentage de forêt (PFOR), puis la pente moyenne du bassin versant (PMBV). Ces dernières variables sont toutes disponibles sous forme de structure matricielle (pixel de 1 km², Conique Conforme de Lambert).

Les thèmes couvrant tout le Québec seront transférés au MENV. Ces cartes pourront servir à extraire l'information sur d'autres bassins versants. Ainsi, il sera possible de les utiliser pour les estimations des débits d'étiages ou pour toute autre étude à caractère régional couvrant la zone d'étude. Elles pourront même servir de base informationnelle (occupation du sol, météorologie, stations de mesure, etc.) à différents organismes de bassins.

3.1.2.2 Choix des variables explicatives

Le Tableau 3-8 présente les statistiques descriptives pour chacune des variables disponibles.

Tableau 3-8 : Statistiques descriptives des variables physiographiques et météorologiques

VARIABLES	BV	PMBV	PLAC	PTMA	DJBZ	PFOR	LAT	NJH27	DJH13	PLME	NCM
STATISTIQUES											
MOYENNE	5655.52	2.40	6.33	1018.03	1635.15	85.78	48.30	12.28	322.51	464.51	45.08
MÉDIANE	1390.00	2.21	4.00	1010.00	1428.10	90.30	47.94	12.20	328.60	460.00	44.00
ÉCART-TYPE	11685.7	1.10	6.57	177.80	529.29	15.97	2.35	7.57	147.69	77.40	12.56
MINIMUM	0.70	0.13	0.00	646.00	920.60	6.50	45.05	0.80	70.20	306.00	21.00
MAXIMUM	96600	6.95	32.00	1520.00	2963.10	100.00	53.94	36.60	734.10	664.00	78.20
ASYMÉTRIE	4.58	0.93	1.34	0.65	1.00	-2.27	0.81	0.61	0.32	0.37	0.33
KURTOSIS	27.68	1.84	1.40	1.01	-0.07	5.92	-0.27	0.25	-0.22	-0.17	-0.74

Ces statistiques donnent de l'information à propos de la distribution de chacune des variables. Par exemple, les coefficients d'asymétrie et d'aplatissement (kurtosis) sont de bons indicateurs de la normalité d'une variable. En effet, on peut dire qu'une variable suit une distribution normale si les valeurs des coefficients d'asymétrie et d'aplatissement sont respectivement près de 0 et 3. Par ailleurs, la représentation sur papier normal d'une variable permet aussi de déterminer si une transformation doit être appliquée dans le but de normaliser la variable. En effet, une statistique de Filliben près de 1 et un nuage de points faisant ressortir une forme linéaire sont deux indicateurs de la normalité d'une variable. Ces graphiques (voir Annexe 2) et les statistiques présentées au Tableau 3-8 ont donc été utilisés dans le but de vérifier l'hypothèse de normalité pour chaque variable. Les conclusions de ces vérifications sont reportées au Tableau 3-9.

À noter qu'une transformation logarithmique sera aussi appliquée pour tous les quantiles d'étiages.

La superficie de drainage explique généralement une proportion importante de la variabilité des débits sur un territoire donné. On remarque d'ailleurs au Tableau 3-10 que les quantiles d'étiage étudiés sont fortement liés à la superficie du bassin versant.

Tableau 3-9 : Transformation à appliquer dans le but de normaliser les variables

VARIABLES	TRANSFORMATION À APPLIQUER
BV	Logarithmique
PMBV	Aucune
PLAC	Racine carrée
PTMA	Logarithmique
DJBZ	Logarithmique
PFOR	Aucune
LAT	Logarithmique
NJH27	Aucune
DJH13	Aucune
PLME	Aucune
NCM	Aucune

Tableau 3-10 : Corrélation des différents quantiles avec la variable BV (en coordonnées logarithmiques)

Estivale			Hivernale			Annuelle		
Q _{5,30}	Q _{2,7}	Q _{10,7}	Q _{5,30}	Q _{2,7}	Q _{10,7}	Q _{5,30}	Q _{2,7}	Q _{10,7}
0.9543	0.9573	0.9470	0.9859	0.9852	0.9802	0.9751	0.9732	0.9637

Une estimation régionale des débits d'étiage basée seulement sur cette variable pourrait donc mener à des résultats de bonne qualité. Cette affirmation sera probablement vérifiée surtout pour la période hivernale qui présente des corrélations entre les quantiles et la variable BV plus fortes que pour les périodes estivale et annuelle. Des analyses seront donc conduites en se basant seulement sur la variable BV, mais aussi en ajoutant d'autres variables physiographiques et météorologiques choisies parmi celles mentionnées au Tableau 3-5.

Dans le but de choisir quelles variables seront utilisées en plus de la superficie de drainage, les corrélations entre les variables physiographiques et météorologiques ont été calculées. Cela permet d'éviter la redondance dans le choix des variables explicatives et donc d'obtenir un modèle plus parcimonieux.

Tableau 3-11 : Corrélations entre les variables physiographiques et météorologiques

	BV	PMBV	PLAC	PFOR	NCM	PTMA	PLME	LAT	DJBZ	NJH27	DJH13
BV	1	-0.130	0.538	-0.046	-0.166	-0.486	-0.425	0.554	0.565	-0.298	-0.370
PMBV		1	-0.288	0.351	-0.296	0.265	0.092	0.024	-0.078	-0.387	-0.283
PLAC			1	-0.117	-0.171	-0.602	-0.542	0.619	0.661	-0.269	-0.424
PFOR				1	-0.510	0.117	-0.022	0.155	0.128	-0.443	-0.423
NCM					1	0.150	0.213	-0.491	-0.422	0.472	0.595
PTMA						1	0.912	-0.627	-0.550	0.062	0.229
PLME							1	-0.666	-0.579	0.203	0.358
LAT								1	0.897	-0.702	-0.821
DJBZ									1	-0.646	-0.770
NJH27										1	0.933
DJH13											1

À partir du Tableau 3-11, on peut souligner certaines particularités pertinentes aux choix des variables à considérer dans le modèle de régionalisation :

- La variable NCM est corrélée à la variable DJH13.
- Les variables NJH27 et DJH13 sont fortement et positivement corrélées. Cela s'explique facilement puisque ce sont deux variables mesurant des températures relativement élevées. Si le nombre de jours où la température est supérieure à 27°C est grand, il y aura certainement un grand nombre de «degrés-jour supérieur à 13°C». De plus, ces deux variables sont corrélées négativement avec la variable DJBZ, ce qui est logique puisque cette variable est aussi une variable de température mesurant plutôt les basses températures. Pour un bassin où le nombre de «degrés-jours inférieurs à 0°C» est élevé, il y aura certainement peu de jours où la température dépasse les 27°C de même qu'un nombre faible de «degrés-jours supérieurs à 13°C». Finalement, ces trois variables de température sont corrélées à la variable LAT. Cette relation n'est pas surprenante puisque les températures observées pour les bassins situés plus au nord sont plus basses que celles des bassins situés plus au sud.

De plus, pour orienter le choix des variables explicatives, les corrélations entre les quantiles spécifiques ($QS_{d,T} = \frac{Q_{d,T}}{BV}$) et les variables physiographiques et météorologiques ont aussi été

calculées (voir Tableau 3-12). Les quantiles spécifiques ont été retenus, car ils permettent d'éliminer l'effet important de la superficie de drainage, et donc permettent aussi un choix plus éclairé des variables à utiliser pour expliquer la variabilité de la réponse hydrologique.

Tableau 3-12 : Corrélations entre les variables physiographiques et météorologiques et les quantiles spécifiques pour les périodes annuelle, estivale et hivernale

	Estivale			Hivernale			Annuelle		
	Ln(QS _{5,30})	Ln(QS _{2,7})	Ln(QS _{10,7})	Ln(QS _{5,30})	Ln(QS _{2,7})	Ln(QS _{10,7})	Ln(QS _{5,30})	Ln(QS _{2,7})	Ln(QS _{10,7})
PMBV	0.170	0.138	0.135	-0.056	-0.055	-0.033	0.090	0.067	0.070
PLAC	0.501	0.569	0.531	0.341	0.353	0.432	0.442	0.477	0.468
PFOR	0.340	0.337	0.317	0.139	0.168	0.216	0.353	0.384	0.380
NCM	-0.541	-0.583	-0.557	-0.222	-0.275	-0.355	-0.487	-0.536	-0.549
PTMA	-0.134	-0.226	-0.202	0.061	0.087	-0.054	-0.078	-0.097	-0.168
PLME	-0.182	-0.272	-0.254	0.104	0.113	-0.019	-0.092	-0.123	-0.190
LAT	0.692	0.736	0.722	0.040	0.061	0.198	0.387	0.407	0.480
DJBZ	0.751	0.777	0.766	0.183	0.191	0.329	0.472	0.487	0.546
NJH27	-0.761	-0.739	-0.744	-0.123	-0.167	-0.229	-0.513	-0.510	-0.541
DJH13	-0.820	-0.824	-0.815	-0.156	-0.207	-0.299	-0.568	-0.591	-0.619

Comme on peut le constater au Tableau 3-12, les variables les plus corrélées aux quantiles estivaux sont les suivantes : BV, PLAC, NCM, PLME, LAT, NJH27 et DJH13. Les deux dernières variables, NJH27 et DJH13, sont des variables caractérisant la température et sont corrélées entre elles. De plus, la latitude est aussi corrélée avec ces variables. Il faudrait donc en choisir une parmi ces 3 variables pour éviter la redondance. Cependant, la variable DJH13, la plus corrélée aux quantiles parmi les 3, est assez fortement reliée à la variable NCM. Puisque l'on suppose que la variable NCM a une importance non négligeable pour expliquer le phénomène des étiages (c'est-à-dire qu'il est souhaitable de l'inclure dans le modèle), il serait préférable de choisir NJH27 au lieu de DJH13. La variable NJH27 est aussi assez fortement reliée aux quantiles estivaux, mais l'est moins à la variable NCM. Pour le cas estival, les variables choisies sont donc : BV, PLAC, NCM, PLME et NJH27.

Pour le cas hivernal, on remarque tout d'abord que les variables caractérisant le sol et la température (NCM, DJH13 et NJH27) ne sont pas très importantes en ce qui concerne l'explication de la variabilité des quantiles hivernaux. Par ailleurs, les variables les plus

corrélées aux quantiles spécifiques sont : PLAC, PFOR et DJBZ. Ces variables ne sont pas fortement corrélées entre elles et peuvent donc être utilisées sans problème pour expliquer la variation des débits d'étiage pour le cas hivernal. On utilisera donc, pour cette saison, les variables suivantes : BV, PLAC, PFOR et DJBZ.

Pour la période annuelle, les variables les plus corrélées aux quantiles sont les suivantes : BV, PLAC, NCM, LAT, DJBZ, NJH27 et DJH13. Les trois dernières variables, DJBZ, NJH27 et DJH13, sont des variables caractérisant la température et sont corrélées entre elles. De plus, la latitude est aussi corrélée avec ce groupe de variables. Il faudrait donc en choisir une parmi ces 4 variables pour éviter la redondance. Cependant, la variable DJH13, la plus corrélée aux quantiles parmi les 4, est assez fortement reliée à la variable NCM. Puisque l'on suppose que la variable NCM a une importance non négligeable pour expliquer le phénomène des étiages (c'est-à-dire qu'il est souhaitable de l'inclure dans le modèle), il serait préférable de choisir NJH27 au lieu de DJH13. La variable NJH27 est aussi assez fortement reliée aux quantiles annuels, mais l'est moins à la variable NCM. Pour le cas annuel, les variables choisies sont donc : BV, PLAC, NCM et NJH27.

Les caractéristiques physiographiques et climatiques pour toutes les stations faisant partie de la base de données de référence sont présentées à l'Annexe 4.

3.2 Application de l'analyse canonique des corrélations combinée à la régression multiple aux bassins du Québec habité

Tout d'abord, l'analyse canonique des corrélations (ACC) a été utilisée pour déterminer les voisinages hydrologiques. L'ACC a été combinée à la régression multiple (RM) dans le but d'obtenir une estimation régionale des différents quantiles d'intérêt. Pour toutes les analyses effectuées, une procédure de type « Jackknife » a été utilisée, c'est-à-dire que chaque station de la base de données a été considérée tour à tour comme étant non jaugée. Une estimation régionale a ainsi été obtenue pour chaque station et on a pu la comparer avec la valeur locale calculée lors de l'analyse fréquentielle. Le biais relatif moyen (BRM) et l'erreur quadratique relative moyenne (EQRM) ont été utilisés pour mesurer la qualité des résultats obtenus.

$$BRM = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k \left[\frac{\hat{X}_i - X_i}{X_i} \right] \quad (30)$$

$$EQRM = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k \left[\frac{\hat{X}_i - X_i}{X_i} \right]^2 \quad (31)$$

où k représente le nombre total de stations cibles jaugées, X_i est la valeur de l'estimation locale pour la station cible jaugée et \hat{X}_i est le résultat de l'estimation régionale obtenue par la combinaison de l'ACC au modèle de régression multiple.

À l'aide de cette méthode, deux sortes d'estimations pourront être obtenues. Tout d'abord, des résultats pourront être produits en faisant intervenir seulement la variable BV. On peut représenter la relation sous la forme additive suivante :

$$\log(Q_{T,d}) = \log(K) + \beta_{BV} \log(BV) + \varepsilon \quad (32)$$

où $Q_{T,d}$ est le quantile d'étiage de période de retour T et de durée d , K est la constante du modèle régressif, β_{BV} est le coefficient associé à la variable BV et ε représente l'erreur d'estimation du modèle. Par ailleurs, les estimations pourront aussi être obtenues à l'aide de plusieurs variables explicatives. Pour chaque saison, les variables sélectionnées ont été présentées à la section 3.1.2.2. On obtient donc les trois équations régionales suivantes, en prenant soin d'appliquer les transformations décrites au Tableau 3.9 pour normaliser les variables :

Période estivale

$$\log(Q_{T,d}) = \log(K) + \beta_{BV} \log(BV) + \beta_{NJH27} NJH27 + \beta_{PLAC} \sqrt{PLAC} + \dots \\ \beta_{NCM} NCM + \beta_{PLME} PLME + \varepsilon \quad (33)$$

Période hivernale

$$\log(Q_{T,d}) = \log(K) + \beta_{BV} \log(BV) + \beta_{PLAC} \sqrt{PLAC} + \beta_{PFOR} PFOR + \beta_{DJBZ} \log(DJBZ) + \varepsilon \quad (34)$$

Période annuelle

$$\log(Q_{T,d}) = \log(K) + \beta_{BV} \log(BV) + \beta_{NJH27} NJH27 + \beta_{PLAC} \sqrt{PLAC} + \beta_{NCM} NCM + \varepsilon \quad (35)$$

Les résultats obtenus pour les deux types d'analyses sont rapportés au Tableau 3-13.

Tableau 3-13 : BRM et EQRM pour les estimations des quantiles d'intérêt par l'ACC-RM

Modèle	saison	Q _{d,T}	BRM (%)	EQRM (%)
ACC-RM BV seulement	Estivale	Q _{5,30}	35.77	149.82
		Q _{2,7}	38.19	171.77
		Q _{10,7}	53.68	308.41
	Hivernale	Q _{5,30}	6.81	16.52
		Q _{2,7}	6.15	15.64
		Q _{10,7}	10.61	29.56
	Annuelle	Q _{5,30}	15.75	64.90
		Q _{2,7}	16.89	75.17
		Q _{10,7}	29.38	155.89
ACC-RM avec plusieurs variables	Estivale	Q _{5,30}	8.80	18.30
		Q _{2,7}	10.91	21.69
		Q _{10,7}	15.14	35.92
	Hivernale	Q _{5,30}	7.11	18.12
		Q _{2,7}	6.67	15.95
		Q _{10,7}	7.40	20.79
	Annuelle	Q _{5,30}	11.42	30.56
		Q _{2,7}	8.31	22.87
		Q _{10,7}	15.08	40.61

Pour les périodes estivale et annuelle, tel que le laissaient présager les corrélations entre les quantiles et la variable BV (Tableau 3-10), l'utilisation de variables supplémentaires s'avère nécessaire pour obtenir des estimations de meilleure qualité. Cependant, ce n'est pas vraiment le cas pour la période hivernale où les résultats ne sont que très légèrement meilleurs lorsqu'on utilise seulement la superficie du bassin versant comme variable explicative (excepté pour Q_{10,7}).

On remarquera également que l'ajout de la variable NCM au modèle de régionalisation (de même que l'élimination des stations problématiques mentionnées au Tableau 3-3) a permis de réduire substantiellement les erreurs d'estimation présentées dans le dernier rapport d'étape (Herrera et al., 2004).

Sur les figures 3-4 à 3-12, on remarque notamment que malgré le fait que pour certaines stations associées à de petites superficies de bassin versant de grandes erreurs soient obtenues, l'erreur d'estimation ne semble pas dépendre de façon générale de la taille du bassin versant. Les résultats détaillés de cette procédure de validation croisée, à partir desquels les figures 3-4 à 3-12 ont été générées, sont reportés à l'Annexe 5. On y constate d'emblée qu'en moyenne, le modèle d'ACC-RM semble plutôt biaisé positivement. Cependant, lorsqu'on examine la question simplement en termes de fréquences de surestimation ou de sous-estimation, on ne discerne pas de tendance systématique du modèle à surestimer ou à sous-estimer les divers quantiles. Le biais positif observé s'expliquerait donc plutôt par le fait que les erreurs de surestimation du modèle dépassent (de façon générale) en amplitude les erreurs de sous-estimation du même modèle. L'examen visuel des figures 3-4 à 3-12 permet par ailleurs de valider cette hypothèse.

Figure 3-4 : Erreur d'estimation (BR) en % de l'ACC-RM (avec plusieurs variables) pour les étiages estivaux en fonction de la superficie (T=10, d=7)

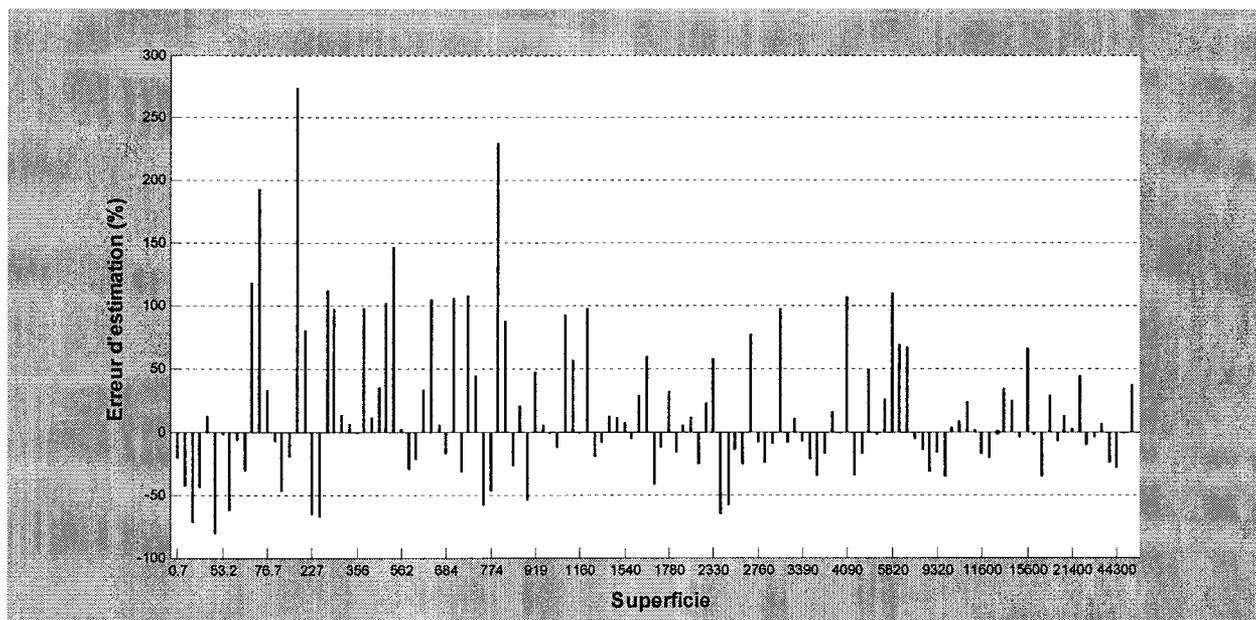


Figure 3-5 : Erreur d'estimation (BR) en % de l'ACC-RM (avec plusieurs variables) pour les étiages hivernaux en fonction de la superficie (T=10, d=7)

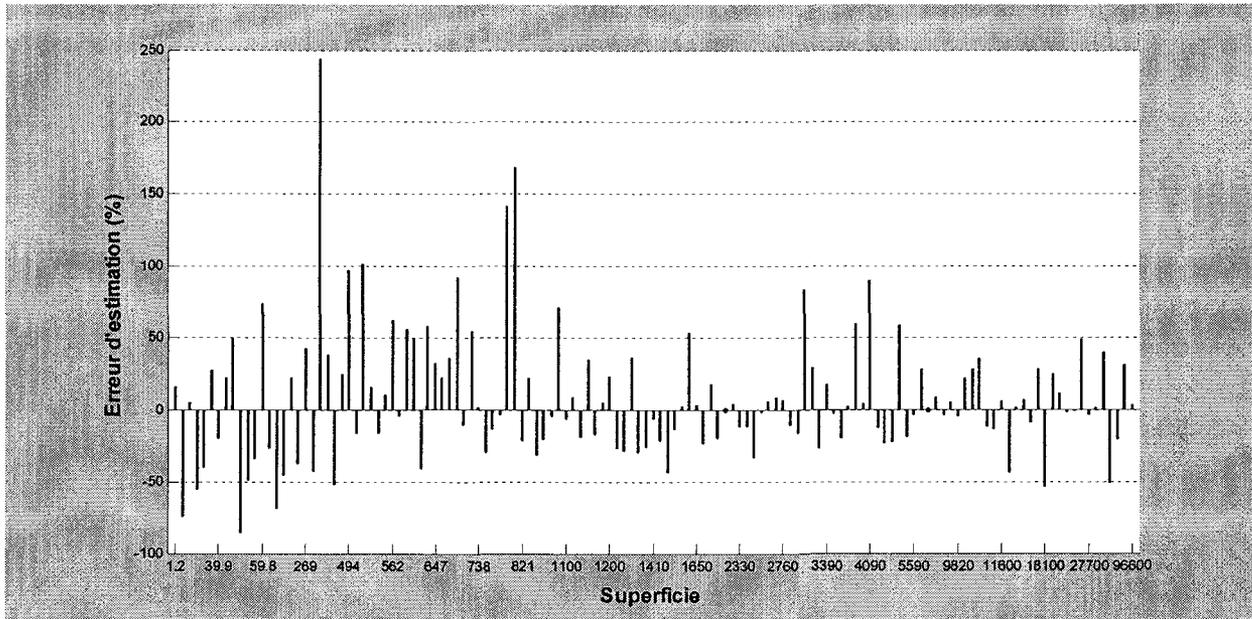


Figure 3-6 : Erreur d'estimation (BR) en % de l'ACC-RM (avec plusieurs variables) pour les étiages annuels en fonction de la superficie (T=10, d=7)

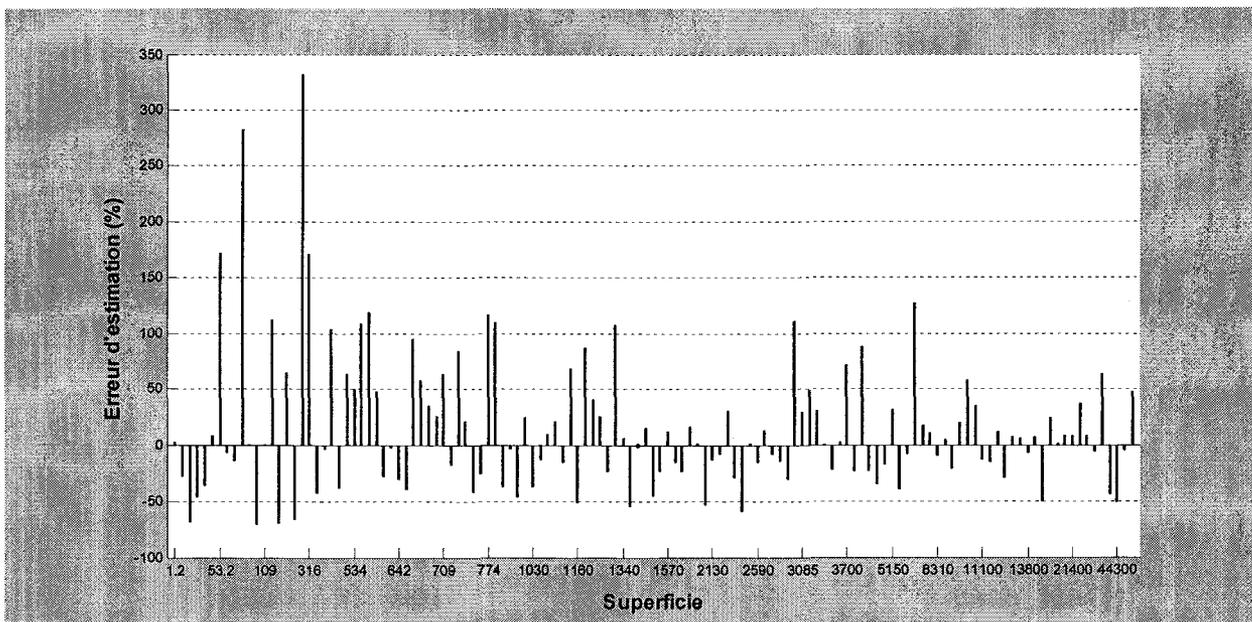


Figure 3-7 : Erreur d'estimation (BR) en % de l'ACC-RM (avec plusieurs variables) pour les étiages estivaux en fonction de la superficie (T=2, d=7)

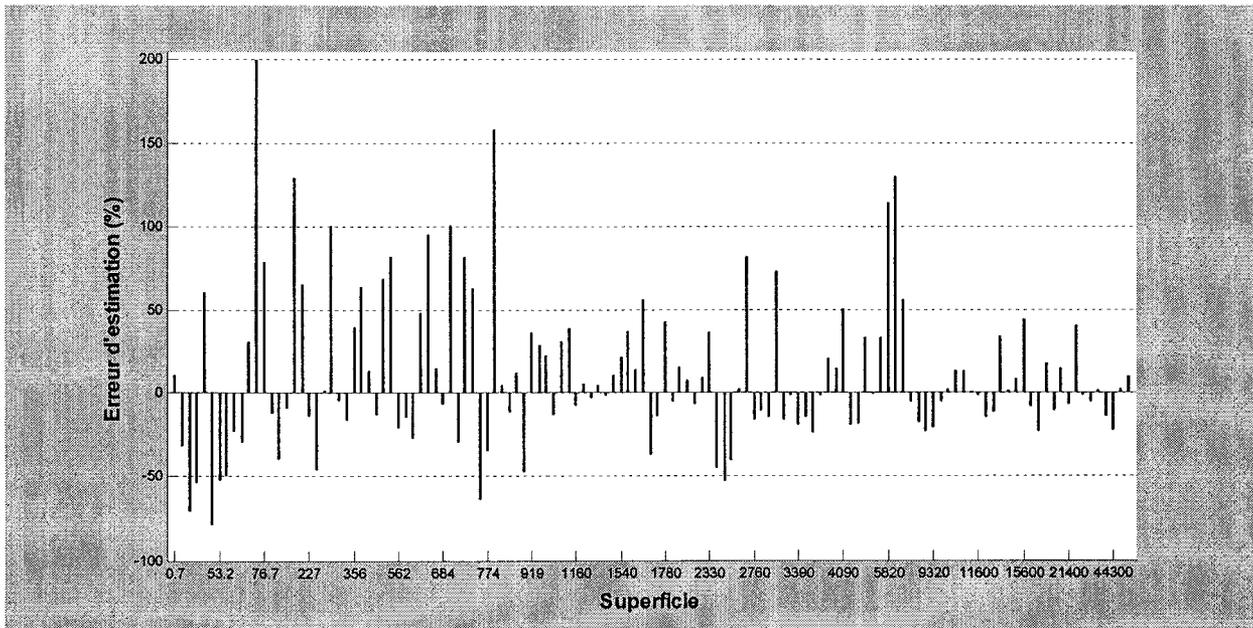


Figure 3-8 : Erreur d'estimation (BR) en % de l'ACC-RM (avec plusieurs variables) pour les étiages hivernaux en fonction de la superficie (T=2, d=7)

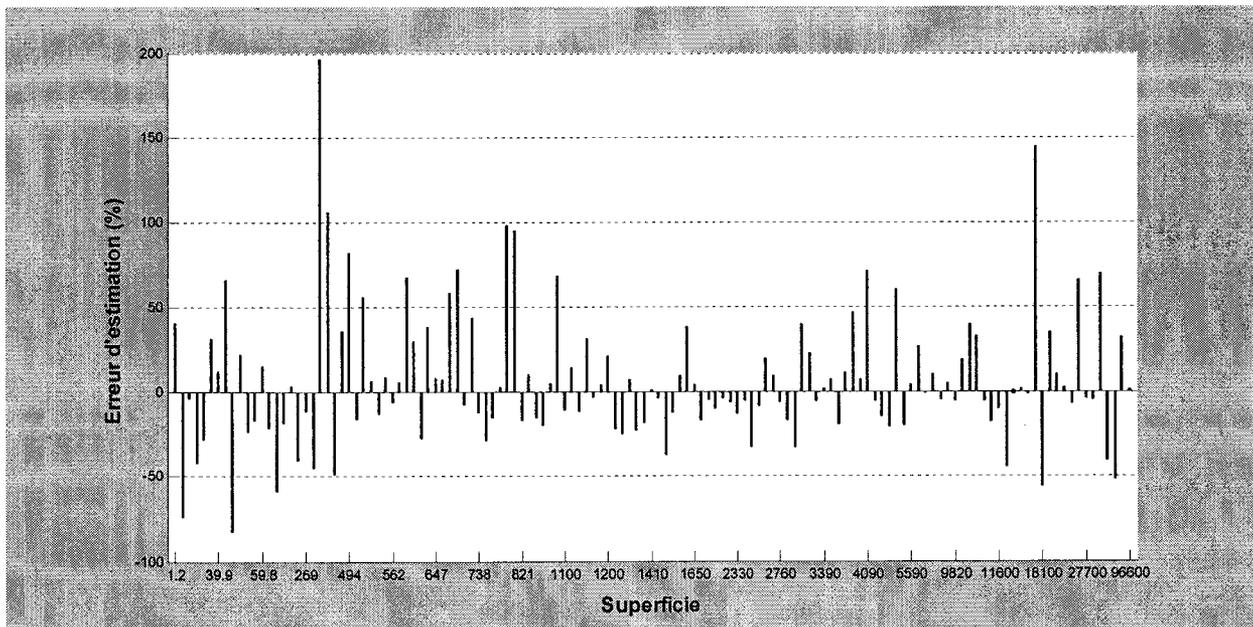


Figure 3-9 : Erreur d'estimation (BR) en % de l'ACC-RM (avec plusieurs variables) pour les étiages annuels en fonction de la superficie (T=2, d=7)

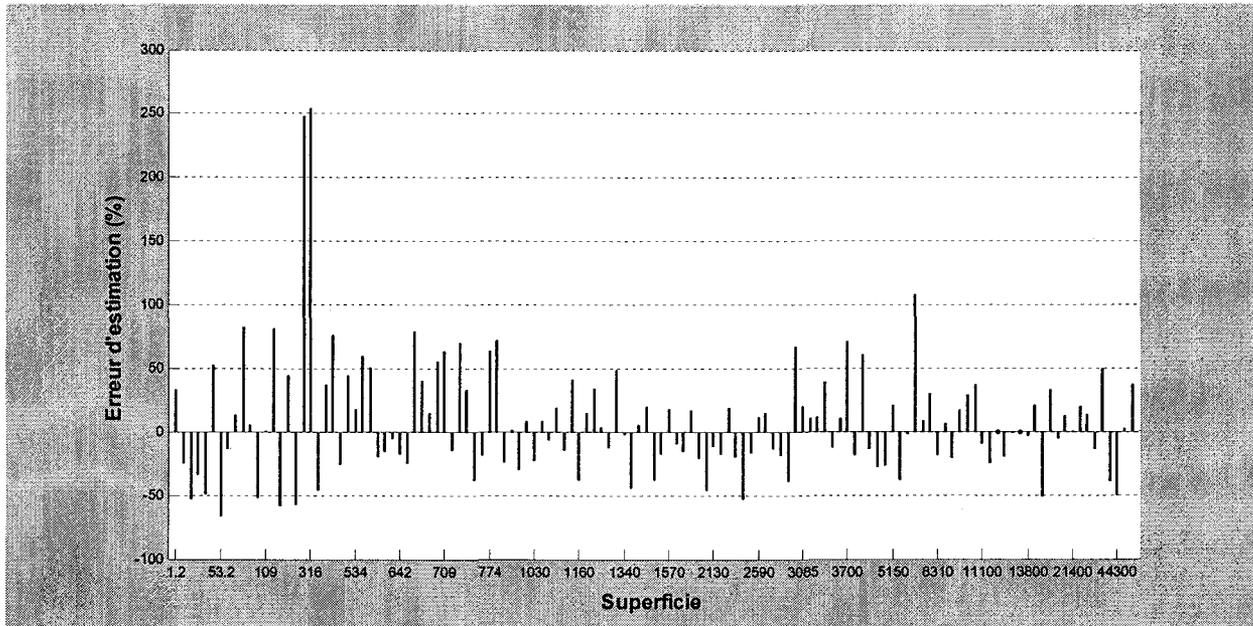


Figure 3-10 : Erreur d'estimation (BR) en % de l'ACC-RM (avec plusieurs variables) pour les étiages estivaux en fonction de la superficie (T=5, d=30)

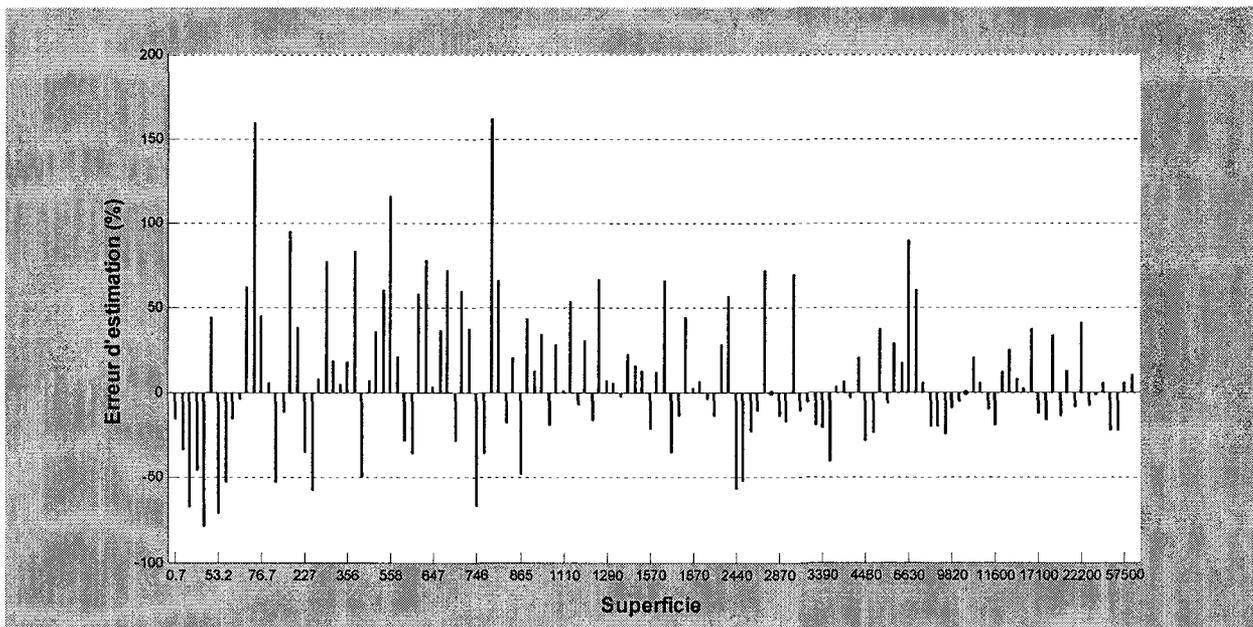


Figure 3-11 : Erreur d'estimation (BR) en % de l'ACC-RM (avec plusieurs variables) pour les étiages hivernaux en fonction de la superficie (T=5, d=30)

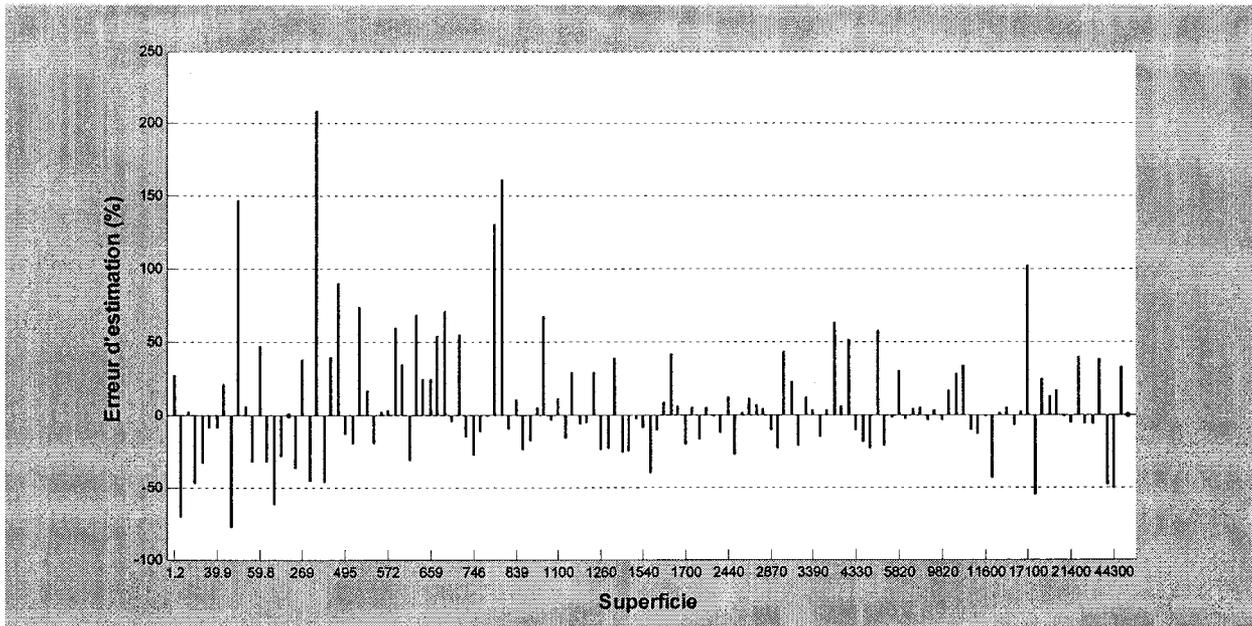
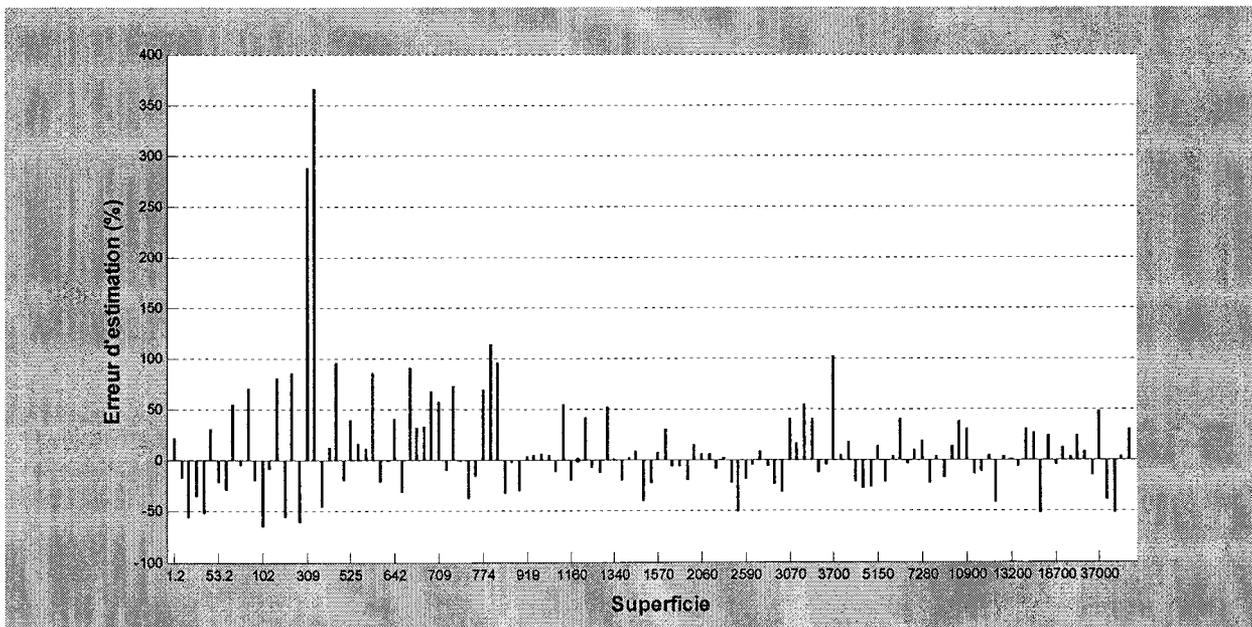


Figure 3-12 : Erreur d'estimation (BR) en % de l'ACC-RM (avec plusieurs variables) pour les étiages annuels en fonction de la superficie (T=5, d=30)



3.3 Application de la classification ascendante hiérarchique combinée à la régression multiple aux bassins du Québec habité

Tout d'abord, la méthode de classification ascendante hiérarchique (CAH) a été appliquée pour déterminer les régions hydrologiquement homogènes. La CAH a été combinée à la régression multiple (RM) dans le but d'obtenir une estimation régionale des différents quantiles d'intérêt. Pour toutes les analyses effectuées, une procédure de type « Jackknife » a été utilisée, c'est-à-dire que chaque station de la base de données a été considérée tour à tour comme étant non jaugée. Une estimation régionale a ainsi été obtenue pour chaque station et on a pu la comparer avec la valeur locale calculée lors de l'analyse fréquentielle. Le biais relatif moyen (BRM) et l'erreur quadratique relative moyenne (EQRM) ont été utilisés pour mesurer la qualité des résultats obtenus (cf. équations 30 et 31).

Tout comme à la section précédente, un modèle régional utilisant seulement l'aire de drainage BV comme variable explicative a été considéré dans un premier temps (cf. équation 32). Des résultats ont ensuite été obtenus pour les modèles incluant plusieurs variables explicatives (cf. équations 33, 34 et 35). Les différentes régions homogènes obtenues sur la base de ces variables selon la durée et la saison sont présentées à l'Annexe 6. Dans chaque cas, une distance de type euclidienne standardisée a été considérée (afin d'éliminer l'effet d'échelle entre les différentes variables) pour le couplage des stations, tandis que la méthodologie de Ward (cf. Lebart, 1984) a été retenue comme algorithme de regroupement. Le résumé des résultats pour les deux types d'analyses sont reportés au Tableau 3-14.

La première chose qui ressort lorsqu'on effectue la comparaison des résultats présentés aux Tableaux 3-13 et 3-14, c'est que l'approche par ACC-RM semble supérieure à l'approche par CAH-RM dans le cas du modèle utilisant plusieurs variables (et ce, indépendamment de la saison) tandis que l'inverse semble vrai dans le cas du modèle utilisant seulement BV comme variable explicative. Or, il est important de souligner avant d'aller plus loin que ce constat ne prouve pas nécessairement l'infériorité de l'approche par ACC par rapport à la CAH lorsqu'on se limite à l'aire du bassin versant pour effectuer la régionalisation des étiages.

Tableau 3-14 : BRM et EQRM pour les estimations des quantiles d'intérêt par la CAH-RM

Modèle	Saison	Q _{d,r}	BRM (%)	EQRM (%)
CAH-RM BV seulement	Estivale	Q _{5,30}	25.20	92.74
		Q _{2,7}	25.97	104.01
		Q _{10,7}	35.70	171.71
	Hivernale	Q _{5,30}	6.55	16.47
		Q _{2,7}	6.26	15.66
		Q _{10,7}	9.32	26.20
	Annuelle	Q _{5,30}	12.72	48.94
		Q _{2,7}	14.17	52.36
		Q _{10,7}	24.10	110.79
CAH-RM avec plusieurs variables	Estivale	Q _{5,30}	14.40	58.88
		Q _{2,7}	13.26	102.79
		Q _{10,7}	22.90	227.44
	Hivernale	Q _{5,30}	23.42	353.73
		Q _{2,7}	23.83	370.81
		Q _{10,7}	27.92	393.83
	Annuelle	Q _{5,30}	10.70	49.39
		Q _{2,7}	11.42	55.52
		Q _{10,7}	16.13	77.93

Le problème se situe alors au niveau de l'application de la technique de classification sur la base d'une variable unique en vue de former des régions homogènes. Dans ce cas-ci, la distribution de la variable BV est trop irrégulière pour que l'algorithme de regroupement puisse être appliqué efficacement. Il a donc fallu en arriver à un compromis consistant à déterminer les limites des classes en fonction d'en arriver à un minimum de 15 stations par classe, ce qui permet d'assurer du même coup la bonne représentativité du modèle régressif. Nommément, ces limites délimitant les classes (peu importe la saison) sont les suivantes (en km²) : [0 200], [200 550], [550 750], [750 1300], [1300 2500], [2500 5000], [5000 12 000], [12 000 100 000].

Naturellement, en imposant ces limites qui permettent de catégoriser adéquatement les stations à notre disposition, il n'est pas étonnant alors de constater que la procédure de « Jackknife » favorise la CAH plutôt que l'ACC. Cependant, cette procédure de regroupement demeure essentiellement subjective et ne permet pas d'inférer directement sur la performance future de la méthode avec des stations non-jaugées extérieures à cette étude. Par contre, l'approche par ACC demeure quant à elle objective et cherchera donc toujours à faire correspondre les stations (parmi celles présentes dans la base de données) se rapprochant le plus des futurs sites cibles pour lesquels on voudra obtenir des estimations régionales.

3.4 Application de la méthode des L-moments aux bassins du Québec habité

Bien que l'approche de régionalisation basée sur les L-moments offre un test d'homogénéité (cf. section 2.2.2) afin de valider le choix des régions hydrologiquement homogènes, elle n'offre pas de méthodologie en tant que telle pour former ces régions. On pourrait donc simplement appliquer le test d'homogénéité sur les régions obtenues à la section précédente à l'aide de la technique de classification. Or, puisque l'un des objectifs principal de cette étude est de comparer différentes approches de régionalisation, il a été convenu qu'il serait plus approprié de considérer une autre technique pour la détermination des régions homogènes avant d'appliquer les étapes de l'approche de régionalisation basée sur les L-moments.

L'algorithme retenu à cette fin est connu sous le nom de partitionnement objectif. En bref, il consiste à former des régions en séparant les différents sites en deux groupes, où l'on assigne un site donné à l'un des deux groupes dépendamment de s'il excède ou non un certain seuil pour une variable caractérisant le bassin versant (dans ce cas-ci, il peut s'agir de l'une ou l'autre des variables identifiées à la section 3.1.2.2). On doit faire en sorte que le seuil en question soit fixé de façon à minimiser un critère d'hétérogénéité intra-groupe, tel qu'une statistique basée sur le rapport de vraisemblance, ou plus simplement la variance du coefficient de variation à l'intérieur du groupe, ou encore la variance intra-groupe des coefficients de L-variation (L-CV) et de L-asymétrie (L-CS). Cette dernière option devrait normalement s'avérer plus accommodante dans la formation des régions homogènes étant donné que le test d'homogénéité est basé sur les rapports de L-moments. Enfin, les deux groupes ainsi déterminés sont à leur tour subdivisés en

de nouveaux sous-groupes, i.e. que le processus est répété de façon itérative jusqu'à ce qu'on obtienne une partition acceptable de groupes homogènes.

Un exemple d'une telle partition résultant de l'application de cet algorithme sur l'ensemble des 130 stations retenues pour l'estimation des étiages annuels de durée 7 jours ($Q_{T,7}$) est présenté au Tableau 3-15. Au lieu de faire un choix parmi les quatre variables explicatives retenues dans le cas annuel (soit BV, PLAC, NJH27 et NCM ; cf. section 3.1.2.2) comme caractéristique à considérer pour le bassin, une solution permettant de contourner ce problème a été considérée : effectuer une analyse en composantes principales sur la matrice de variables explicatives, et ne retenir que la première composante (i.e. celle qui explique le plus fort pourcentage du jeu de données) comme critère d'assignation pour la procédure de partitionnement.

Tableau 3-15 : Exemple d'application de l'algorithme de partitionnement objectif

Région 1	Région 2	Région 3	Région 4	Région 5	Région 6
022504/022507	011507	010101	010801/010802	050116/050144	061905
022703	021915	011508	010901/010902	050409	072302
023101/023106	024001/024007	020401/020404	011201	051001	073801
023301/023303	030214/030234	021407	020502	051003	074601
023401	030219	021502	020601/020602	051004	074701
023402	030282	021601	020802	051005	075601
023403	040201	040129	040830	061020	080701
023426	040814	040202/040204	050305	061906	080704
023429	041301	040212	050408	062101	080707
023701	041901/041902	040401/040406	051502	062102	080718
024003	041903	043009/043012	052803	062209	080801
024013	042606	050117/050135	052805	071401	081002
030101	050119	050301	060101	073301/073303	081006
030103	050701	050302/050304	061502	074902	081007
030238	050812	051002	062802	080101/080102	090601
030316	051301	051007	070401	080705/080717	090602
030335	052202/052219	052203/052212		080809	090605
030340	052601	061022			090607
030341	060601	061602			090609
030415	061909	061801			090610
030901/030905	062701				090613
031401					092703
046403					092704
046706					092706
046707					092707
052233					092708
					092711
					092715
					092717
					092722

Les valeurs du test de discordance (cf. section 2.2.1) pour chaque station de chacune des régions du Tableau 3-15 sont reportées quant à elles au Tableau 3-16. Les valeurs marquées en caractères gras correspondent aux stations pouvant être considérées comme problématiques (i.e. lorsque $D > 3$) à l'intérieur du groupe auquel elle est associée. Dans ce cas-ci, il s'agit des 030340, 052806 et 074601. Elles ne constituent donc que l'exception, et étant donné que la plus forte valeur observée pour D n'excède même pas 4.5, on peut donc affirmer avec une certaine confiance qu'il n'y a pas vraiment de station se devant d'être écartée impérativement du lot. En fait, cela est consistant avec le travail d'identification d'élimination des stations problématiques effectué à l'étape de la constitution de la base de données (cf. section 3.1).

Tableau 3-16 : Valeurs de la statistique D du test de discordance pour les stations du Tableau 3-15

Région 1	Région 2	Région 3	Région 4	Région 5	Région 6
0.15	0.25	1.04	0.00	0.19	0.24
0.78	0.42	2.69	0.16	2.26	1.62
0.51	2.05	0.06	0.10	1.89	0.04
2.14	0.54	2.00	1.60	0.09	3.31
0.70	0.81	1.65	0.40	1.27	2.37
0.49	0.43	0.79	0.53	2.99	2.62
0.85	1.90	0.36	1.45	0.05	0.62
1.65	1.76	0.55	1.80	1.39	1.99
0.29	0.09	1.37	0.73	1.10	0.45
0.73	0.35	0.95	0.66	0.36	0.07
0.12	0.60	0.47	3.91	0.12	0.82
1.87	0.87	0.06	2.13	0.18	0.30
1.07	0.66	2.34	0.61	1.01	1.39
0.15	1.14	0.60	0.94	2.47	0.40
0.74	0.93	0.90	0.84	0.63	1.04
2.37	1.94	1.27	0.13	0.42	1.92
0.40	0.35	0.17		0.56	0.48
4.14	2.88	0.77			2.50
2.31	0.89	1.41			0.74
0.48	1.52	0.56			0.73
0.15	0.62				0.75
0.32					0.03
1.03					0.41
0.69					0.24
0.84					1.13
1.00					0.73
					1.20
					0.16
					1.35
					0.36

Les choses se gâtent par contre lorsque vient le temps d'appliquer le test d'homogénéité aux groupements du Tableau 3-15. Les valeurs de la statistique H (en fixant le nombre de simulations à 1000 pour la détermination des paramètres de la distribution kappa, cf. section 2.2.2) pour chaque région sont données au Tableau 3-17. On y constate que le critère d'homogénéité ($H < 2$) n'y est largement pas satisfait pour chacun des groupes.

Tableau 3-17 : Valeurs de la statistique H du test d'homogénéité pour les régions du Tableau 3-15

Région 1	Région 2	Région 3	Région 4	Région 5	Région 6
5.56	11.16	13.00	15.10	6.11	8.00

Conséquemment, l'obtention d'estimations régionales sur la base de ces régions ne peuvent donc pas être considérées comme étant valides selon les standards de l'approche basée sur les L-moments.

4 DÉVELOPPEMENT DE L'OUTIL GÉOMATIQUE

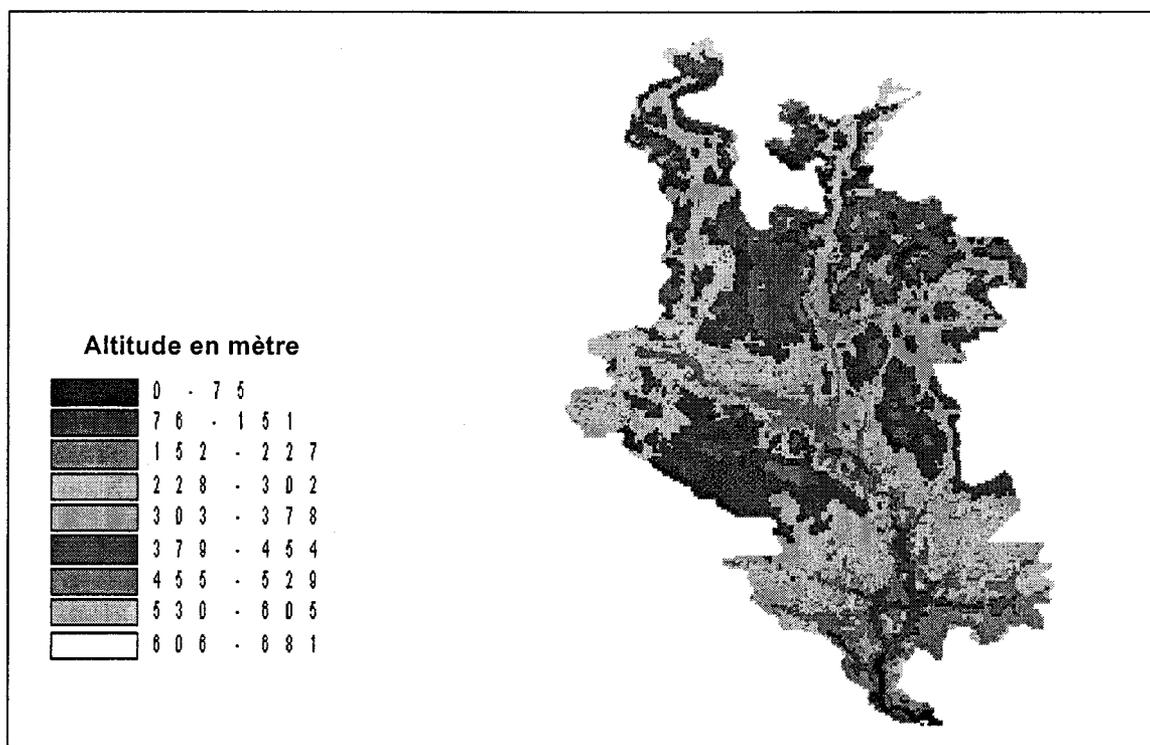
Les données cartographiques (réseau hydrographique, précipitation, occupation du sol, limite des bassins, etc.) qui sont utilisées pour estimer les variables hydrologiques doivent être structurées dans un cadre idéal de façon à tirer profit des capacités de traitement et d'analyse d'un système d'information géographique (SIG). Le SIG est un outil de gestion des données à référence spatiale lié à un concept de géographie informatisée du territoire. Le SIG permet, entre autres, l'intégration (plans, cartes, images), le stockage (base de données), la compilation (classification, interprétation), la modélisation (simulation, création de modèle), l'analyse (topologique, métrique, statistique) et la diffusion (cartographie, diffusion simultanée dans Internet) de l'information géographique (Thériault, 1994). D'autre part, l'exploitation de l'information cartographique sous forme numérique (en comparaison au papier) présente plusieurs avantages, soit la superposition de couches, l'analyse multi-couches, le mode de stockage des données, la gestion de l'historique, le traitement en continu de l'information et les applications novatrices développées dans le domaine. L'utilisation d'outils géomatiques permet également d'améliorer les capacités d'analyse et de gestion pour les décideurs en leur permettant de schématiser des problèmes complexes facilitant la compréhension des enjeux. Ce secteur d'activité est présentement en plein essor. En outre, le SIG devient un dispositif essentiel dans la prise de décision, puisqu'il offre la possibilité au gestionnaire d'obtenir une représentation spatiale des impacts éventuels et de lui permettre une meilleure évaluation des actions à prendre face à de futurs cas extrêmes (ex. débits d'étiages).

Dans le cadre du présent projet, une personnalisation conviviale des applications cartographiques pour le bénéfice du CEHQ a été une voie à suivre pour optimiser l'exploitation des données et favoriser l'interaction entre l'interface et l'utilisateur. Les outils d'aide à la décision développés dans le domaine de l'hydrologie ont leur raison d'être, puisque la gestion de l'eau requiert à la base une importante masse d'information permettant de mieux gérer la ressource sur le territoire (sécurité des barrages, évaluation environnementale, analyse et prévention du risque).

Dans ce chapitre, on discute, entre autres, de l'architecture globale de la base de données utilisée par l'outil ainsi que de la méthode de régionalisation employée pour extraire rapidement

l'information et obtenir une estimation du débit d'étiage. On aborde aussi, dans ce chapitre, les différentes fonctionnalités (menu, programme, extensions, etc.) du prototype qui seront mises à la disposition des chercheurs du CEHQ et qui pourront être enrichies par l'équipe en charge du volet géomatique au ministère. Finalement, on présente la procédure d'automatisation de la délimitation de l'aire de drainage à l'aide d'un modèle numérique d'altitude (MNA) dans la procédure d'estimation régionale. Un MNA est une représentation continue de l'espace en coordonnées planimétriques (latitude, longitude) et altimétriques (altitude). En fait, c'est une surface en 2D qui représente l'altitude du terrain en valeur numérique (figure 4-1).

Figure 4-1 : Exemple d'un modèle numérique d'altitude (MNA)



4.1 Structure de données

La structure de la base de données à référence spatiale (BDRS) a été créée pour améliorer l'exploitation par l'organisation de ces données hydrologiques, physiographiques et météorologiques. Les données sont présentées en deux formats : sous forme de grilles (matrice

en pixel carré) ou de vecteurs (polygone, polyligne, point). Une brève description des couches numériques utilisées dans l'outil est présentée dans les Tableaux 4-1 et 4-2.

Tableau 4-1 : Inventaire des données vectorielles

Couche	Source	Échelle	Classe d'objet
Région hydrologique	MENV	1 : 250 000	polygone
Limites des grands bassins versants à l'exutoire	CEHQ	1 : 250 000	polygone
Station hydrométrique	MENV	1 : 1 000 000	point
Station jaugée du présent projet	INRS-ETE	1 : 1 000 000	point
Station météorologique	MENV	1 : 1 000 000	point
Site cible non-jaugé	INRS-ETE	1 : 1 000 000	point
Bassin cible non-jaugé	INRS-ETE	1 : 1 000 000	polygone
Réseau hydrographique	NRCAN	1 : 1 000 000	polyligne
Réseau hydrographique extrait du MNA modifié	INRS-ETE	1 : 1 000 000	polygone
Réseau routier	NRCAN	1 : 1 000 000	polyligne
Ville	NRCAN	1 : 1 000 000	point

En ce qui a trait aux grilles, l'échelle globale des données est de 1 : 1 000 000 (ce qui correspond à une précision d'environ 1 km) et la projection cartographique est Conique conforme de Lambert adaptée au Québec. Les métadonnées sont disponibles spécifiquement dans le dictionnaire des données du guide de l'utilisateur de l'outil (dénommé ARIDE), qui est quant à lui présenté à l'Annexe 10 du présent rapport (plus précisément aux pages A10-19 – A10-22). Un répertoire hiérarchisé des données a également été créé pour subdiviser les différents éléments cartographiques. Il faut noter que les données vectorielles (polygone, polyligne, point) seront utilisées comme couche de visualisation, tandis que les couches matricielles serviront de base pour l'analyse spatiale.

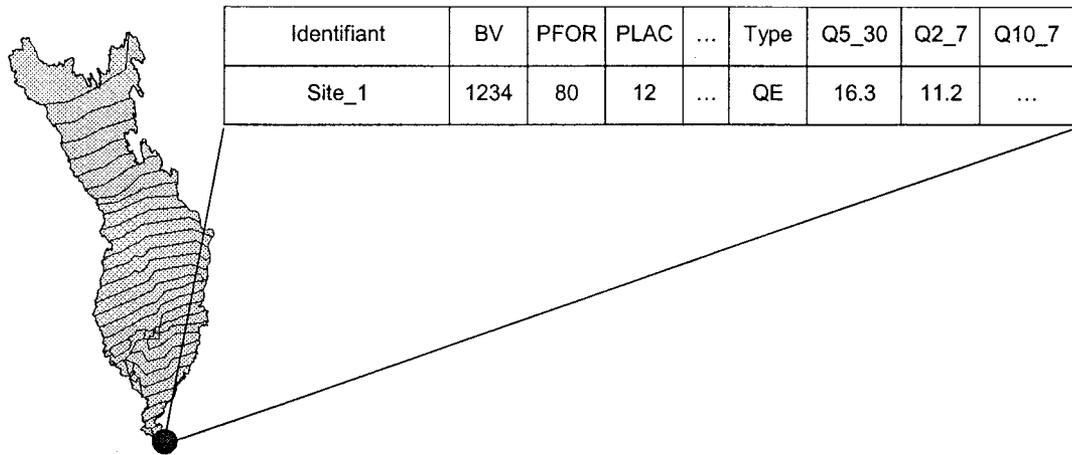
Tableau 4-2 : Inventaire des données matricielles

Grille	Source	Résolution	Dimension
Numéro de courbe moyen	AACAN	1 km	1826 x 1646
Lac (surface d'eau)	NRCAN	1 km	2024 x 2005
Forêt	NRCAN	1 km	2024 x 2005
Nombre de jours moyen où la température est > 27 °	MENV	1 km	1826 x 1638
Précipitation liquide moyenne à l'été-automne	MENV	1 km	1826 x 1637
Degré-jour en bas de 0°C	MENV	1 km	1826 x 1637
MNA brut	NRCAN	1 km	2090 x 1994
MNA modifié	INRS-ETE	1 km	2090 X 1994
Orientation des versants	INRS-ETE	1 km	2090 X 1994
Réseau d'accumulation	INRS-ETE	1 km	2090 X 1994

La couche vectorielle des sites cibles non-jaugés sera mise à jour continuellement (Tableau 4-3). Tous les résultats d'estimation régionale seront incorporés dans cette entité, elle contient la localisation cartographique du site cible, l'identifiant du site cible, le type d'estimation (ex. annuel, estival), les débits estimés sur toutes les périodes de retour, sa date de création et les variables utilisées. Cette couche cartographique demeure l'entité centrale du projet. Effectivement, les résultats de l'estimation seront incorporés dans cette table où la localisation géographique du site sera stockée ainsi que la période appropriée pour l'estimation régionale et d'autres informations susceptibles d'être attachées aux sites cibles (Tableau 4-3, figure 4-2).

Tableau 4-3 : Table des données pour les sites cibles non-jaugés

Identifiant	BV	PFOR	PLAC	...	Type	Q5_30	Q2_7	Q10_7
Site 1	1234	80	12	...	QE	16.3	11.2	...

Figure 4-2 : Représentation cartographique de la table des sites cibles non-jaugés

Cette table de données a été établie pour structurer les résultats de l'estimation régionale dans une optique de cartographie thématique. Pour chaque site cible de cette table, un identifiant unique ayant trois types d'estimation, i.e. annuel (QA), estival (QE) et hivernal (QH) sera attaché aux objets cartographiques (planimétrie X, Y du site). De plus, des requêtes dynamiques sur les attributs et les éléments cartographiques sur le territoire (sites cibles, stations jaugées, stations météorologiques, etc.) pourront être effectuées. À titre d'exemple, il sera possible d'identifier les stations hydrométriques, les sites cibles, les bassins versants, les structures hydrauliques et toute autre information géographique située en périphérie de l'endroit du site non-jaugé où l'on veut faire une estimation.

Plusieurs autres analyses thématiques pourront être faites à partir de ces couches cartographiques, on peut penser à des cartes de localisation des stations, des bassins versants, de l'occupation du sol ou des zones à risque pour les inondations pourraient également être produites avec les données de la présente étude de régionalisation. Par le fait même, les cartes produites par le CEHQ seront fonction de leurs besoins futurs en cartographie selon les différents projets (gestion de la qualité de l'eau, conservation de l'eau, évaluation de projet, analyse de l'impact des sécheresses, etc.).

Un outil d'aide à la décision a donc été configuré pour permettre une automatisation des fonctions de délimitation de l'aire de drainage, d'extraction des données (physiographiques et météorologiques) et de récupération des résultats de l'estimation afin de les diffuser.

4.2 Prototype de régionalisation

Pour améliorer l'efficacité du prototype de régionalisation, l'outil intègre deux programmes informatiques s'arrimant ensemble pour produire les valeurs de débits voulues. Pour ce faire, une extension en langage Avenue (langage de programmation d'ArcView 3.x) qui s'intègre dans l'interface du SIG au CEHQ (ArcView GIS 3.x) a été conçue. Ce programme se retrouve à la base du prototype de régionalisation et il offre plusieurs fonctionnalités à travers un menu interactif implanté dans le menu principal d'ArcView (figure 4-3). Les principales fonctions sont : l'outil de zoom sur une région hydrologique du MENV visée par l'analyse régionale, le choix du site cible, la délimitation du bassin de drainage lorsqu'il est inexistant, l'ouverture d'un bassin existant, l'extraction des variables explicatives (physiographiques/météorologiques) employées dans la procédure de régionalisation, le démarrage du programme de régionalisation et la récupération et la sauvegarde des résultats de l'estimation régionale dans une base de données à référence spatiale. Un autre programme a été produit, soit celui permettant d'appliquer l'approche d'analyse des corrélations canoniques (ACC) couplée à la régression multiple (RM). Il s'agit d'un exécutable qui a été développé dans MATLAB et qui sera appelé par le sous-menu « Démarrage de la régionalisation ». Il permet de déterminer le voisinage homogène du site cible en plus de procéder à l'estimation régionale des débits d'étiage (annuels, estivaux, hivernaux) (figure 4-4). Il faut souligner que le couplage SIG-ACC-RM est assez originale, puisque les méthodes que nous retrouvons dans la littérature n'utilisent pas la méthode des voisinages hydrologiques en conjonction avec les puissances d'un SIG (Charleux-Demargne, 2000 ; Sauquet, 2000 ; Javelle, 2001 ; Ries et Crouse, 2002).

Les fonctionnalités développées pour le CEHQ pourront servir à obtenir rapidement une carte du territoire couvert ainsi que les valeurs de débits associées. Les menus ont été structurés de telle façon qu'une personne ayant peu d'expérience en SIG puisse tirer profit de la richesse d'information que le système peut lui apporter. Cet environnement informatique convivial

favorise la curiosité du professionnel face à l'outil et améliore ses capacités à comprendre les principes de base reliés aux données sur le territoire. Un guide d'utilisation simple et clair a été réalisé pour en faciliter l'usage (Annexe 10). Il faut souligner que le prototype de régionalisation n'utilise pas toutes les variables explicatives considérées au départ (LAT, PMBV, etc.), cependant d'autres variables qui ne sont pas incluses dans le présent modèle pourraient éventuellement être intégrées dans l'outil.

Figure 4-3 : Menus intégrés dans l'interface principale d'ArcView

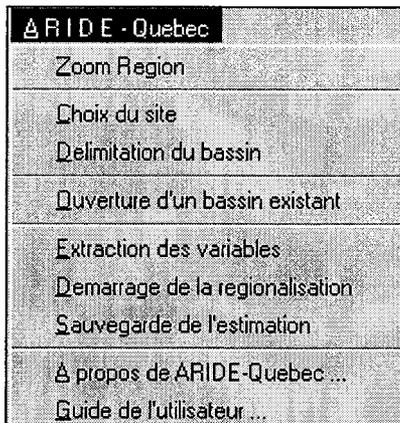
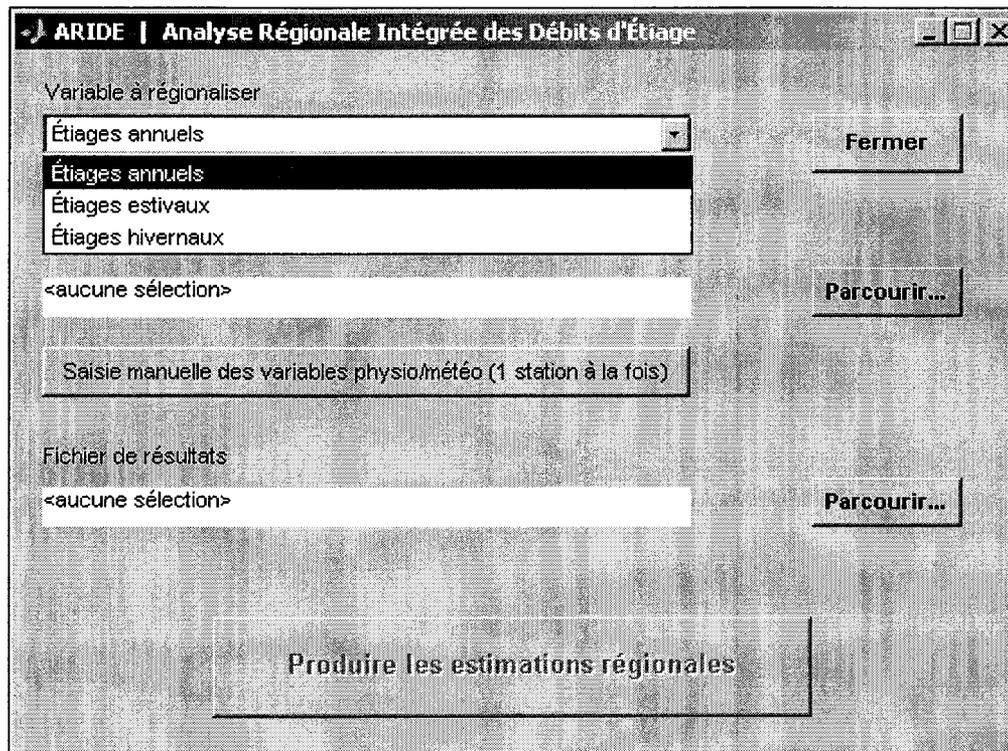


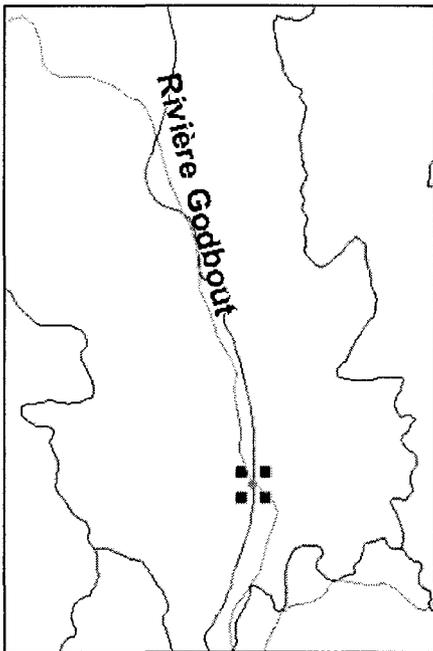
Figure 4-4 : Programme de régionalisation appelé par le SIG



4.2.1 Procédure d'estimation

Lorsqu'on effectue une estimation régionale à un site donné, il faut d'abord être en mesure de situer géographiquement (coordonnées géographiques, rivière drainée, stations hydrométriques ou météorologiques en périphérie) le site cible et le bassin hydrographique correspondant, soit à l'aide d'une carte topographique existante ou des cartes matricielles disponibles au CEHQ. Lorsque le site cible à analyser est bien localisé sur le cours d'eau, il s'agit de créer le site sur la carte à l'écran (tel qu'illustré à la figure 4-5).

Figure 4-5 : Détermination cartographique du site cible à analyser



Ensuite, lorsque la première étape est complétée, il faut savoir si la délimitation cartographique du bassin de drainage a déjà été numérisée (bassins de niveau 01 à 04 du CEHQ ou base de données du CEHQ) ou si elle devra être exécutée, soit de façon manuelle avec une table de numérisation ou à partir d'une procédure automatique de délimitation de l'aire de drainage (voir section 4.2.2). La possibilité d'ouvrir une couche cartographique d'un bassin déjà existant dans la base de données du CEHQ sera également offerte dans les fonctionnalités du programme. En fait, le bassin cible sera l'entité (polygone) qui permettra d'extraire les variables explicatives du site (exutoire) en question.

Donc, lorsque les limites du bassin versant sont générées (automatiquement ou manuellement), les variables explicatives peuvent être extraites. Il s'agit de sélectionner le bassin cible et de générer les valeurs associées aux variables météorologiques et physiographiques.

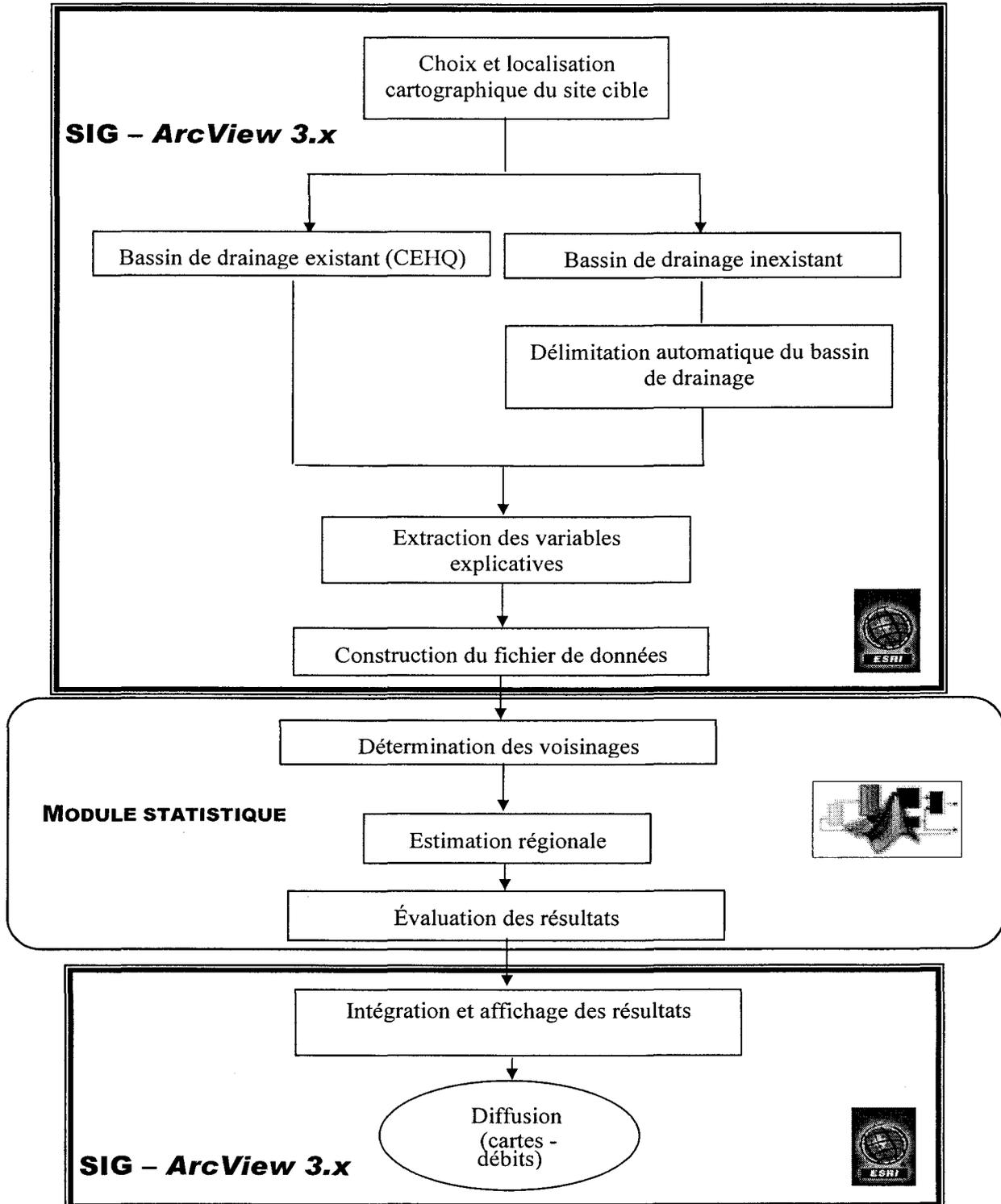
Par la suite, le module statistique de régionalisation (figure 4-4) utilise les données extraites pour déterminer les stations jaugées voisines du site d'intérêt et génère la démarche d'estimation régionale, selon le type de variable hydrologique souhaité (étiages annuels, estivaux, hivernaux) et ce, sur plusieurs périodes de retour (2, 5 et 10 ans). Il faut noter que ce module de régionalisation peut être utilisé sans les outils de géomatique qui ont été développés, mais la précision de l'estimation sera beaucoup moins fiable et le risque d'erreur sera grandement augmenté. Ce programme offre donc la possibilité à l'utilisateur de saisir manuellement les valeurs d'entrée reliées aux variables explicatives qu'il a pu récolter et d'obtenir une estimation régionale sans sauvegarder le résultat dans la base de données centralisée.

Ensuite, la vérification des résultats de l'estimation peut s'effectuer. On peut alors y visualiser à l'écran les valeurs du R-carré pour chaque estimation de même que les stations avoisinantes utilisées. Ainsi, lorsque les principales étapes d'entrée sont complétées, les résultats d'estimation du site cible sont stockés dans la base de données et peuvent être affichés ensuite sur une carte à l'écran. Pour schématiser les différentes étapes à exécuter, la figure 4-6 illustre les différents blocs thématiques qui interviennent dans cette démarche de cartographie des étiages. Pour obtenir plus de détails sur certaines de ces étapes, le lecteur est référé à l'Annexe 10 qui contient toutes les directives pour mener à bien l'utilisateur dans l'outil de régionalisation.

Enfin, avec les derniers développements informatiques dans les SIG liés à l'analyse tridimensionnelle du territoire, les modèles numériques d'altitude permettent maintenant de générer les limites des bassins versants de façon automatique (voir section 4.2.2), de créer des cartes de flux hydrologique, de produire des profils de rivières en tout point, de produire des animations à vol d'oiseau le long des cours d'eau et de simuler des événements extrêmes (ESRI, 2002). Les projets en géomatique appliquée à l'hydrologie peuvent porter, entre autres, sur l'analyse des éléments humains ou naturels qui peuvent être affectés par la qualité de l'eau d'une rivière lors d'un débit d'étiage exceptionnel. Dans ce type d'application, les valeurs de débits

pourront être prises en compte dans les modèles de simulation. Ceci représente un des exemples d'une approche "géomatisée" dans un but de gestion territoriale des ressources en eau.

Figure 4-6 : Organigramme de la méthodologie de régionalisation



4.2.2 Délimitation automatique du bassin versant

L'aire de drainage est une variable fondamentale dans toutes les études régionales et le SIG permet ce calcul de superficie d'une façon instantanée. Par contre, si les limites du bassin versant n'existent pas dans la base de données, la tâche devient plus compliquée, c'est pourquoi une démarche conviviale et automatique a sa raison d'être dans ce projet. Le travail de délimitation de l'aire de drainage est exécuté majoritairement par des mesures établies par l'interprète à l'aide d'une carte topographique en papier ou en format numérique. Par contre, avec l'avènement des traitements informatiques dans les SIG avec les données d'altitude, il est maintenant possible avec un modèle (MNA) représentant, sur une surface continue, les variations d'altitude, de produire des cartes d'écoulement et de délimiter automatiquement l'aire de drainage pour n'importe quel pixel sur le territoire. En effet, la connaissance de l'orientation des pentes, de la direction des versants et du parcours des rivières sont des informations que l'on peut extraire d'un MNA et qui permettent, entre autres, de déduire le chemin parcouru par une goutte d'eau à la surface. Les limites des applications du MNA en hydrologie n'ont pas encore été atteintes, puisque le MNA est une source d'information riche et en plein développement. En fait, un MNA représente le relief sur une matrice où chaque pixel a une valeur numérique d'élévation (figure 4-7).

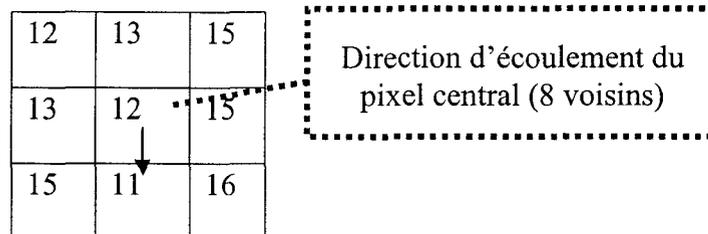
Figure 4-7 : Exemple d'une matrice d'élévation

12	13	15	17	23	25
13	11	15	17	19	24
15	10	16	18	30	31
12	10	9	15	27	37

À partir de cette représentation du relief en valeurs numériques, les outils informatiques intégrés dans les SIG peuvent, pour chaque pixel, calculer la pente, l'orientation (nord-sud-est-ouest) et le nombre de pixels qu'il draine en un point. En utilisant ces deux dernières informations, on peut ainsi, pour chaque pixel dans le modèle, calculer à partir des pixels voisins, la direction d'écoulement et le réseau d'accumulation. L'algorithme automatique le plus robuste, permettant de générer la limite de l'aire de drainage avec une analyse de l'écoulement en huit directions

selon le principe de descente maximale, est celui qu'on nomme D8 (Charleux-Demargne, 2001). Cet algorithme est celui qui a été implanté dans l'environnement d'ArcView 3.x, c'est pourquoi il a été préféré dans cette étude (ESRI, 2002). La procédure choisie fait appel à l'analyse des huit voisins les plus proches du pixel cible pour déterminer l'écoulement en relation avec l'altitude (figure 4-8). Il faut souligner que pour tirer profit de ces analyses spatiales dans ArcView, l'installation de l'extension gratuite « Hydrologic Modeling (sample) » est requise.

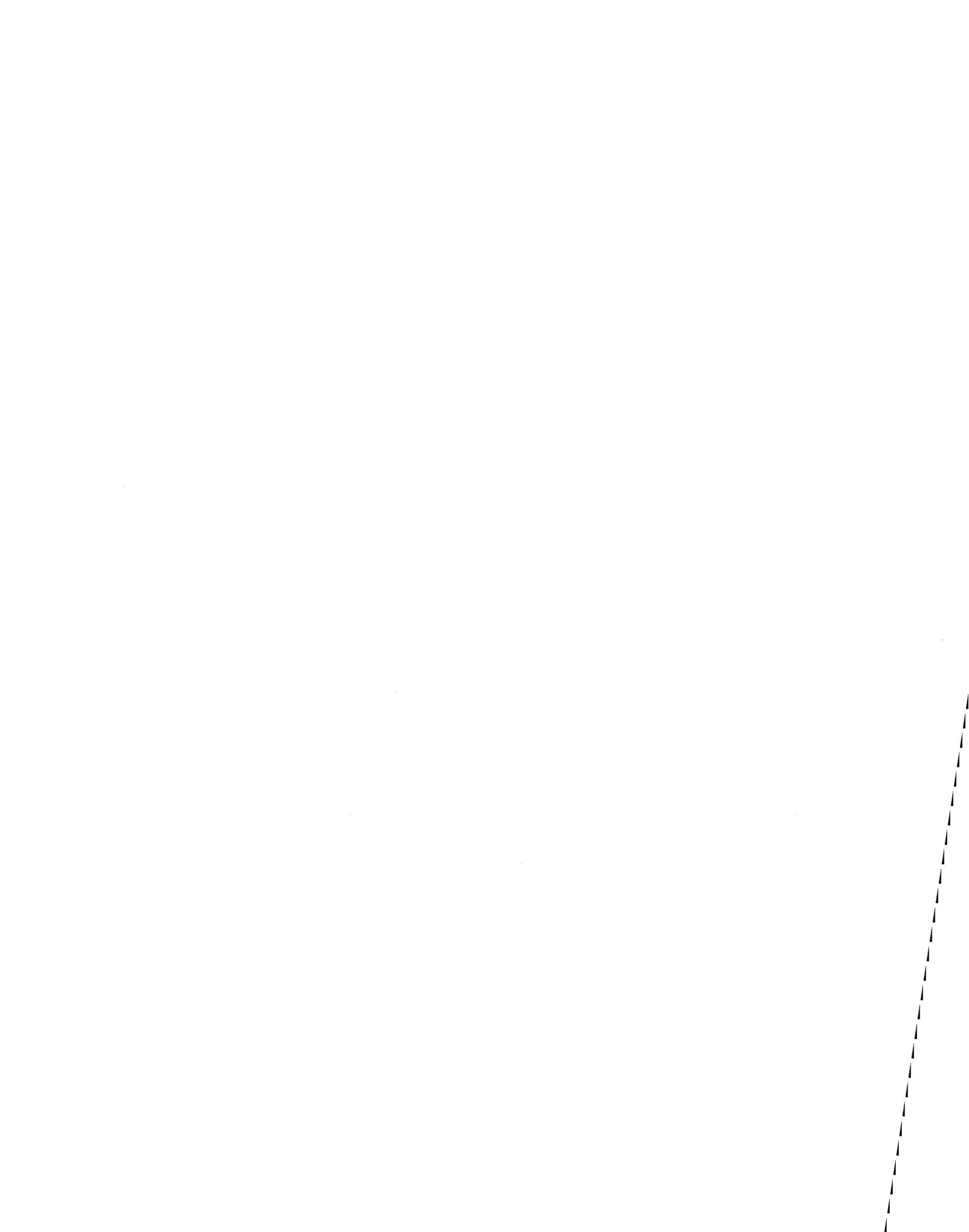
Figure 4-8 : Illustration de l'algorithme D8 pour déterminer l'écoulement avec le MNA



De cette façon, il est possible en cliquant sur l'endroit où l'on veut avoir une estimation, d'obtenir tous les pixels qui s'écoulent vers le site cible et indirectement les limites de son bassin de drainage. Malgré cette méthode simple de délimitation de l'aire de drainage, plusieurs études ont démontré que l'algorithme D8 pouvait avoir quelques défauts surtout en zone de faible pente (Gurnell et Montgomery, 2000 ; Charleux-Demargne, 2001). Pour pallier à ces erreurs dans le MNA, on peut, à l'aide de diverses couches informationnelles, pousser l'algorithme à mieux répondre selon la réalité du terrain (Charleux-Demargne, 2001). Dans notre cas, nous possédons déjà la couche des cours d'eau ainsi que les grandes limites des bassins versants. À partir de ces informations cartographiques, on peut soustraire une valeur arbitraire (100) du MNA au niveau des pixels correspondant aux cours d'eau et additionner une autre valeur (200) aux pixels représentant les limites des grands bassins. Cette méthode a été proposée pour pallier au problème des cours d'eau parallèles au tronçon principal et des branches de cours d'eau sans issue qui apparaissent dans les dépressions ou les régions de plaines (Sauquet, 2000 ; Charleux-Demargne, 2001). De plus, une hiérarchisation du réseau hydrographique selon son altitude a également été utilisée pour affecter la structure du MNA. La méthode n'affecte en rien la configuration globale du MNA, mais agit plutôt localement. Le résultat de cette transformation

permet au SIG (ArcView 3.x) de prendre les meilleures décisions dans la délimitation de l'aire de drainage et de conserver une certaine topologie entre les limites des bassins versants (pas de superposition dans les limites de bassins). Cet algorithme n'étant pas infaillible, une validation est donc nécessaire pour la délimitation adéquate du bassin cible.

Cette procédure d'automatisation de l'aire de drainage a donc été intégrée dans les fonctionnalités du programme de régionalisation. Elle utilise comme base informationnelle le MNA modifié couvrant tout le Québec habité et ayant une résolution de 100 m (ce qui n'était pas le cas au moment de la remise de la première version de ce rapport, i.e. qu'un travail de migration de l'échelle au 1 : 1 000 000 vers l'échelle au 1 : 100 000 a été effectué durant l'automne 2004, ce qui fait maintenant l'objet de l'Annexe 11 du présent document). Enfin, la méthode de numérisation manuelle, étant plus longue et plus fastidieuse, demeure la technique la plus exacte, mais compte tenu des besoins de régionalisation, la démarche automatisée demeure amplement suffisante.



5 CONCLUSIONS

Les résultats obtenus dans le cadre de ce projet d'estimation régionale des débits d'étiage pour le Québec habité ont permis d'en arriver aux conclusions suivantes:

- La méthode de régionalisation des étiages combinant la classification ascendante hiérarchique et la régression multiple (CAH-RM) conduit à des résultats acceptables. Cependant, la méthode de régionalisation faisant plutôt appel à l'analyse canonique des corrélations combinée à la régression multiple (ACC-RM) permet d'obtenir des estimations plus précises.
- L'approche par ACC pour la détermination des régions homogènes est donc à privilégier par rapport aux approches par la CAH et par les L-moments, cette dernière se révélant d'ailleurs plutôt inappropriée pour la régionalisation des débits d'étiage au Québec.
- L'utilisation d'une variable de température (NJH27) et d'une variable caractérisant les propriétés du sol (NCM) permet d'améliorer les estimations des débits d'étiage pour les périodes annuelle et estivale.
- La méthodologie de régionalisation découlant de la combinaison ACC-RM est celle qui a été implantée dans l'outil géomatique développé pour l'estimation des débits d'étiage pour le Québec habité.
- De plus, contrairement à ce qui avait été constaté lors de l'étude de la régionalisation des crues (Gignac et al., 2003), les débits d'étiage ne semblent pas être influencés outre mesure par la taille du bassin versant.
- La base cartographique utilisée dans ce projet a une précision au-delà du 1 : 1 000 000, donc si le MENV détient d'autres données spatiales plus précises, il pourra dans le futur les remplacer aux données présentement utilisées. Or une mise à jour de la base cartographique vers une échelle de 1 : 100 000 a été complétée à l'automne 2004 par Nicolas Gignac. Un compte-rendu détaillé de cette mise à jour est d'ailleurs adjoint au présent document à l'Annexe 11.

- L'application de la méthode développée dans ce rapport peut être utilisée sans les outils de géomatique, cependant les résultats obtenus de cette façon seront évidemment nettement différents et la consistance dans les estimations risquent d'en être affectée sérieusement. Une application dans Internet pourrait évidemment régler ce problème. Par exemple, un usager voulant connaître sa valeur d'étiage critique pourrait n'avoir qu'à cliquer sur une carte, disponible par l'entremise d'un site web, à l'endroit qui l'intéresse et ainsi obtenir une estimation régionale retransmise par voie Internet sécurisée, sans toutefois bénéficier d'outils de géomatique sur son poste de travail.
- Le format de données utilisé dans le cadre de ce projet pourra facilement s'intégrer dans le système d'information du MENV.
- Une période d'intégration devra être planifiée pour tester l'outil de régionalisation des débits d'étiages dans le SIG du CEHQ.
- L'outil de régionalisation des débits d'étiage créé dans le cadre de ce projet présente quelques limites, soit le nombre de variables explicatives utilisées, la précision des données (résolution de 1km → 100 m) ainsi que la qualité des données utilisées.
- Bien que de bons résultats d'estimation aient été obtenus, il est fortement conseillé de toujours procéder à la validation de ces derniers et de s'assurer de bien connaître les caractéristiques du site à l'étude, et ce, dans le but d'éviter de mauvaises interprétations des résultats.

RECOMMANDATIONS

Quelques recommandations ont par ailleurs été établies dans le but d'assurer une bonne gestion en ce qui concerne l'estimation régionale des débits d'étiage:

- Parmi les stations problématiques supprimées de la base de données, plusieurs font parties des régions hydrographiques 02 et 03. Il est donc impératif d'être prudent lors du calcul des estimations pour des cours d'eau provenant de ces régions du Québec.

- Il serait intéressant d'approfondir l'utilisation de variables caractérisant le sol en ce qui concerne l'étude des étiages. La variable utilisée dans ce projet (NCM) a permis l'amélioration des résultats, mais il existe peut-être un indice de sol plus approprié qui permettrait d'expliquer encore mieux la variabilité des débits d'étiage.
- Ne pas perdre de vue qu'afin d'interpréter correctement et de bien utiliser les estimations découlant de la méthodologie développée dans cette étude, il est important de rester conscient des limites de cette approche (résultat d'apport naturel uniquement, altération des débits par les infrastructures humaines, etc.).
- Assurer la mise à jour continuelle de l'information et enrichir la base de données pour que le système ne demeure pas statique.
- Il serait aussi intéressant d'utiliser des cartes interactives à travers un réseau Intranet étendu permettant la localisation du site cible et la production d'estimations régionales. Cela pourrait être une stratégie très enrichissante pour les demandes externes en régionalisation.

REMARQUES CONCERNANT LA MISE À JOUR DE L'OUTIL GÉOMATIQUE

Notons d'emblée que ces remarques s'appliquent autant à l'outil de régionalisation des crues (ARC-Québec [préalablement développé dans le cadre du même projet PARDE], voir Gignac, 2003) qu'au nouvel outil ARIDE pour la régionalisation des étiages. Des améliorations à ces deux outils peuvent être apportées à différents niveaux.

Tout d'abord, il est recommandé de mettre à jour aux 5 ans environ les divers fichiers contenant les résultats de l'analyse fréquentielle locale pour les stations jaugées retenues. Étant donné qu'il peut être assez long de repasser au travers de toutes les étapes de l'analyse fréquentielle, telles que décrites dans Kouider et al. (2002) pour les crues et dans Herrera et al. (2003) pour les étiages, l'idée de refaire ce travail par période de 5 ans semble un bon compromis. En effet, l'ajout d'une seule valeur aux séries annuelles de débits maxima et minima ne peut qu'avoir un

impact très faible sur les valeurs des quantiles locaux, bien que d'un autre côté, puisque la longueur des diverses séries est généralement assez courte (en particulier pour les étiages), ce travail de mise à jour sur une base périodique n'est pas à négliger pour autant.

Ainsi, après avoir ajouté les nouvelles valeurs disponibles aux séries de maximums annuels pour les crues, de même qu'après avoir extrait les plus récentes valeurs d'étiages 7 jours et 30 jours (ce qui peut être fait à partir de la base de données journalières du MENV), une personne désignée au CEHQ disposant du logiciel HYFRAN pourrait alors entreprendre à nouveau le processus d'analyse fréquentielle locale. Il est important de souligner ici que toutes les étapes de la procédure devront être reprises depuis le début. À commencer par les tests d'indépendance, de stationnarité et d'homogénéité, car il se pourrait que l'ajout de nouvelles valeurs pour une station donnée fasse en sorte que celle-ci ne respecte plus les hypothèses de base nécessaires à l'ajustement des diverses distributions statistiques (quitte à la retirer de la base de données). Il faudra ensuite réévaluer le choix de la meilleure loi, bien qu'à priori on puisse s'attendre à retenir les mêmes lois qu'auparavant dans la majorité des cas (on portera alors une attention plus particulière aux courtes séries).

Enfin, une fois qu'on a complété l'estimation des quantiles pour chaque période de retour et chaque saison considérée (i.e., les périodes annuelle, printanière et estivale-automnale pour les crues, puis annuelle, hivernale et estivale pour les étiages), on peut procéder à l'édition des fichiers texte correspondants. Or, il est bon de noter ici que depuis la mise à jour de l'échelle (afin de passer d'une résolution de 1km à 100 m) des outils ARC-Québec et ARIDE, telle que décrite à l'Annexe 11, les répertoires d'installation des deux outils ont été reconfigurés selon le schéma illustré à la page A11-19. Ainsi, les fichiers à éditer devraient se retrouver sous les répertoires "C:\arcgis\ARC-ARIDE\Workspace\EXECUTABLE\Crue" (dans le cas des crues) et "C:\arcgis\ARC-ARIDE\Workspace\EXECUTABLE\Etiage" (dans le cas des étiages). Plus précisément, on s'intéresse aux fichiers suivants:

ANL_V_PB.prn → crues annuelles

PRINT_V_PB.prn → crues printanières

ETE_V_PB.prn → crues estivales-automnales

VANL_V_0304.prn → Volumes annuels (régions 03 et 04 uniquement)

VPRINT_V_0304.prn → Volumes printaniers (régions 03 et 04 uniquement)

VETE_V_03040.prn → Volumes estivaux (régions 03 et 04 uniquement)

annuel.txt → étiages annuels

hiver.txt → étiages hivernaux

ete.txt → étiages estivaux

Dans tous les cas, il est important de ne pas modifier les noms de ces fichiers. Il suffit donc de respecter le format de ces divers fichiers texte, i.e. une ligne par station, où l'on entre tout d'abord le numéro de la station, suivi des variables physiographiques/météorologiques retenues selon le cas (telles qu'identifiées au haut de chaque fichier), puis des valeurs des quantiles locaux d'intérêt. Les différentes entrées peuvent être séparées soit par des espaces ou des tabulations. Il est également important que les deux premières lignes demeurent inchangées dans tous les fichiers. Le code -99.00 est utilisé dans les fichiers reliés aux étiages lorsque certains quantiles ne peuvent être estimés. L'utilisateur est donc libre de retirer et/ou d'ajouter des stations en tout temps, tout en prenant soin de bien spécifier les valeurs des variables physiographiques/météorologiques lorsqu'une nouvelle station est ajoutée, sans quoi l'outil de régionalisation ne pourra pas fonctionner correctement.

D'autre part, des changements au module de régionalisation développé dans l'environnement MATLAB peuvent être apportés de la part de l'INRS, afin de le rendre plus flexible. Étant donné qu'il est fourni sous forme compilée, le transfert au CEHQ des éventuelles améliorations apportées au module (e.g. l'ajout des intervalles de confiance associés aux estimations régionales, la possibilité de retirer manuellement certaines stations des voisinages déterminés de façon automatique) peut se faire facilement dans ce contexte, puisque cela se résume simplement à écraser les anciens fichiers exécutables qui se retrouvent dans les mêmes répertoires que ceux mentionnés ci-haut (i.e. "C:\arcgis\ARC-ARIDE\Workspace\EXECUTABLE\Crue" et "C:\arcgis\ARC-ARIDE\Workspace\EXECUTABLE\Etiage").

Enfin, en ce qui concerne l'aspect géomatique intégré aux outils de régionalisation, le CEHQ devra désormais chercher son expertise à l'extérieur de l'équipe de la Chaire de recherche du Canada en estimation des variables hydrologiques pour de futurs développements à ce niveau. Effectivement, la conception d'ARC-Québec et d'ARIDE est l'œuvre de Nicolas Gignac, qui a été recruté spécialement pour ses compétences dans le domaine. Le tout s'est réalisé dans le cadre d'un projet de maîtrise pour M. Gignac, qui a toutefois décidé de poursuivre sa carrière à l'extérieur du pays maintenant que le projet est arrivé à son terme. Il est toutefois entendu avec le CEHQ que l'INRS assurera un support technique au besoin pour les usagers du MENV des deux outils dans leur forme actuelle (la personne désignée pour assumer cette tâche étant Karem Chokmani, tel que mentionné à l'Annexe 11).

RÉFÉRENCES

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

Caron, C., 2001 : Gestion de données spatiales. Note de cours : SCG-65822. Département des Sciences géomatiques, Université Laval, 102 p.

Chang, M., P.G. Boyer, 1977 : Estimates of low flows using watershed and climatic parameters. *Water Resources Research*, **13(6)**, 997-1001.

Charleux-Demargne, J., 2001 : *Qualité des Modèles Numériques de Terrain pour l'Hydrologie : Application à la Caractérisation du Régime de Crues des Bassins Versants*. Université de Marne-la-Vallée, Cemagref-Engref, Marseille, 259 p.

Comité mixte des organismes intéressés à la géomatique, 1995 : La géomatique au Canada : Nouvelle norme canadienne pour le répertoire de métadonnées. Publication officielle du comité mixte des organismes intéressés à la géomatique, **vol. 6 no. 2**, hiver 1995, 1 p.

Dalén, J., 1987 : Algebraic bounds on standardized sample moments. *Statistical and Probability Letters*, **5**, 329-331.

Dalrymple, T., 1960 : Flood frequency analysis. *US Geol. Surv. Water Supply Pap.*, 1543A.

Digital Chart of the World, 2002 : Page Web de distribution des données. Penn State University, www.maproom.psu.edu/dcw/.

Dingman, S.L. et S.C. Lawlor, 1995 : Estimating low flow quantiles from drainage basin characteristics in New Hampshire and Vermont. *Water Resources Bulletin*, **31(2)**, 243-256.

Durrans, S.R. et S. Tomic, 1996 : Regionalization of low-flow frequency estimates : an Alabama case study. *J. Amer. Water Resour. Assoc.*, **32(1)**, 23-37.

Farvolden, R.N., 1963 : Geologic controls on groundwater storage and base flow. *Journal of Hydrology*, **1**, 219-249.

Fetter, C.W., 1994 : *Applied Hydrology*. Macmillan College Publishing Company.

Gignac, N., T.B.M.J. Ouarda, K. Chokmani, H. Gingras, B. Bobée, 2003 : Régionalisation et cartographie des crues. INRS-ETE, Rapport de recherche No R-636-f1.

Girard, C, T.B.M.J. Ouarda et B. Bobée, 2000 : Une approche par classification à la constitution de voisinages homogènes basés sur l'ACC. INRS-ETE, Rapport de recherche No R-576.

Greenwood, J.A., J.M. Landwehr, N.C. Matalas et J.R. Wallis, 1979 : Probability weighted moments : definition and relation to parameters of several distributions expressible in inverse form. *Water Resources Research*, **15**, 1049-1054.

Gregory, K.J. et D.E. Walling, 1973 : *Drainage basin form and process : a geomorphological approach*. Edward Arnolds Publishers.

GREHYS (Groupe de REcherche en HYdrologie Statistique), 1996 : Inter-comparison of regional flood frequency procedures for Canadian rivers. *Journal of Hydrology*, **186**, 85-103.

Gurnell, A.M. et D.R. Montgomery, 2000 : *Hydrological applications in GIS*. Jonh Wiley, New-York, 176 p.

Herrera, E., T.B.M.J. Ouarda, H. Gingras et B. Bobée, 2003 : Développement d'un modèle hydrologique visant l'estimation des débits d'étiage pour le Québec habité. INRS-ETE, Rapport de recherche No R-684-e1.

Herrera, E., T.B.M.J. Ouarda, V. Jourdain, H. Gingras et B. Bobée, 2004 : Développement d'un modèle hydrologique visant l'estimation des débits d'étiage pour le Québec habité. INRS-ETE, Rapport de recherche No R-684-e2.

Hosking, J.R.M. et J.R. Wallis, 1988 : The effect of intersite dependence on regional flood frequency analysis. *Water Resources Research*, **24**, 588-600.

-
- Hosking, J.R.M. et J.R. Wallis, 1993 : Some statistics useful in regional frequency analysis. *Water Resources Research*, **29(2)**, 271-281.
- Hosking, J.R.M., 1990 : L-moments : Analysis and estimation of distributions using linear combinations of order statistics. *Journal of the Royal Statistical Society*, **B-52**, 105-124.
- Hosking, J.R.M., et J.R. Wallis, 1997 : *Regional frequency analysis*. Cambridge University Press.
- Javelle, P., 2001 : *Caractérisation du régime des crues : le modèle débit-durée-fréquence convergent*. Approche locale et régionale. Institut National Polytechnique de Grenoble, Cemagref, Marseille, 267 p.
- Kouider, A., H. Gingras, T.B.M.J. Ouarda, Z. Ristic-Rudolf et B. Bobée, 2002 : Analyse fréquentielle locale et régionale et cartographie des crues au Québec. INRS-ETE, Rapport de recherche No R-627-e1.
- Kroll, C.N. et J.R. Stedinger, 1998 : Regional hydrologic analysis: ordinary and generalized least squares revisited. *Water Resources Research*, **34(1)**, 121-128.
- Kroll, C.N. et M. Voyer, 2002 : Probability distribution of low streamflow series in the United States. *J. Hydrologic Eng.*, **7(2)**, 137-146.
- Landwehr, J.M., N.C. Matalas et J.R. Wallis, 1979 : Probability-weighted moments compared with some traditional techniques in estimating Gumbel parameters and quantiles. *Water Resources Research*, **15**, 1055-1064.
- Lebart, L., A. Morineau et K.M. Warwick, 1984 : *Multivariate Descriptive Statistical Analysis*. J. Wiley & Sons, 229 pp.
- Lettenmaier, D.P. et K.W. Potter, 1985 : Testing flood frequency estimation methods using a regional flood generation model. *Water Resources Research*, **9**, 1534-1542.
- Lettenmaier, D.P. J.R. Wallis et E.F. Wood, 1987 : Effect of regional heterogeneity on flood frequency estimation. *Water Resources Research*, **23**, 313-323.

Loganathan, G.V., P. Mattejat, C.Y. Kuo et M.H. Diskin, 1986 : Frequency analysis of low flows : hypothetical distribution methods and a physically based approach. *Nordic Hydrology*, **17**, 129-150.

Mahalanobis, P.C., 1936 : On the generalized distance in statistics. *Proc. Natl. Inst.Sci. India*, **12**, 49-55.

Muirhead, R. J. 1982 : *Aspects of multivariate statistical theory*. J. Wiley, 673 pp.

Nathan, R.J. et T.A. McMahon, 1990 : Identification of homogeneous regions for the purposes of regionalisation. *Journal of Hydrology*, **121**, 217-238.

Ouarda, T.B.M.J., M. Haché, P. Rasmussen, and B. Bobée., 1998 : Régionalisation des événements hydrologiques extrêmes. INRS-ETE, Rapport de recherche R-534, 181 p.

Ouarda, T.B.M.J., C. Girard, G.S. Cavadias, and B. Bobée., 2001 : Regional flood frequency estimation with canonical correlation analysis. *J. Hydrol.* 254: 157-173.

Potter, K.W. et D.P. Lettenmaier, 1990 : A comparison of regional flood frequency estimation methods using resampling method. *Water Resources Research*, **26**, 415-426.

Ries III, K.G. et P.J. Friesz, 2000 : Methods for estimating low-flow statistics for Massachusetts streams. USGS, Water-Resources Investigations Report 00-4135.

Ries, K.G. et M.Y. Crouse, 2002 : The National flood frequency program, version 3 : A Computer program for estimating Magnitude and Frequency Floods for Ungauged Sites. U.S. Geological Survey Water-Resources Investigations, Report 02 02-4168, 42 p.

Rifai, H.S., S.M. Brock, K.B. Ensor et P.B. Bedient, 2000 : Determination of low-flow characteristics for Texas streams. *Journal of Water Resources Planning and Management*, **126(5)**, 310-319.

Sauquet, E., 2000 : *Une cartographie des écoulements annuels et mensuels par la topologie du réseau hydrographique*. CEMAGREF-Lyon, Lyon, 352 p.

-
- Smakhtin, V.U., 2001 : Low flow hydrology: a review. *Journal of Hydrology*, **240**, 147-186.
- Stedinger, J.R. et G.D. Tasker, 1985 : Regional hydrologic analysis 1: ordinary, weighted and generalized least squares compared. *Water Resources Research*, **21(9)**, 1421-1432.
- Stedinger, J.R. et G.D. Tasker, 1986 : Regional hydrologic analysis 2: model-error estimation of sigma an log-Pearson type 3 distributions. *Water Resources Research*, **22(10)**, 1487-1499.
- Tasker, G.D., 1980 : Hydrologic Regression with weighted least squares. *Water Resources Research*, **16(6)**, 1107-1113.
- Thériault, M., 1994 : *Concepts fondamentaux : Système d'information géographique*. Département de géographie, Université Laval, Ste-Foy, 179 p.
- Thomas, D.M. et M.A. Benson, 1970 : Generalization of streamflow characteristics from drainage basin characteristics. USGS, Water-Supply Paper No 1975.
- Vogel, R.M. et C.N. Kroll, 1990 : Generalized low flow frequency relationships for ungaged sites in Massachusetts. *Water Resources Bulletin*, **26(2)**, 241-253.
- Vogel, R.M. et C.N. Kroll, 1992 : Regional geohydrologic-geomorphic relationships for the estimation of low flow statistics. *Water Resources Research*, **28(9)**, 2451-2458.
- Wright, C.E., 1970 : Catchment characteristics influencing low flows. *Water and Water Engineering*, **November**, 468-471.
- Zecharias, Y.B. et W. Brutsaert, 1988 : The influence of basin morphology on ground water outflow. *Water Resources Research*, **24(10)**, 1645-1650.
- Département d'agriculture des Etats-Unis, 2004 : (SCS curve number method), <http://www.ecn.purdue.edu/runoff/documentation/scs.htm>.
- Environmental System Research Institute, ESRI, 2002 : Page Web de la compagnie; www.esri.com.

Ministère de l'Environnement du Québec, 2001 : Banque de données météorologiques du ministère de l'Environnement du Québec. Gouvernement du Québec.

Ministère de l'Environnement du Québec, 2002 : Banque de données hydriques du ministère de l'Environnement du Québec. Gouvernement du Québec.

Ministère de l'agriculture et de l'agroalimentaire du Canada, 1998 : (pédo-paysage du Canada), <http://sis.agr.gc.ca/siscan/nsdb/slc/intro.html>.

Ministère des Ressources Naturelles du Canada, 2001 : CANADA3D. Modèle numérique d'altitude avec une résolution de 1 km pour tout le Canada.

Ministère des Ressources Naturelles du Canada, 2002 : Cartes vectorielles de l'Atlas du Canada. VMAP0 et cartes de base de l'Atlas du Canada. 1 : 1 000 000, 1 : 2 000 000.

ANNEXES

Annexe 1 : Liste des stations utilisées

010101	024013	040409	051011	072302	090606
010801/010802	030101	040810	051301	072502	090607
010901/010902	030103	040814	051502	073301/073303	090609
011001/011003	030214/030234	040830	052201	073502/073503	090610
011201	030215	041301	052202/052219	073801	090613
011507	030219	041901/041902	052203/052212	073802	092703
011508	030238	041903	052228	074601	092704
011601	030242	042103	052231	074701	092706
020302	030262	042606	052233	074901	092707
020401/020404	030282	042607	052601	074902	092708
020502	030286	043008	052801	074903	092711
020601/020602	030304	043009/043012	052803	075601	092715
020802	030309	043202	052805	075701/075702	092717
021407	030314	046706	052806	075703	092722
021502	030316	046707	060101	075704	
021601	030335	050116/050144	060601	076101	
021701/021702	030339	050117/050135	061020	076201	
021915	030340	050118	061022	076601	
022003	030341	050119	061502	080101/080102	
022301	030343	050301	061602	080104	
022504/022507	030401	050302/050304	061801	080701	
022701/022704	030402/030403	050305	061901	080703	
022703	030415	050402	061905	080704	
023101/023106	030420	050408	061906	080705/080717	
023301/023303	030421	050409	061909	080707	
023401	030901/030905	050701	062101	080718	
023402	030907	050812	062102	080801	
023403	031401	050813	062209	080809	
023422	040115	051001	062701	081002	
023426	040129	051002	062802	081006	
023429	040201	051003	070201	081007	
023701	040202/040204	051004	070202	081101	
024001/024007	040212	051005	070401	090601	
024003	040401/040406	051006	071401	090602	
024010	040402	051007	072301	090605	

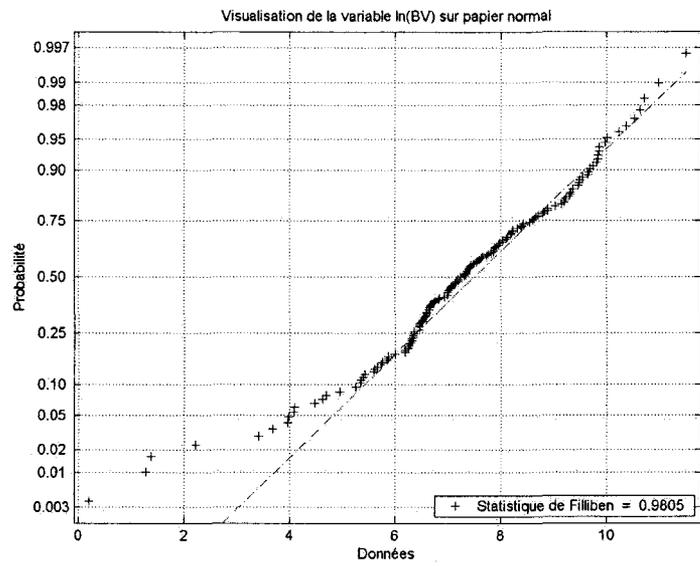
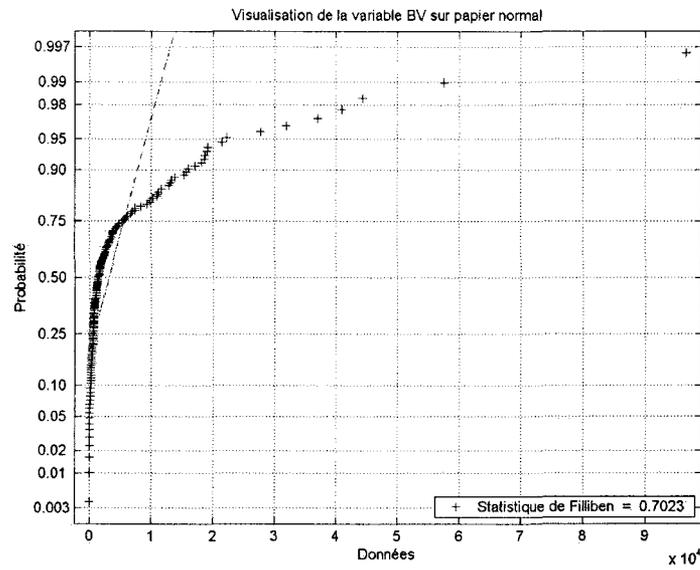


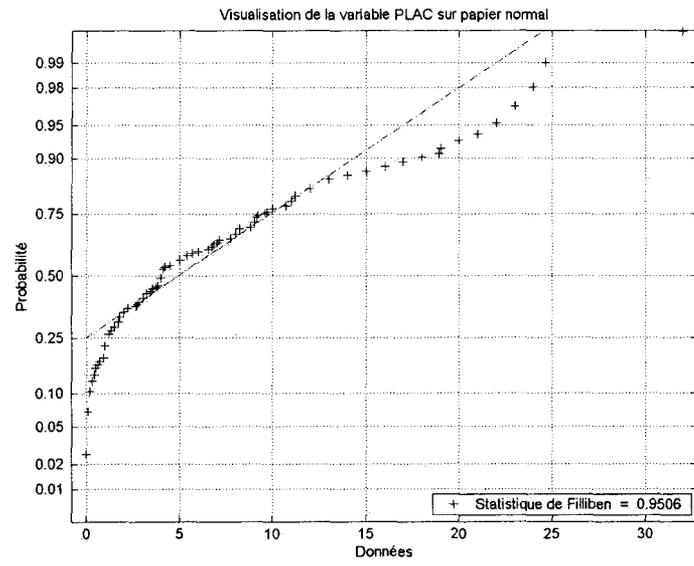
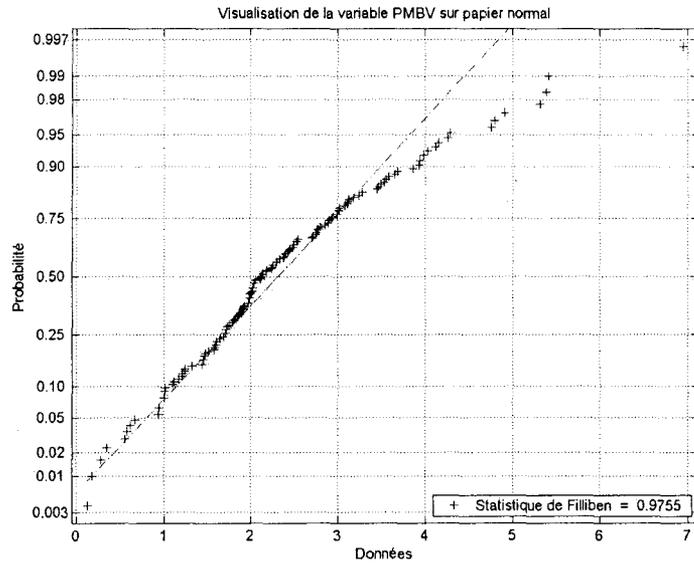
Stations problématiques

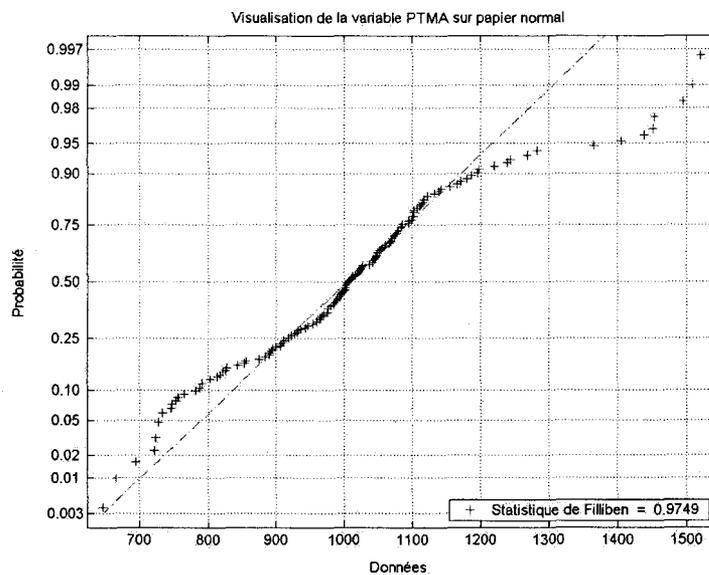
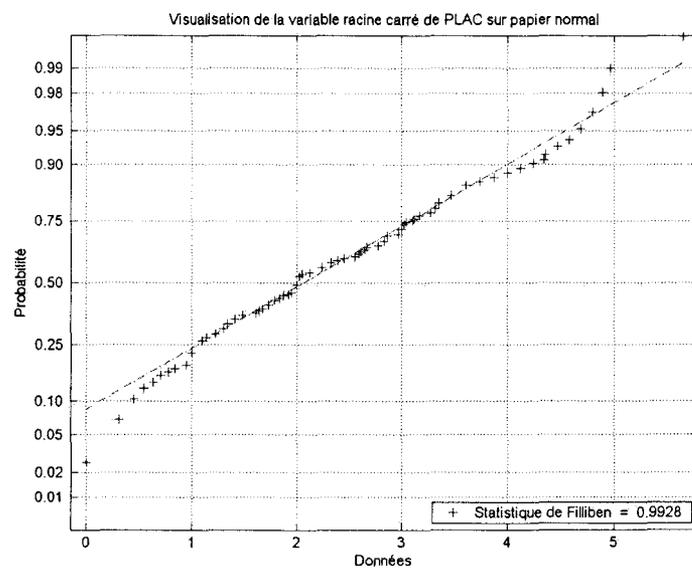
En gras

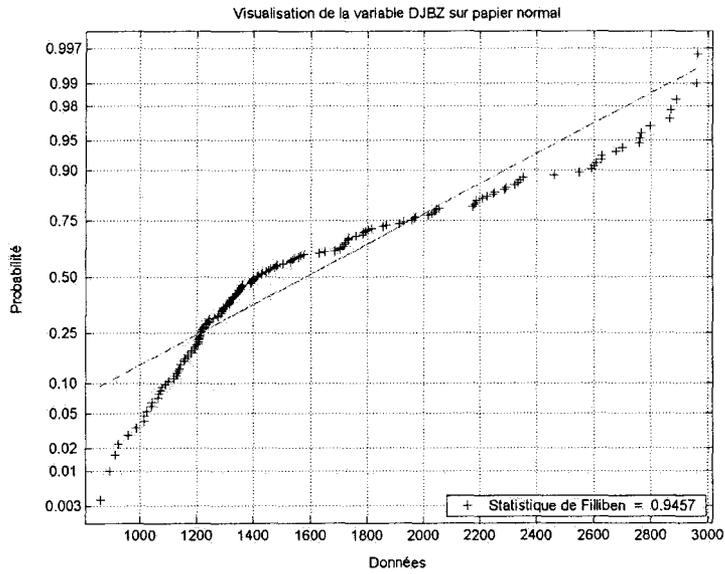
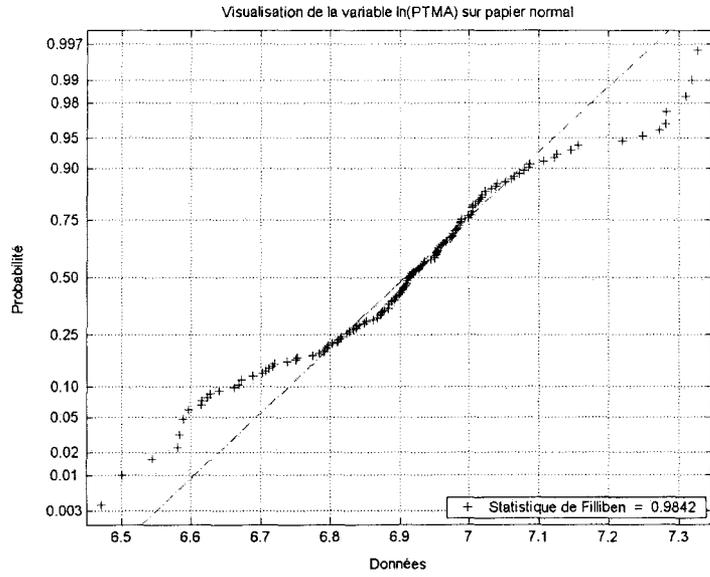
Stations ayant échoué au moins un des deux tests pour au moins un des six cas
(combinaison durée – saison)

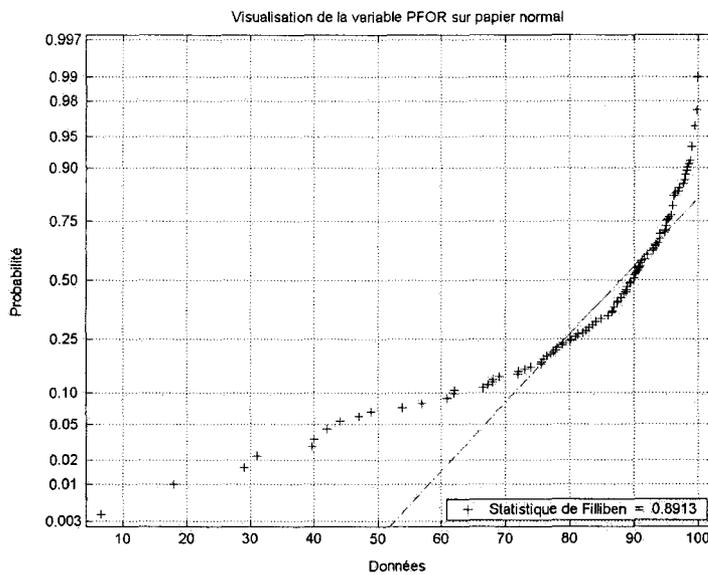
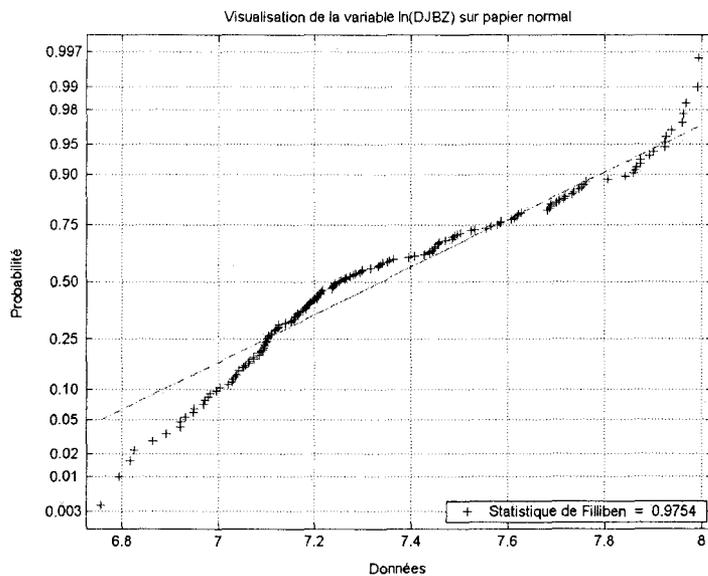
Annexe 2 : Vérification de l'hypothèse de normalité

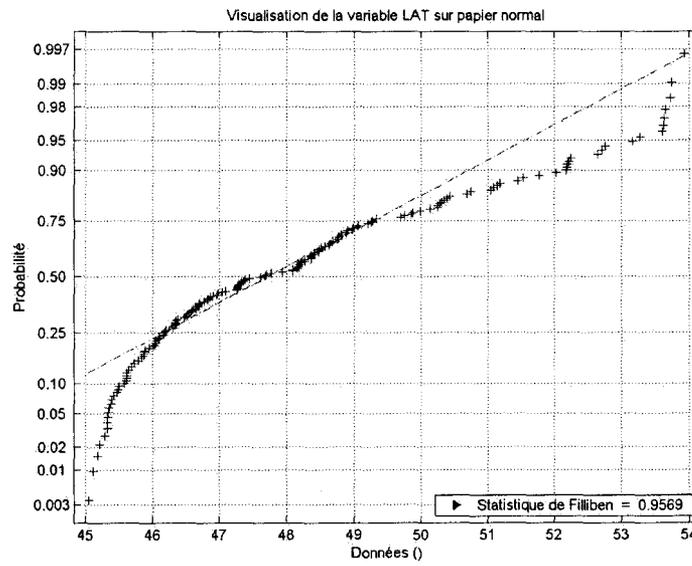
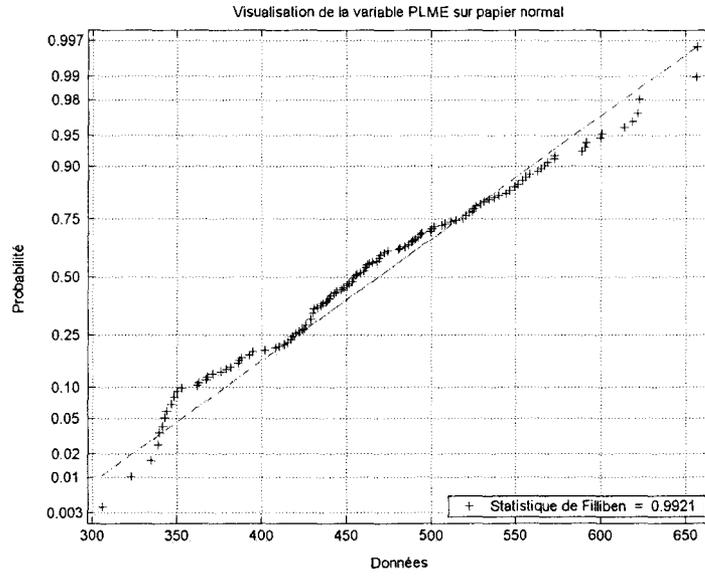


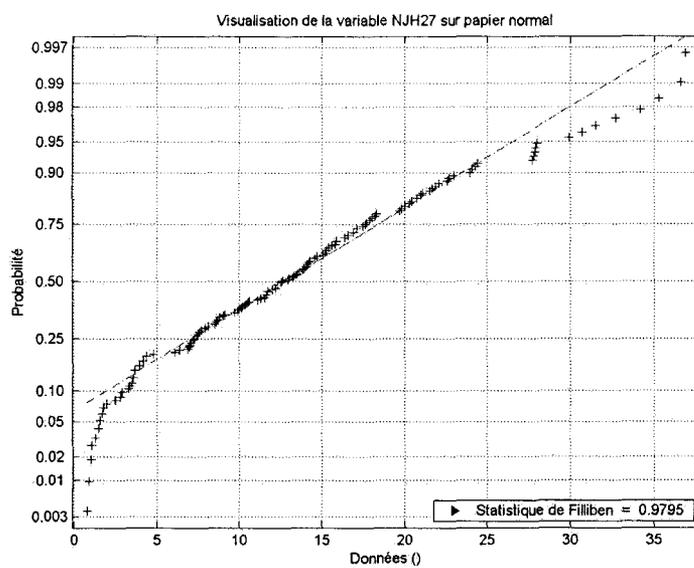
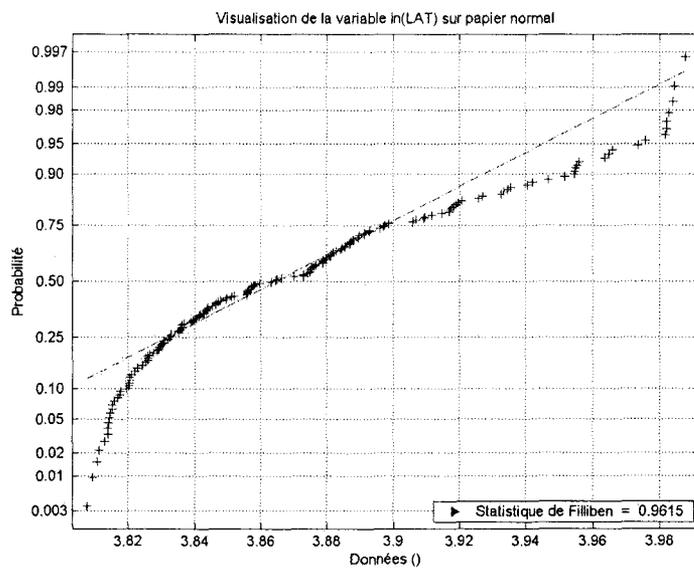


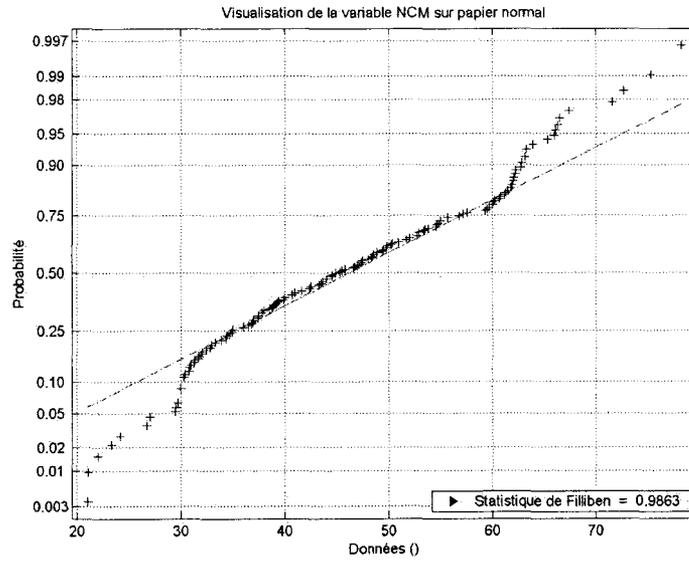
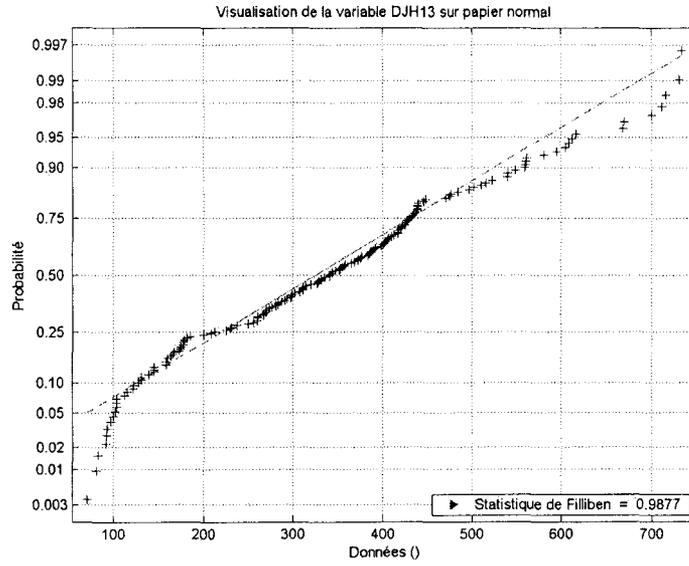












Annexe 3 : Méthodologie employée pour calculer les caractéristiques physiographiques et météorologiques des bassins versants

1. Superficie du bassin versant

Toutes les valeurs de superficie des bassins versants jaugés utilisées dans ce rapport ont été tirées de la Banque de Données Hydriques du ministère de l'Environnement du Québec (Ministère de l'Environnement du Québec, 2002). Pour les sites non-jaugés, l'outil de régionalisation permet de calculer le nombre de pixels présents à l'intérieur du bassin cible et en connaissant la résolution du pixel, le SIG calcule automatiquement l'aire de drainage.

2. Pente moyenne du bassin versant

La puissance de calcul d'un SIG a été utilisée pour calculer la pente moyenne du bassin versant. Cette valeur de changement de pente est calculée sur chaque pixel à partir de ses pixels voisins à partir d'un MNA. Cette représentation numérique de la pente du terrain est représentée en degré (ex. pente de 5 degrés) et ce pour chaque pixel et ses voisins. Ensuite, le SIG calcule la moyenne arithmétique sur l'ensemble du bassin versant.

3. Latitude de la station

La valeur de latitude des stations jaugées utilisée dans ce rapport a été tirée de la Banque de Données Hydriques du ministère de l'Environnement du Québec (Ministère de l'Environnement du Québec, 2002). Le SIG permet également d'extraire automatiquement cette information.

4. Pourcentage de superficie de forêt

La superficie occupée par la forêt divisée par la superficie totale du bassin ramenée en pourcentage correspond au pourcentage de forêt. Cette variable a majoritairement été extraite dans Belzile et al. (1997). Les autres pourcentages ont été calculés à l'aide d'un SIG et de cartes numériques à l'échelle du 1 : 1 000 000. Cette dernière procédure relève le nombre de pixels de forêt et en connaissant la résolution du pixel, le SIG calcule automatiquement la proportion de forêt sur l'ensemble du bassin.

5. Pourcentage de superficie de lac

La superficie occupée par les lacs divisée par la superficie totale du bassin ramenée en pourcentage correspond au pourcentage de lac. Cette variable a majoritairement été extraite dans Belzile et al. (1997). Les autres pourcentages ont été calculés à l'aide d'un SIG et de cartes numériques à l'échelle du 1 : 1 000 000, selon la méthode introduite au point N° 4.

6. Précipitation totale (solide et liquide) moyenne annuelle

La banque de données météorologiques mensuelles du MENV a été compilée pour chaque station de mesure (Ministère de l'Environnement, 2001). La somme de toutes ces valeurs mensuelles est faite pour une année et une valeur moyenne annuelle a été calculée pour chaque station de mesure où la donnée était existante sur plus de 15 années. Ensuite, une interpolation dans un SIG a été exécutée pour estimer sur chaque pixel du Québec habité la valeur de précipitation totale moyenne annuelle à cet endroit. Enfin, une moyenne arithmétique sur l'ensemble du bassin versant est calculée automatiquement par le SIG. Ce résultat représente la précipitation totale moyenne annuelle sur l'ensemble du bassin de drainage à l'étude.

7. Précipitation liquide moyenne pour la saison d'été-automne

La méthode utilisée au point N° 6 est la même que celle employée pour la précipitation liquide moyenne d'été-automne, sauf que la compilation a été effectuée pour 6 mois seulement (juillet-décembre) durant l'année.

8. Degré-jour moyen annuel < 0°C

Le nombre de degrés-jours est calculé mensuellement de la façon suivante : la somme totale des différences entre la température moyenne quotidienne (lorsqu'elle est inférieure à la température de référence) et la température de référence, soit 0°C. Pour obtenir la valeur moyenne annuelle de cette variable sur l'ensemble d'un bassin, la méthode utilisée au point N° 6 est celle employée pour le nombre de degrés-jours moyen annuel inférieurs à 0°C.

9. Degré-jour moyen annuel > 13°C

Le nombre de degrés-jours est calculé mensuellement de la façon suivante : la somme totale des différences entre la température moyenne quotidienne (lorsqu'elle est supérieure à la température de référence) et la température de référence, soit 13°C. Pour obtenir la valeur moyenne annuelle de cette variable sur l'ensemble d'un bassin, la méthode utilisée au point N° 6 est celle employée pour le nombre de degrés-jours moyen annuel supérieurs à 13°C.

10. Nombre de jour moyen > 27°C

Le nombre de jours est calculé mensuellement de la façon suivante : la somme totale des jours où la température maximale quotidienne a été supérieure à la température de référence, soit 27°C. Pour obtenir la valeur moyenne annuelle de cette variable sur l'ensemble d'un bassin donné, la méthode utilisée au point N° 6 est celle employée pour le nombre de jours moyen annuel supérieurs à 27°C.

Annexe 4 : Caractéristiques physiographiques et climatiques des bassins versants

N° station	BV	PLAC	DJBZ	PFOR	NJH27	PLME	NCM
	km ²	%	dgr-jr	%	nb jours	mm	-
010101	534	0	1193	100	11.1	493	30.2
010801/010802	1910	0.2	1242.7	99.8	8.7	465	32.9
010901/010902	1340	1	1129.6	96	9.9	472	31.6
011001/011003	1680	0.5	1355	99.4	9	460	38
011201	1140	0.2	1319.7	98.2	7	486	31.7
011507	2760	2.6	1430.7	83.6	11.5	454	52
011508	558	9.2	1345.8	72.1	13.5	431	53.5
020302	1090	0	1261	100	10.5	450	37.4
020401/020404	659	0.3	1236	99.4	10.6	418	33.9
020502	59.8	0	1047	100	6.96	454	30
020601/020602	645	0.2	1143	99.8	9.7	430	30.7
020802	1200	1	1217.7	99	6.1	386	36
021407	774	1	1315.4	99	7.7	426	38.9
021502	721	0.4	1241.7	97.8	7.3	461	43.7
021601	1650	1	1398.7	94	9.7	469	45.5
021915	494	2.2	1415.8	97.8	11.6	435	54.7
022003	1610	3.5	1394.4	92	12.3	444	52.7
022504/022507	525	0.4	1359	93	14.2	440	57.2
022701/022704	795	0.2	1299.7	89	14.1	460	62.3
022703	783	1.3	1326	98.7	14	463	62.2
023101/023106	821	0.1	1288	96	13	514	60
023301/023303	1160	0.7	1287	62.1	11.6	522	61.2
023401	709	4	1232.3	44	17.7	526	55.7
023402	5820	2	1208.9	69	15.6	501	62.9
023403	1170	4.1	1159.4	90	14.6	494	63.2
023426	4090	1.3	1211.2	95	15.2	492	63.3
023429	3070	1.7	1169.1	96	15.3	480	63.3
023701	356	2.6	1216.6	60.9	24.1	529	60
024001/024007	2330	4	1204	47	13.6	537	61.5
024003	919	2.8	1206	53.9	14.6	549	62.9
024010	25.7	0	1203	100	14.27	552	60.7
024013	227	1.8	1213.1	60.9	13.2	540	67.4
030101	549	1	1099.7	49	17.6	534	66.5
030103	1540	1	1138	40	21	546	63.2
030214/030234	642	4	1143	84	13.6	518	62.8
030215	519	4	984.6	57	23	461	61.9
030219	839	0.7	1179.6	89	10.2	520	62
030238	87.2	0	1154	75.6	15.4	508	62.1
030262	285	0	1041	39.7	27.9	500	55
030282	738	0.3	1179.8	89.4	10.3	520	61.8
030316	316	0.2	1062.9	29	34.2	488	72.6
030335	59.3	1.7	1078	98	22.1	573.15	59.5
030340	271	3.8	1023.3	96.2	20.8	558	61.8
030341	3310	0.9	1013	67.2	32.7	531	66.1

030415	309	2	957.6	42	27.8	489	75.3
030901/030905	2490	3	920.6	31	36.6	458	66.3
031401	219	1	1135	84	13.8	472	59.3
040129	109	1.8	1307.3	97.6	15.3	490	30
040201	2570	5	1398.8	92	20	469	52.7
040202/040204	5460	8	1346.4	90.1	19.7	469	40.7
040212	39.9	4	1332.7	89	18.2	474	30
040401/040406	1330	15	1192.9	88.5	22.6	447	41
040409	61.6	0	1175	100	23.95	474	39.4
040810	1780	9.6	1292.8	88.5	15.9	418	47
040814	1290	7.1	1224.3	88.9	17.7	426	49.8
040830	6840	4.2	1734.7	94.8	12.3	500	37.5
041301	5150	10	1314.5	93.7	20	426	49.5
041901/041902	3760	12	1361	88	24.4	430	44.5
041903	2110	9.7	1473	90.3	19.8	441	48.4
042606	2590	14	1276	86	24.3	440	48.5
043009/043012	2590	8.2	1868	88	15.2	429	48.6
046706	53.6	0	1119	6.5	27.7	492	66
046707	28	0	1107	90	27.87	492	78.2
050116/050144	2640	9.1	1578.2	90.9	17.1	426	30
050117/050135	1570	3	1631	96	15.1	430	37
050119	1390	6.5	1481.2	90.6	16.9	430	46.7
050301	4580	5.7	1478.9	75.7	17.1	554	34.9
050302/050304	4480	3.7	1454.4	95.3	16.9	524	34.3
050305	2870	6	1537.9	94	15.9	573	31.9
050408	1550	2.7	1543.2	93.4	8.1	657	36.5
050409	642	4	1529.8	96	7.7	656	34.7
050701	355	3.4	1292	68.1	15.8	589	47.4
050812	102	0	1198	78.9	20.3	554	33.3
050813	1.7	0	1347	100	13.3	664	37.5
051001	1100	2	1565.8	96	7.5	614	32.9
051002	3.94	0.1	1720	99	4.2	622	42.5
051003	9.17	0.1	1712.1	99	4.2	623	35
051004	1.22	0.1	1735	99	4	623	30
051005	269	2	1759.2	97	3.7	601	38.8
051006	58.8	1	1785.8	95	4.2	591	30
051007	3.57	0.1	1720	99	4.2	619	42.5
051011	0.7	0.6	1798	99.4	3.31	590	43.3
051301	865	1	1390.2	91	13.4	413	41.6
051502	1700	3	1504.6	96	7.4	422	37
052202/052219	1340	1.5	1226.3	96	20.8	461	36.9
052203/052212	1270	4.1	1283.9	95	18.3	484	34.3
052228	190	1.7	1315	98.3	17.5	453	35
052231	76.7	3.8	1229	96.2	22.69	473	49.8
052233	647	4	1167.7	85	28	455	56.8
052601	1030	5.4	1274.8	81.3	18	447	40.7
052803	53.2	16.7	1361	83.3	21.55	485	42.4
052805	774	8	1428.1	92	16.4	438	30.9

060101	736	4	1392	95.7	12	415	30.7
060601	572	3.4	1558.5	95.4	14.1	420	44.9
061020	1110	3.2	1722.5	96.8	4.8	600	39.9
061022	495	3	1702.2	97	3.7	565	50.4
061502	2280	4	1684.6	96	7.1	544	43.5
061602	562	8.8	1702	91.2	7.9	448	55
061801	1090	6.7	1783.5	89	16.9	468	41.6
061905	11100	9	2016	91	6.4	410	47.4
061906	4330	13	1957.2	87	11.6	425	45.8
061909	585	1.5	1802	98.5	16.4	362	40
062101	9320	5	2186.6	94	7.6	451	43.7
062102	9870	4	2054.8	95	8.6	429	44
062209	3600	8	2252.5	92	7.2	430	48.6
062701	746	1.7	1651	91	13.9	546	39.3
062802	1100	4.5	1458.9	95.1	12.9	511	30.8
070202	40.7	4	1397	96	14	476	32.4
070401	3085	6	1529.4	94.1	15.4	470	32
071401	1570	6.7	1242.4	93.3	8.5	348	31.2
072301	19000	12	2293.4	88	3.6	382	44.6
072302	3390	10.7	2601.9	86.7	2.9	379	45.3
073301/073303	676	7	1444.5	93	1.3	486	53.8
073502/073503	7230	7.7	2181	90.4	2.9	388	51
073801	13000	12	2224.6	88	1.5	386	38.5
074601	2060	10	1731.3	86	1	443	47.2
074701	5590	11	1912.6	87	0.9	424	50.3
074902	11600	6.8	2332.4	92.9	2	395	54.6
074903	15600	11	2246.5	87	1.6	402	54.8
075601	2950	9	1326.5	90	1	506	26.7
076601	6630	16	1855	83	1.1	592	27
080101/080102	3680	23	1929.6	72	16.6	417	53.4
080701	57500	19	1967.8	81	12.5	439	49.4
080704	18700	21	2038.8	79	11.3	441	48
080705/080717	8310	17	1793.1	83	15.9	462	55
080707	22200	18	1813.6	82	14.7	453	49.9
080718	31900	19	2045	80	12.2	435	51.7
080801	17100	32	2172.5	68	10.1	387	47.5
080809	9820	20	2188.1	73	11.7	393	61.3
081002	40900	20	2340.7	78	4.4	368	37.8
081006	7280	11.2	2460.5	88.8	0.8	393	48.9
081007	18100	22	2350.8	78	1.7	376	39
090601	44300	5	2320	94	9.1	339	26.7
090602	27700	9	2609.3	90	3.6	363	30.3
090605	1870	15	2549.8	84	7.4	343	24.1
090606	1970	7	2678.7	91.6	8.7	335	21
090607	3390	12	2591.7	87.5	8.8	343	22
090609	3700	11	2628.2	87.6	8.5	339	23.3
090610	11600	8	2700.9	90.8	1.7	371	34.4
090613	21400	9	2628.9	90.7	2.5	367	32.8

092703	37000	23	2888.9	76.4	1.8	347	37.8
092704	96600	17	2798.8	82.5	3.6	340	31.3
092706	18600	9	2963.1	89.5	6.9	306	44
092707	10900	22	2863.9	77.5	7.1	344	44
092708	19100	12	2768.1	86.8	2.8	342	29.7
092711	13800	12	2760	87	3.5	347	29.5
092715	13200	13	2763.1	86	3.4	348	29.4
092717	10200	22	2958.8	77.2	3.7	323	30
092722	12800	24	2869.3	76	1.5	353	40

Annexe 5 : Biais Relatif [BR] (%) et Erreur Quadratique Relative [EQR] (%) associés à chaque station dans la procédure de validation croisée ("Jackknife") comparant l'estimation locale à l'estimation régionale des quantiles d'étiage $Q_{5,30}$, $Q_{2,7}$ et $Q_{10,7}$ (et où le modèle d'estimation régionale est l'ACC-RM)

Période estivale

Stations	$Q_{5,30}$		$Q_{2,7}$		$Q_{10,7}$	
	BR	EQR	BR	EQR	BR	EQR
010101	36.04	12.99	-13.08	1.71	35.84	12.85
010901/010902	23.32	5.44	11.07	1.23	12.26	1.50
011001/011003	-35.38	12.52	-37.18	13.83	-41.87	17.53
011201	54.12	29.29	38.88	15.12	56.97	32.46
011507	0.30	0.00	-15.77	2.49	-8.13	0.66
011508	116.07	134.72	82.00	67.23	147.51	217.60
020302	34.73	12.06	22.53	5.07	-0.89	0.01
020502	62.10	38.56	31.56	9.96	117.99	139.21
020601/020602	78.05	60.91	95.30	90.82	105.49	111.27
020802	-15.83	2.51	-2.70	0.07	-19.54	3.82
021407	-35.84	12.85	-35.01	12.25	-47.66	22.71
021502	-28.12	7.91	-29.67	8.80	-32.33	10.45
021915	84.13	70.78	64.40	41.47	98.17	96.38
022003	65.91	43.44	56.58	32.02	60.11	36.13
022504/022507	7.56	0.57	13.46	1.81	11.81	1.39
022703	66.43	44.13	4.64	0.22	88.16	77.72
023101/023106	-17.30	2.99	-11.15	1.24	-26.54	7.04
023301/023303	-6.90	0.48	-7.34	0.54	-0.85	0.01
023401	71.88	51.66	101.07	102.14	105.71	111.74
023402	17.44	3.04	115.20	132.70	110.73	122.62
023403	30.72	9.44	5.92	0.35	98.28	96.58
023426	21.12	4.46	50.95	25.96	107.16	114.83
023429	70.12	49.17	73.94	54.67	97.62	95.30
023701	18.26	3.33	40.28	16.22	-1.75	0.03
024001/024007	57.21	32.73	37.02	13.71	57.88	33.50
024003	43.78	19.16	37.04	13.72	48.14	23.17
024010	N/D	N/D	60.99	37.20	13.08	1.71
024013	-35.36	12.50	-14.08	1.98	-66.06	43.64
030101	60.89	37.07	69.12	47.77	102.24	104.54
030103	16.02	2.57	22.21	4.93	7.85	0.62
030214/030234	58.48	34.20	N/D	N/D	N/D	N/D
030219	20.50	4.20	13.10	1.72	21.17	4.48
030238	6.17	0.38	-12.17	1.48	-7.24	0.52
030262	8.54	0.73	1.81	0.03	112.71	127.04
030282	38.03	14.46	63.66	40.53	44.83	20.09

030316	19.29	3.72	-4.83	0.23	13.83	1.91
030335	-4.06	0.16	-29.10	8.47	-31.05	9.64
030340	-57.15	32.66	-45.71	20.89	-67.43	45.46
030341	-5.53	0.31	-0.94	0.01	10.73	1.15
030415	77.65	60.29	101.12	102.26	97.59	95.24
030901/030905	-57.02	32.52	-45.19	20.42	-66.21	43.84
031401	38.21	14.60	65.47	42.86	80.90	65.45
040129	-11.45	1.31	-9.15	0.84	-19.69	3.88
040201	-52.42	27.48	-52.74	27.82	-59.00	34.81
040202/040204	-6.24	0.39	-0.40	0.00	-2.49	0.06
040212	44.77	20.05	N/D	N/D	N/D	N/D
040409	159.93	255.77	199.96	399.85	192.94	372.25
040810	44.27	19.60	42.87	18.38	32.93	10.84
040814	7.49	0.56	5.10	0.26	-8.83	0.78
040830	60.78	36.94	56.54	31.96	67.37	45.38
041301	37.95	14.40	33.69	11.35	49.46	24.46
041901/041902	-3.10	0.10	15.14	2.29	-0.85	0.01
041903	-13.44	1.81	-6.86	0.47	-25.99	6.76
042606	-22.90	5.24	-40.34	16.27	-14.39	2.07
043009/043012	-10.80	1.17	2.47	0.06	-26.30	6.92
046706	-52.46	27.52	-49.71	24.71	-62.52	39.09
046707	-78.82	62.12	-78.69	61.91	-81.00	65.61
050116/050144	71.94	51.75	82.15	67.49	77.37	59.87
050117/050135	-21.41	4.58	N/D	N/D	N/D	N/D
050119	-2.46	0.06	-1.43	0.02	13.20	1.74
050301	-23.55	5.55	-18.70	3.50	-17.40	3.03
050302/050304	-27.90	7.79	-19.29	3.72	-35.28	12.45
050305	-13.44	1.81	-10.86	1.18	-25.30	6.40
050408	12.98	1.69	37.36	13.96	-5.58	0.31
050409	N/D	N/D	48.40	23.42	33.80	11.43
050701	5.19	0.27	-16.40	2.69	7.25	0.52
050812	-52.85	27.93	-39.88	15.90	-47.00	22.09
050813	-67.19	45.15	-70.44	49.62	-71.68	51.38
051004	-33.41	11.16	-31.49	9.91	-42.79	18.31
051006	-15.30	2.34	-23.51	5.53	-5.99	0.36
051007	-45.90	21.07	-53.25	28.36	-44.71	19.99
051011	-15.18	2.30	10.97	1.20	-20.35	4.14
051301	-47.87	22.92	-47.59	22.65	-54.24	29.42
051502	-13.71	1.88	-13.91	1.93	-12.48	1.56
052202/052219	6.53	0.43	N/D	N/D	N/D	N/D
052203/052212	66.86	44.71	N/D	N/D	N/D	N/D
052228	95.44	91.09	129.56	167.86	274.11	751.36
052231	45.75	20.93	78.90	62.25	33.94	11.52
052233	4.25	0.18	14.70	2.16	5.68	0.32
052601	12.96	1.68	29.36	8.62	6.17	0.38
052803	-71.59	51.24	-52.19	27.24	-2.76	0.08
052805	161.92	262.18	158.77	252.08	230.08	529.38
060101	60.04	36.05	81.82	66.95	108.40	117.50

060601	-28.11	7.90	-14.29	2.04	-29.76	8.86
061020	1.82	0.03	N/D	N/D	N/D	N/D
061022	-49.65	24.65	N/D	N/D	N/D	N/D
061502	28.40	8.07	9.98	1.00	23.45	5.50
061602	21.60	4.67	-20.98	4.40	2.31	0.05
061801	-19.00	3.61	-13.39	1.79	-12.02	1.45
061905	6.08	0.37	0.82	0.01	2.02	0.04
061909	-36.05	13.00	-27.17	7.38	-21.53	4.63
062101	-24.79	6.14	-21.11	4.46	-16.51	2.72
062102	-5.26	0.28	2.63	0.07	3.68	0.14
062209	-40.36	16.29	-24.20	5.85	-35.22	12.40
062701	-66.86	44.71	-63.93	40.87	-58.38	34.08
062802	28.87	8.33	31.27	9.78	92.45	85.46
070401	-10.56	1.11	-15.86	2.52	-8.21	0.67
071401	12.63	1.59	14.56	2.12	29.33	8.60
072302	-19.31	3.73	-19.06	3.63	-7.45	0.55
073301/073303	36.94	13.64	-6.69	0.45	-17.37	3.02
073502/073503	5.95	0.35	-5.47	0.30	-4.88	0.24
073801	25.40	6.45	34.39	11.83	35.01	12.26
074601	-3.66	0.13	7.91	0.63	12.43	1.55
074701	29.45	8.68	34.13	11.65	26.25	6.89
074902	-10.21	1.04	-1.41	0.02	-17.88	3.20
074903	37.54	14.09	44.40	19.72	66.45	44.15
075601	-16.88	2.85	-14.44	2.08	-9.61	0.92
076601	89.61	80.30	130.56	170.45	69.67	48.54
080101/080102	3.83	0.15	-1.13	0.01	-17.24	2.97
080701	6.21	0.39	2.70	0.07	-1.29	0.02
080704	-13.77	1.90	-11.07	1.23	-7.75	0.60
080705/080717	-19.96	3.99	-23.01	5.30	-31.96	10.21
080707	41.35	17.09	41.14	16.93	44.35	19.66
080718	-1.17	0.01	-5.34	0.29	-4.39	0.19
080801	-12.49	1.56	-8.20	0.67	-2.32	0.05
080809	-9.21	0.85	-5.58	0.31	-35.82	12.83
081002	-21.88	4.79	-13.55	1.84	-24.60	6.05
081006	-19.69	3.88	-17.52	3.07	-14.15	2.00
081007	-15.73	2.47	-23.27	5.41	-36.26	13.15
090601	-21.78	4.74	-22.24	4.94	-28.70	8.24
090602	-7.92	0.63	-1.31	0.02	-10.00	1.00
090605	2.90	0.08	-5.16	0.27	-16.12	2.60
090606	6.77	0.46	16.15	2.61	6.13	0.38
090607	-20.70	4.28	-14.47	2.09	-21.65	4.69
090609	6.81	0.46	21.39	4.57	15.67	2.46
090610	-18.93	3.58	-14.33	2.05	-20.94	4.38
090613	-8.66	0.75	-7.16	0.51	3.08	0.10
092703	5.93	0.35	1.77	0.03	6.85	0.47
092704	10.69	1.14	10.45	1.09	37.70	14.22
092706	33.84	11.45	17.81	3.17	29.73	8.84
092707	20.95	4.39	13.58	1.84	23.87	5.70

092708	13.31	1.77	15.12	2.28	12.73	1.62
092711	3.00	0.09	8.56	0.73	-4.74	0.22
092715	8.79	0.77	1.74	0.03	25.57	6.54
092717	0.27	0.00	13.38	1.79	8.44	0.71
092722	12.19	1.49	-11.67	1.36	-0.35	0.00
MOYENNE	8.80	18.30	10.91	21.69	15.14	35.92

Fréquence de surestimation	74/134 (55.2%)	65/129 (50.4%)	63/129 (48.9%)
Fréquence de sous-estimation	60/134 (44.8%)	64/129 (49.6%)	66/129 (51.1%)

Période hivernale

Stations	Q _{5,30}		Q _{2,7}		Q _{10,7}	
	BR	EQR	BR	EQR	BR	EQR
010101	16.46	2.71	7.37	0.54	15.93	2.54
010801/010802	4.87	0.24	-3.53	0.12	-0.54	0.00
010901/010902	-2.74	0.08	1.86	0.03	-6.68	0.45
011201	29.08	8.46	31.68	10.04	34.85	12.15
011507	3.95	0.16	-5.71	0.33	6.53	0.43
011508	2.43	0.06	8.99	0.81	10.89	1.19
020401/020404	24.75	6.13	7.65	0.58	22.49	5.06
020502	46.93	22.03	15.17	2.30	74.53	55.54
020601/020602	68.70	47.19	38.43	14.77	58.08	33.73
020802	29.60	8.76	21.69	4.70	23.36	5.46
021407	-12.03	1.45	-15.56	2.42	-13.95	1.95
021502	-4.67	0.22	-7.54	0.57	-11.35	1.29
021601	5.86	0.34	5.00	0.25	3.37	0.11
021915	90.04	81.07	82.20	67.57	97.75	95.54
022003	41.51	17.23	38.23	14.62	53.69	28.82
022504/022507	74.10	54.92	55.88	31.22	101.95	103.94
022701/022704	161.85	261.94	94.91	90.07	169.10	285.94
022703	131.24	172.25	98.03	96.10	142.14	202.03
023101/023106	-9.69	0.94	-17.10	2.93	-21.89	4.79
023301/023303	-6.67	0.44	-2.64	0.07	-16.78	2.81
023401	71.40	50.98	72.24	52.19	92.33	85.25
023402	29.87	8.92	26.73	7.15	28.45	8.09
023403	-5.28	0.28	4.98	0.25	4.87	0.24
023426	51.98	27.02	71.86	51.64	90.30	81.54
023429	43.96	19.32	40.00	16.00	84.17	70.85
023701	40.39	16.31	35.87	12.86	25.14	6.32
024001/024007	-12.77	1.63	-13.29	1.77	-11.45	1.31
024003	-18.06	3.26	-20.16	4.06	-21.20	4.50
024013	-36.93	13.64	-40.41	16.33	-37.77	14.27

030101	-19.57	3.83	-12.94	1.67	-16.53	2.73
030103	-9.30	0.87	-3.98	0.16	-21.32	4.55
030214/030234	34.66	12.01	29.74	8.84	50.17	25.17
030215	-19.45	3.78	N/D	N/D	N/D	N/D
030219	10.73	1.15	11.10	1.23	22.04	4.86
030238	-32.67	10.67	-21.44	4.60	-27.03	7.31
030282	-15.25	2.32	-12.34	1.52	1.62	0.03
030316	N/D	N/D	106.20	112.79	38.04	14.47
030335	-32.16	10.34	-17.06	2.91	-34.59	11.96
030340	-45.96	21.13	-45.09	20.33	-43.43	18.86
030341	-21.46	4.60	-5.42	0.29	-26.92	7.25
030415	209.59	439.29	196.72	386.98	243.97	595.24
030901/030905	12.71	1.61	-5.07	0.26	-11.68	1.36
031401	0.13	0.00	4.01	0.16	22.20	4.93
040129	-28.76	8.27	-18.36	3.37	-45.93	21.09
040201	-28.04	7.86	-33.11	10.96	-33.65	11.33
040202/040204	-22.00	4.84	-19.60	3.84	-19.43	3.78
040212	-9.14	0.84	12.26	1.50	-19.64	3.86
040401/040406	39.37	15.50	7.56	0.57	36.72	13.49
040814	-23.59	5.57	-25.06	6.28	-28.41	8.07
040830	-3.02	0.09	-0.93	0.01	0.15	0.00
041301	58.03	33.67	60.38	36.46	58.70	34.46
041901/041902	6.41	0.41	7.77	0.60	4.05	0.16
041903	-17.11	2.93	-9.93	0.99	-19.44	3.78
042606	1.42	0.02	-8.58	0.74	-2.37	0.06
043009/043012	11.85	1.40	20.42	4.17	6.33	0.40
046706	147.57	217.77	22.34	4.99	-86.42	74.69
046707	-9.51	0.91	31.59	9.98	27.39	7.50
050116/050144	7.20	0.52	9.83	0.97	8.68	0.75
050117/050135	-10.88	1.18	-12.35	1.52	-13.86	1.92
050119	-25.03	6.26	-18.43	3.40	-25.91	6.71
050301	-23.63	5.58	-20.62	4.25	-22.42	5.03
050302/050304	-18.98	3.60	-14.83	2.20	-23.07	5.32
050305	-10.92	1.19	-16.75	2.80	-10.59	1.12
050408	-40.59	16.48	-37.48	14.05	-44.08	19.43
050409	-31.80	10.11	-27.48	7.55	-41.41	17.15
050701	-46.97	22.06	-48.87	23.88	-52.08	27.12
050812	-61.75	38.13	-58.82	34.59	-68.80	47.34
050813	-71.33	50.88	-73.93	54.66	-74.20	55.05
051001	-3.76	0.14	-10.73	1.15	-6.12	0.37
051002	-47.91	22.95	-42.33	17.92	-56.03	31.39
051003	-32.98	10.88	-28.45	8.10	-40.08	16.06
051004	27.16	7.38	40.94	16.76	15.85	2.51
051005	37.94	14.39	-11.05	1.22	42.56	18.11
051006	6.33	0.40	-23.34	5.45	-49.67	24.67
051007	2.23	0.05	-3.83	0.15	5.52	0.31
051301	-24.00	5.76	-15.40	2.37	-31.31	9.81
051502	-20.47	4.19	-16.61	2.76	-23.67	5.60

052202/052219	-25.87	6.69	-22.98	5.28	-29.65	8.79
052203/052212	-24.31	5.91	-22.00	4.84	-26.77	7.16
052233	24.79	6.15	8.73	0.76	31.81	10.12
052601	4.83	0.23	5.57	0.31	-4.83	0.23
052803	-77.68	60.34	-82.39	67.88	49.73	24.73
052805	-0.96	0.01	3.05	0.09	-4.00	0.16
060101	55.43	30.72	43.64	19.04	54.16	29.33
060601	3.18	0.10	5.94	0.35	-4.46	0.20
061020	-16.75	2.80	-11.43	1.31	-18.58	3.45
061022	-13.28	1.76	-16.06	2.58	-16.67	2.78
061502	-1.04	0.01	-5.98	0.36	4.53	0.21
061602	N/D	N/D	-6.35	0.40	62.22	38.71
061801	67.98	46.21	68.47	46.88	71.31	50.85
061905	-11.26	1.27	-5.16	0.27	-11.48	1.32
061906	-11.28	1.27	-5.33	0.28	-12.49	1.56
061909	59.84	35.80	67.30	45.30	56.44	31.86
062101	3.03	0.09	5.23	0.27	4.81	0.23
062102	16.76	2.81	19.55	3.82	22.51	5.07
062209	-15.37	2.36	-18.71	3.50	-19.60	3.84
062701	-27.53	7.58	-29.40	8.65	-29.84	8.90
062802	11.41	1.30	14.95	2.23	8.66	0.75
070202	21.28	4.53	65.98	43.53	21.97	4.83
070401	23.08	5.33	23.18	5.37	29.09	8.46
071401	8.67	0.75	10.18	1.04	2.09	0.04
072301	17.18	2.95	N/D	N/D	N/D	N/D
072302	12.58	1.58	2.28	0.05	17.78	3.16
073301/073303	54.54	29.75	58.47	34.19	35.90	12.89
073502/073503	4.05	0.16	N/D	N/D	N/D	N/D
073801	1.87	0.04	-0.22	0.00	2.00	0.04
074601	4.91	0.24	-4.24	0.18	18.15	3.29
074701	-2.10	0.04	4.80	0.23	-4.09	0.17
074902	-13.33	1.78	-17.50	3.06	-13.59	1.85
074903	2.81	0.08	N/D	N/D	N/D	N/D
075601	-23.55	5.54	-32.61	10.63	-15.98	2.55
080101/080102	3.66	0.13	11.68	1.36	2.64	0.07
080701	33.16	11.00	32.08	10.29	30.94	9.57
080704	13.16	1.73	10.78	1.16	11.13	1.24
080705/080717	-3.93	0.15	-4.52	0.20	-4.00	0.16
080707	40.22	16.18	65.95	43.49	49.09	24.10
080718	-6.89	0.47	-4.30	0.18	1.96	0.04
080801	103.06	106.21	144.43	208.59	28.59	8.17
080809	-4.08	0.17	-4.96	0.25	-4.83	0.23
081002	-48.35	23.38	-40.91	16.74	-50.93	25.94
081006	5.09	0.26	10.65	1.13	8.68	0.75
081007	-55.53	30.83	-56.13	31.51	-53.70	28.84
090601	-51.42	26.44	-52.26	27.31	-20.91	4.37
090602	-6.10	0.37	-3.40	0.12	-3.62	0.13
090607	3.54	0.12	7.67	0.59	-2.85	0.08

090609	63.17	39.91	47.17	22.25	59.54	35.45
090610	-0.75	0.01	-10.18	1.04	6.09	0.37
090613	-5.17	0.27	-6.41	0.41	-0.89	0.01
092703	38.74	15.01	69.65	48.51	39.88	15.90
092704	-0.61	0.00	1.61	0.03	3.29	0.11
092706	24.44	5.98	35.07	12.30	24.89	6.19
092707	33.41	11.16	32.81	10.77	36.01	12.97
092708	-1.48	0.02	3.37	0.11	-2.06	0.04
092711	-6.98	0.49	-1.04	0.01	-8.92	0.80
092715	5.36	0.29	2.49	0.06	7.38	0.55
092717	28.73	8.25	40.32	16.25	28.14	7.92
092722	-44.19	19.53	-44.51	19.81	-44.32	19.64
MOYENNE	7.11	18.12	6.67	15.95	7.40	20.79

Fréquence de surestimation	68/135 (50.4%)	65/133 (48.9%)	68/133 (51.1%)
Fréquence de sous-estimation	67/135 (49.6%)	68/133 (51.1%)	65/133 (48.9%)

Période annuelle

Stations	Q _{5,30}		Q _{2,7}		Q _{10,7}	
	BR	EQR	BR	EQR	BR	EQR
010101	16.58	2.75	18.47	3.41	50.22	25.22
010801/010802	6.80	0.46	-11.10	1.23	-12.77	1.63
010901/010902	3.38	0.11	5.68	0.32	-0.16	0.00
011001/011003	-5.93	0.35	N/D	N/D	N/D	N/D
011201	55.39	30.69	41.22	16.99	68.35	46.72
011507	-5.43	0.29	-13.47	1.81	-8.57	0.73
011508	86.18	74.27	51.19	26.20	119.11	141.87
020401/020404	33.67	11.34	14.66	2.15	34.97	12.23
020502	70.75	50.05	82.74	68.47	282.88	800.20
020601/020602	91.39	83.52	79.85	63.76	94.66	89.60
020802	42.74	18.27	34.37	11.81	40.84	16.68
021407	-15.75	2.48	-19.09	3.64	-25.51	6.51
021502	-9.33	0.87	-15.05	2.26	-17.39	3.02
021601	-6.02	0.36	-9.03	0.81	-15.02	2.25
021915	95.97	92.09	76.39	58.36	104.75	109.73
022003	31.24	9.76	N/D	N/D	N/D	N/D
022504/022507	39.52	15.62	45.03	20.28	63.79	40.69
022701/022704	95.75	91.68	N/D	N/D	N/D	N/D
022703	114.48	131.06	72.13	52.03	109.69	120.31
023101/023106	-32.89	10.82	-24.28	5.90	-37.58	14.12
023301/023303	-20.60	4.24	-37.72	14.23	-51.35	26.37
023401	57.44	32.99	64.38	41.45	64.37	41.44

023402	41.51	17.23	107.69	115.96	126.92	161.08
023403	0.67	0.00	14.80	2.19	87.45	76.48
023426	18.33	3.36	61.34	37.62	88.02	77.47
023429	40.99	16.80	66.79	44.61	110.74	122.63
023701	13.69	1.87	37.53	14.08	-3.93	0.15
024001/024007	2.95	0.09	19.39	3.76	30.83	9.50
024003	4.62	0.21	8.69	0.76	24.51	6.01
024013	-55.34	30.63	-58.82	34.60	-69.29	48.01
030101	12.03	1.45	59.62	35.55	109.09	119.01
030103	8.93	0.80	20.39	4.16	15.24	2.32
030214/030234	41.51	17.23	-18.08	3.27	-30.58	9.35
030219	-1.89	0.04	2.11	0.04	-4.22	0.18
030238	-20.28	4.11	5.52	0.30	1.06	0.01
030282	-1.07	0.01	33.52	11.24	21.42	4.59
030316	366.37	1342.30	254.95	649.98	170.82	291.79
030335	-5.28	0.28	13.97	1.95	-14.21	2.02
030340	-60.57	36.69	-57.50	33.07	-66.18	43.79
030341	55.74	31.07	11.28	1.27	48.57	23.59
030415	288.17	830.42	248.14	615.71	331.63	1099.80
030901/030905	-22.25	4.95	-19.53	3.81	-29.35	8.62
031401	80.78	65.26	81.89	67.06	112.69	127.00
040129	-9.01	0.81	0.45	0.00	1.06	0.01
040201	-50.64	25.64	-53.92	29.07	-59.45	35.34
040202/040204	-21.65	4.69	-38.48	14.80	-39.51	15.61
040212	31.02	9.62	52.90	27.98	8.36	0.70
040401/040406	52.67	27.74	48.55	23.58	107.89	116.39
040814	-12.37	1.53	-12.54	1.57	-24.04	5.78
040830	-4.03	0.16	9.42	0.89	17.49	3.06
041301	14.59	2.13	20.73	4.30	31.82	10.13
041901/041902	5.61	0.31	-18.87	3.56	-23.80	5.66
041903	N/D	N/D	-45.94	21.10	-53.00	28.09
042606	-19.08	3.64	-16.74	2.80	2.34	0.05
043009/043012	-5.04	0.25	11.98	1.43	-15.53	2.41
046706	-29.32	8.60	-13.62	1.86	-7.07	0.50
046707	-51.91	26.94	-49.51	24.51	-35.67	12.73
050116/050144	9.26	0.86	15.29	2.34	13.41	1.80
050117/050135	-23.03	5.30	-17.59	3.09	-23.17	5.37
050119	-20.29	4.12	-44.58	19.87	-54.77	29.99
050301	-25.92	6.72	-26.41	6.97	-17.30	2.99
050302/050304	-27.80	7.73	-27.49	7.55	-34.81	12.12
050305	-24.21	5.86	-18.73	3.51	-14.13	2.00
050408	-40.60	16.49	-37.64	14.17	-45.77	20.95
050409	-31.44	9.89	-24.41	5.96	-39.23	15.39
050701	-46.03	21.19	-46.05	21.20	-43.10	18.58
050812	-64.21	41.24	-52.92	28.00	-71.01	50.42
051001	6.33	0.40	-6.52	0.43	10.02	1.00
051002	-55.80	31.14	-53.82	28.97	-67.81	45.98
051003	-35.88	12.87	-34.13	11.65	-46.13	21.28

051004	21.73	4.72	33.48	11.21	3.01	0.09
051005	86.03	74.00	44.90	20.16	64.77	41.95
051006	55.94	31.29	N/D	N/D	N/D	N/D
051007	-17.26	2.98	-25.30	6.40	-27.54	7.59
051301	-30.22	9.13	-29.76	8.86	-46.42	21.55
051502	-20.61	4.25	-15.54	2.42	-23.02	5.30
052202/052219	1.09	0.01	-1.86	0.03	6.02	0.36
052203/052212	-7.06	0.50	3.94	0.15	26.49	7.02
052233	32.08	10.29	40.37	16.30	57.72	33.31
052601	N/D	N/D	-22.38	5.01	-37.50	14.07
052803	-20.83	4.34	-66.68	44.46	171.82	295.23
052805	69.92	48.89	64.08	41.06	117.47	137.99
060101	72.73	52.90	70.55	49.77	84.97	72.20
060601	-21.19	4.49	-15.61	2.44	-27.60	7.62
061020	-10.69	1.14	-14.63	2.14	-15.88	2.52
061022	-19.81	3.92	-25.65	6.58	-38.21	14.60
061502	-8.15	0.66	-18.04	3.25	-8.37	0.70
061602	N/D	N/D	-19.44	3.78	48.22	23.25
061801	5.12	0.26	9.18	0.84	-13.26	1.76
061905	-13.65	1.86	-9.25	0.86	-12.85	1.65
061906	-21.37	4.57	-13.09	1.71	-22.91	5.25
061909	-1.44	0.02	-4.86	0.24	-3.27	0.11
062101	4.28	0.18	6.40	0.41	5.76	0.33
062102	14.04	1.97	16.74	2.80	19.99	3.99
062209	-12.98	1.69	-12.34	1.52	-22.32	4.98
062701	-38.47	14.80	-38.02	14.46	-41.84	17.51
062802	5.35	0.29	19.48	3.80	21.36	4.56
070401	16.78	2.82	19.97	3.99	29.85	8.91
071401	7.72	0.60	17.98	3.23	12.31	1.52
072302	N/D	N/D	12.39	1.53	30.72	9.44
073301/073303	68.19	46.50	55.51	30.82	25.56	6.53
073502/073503	10.23	1.05	N/D	N/D	N/D	N/D
073801	4.78	0.23	-0.99	0.01	7.55	0.57
074601	6.78	0.46	-20.56	4.23	1.57	0.02
074701	4.14	0.17	-2.80	0.08	-8.94	0.80
074902	-11.53	1.33	-24.87	6.19	-15.37	2.36
074903	30.92	9.56	N/D	N/D	N/D	N/D
075601	-31.54	9.95	-38.67	14.95	-30.29	9.17
080101/080102	-5.04	0.25	10.85	1.18	2.88	0.08
080701	4.82	0.23	3.17	0.10	-4.79	0.23
080704	-4.41	0.19	-5.34	0.29	1.29	0.02
080705/080717	-22.15	4.90	-18.52	3.43	-9.90	0.98
080707	24.68	6.09	20.32	4.13	37.91	14.37
080718	-15.20	2.31	-14.01	1.96	-6.58	0.43
080801	27.26	7.43	21.34	4.56	7.77	0.60
080809	-17.74	3.15	-21.10	4.45	-21.27	4.53
081002	-39.88	15.90	-39.40	15.52	-44.48	19.79
081006	19.47	3.79	30.56	9.34	10.92	1.19

081007	-51.72	26.75	-51.63	26.66	-49.82	24.82
090601	-51.53	26.55	-50.57	25.57	-51.00	26.01
090602	9.13	0.83	14.47	2.09	9.15	0.84
090605	15.81	2.50	16.99	2.89	16.63	2.76
090607	40.76	16.62	39.97	15.98	1.25	0.02
090609	102.72	105.52	71.26	50.79	71.56	51.21
090610	6.09	0.37	-0.18	0.00	12.41	1.54
090613	3.98	0.16	1.28	0.02	9.28	0.86
092703	49.51	24.51	50.10	25.10	64.30	41.34
092704	31.41	9.86	37.16	13.81	47.36	22.43
092706	24.05	5.78	33.86	11.47	25.20	6.35
092707	30.57	9.35	37.39	13.98	35.24	12.42
092708	13.18	1.74	13.29	1.77	9.02	0.81
092711	-6.36	0.40	-3.24	0.11	-7.83	0.61
092715	1.87	0.04	-0.15	0.00	5.97	0.36
092717	38.55	14.86	29.39	8.64	58.45	34.17
092722	-41.59	17.29	-20.02	4.01	-29.40	8.64
MOYENNE	11.42	30.56	8.31	22.87	15.08	40.61

Fréquence de surestimation	71/131 (54.2%)	66/129 (51.1%)	69/129 (53.5%)
Fréquence de sous-estimation	60/131 (45.8%)	63/129 (48.9%)	60/129 (46.5%)

Annexe 6 : Régions hydrologiquement homogènes déterminées par l'application de la technique de classification ascendante hiérarchique

Répartition des stations utilisée pour l'estimation du $Q_{2,7}$ et du $Q_{10,7}$ annuel

011508	010101	011507	061022	071401	080101/080102	030316
040129	010801/010802	021915	061602	073801	080704	030341
040202/040204	010901/010902	022504/022507	061905	075601	080705/080717	030415
040212	011201	022703	061906	090602	080707	030901/030905
040401/040406	020401/020404	023101/023106	062209	090605	080718	046706
040814	020502	023301/023303	072302	090607	080801	046707
041301	020601/020602	023401	073301/073303	090609	080809	052233
041901/041902	020802	023402	074601	090610	081007	
041903	021407	023403	074701	090613	092707	
042606	021502	023426	074902	092708	092717	
043009/043012	021601	023429	081006	092711	092722	
050116/050144	040830	023701	092706	092715		
050117/050135	050408	024001/024007				
050119	050409	024003				
050301	051001	024013				
050302/050304	051002	030101				
050305	051003	030103				
050701	051004	030214/030234				
050812	051005	030219				
051301	051007	030238				
052202/052219	051502	030282				
052203/052212	061020	030335				
052601	061502	030340				
052803	062101	031401				
052805	062102	040201				
060101	080701					
060601	081002					
061801	090601					
061909	092703					
062701	092704					
062802						
070401						

Répartition des stations utilisée pour l'estimation du $Q_{2,7}$ et du $Q_{10,7}$ hivernal

022003	010101	061905	011507	080101/080102	023401	040401/040406
040201	010801/010802	062101	011508	080704	024001/024007	041901/041902
040202/040204	010901/010902	062102	022701/022704	080707	024003	042606
040212	011201	062209	023301/023303	080718	030101	052803
040814	020401/020404	072302	023402	080801	030103	061906
040830	020502	073801	023403	080809	030316	074701
041301	020601/020602	074902	023701	081007	030415	080705/080717
041903	020802	080701	024013	092707	030901/030905	
043009/043012	021407	081002	030214/030234	092717	046706	
050116/050144	021502	081006	030219	092722		
050117/050135	021601	090601	030238			
050119	021915	090602	030282			
050302/050304	022504/022507	090607	030341			
050305	022703	090609	031401			
050408	023101/023106	090610	046707			
050409	023426	090613	050301			
051001	023429	092703	050701			
051002	030335	092704	050812			
051003	030340	092706	052233			
051004	040129	092708	052601			
051005	050813	092711				
051006	051301	092715				
051007	052202/052219					
051502						
052203/052212						
052805						
060101						
060601						
061020						
061022						
061502						
061602						
061801						
061909						
062701						
062802						
070202						
070401						
071401						
073301/073303						
074601						
075601						

Répartition des stations utilisée pour l'estimation du $Q_{2,7}$ et du $Q_{10,7}$ estival

010101	011507	022703	071401	041901/041902	050408	030262
010901/010902	011508	023101/023106	073801	042606	050409	030316
011001/011003	021915	023301/023303	074903	052803	050813	030341
011201	022003	023401	080801	080101/080102	051004	030415
020302	022504/022507	023402	081007	080701	051006	030901/030905
020502	040810	023403	090602	080704	051007	040201
020601/020602	040814	023426	090605	080705/080717	051011	046706
020802	041301	023429	090606	080707	061502	046707
021407	041903	023701	090607	080718	073301/073303	052231
021502	043009/043012	024001/024007	090609	080809	075601	052233
040129	050119	024003	090610	081002	076601	
040202/040204	051301	024010	090613	090601		
040409	060601	024013	092706	092703		
040830	061602	030101	092707	092704		
050116/050144	061905	030103	092708			
050301	061909	030219	092711			
050302/050304	062101	030238	092715			
050305	062102	030282	092717			
050701	062209	030335	092722			
050812	072302	030340				
051502	073502/073503	031401				
052228	074601					
052601	074701					
052805	074902					
060101	081006					
061801						
062701						
062802						
070401						

Répartition des stations utilisée pour l'estimation du $Q_{5,30}$ annuel

011508	011507	010101	080101/080102	061022	071401	030316
040129	021915	010801/010802	080701	061905	073801	030341
040202/040204	022203	010901/010902	080704	061906	075601	030415
040212	022504/022507	011001/011003	080705/080717	062209	090602	030901/030905
040401/040406	022701/022704	011201	080707	073301/073303	090605	046706
040814	022703	020401/020404	080718	073502/073503	090607	046707
041301	023101/023106	020502	080801	074601	090609	052233
041901/041902	023301/023303	020601/020602	080809	074701	090610	
042606	023401	020802	081002	074902	090613	
043009/043012	023402	021407	081007	074903	092708	
050116/050144	023403	021502	090601	081006	092711	
050117/050135	023426	021601	092703	092706	092715	
050119	023429	040830	092704			
050301	023701	050408	092707			
050302/050304	024001/024007	050409	092717			
050305	024003	051001	092722			
050701	024013	051002				
050812	030101	051003				
051301	030103	051004				
052202/052219	030214/030234	051005				
052203/052212	030219	051006				
052803	030238	051007				
052805	030282	051502				
060101	030335	061020				
060601	030340	061502				
061801	031401	062101				
061909	040201	062102				
062701						
062802						
070401						

Répartition des stations utilisée pour l'estimation du $Q_{5,30}$ hivernal

022003	061905	010101	011507	080101/080102	023401	040401/040406
040201	062101	010801/010802	011508	080704	024001/024007	041901/041902
040202/040204	062102	010901/010902	022701/022704	080707	024003	042606
040212	062209	011201	023301/023303	080718	030101	052803
040814	072301	020401/020404	023402	080801	030103	061906
040830	072302	020502	023403	080809	030215	074701
041301	073502/073503	020601/020602	023701	081007	030415	080705/080717
041903	073801	020802	024013	092707	030901/030905	
043009/043012	074902	021407	030214/030234	092717	046706	
050116/050144	074903	021502	030219	092722		
050117/050135	080701	021601	030238			
050119	081002	021915	030282			
050302/050304	081006	022504/022507	030341			
050305	090601	022703	031401			
050408	090602	023101/023106	046707			
050409	090607	023426	050301			
051001	090609	023429	050701			
051002	090610	030335	050812			
051003	090613	030340	052233			
051004	092703	040129	052601			
051005	092704	050813				
051006	092706	051301				
051007	092708	052202/052219				
051502	092711					
052203/052212	092715					
052805						
060101						
060601						
061020						
061022						
061502						
061801						
061909						
062701						
062802						
070202						
070401						
071401						
073301/073303						
074601						
075601						

Répartition des stations utilisée pour l'estimation du $Q_{5,30}$ estival

010101	022703	052803	011507	011508	080701
010901/010902	023101/023106	061905	021915	030415	080704
011001/011003	023301/023303	062101	022003	040810	080705/080717
011201	023401	062102	022504/022507	040814	080707
020302	023402	071401	040201	041301	080718
020502	023403	072302	040830	041903	080801
020601/020602	023426	073502/073503	041901/041902	043009/043012	081002
020802	023429	073801	042606	046706	081007
021407	023701	074902	050302/050304	046707	090601
021502	024001/024007	074903	052231	050119	092703
040129	024003	080101/080102	062209	061602	092707
040202/040204	024013	080809	062802	074601	092717
040212	030101	081006	070401	074701	092722
040409	030103	090602	073301/073303		
050116/050144	030214/030234	090605	075601		
050117/050135	030219	090606	076601		
050301	030238	090607	092704		
050305	030262	090609			
050408	030282	090610			
050701	030316	090613			
050812	030335	092706			
050813	030340	092708			
051004	030341	092711			
051006	030901/030905	092715			
051007	031401				
051011	052233				
051301					
051502					
052202/052219					
052203/052212					
052228					
052601					
052805					
060101					
060601					
061020					
061022					
061502					
061801					
061909					
062701					

Annexe 7 : Classification américaine (traduction libre)

Groupe de sol hydrologique	Caractéristiques des groupes de sol
A	Sols présentant des taux élevés d'infiltration lorsque fortement mouillés, et constitués principalement de couches profondes de sable ou de gravier drainées de façon modérée à excessive. Ces sols ont un taux rapide de transmission d'eau.
B	Sols présentant des taux modérés d'infiltration lorsque fortement mouillés, et constitués principalement de textures allant de modérément profondes à profondes, de même que de modérément fines à modérément grossières. Ces sols ont un taux modéré de transmission d'eau.
C	Sols présentant de bas taux d'infiltration lorsque fortement mouillés, et constitués principalement de couches qui entravent le mouvement de l'eau vers le bas, ou encore de couches dont la texture varie de modérément fine à fine. Ces sols ont un taux lent de transmission d'eau.
D	Sols présentant de très bas taux d'infiltration lorsque fortement mouillés, et constitués principalement d'argile avec un fort potentiel de gonflement, d'une nappe phréatique élevée permanente, d'un horizon argileux compact ou d'une couche d'argile en surface (ou bien près d'elle), ainsi que de couches peu profondes de matériaux pratiquement imperméables. Ces sols ont un taux très lent de transmission d'eau.

Annexe 8 : Classes de végétation provenant de la carte pédo-paysage du Canada

Symboles de classe de végétation	Description
A	Cultures : Grandes cultures annuelles.
B	Bog : Des arbres peuvent pousser ou non sur les bogs qui sont généralement recouverts de <u>Sphagnum</u> spp. et de plantes éricacées buissonneuses.
C	Forêt de conifères : Dominée par des espèces à aiguilles et à cône. Dans les régions à régime écoclimatique subarctique, ceci fait référence à une forêt de conifères ouverte à lichen; dans les régions à régimes écoclimatiques boréales ceci fait référence à une forêt de conifères à couvert fermé.
D	Forêt de feuillus : Dominée par des espèces latifoliées (à grandes feuilles).
F	Fen : Dominé par des cypéracées, des graminées, des roseaux et des mousses brunes avec quelques arbustes et, parfois, une couverture éparse d'arbres.
G	Prairie Prairie autochtone pérenne ou pâturage bonifié.
H	Désert arctique : Zones sans végétation du désert polaire du Haut-Arctique; peut être causé par des facteurs climatiques (trop froid ou trop sec) ou édaphiques (faible teneur en éléments nutritifs ou substratum toxique), ou par les deux à la fois.
L	Lichen : Dominé par les lichens avec des quantités importantes de mousses et incluant habituellement des buissons peu ou moyennement éricacés
M	Forêt mixte de conifères et de feuillus : Voir codes C et D.
P	Prairie-parc : Transition forêt-prairie composée d'une mosaïque de trembles associées à des cultures, des prairies et des prairies herbeuses.
R	Terres marécageuses : Configuration superficielle en mosaïque composée de cuvettes ou de chenaux intercalés à des touffes émergées

	de cypéracées, de graminées, de joncs et de roseaux, bordant des prairies herbeuses et des bandes périphériques d'arbustes ou d'arbres; les plantes aquatiques submergées et flottantes sont abondantes dans les zones d'eau libre.
S	Arbustales : Dominées par des espèces arbustives
SP	Tourbe de carex : Dominée par le <u>Carex</u> spp. et d'ordinaire à décomposition et développement du tapis végétal moyens; les feuilles de carex sont facilement identifiables à l'oeil nu
TA	Toundra alpine : Terrain sans arbre qui se trouve en hautes altitudes immédiatement au-dessus de la zone forestière et de la limite forestière altitudinale; la végétation de toundra comprend les lichens, les mousses, les cypéracées, les graminées, les plantes herbacées dicotylédones et les arbustes bas (20 cm ou moins) y compris les éricacées, les saules nains et les bouleaux.
TH	Toundra d'arbustes hauts : Dominé par des arbustes de 20 à 60 cm de haut qui poussent dans la région basse écoclimatique de l'Arctique.
TM	Toundra d'arbustes moyens : Semblable à la toundra à arbuste bas (voir code TL), sauf que les arbustes y sont de taille moyenne (>20 cm).
TL	Toundra d'arbustes bas : Terrain sans arbre qui se trouve en haute latitude et surtout dans la zone immédiatement au nord de la forêt boréale, y compris les parties sans arbres de l'écotone forêt--toundra adjacent à la limite forestière; la végétation de toundra comprend les lichens, les mousses, les cypéracées, les graminées, les plantes herbacées dicotylédones et les arbustes bas (20 cm ou moins) y compris les éricacées, les saules nains et les bouleaux.
TB	Toundra, herbes brisé - arbustes bas : Les arbustes nains, les Dryas et les saules sont des composantes importantes de la végétation. Il y a d'autres plantes vasculaires, mais leur couvert végétal est faible. Les lichens crustacés sont très répandus sur le sol de surface. Le couvert végétal est de 10 à 20 %.
U	Surface sans végétation
W	Pré, humide : Dominé par les carex et les herbes cotonneuses avec des mousses humides (ex. Mnium spp., Sphagnum spp.) et des herbes occasionnelles.
#	Ne s'applique pas

Annexe 9 : Classes de drainage provenant de la carte pédo-paysage du Canada

Symboles de classe de drainage	Description
E	Excessif : L'eau s'écoule du sol beaucoup plus rapidement qu'elle n'y pénètre; le surplus d'eau descend très rapidement dans les cas où le matériau sous-jacent est perméable; l'écoulement souterrain peut être très rapide lorsque les pluies sont intenses là où le gradient est abrupt; l'eau provient des précipitations.
R	Rapide : L'eau s'écoule du sol plus rapidement qu'elle n'y pénètre; le surplus d'eau descend vers le bas dans les cas où le matériau sous-jacent est perméable; il peut se produire un écoulement souterrain sur les gradients abrupts lors des pluies intenses; l'eau provient des précipitations.
W	Bon : L'eau s'écoule du sol aisément mais non rapidement; le surplus d'eau descend facilement dans le matériau sous-jacent perméable ou migre latéralement sous forme d'écoulement souterrain; ces matériaux retiennent fréquemment de fortes quantités d'humidité permettant la croissance des plantes après les pluies ou à la suite d'irrigations.
M	Moyen : L'eau s'écoule du sol un peu plus lentement qu'elle n'y pénètre; le surplus d'eau s'écoule un peu lentement à cause de la faible perméabilité, de la surface de saturation élevée, du faible gradient ou d'une combinaison de ces facteurs; l'eau provient essentiellement des précipitations dans les sols à texture moyenne à fine; dans les sols à texture grossière, des volumes importants d'écoulement souterrain s'ajoutent aux précipitations.
I	Imparfait : L'eau s'écoule du sol suffisamment lentement (par rapport à l'apport d'eau) pour que le sol reste humide durant une grande partie de la saison de croissance des plantes; le surplus d'eau descend lentement vers le bas là où les précipitations constituent le principal apport; dans les cas où les eaux souterraines ou subsuperficielles, ou les deux, constituent la principale source, le taux d'écoulement peut varier, mais le sol demeure humide durant une importante partie de la saison de croissance des plantes.
P	Faible : Étant donné que l'eau s'écoule beaucoup plus lentement qu'elle y est apportée, le sol demeure humide durant une grande partie de la période où le sol n'est pas gelé; il y a la plupart du temps un surplus d'eau dans le sol; l'écoulement superficiel ou souterrain, ou les deux, s'ajoute aux précipitations comme principale source d'eau; il peut y avoir aussi

	une nappe d'eau suspendue.
V	Très faible : L'eau s'écoule tellement lentement que la surface de saturation affleure à la surface durant une large part de la période où le sol n'est pas gelé; l'écoulement de la nappe souterraine et l'écoulement souterrain constituent les principales sources d'eau; les précipitations jouent un rôle moins grand, sauf là où il y a une nappe d'eau suspendue.
#	Ne s'applique pas

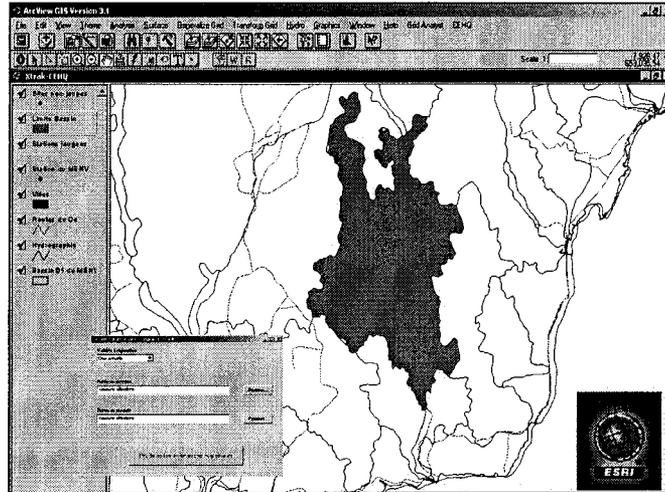
ANNEXE 10

GUIDE DE L'USAGER POUR L'OUTIL GÉOMATIQUE D'ANALYSE RÉGIONALE DES DÉBITS D'ÉTIAGE



Analyse Régionale Intégrée des Débits d'Étiages au Québec

ARIDE



Guide de l'utilisateur

Régionalisation et cartographie des débits d'étiage au Québec habité



Novembre 2004

A) Avant-propos

Ce prototype permet d'obtenir une estimation régionale des débits d'étiages pour des sites qui sont non-jaugés et se situant sur les cours d'eau de la partie habitée du Québec (au sud du 55^e parallèle). Le but principal de cet outil est la régionalisation des débits des étiages (regroupement des stations ayant un comportement hydrologique semblable et estimation régionale) à partir des caractéristiques physiographiques et météorologiques se rapportant aux bassins non-jaugés. Ce prototype de régionalisation englobe deux importantes composantes, soit l'extension développée dans *ArcView GIS 3.x* © et le module programmé dans l'environnement *MATLAB* ©.

Dans ce guide de l'utilisateur, la procédure générale à suivre est expliquée pour que l'utilisateur obtienne les débits d'étiages en quelques minutes et ce, sur un simple ordinateur de bureau.

Pour obtenir plus d'information, l'utilisateur est référé au rapport complet du projet PARDE de régionalisation des crues (Gignac *et al.*, 2003) et au *Dictionnaire des données géographiques* disponible à la fin de ce document.

B) Logiciels, programmes et données

Pour que l'outil puisse fonctionner correctement, il faut d'abord installer sur le poste de travail une licence d'*ArcView GIS 3.x* © qui bénéficie des extensions : *Spatial Analyst (licence)*, *Hydrologic Modeling*, *Geoprocessing Wizard*, *Kriging Interpolation*, *Grid Analyst*, *Geoprocessing* et *Dialog Designer*. Ces extensions sont, pour la plupart disponibles dans le répertoire **C:/ESRI/ARIDE_QC/Workspace/Extension**. L'extension développée pour le CEHQ, soit *ARIDE-Quebec (prototype)*, devra être copiée dans le répertoire créé, par défaut, lors de l'installation d'*ArcView GIS* (ex. **IARCVIEW/EXT32**) sur l'ordinateur hôte.

Le poste de travail requiert également le module de détermination des régions hydrologiquement homogènes (DRH) et de la méthode d'estimation régionale (MER) qui a été compilé dans l'environnement *MATLAB*. Ce programme développé pour le projet nécessite dans son répertoire les différentes bibliothèques de *MATLAB* utilisées par ce dernier, mais ne requiert pas l'installation d'une licence *MATLAB* sur le poste en question.

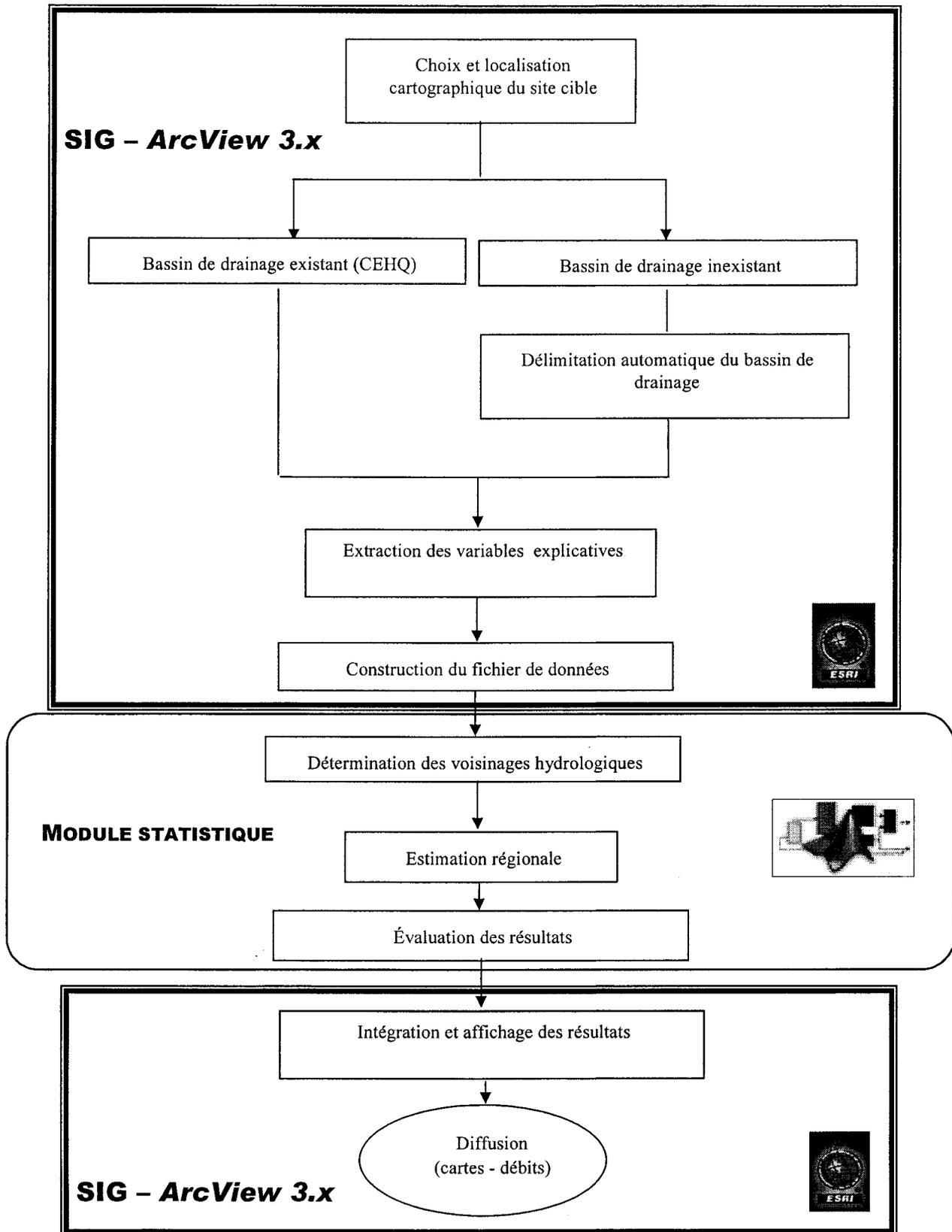
D'autre part, le prototype a été testé sur des ordinateurs ayant MS Windows© 98/NT/2000 comme système d'exploitation, donc il est conseillé de l'utiliser dans cet environnement informatique.

De plus, les données de référence (couches cartographiques et bases de données) assurant le bon fonctionnement de l'outil ont été copiés dans un répertoire **C:/ESRI/ARIDE_QC/** prévu à cet effet. Voici l'inventaire des données de référence et le nom des fichiers correspondants :

- Grilles thématiques (**/ARIDE_QC/BDRS/THEMATIC/**)
 - o Réseau d'accumulation (PHYSIO) – qc_accum ;
 - o Orientation des versants (PHYSIO) – qc_direct ;
 - o Modèle numérique d'altitude (PHYSIO) – qc_mna ;
 - o Forêt (PHYSIO) – qc_pfor ;
 - o Lac (PHYSIO) – qc_plac ;
 - o Numéro de courbe moyen (PHYSIO) – qc_cnm ;
 - o Précipitation liquide moyenne à l'été-automne (METEO) – qc_plme ;
 - o Degré jour en bas de 0° C (METEO) – qc_djbz ;
 - o Nombre de jour supérieur à 27 ° C (METEO) – qc_njh27.
- Couches de contexte (**/ARIDE_QC/BDRS/CONTEXTE/**)
 - o Hydrographie au 1 : 1 000 000 – qc_eau.shp ;
 - o Hydrographie au 1 : 1 000 000 extraite du MNA – qc_eau_mna.shp ;
 - o Rivières au 1 : 250 000 – qc_eau_250.shp ;
 - o Rivières et lacs au 1 : 250 000 – qc_eau2_250.shp ;
 - o Routes – qc_route.shp ;
 - o Villes – qc_ville.shp.
- Stations ponctuelles (**/ARIDE_QC/BDRS/STATION/**)
 - o Stations jaugées de référence (étude régionale) – jauge.shp ;
 - o Stations météorologiques – station_meteo.shp
 - o Stations hydrométriques (actives, fermées) – station_hydro.shp ;
 - o Exutoires des sites non-jaugés – non_jauge.shp ;
 - o Sites d'intérêt avec estimation régionale – site_estime2.shp.
- Polygones (**C:/ESRI/ARIDE_QC/BDRS/**)
 - o Régions hydrologiques du MENV (REGION) – re_hy.shp ;
 - o Bassins cibles non-jaugés (BASSIN) – bassin_cible.shp ;
 - o Grands bassins hydrographiques du CEHQ (BASSIN) – bv_n1.shp.

Le répertoire stockant, par défaut, toutes les estimations est le suivant : **C:/ESRI/ARIDE_QC/Workspace/TEMP/**.

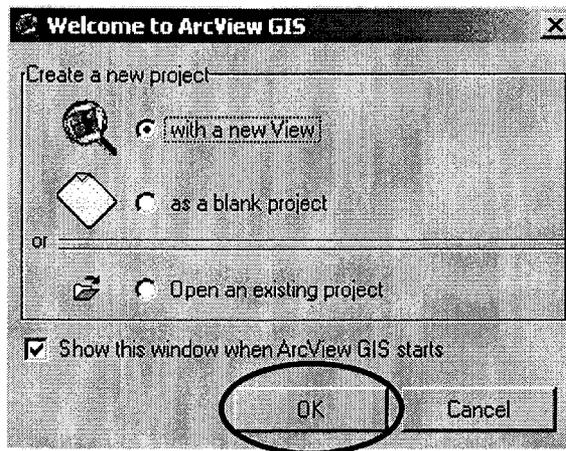
C) Plan de l'outil de régionalisation



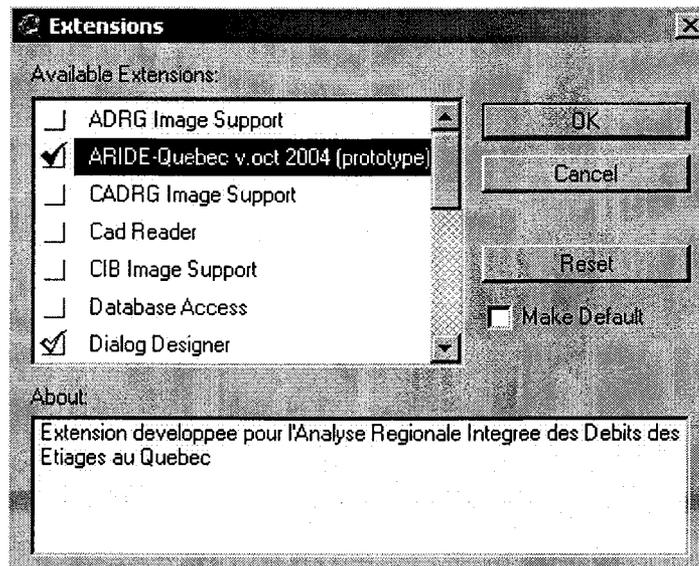
D'entrée de jeu, l'utilisateur doit identifier la localisation exacte du site cible ou de l'exutoire en question, il peut le faire à partir des cartes topographiques en format papier disponibles au CEHQ ou à l'aide de l'outil géomatique du CEHQ utilisant comme base référentielle une carte matricielle du territoire québécois. Ensuite, le programme permet de délimiter automatiquement le bassin cible non-jaugé qui correspond à la zone d'extraction des caractéristiques physiographiques et météorologiques. Ainsi, lorsque ce bassin de drainage est inexistant dans les bases de données du CEHQ, il peut être délimité par un algorithme (D8) implanté par défaut dans *ArcView GIS 3.x*. Cet algorithme n'étant pas infaillible, une validation est donc nécessaire pour la délimitation adéquate du bassin cible. D'autre part, si le bassin cible existe déjà dans la base de données du CEHQ, l'utilisateur pourra l'ouvrir à partir de l'outil et faire les analyses régionales ensuite. À partir de ce bassin cible (délimité automatiquement ou existant dans la base de données), l'extraction des variables explicatives sur son territoire peut s'exécuter. Ces données explicatives servent, par la suite, à déterminer les stations jaugées qui sont similaires hydrologiquement au site d'intérêt, cette étape se fait à l'aide d'un module statistique spécifique. Après avoir déterminé les voisinages hydrologiques (DRH) du site d'intérêt, la méthode d'estimation régionale (MER) génère les coefficients de régression multiple utilisés dans l'équation régionale. Suite à ces calculs, les quantiles de débits à différentes périodes de retour (2, 5 et 10 ans) sont générés. La sauvegarde des résultats dans la base de données des sites estimés peut se faire dans un fichier en format texte contenant les résultats et les paramètres de l'estimation. Ces valeurs de débits obtenus par DRH-MER, correspondant aux attributs des sites cibles, sont alors attachés aux objets cartographiques de ces derniers. Cette base de données à référence spatiale est ensuite disponible pour diffuser et publier, sous forme de cartes et de tableaux, les analyses régionales effectuées sur les sites d'intérêt.

1. Lancement de la procédure de régionalisation

La première étape de la procédure de régionalisation débute avec l'ouverture de *ArcView GIS 3.x* (ou d'un nouveau projet) et d'une nouvelle session.



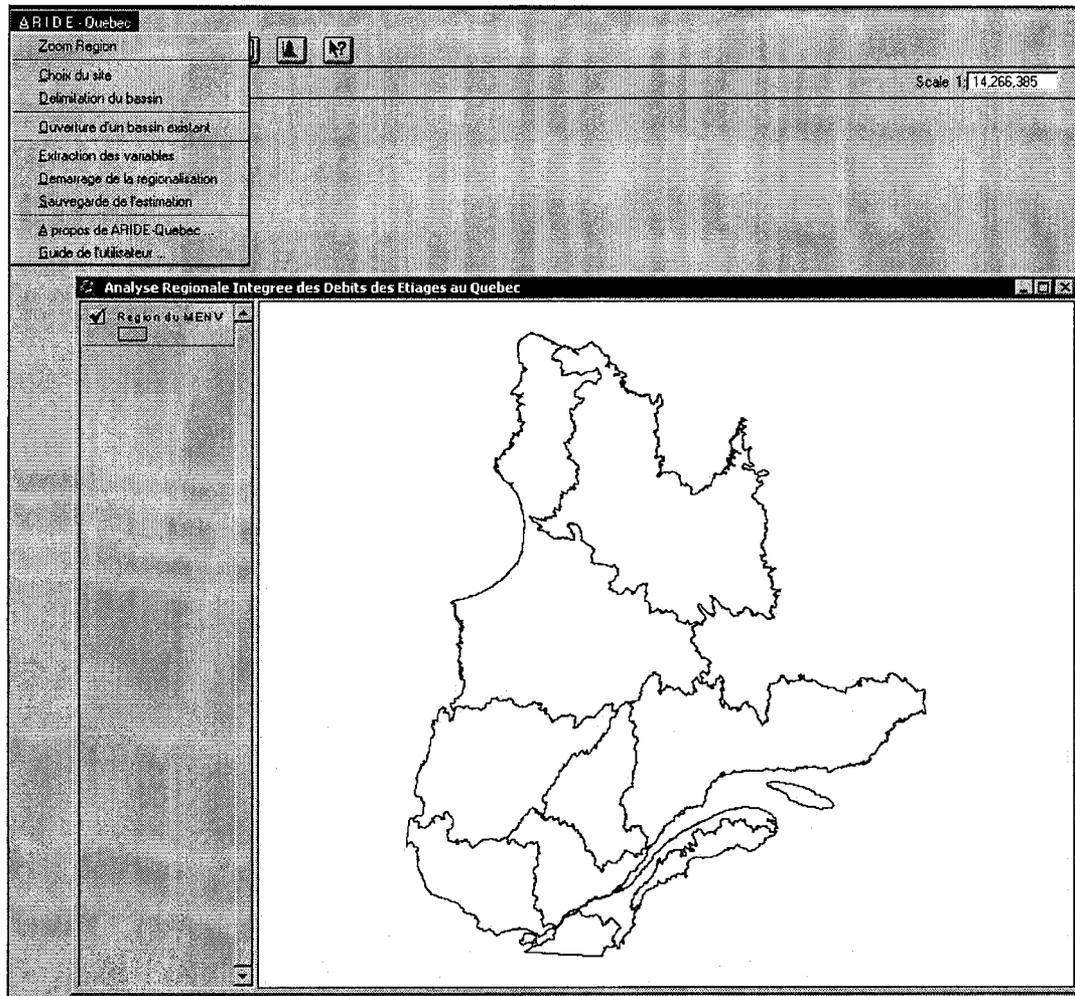
Ensuite, il faut sélectionner **File > Extensions...** dans le menu principal, il faut cocher l'extension *ARIDE-Québec (prototype)* qui a été développée pour le présent projet. Il s'agit de cliquer sur OK et l'extension sera activée.



Il est important de noter qu'un projet de départ intégrant toutes les extensions utilisées dans cet outil est également disponible. Ce projet permet alors de passer directement et plus simplement à la prochaine étape sans passer par une ouverture systématique d'une nouvelle session en activant l'extension, comme expliquée ci-

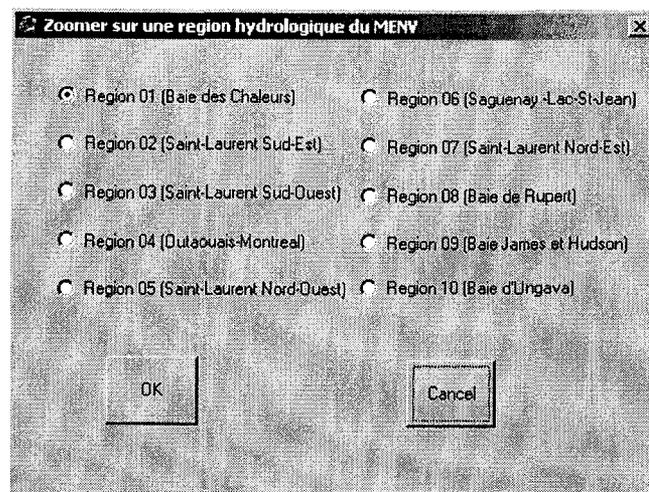
haut. Le nom du fichier se nomme «aride_qc.apr» (répertoire C:/ESRI/ARIDE_QC/Workspace/Projet).

Ainsi, une nouvelle *View* (régions hydrologiques du MENV) va s'ouvrir et le menu *ARIDE-Quebec* va apparaître dans la barre de menu.

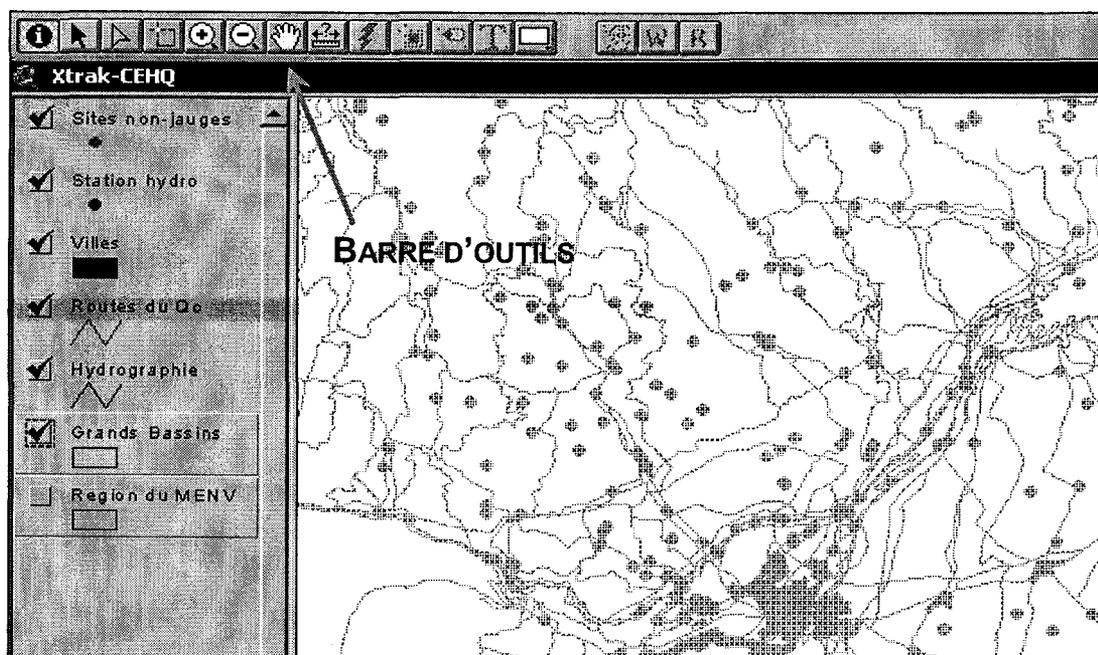


2. Zoomer sur une région hydrologique du MENV

Le premier sous-menu se nomme *Zoom Region* et il permet à l'utilisateur de zoomer une région hydrologique du MENV où il veut une estimation.



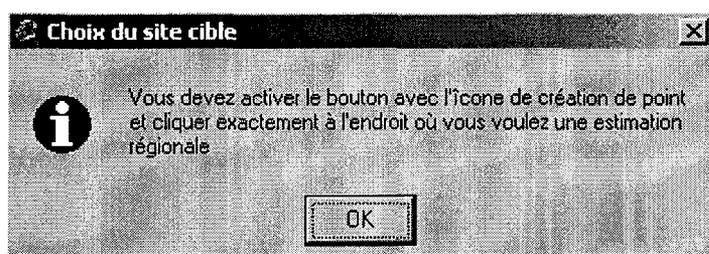
Ce choix de zoom dans une région hydrologique spécifique permet à l'utilisateur de se situer sur le territoire avec des couches de contexte (hydrographie, routes, villes, sites non-jaugés, stations hydrométriques, stations météorologiques, etc.) qui correspondent à la base cartographique vectorielle (échelle 1 : 1 000 000) servant à localiser le site d'intérêt. Ainsi, l'utilisateur peut, à sa guise, se déplacer dans plusieurs régions hydrologiques ou zoomer sur une localité en particulier à l'aide des dispositifs de visualisation (outil de loupe) situés dans la barre d'outil en haut de la fenêtre de la *View*.



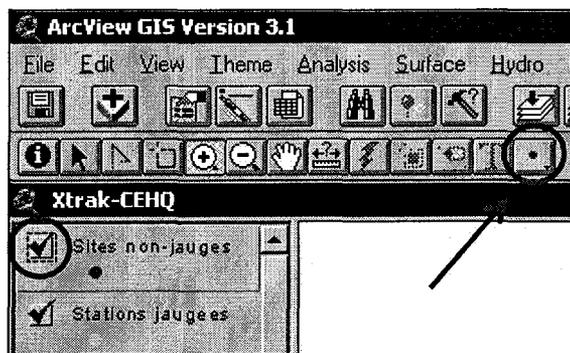
Il est important de considérer les régions hydrologiques du MENV comme un découpage géographique général. En fait, les voisins hydrologiques d'un site d'intérêt peuvent se retrouver géographiquement dans une autre zone que les limites régionales créées par le MENV.

3. Choix du site d'intérêt

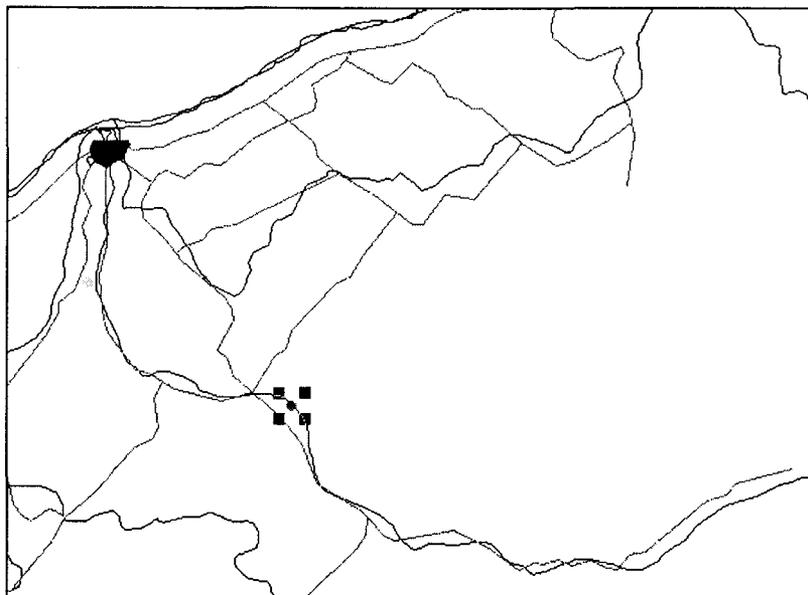
Après avoir localisé la zone de l'exutoire du site cible, il s'agit de sélectionner le sous-menu *Choix du site* pour entrer le point (objet) à analyser dans la base de données. Pour ce faire, un message indiquant que l'utilisateur doit activer dans la barre d'outils le créateur de point apparaît.



Suite à ce message, la couche thématique représentant les objets des sites non-jaugés peut maintenant être modifiée. Il s'agit alors simplement d'activer en haut de la View l'icône de création de point à l'extrémité droite de la barre d'outils.

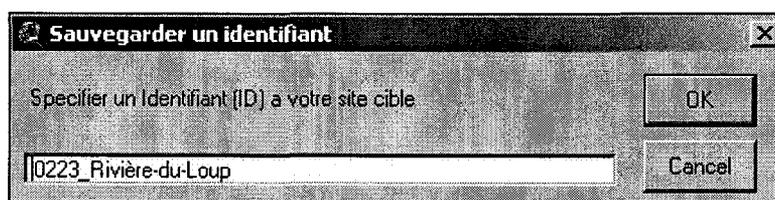


Ensuite, l'utilisateur peut cliquer à l'endroit spécifique pour créer le point sur le cours d'eau qui a été ciblé (cours d'eau au 1 : 1 000 000). En fait, le site d'intérêt sera stocké par défaut dans la base de données des sites non-jaugés et les quatre petits carrés noirs autour du point créé indiquent qu'il demeure la sélection active, ce qui sera important lors la prochaine étape.

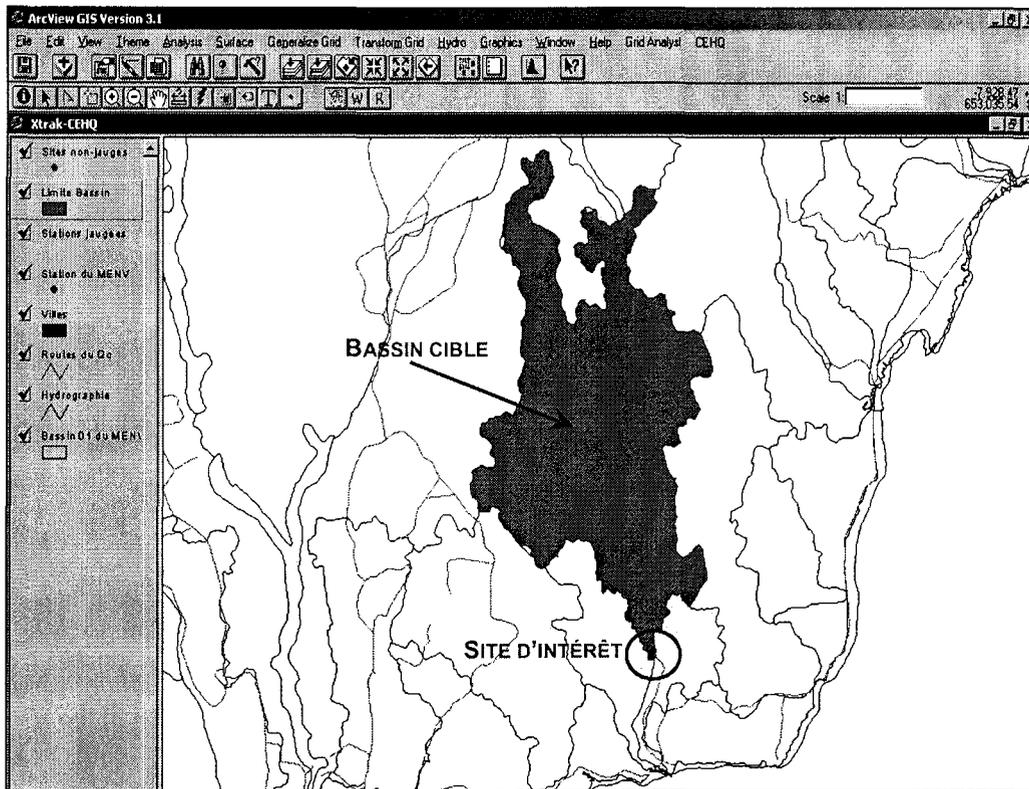


4. Délimitation automatique du bassin de drainage

La présente étape permet la génération automatique du bassin cible pour le site d'intérêt. Le point à l'exutoire du cours d'eau doit être la sélection active dans la *View*. Ensuite, il s'agit de cliquer dans le sous-menu *Délimitation du bassin* pour démarrer l'analyse. De ce fait, le programme ouvre les couches à utiliser pour générer automatiquement le bassin de drainage, soit le réseau d'accumulation et l'orientation des versants. Ensuite, pour identifier le site cible, un message, demandant à l'utilisateur de spécifier un nom unique au site cible, apparaîtra.



L'identifiant du site d'intérêt sera le nom attribué au point cible et au bassin cible, c'est pourquoi il est important qu'il soit significatif pour l'utilisateur (numéro de bassin du CEHQ, nom du cours d'eau, numéro de la région hydrologique du MENV, nom de la station, numéro de la station hydrométrique dans le répertoire hydrologique, etc.). Lorsque l'analyse spatiale a été effectuée à partir du réseau d'accumulation et de l'orientation des versants, le bassin de drainage est généré, intégré dans la base des bassins cibles et enfin il s'affiche à l'écran. Le bassin cible correspond, par défaut, à la sélection active de la *View*.

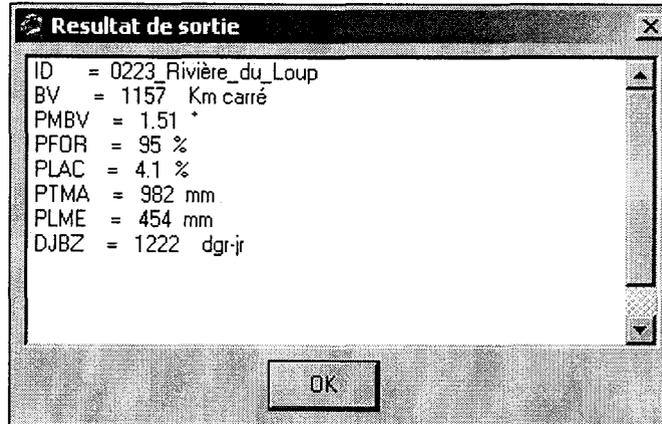


5. Ouverture d'un bassin existant

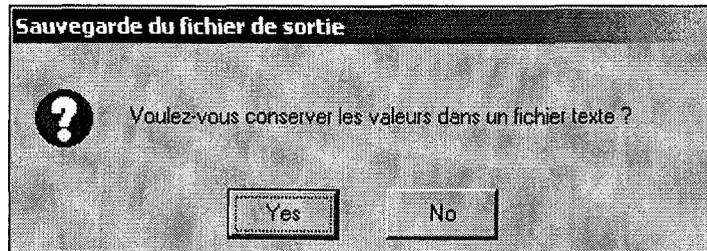
Un bassin existant en format numérique dans la base de données du CEHQ peut également s'intégrer dans la *View* active pour fin d'analyse régionale. Il s'agit de cliquer dans le menu *Ouverture d'un bassin existant* et de spécifier le fichier d'entrée à importer. Ensuite, l'utilisateur doit saisir les paramètres de projection du fichier source pour que le nouveau fichier du bassin existant détienne la bonne projection et puisse se superposer à la *View* active. Cette dernière couche du bassin existant demeure alors la sélection active et en utilisant l'outil suivant :  , on peut désigner le bassin en question qui sera utilisé pour les analyses régionales subséquentes.

6. Extraction des variables physiographiques et météorologiques

Pour extraire les variables explicatives, il s'agit simplement d'avoir le bassin cible comme sélection active dans la fenêtre et ensuite cliquer dans le sous-menu *Extraction des variables*. Ce programme permet la visualisation à l'écran des résultats et la configuration du fichier d'entrée pour le module de DRH-MER. Toutes les variables physiographiques et météorologiques employées dans les estimations pour les saisons annuelles, hivernales et estivales sont calculées à cette étape.



À la fin de l'exécution du programme, une boîte de dialogue apparaît et demande à l'utilisateur de décider s'il veut sauvegarder les résultats dans un fichier texte.



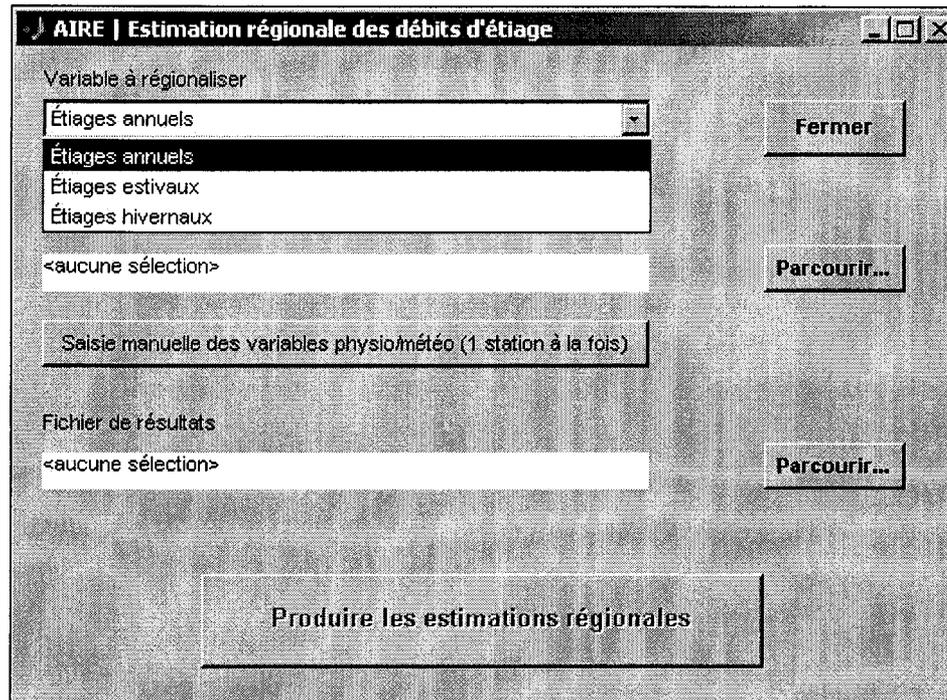
Si la réponse est positive, le fichier texte généré sera produit dans le répertoire attribué au fichier temporaire : **C:/ESRI/ARIDE_QC/Workspace/Temp** ou dans un autre répertoire que l'utilisateur peut choisir. Le fichier de données sera structuré de telle sorte qu'il puisse être lu par le module de DRH-MER, soit la prochaine étape à exécuter. Lorsque les valeurs des variables équivalent à "-99", la variable n'est pas considérée dans l'analyse.

NO_BV_1	BV	PMBV	PFOR	PLAC	PTMA	PLME	DJBZ
0528	1623	1.48	82	3.1	992	461	1361
0621_jaune	1210	-99	-99	-99	-99	-99	-99

7. Détermination des voisinages hydrologiques et estimation régionale

Lorsque les valeurs des variables météorologiques et physiographiques ont été sauvegardées dans un fichier de données en format texte, il s'agit de cliquer dans le sous-menu *Demarrage de la régionalisation*. Ensuite, l'interface du programme

MATLAB, déterminant la région homogène et utilisant la méthode d'estimation régionale, apparaît.



Le premier paramètre à spécifier est la variable que l'utilisateur veut régionaliser. Les choix sont les suivants : étiages annuels, estivaux et hivernaux. Par la suite, le fichier de données doit être spécifié, il correspond au fichier de données résultant de l'étape 5 du présent document, soit l'extraction des variables explicatives.

Une autre option permettant à l'utilisateur de saisir manuellement les valeurs d'entrée des variables explicatives est également disponible par l'entremise d'une station à la fois. Elle est utile pour l'utilisateur qui s'intéresse à certaines variables explicatives seulement, cependant il doit être conscient que la précision de l'estimation en sera grandement influencée. Les variables explicatives sont en ordre de force des corrélations par rapport aux débits, soit BV, PLAC, PLME, DJBZ, NJH27, NCM, et PFOR.

L'utilisateur devra inscrire la valeur "-99" s'il ne s'intéresse pas à la valeur d'une ou de plusieurs variables explicatives. Par contre, les résultats seront moins précis si l'utilisateur n'utilise pas toutes les variables qui ont été choisies, par défaut, dans le présent projet.

AIRE | saisie manuelle des variables physio/météo

Indiquez l'identifiant du site pour lequel vous souhaitez saisir les variables physio/météo manuellement.

Hiver : BV, PLAC, PFOR, DJBZ

Été : BV, NJH27, PLAC, NCM, PLME

Annuel : BV, NJH27, PLAC, NCM

BV = PFOR = DJBZ =

PLAC = PLME =

NCM = NJH27 =

Enfin, l'utilisateur doit désigner le nom du fichier de résultats et où il veut stocker les valeurs d'estimation des différents quantiles de périodes de retour 2, 5 et 10 ans. Ce fichier sert à la prochaine phase qui permet la récupération et la sauvegarde finale des résultats d'estimation dans la base de données à référence spatiale. Enfin, il ne reste qu'à cliquer sur *Produire les estimations régionales* pour entamer les calculs régionaux.

L'approche préconisée pour déterminer la région homogène (DRH) du site d'intérêt sera différente selon la variable à régionaliser et la superficie des bassins versants. Les méthodes sont les suivantes :

- Annuel : Analyse Canoniques des Corrélations (ACC) version modifiée, par classification avec BV, NJH27, PLAC, NCM ;
- Été : ACC-classification avec BV, NJH27, PLAC, NCM, PLME ;
- Hiver : ACC-classification avec BV, PLAC, PFOR, DJBZ ;

La méthode d'estimation régionale (MER) sera la même pour tous les modèles, soit la régression multiple. Les paramètres de la régression seront générés automatiquement par le module. Lorsque l'estimation régionale est effectuée, l'utilisateur peut visualiser les paramètres relatifs aux modèles à l'écran pour juger de la fiabilité des valeurs d'estimation. Il peut connaître les résultats de l'estimation, le nombre de voisins hydrologiques, les variables explicatives utilisées, le R-carré, les stations voisines et le facteur de correction utilisé selon le cas.

```

-> Résultats de l'estimation régionale (QA)
>> Station : 020601/020602
>> Variables : BV-PLAC-NCM-NJH27

```

Variable d'étiage Q(T,d) (T en années, d en jours)	Estimations (m3/s)	Nb de voisins	R-carré
Q(5.30)	1.95	33	0.41
Q(2.7)	2.11	34	0.48
Q(10.7)	1.59	41	0.45

```

>> Stations voisines pour chaque débit d'étiage

```

Q(5.30)	Q(2.7)	Q(10.7)
010101	010101	010101
011201	011201	011201
011508	011508	020401/020404
020401/020404	020401/020404	020601/020602
020601/020602	020601/020602	020802
020802	020802	021407
021407	021407	021502
021502	021502	023101/023106
022003	022703	023301/023303
023101/023106	023101/023106	023401
023301/023303	023301/023303	023403
023401	023401	023426
023403	023403	023429
024003	023429	024001/024007
030103	024003	024003
030214/030234	030103	030103
030219	030214/030234	030214/030234
030282	030219	030219
030340	030282	030282
030341	030340	030340
040401/040406	030341	030341
050409	050409	030901/030905
050701	050701	040401/040406
051301	051301	040814
052202/052219	052202/052219	050409
052805	052805	050701
060101	060101	051001
060601	060601	051301
061022	061022	052202/052219
061801	061602	052203/052212
061909	061801	052601
062701	061909	052805
073301/073303	062701	060101
	073301/073303	060601
		061022
		061602
		061801
		061909
		062701
		062802
		073301/073303

Le fichier de sortie, présentant les résultats de l'estimation, est conçu de telle façon qu'il soit aisément récupérable par le SIG.

```

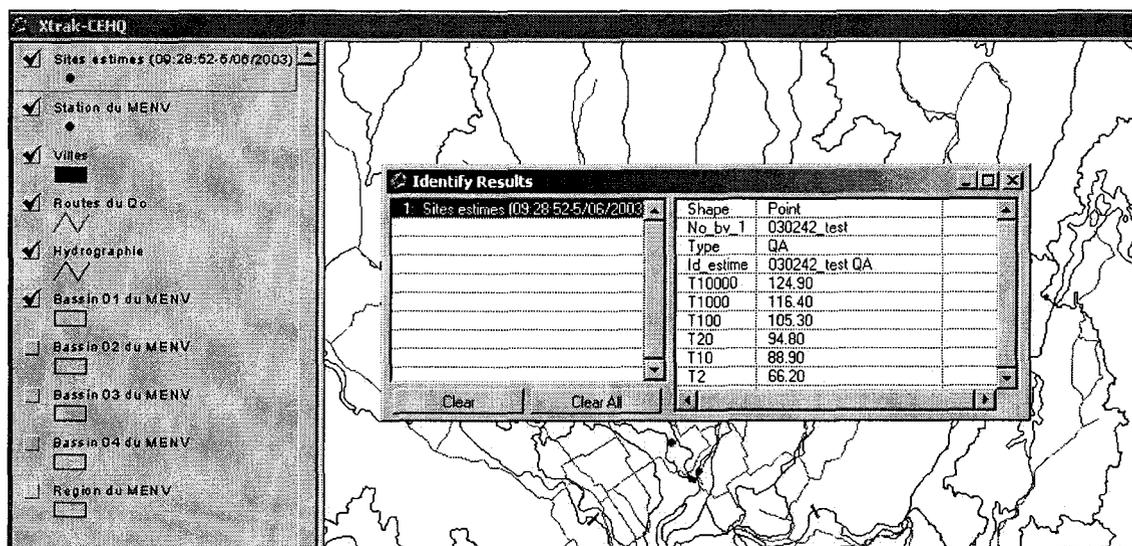
"NO_BV_1", "TYPE", "Q(5.30)", "Q(2.7)", "Q(10.7)", "VARIABLES", "DATE"
"020601/020602", "QA", 1.95, 2.11, 1.59, "BV-PLAC-NCM-NJH27", "05-Oct-2004 15:05:51"

```

8. Récupération et sauvegarde des résultats de l'estimation

Quand l'utilisateur est satisfait des résultats de l'estimation, il doit terminer sa session en sauvegardant et en récupérant les valeurs estimées dans la base de données à

référence spatiale. Cette étape confirme que le site non-jaugé a été correctement analysé et que les résultats sont jugés de bonne qualité. En fait, le programme rattache le point (objet cartographique) préalablement créé (étape 3) avec les résultats de l'estimation régionale (attributs). Pour ce faire, l'utilisateur n'a qu'à cliquer sur le sous-menu *Sauvegarde de l'estimation* pour récupérer le fichier préalablement créé et mettre à jour la couche cartographique des sites estimés. Pour afficher le résultat final à l'écran, l'utilisateur doit activer dans la barre d'outil l'icône  et cliquer sur l'exutoire où il y a eu une estimation.



9. Perspectives

Le prototype qui a été développé permet donc l'estimation régionale des débits d'étiages à n'importe quel endroit sur les cours d'eau du Québec habité à une échelle de 1 : 1 000 000. Cet outil se base sur l'intégration de plusieurs couches d'information qui permet aux usagers d'obtenir des estimations régionales selon une procédure uniforme et centralisée, ce qui occasionne une diminution des erreurs.

Dans l'avenir, le prototype sera appelé à être bonifié et personnalisé. Il bénéficie d'une nouvelle base cartographique (échelle 1 : 100 000) et des outils d'analyse plus performants. Une nouvelle technologie permettant aux usagers d'avoir accès à l'outil cartographique de leur poste de travail avec un lien réseau avec le SIG sur un ordinateur hôte pourrait aussi être intéressant à envisager. Enfin, la diffusion dans Intranet et/ou Internet pourrait être une stratégie enrichissante pour les demandes externes en régionalisation.

10. Références

Gignac, N., Ouarda, T.B.M.J., Chokmani, K., Gingras, H., et B. Bobée (2003) *Régionalisation et cartographie des crues au Québec habité*. INRS-Eau, Terre et Environnement. Rapport de recherche No. R-636-f1, Ste-Foy, 149 p.

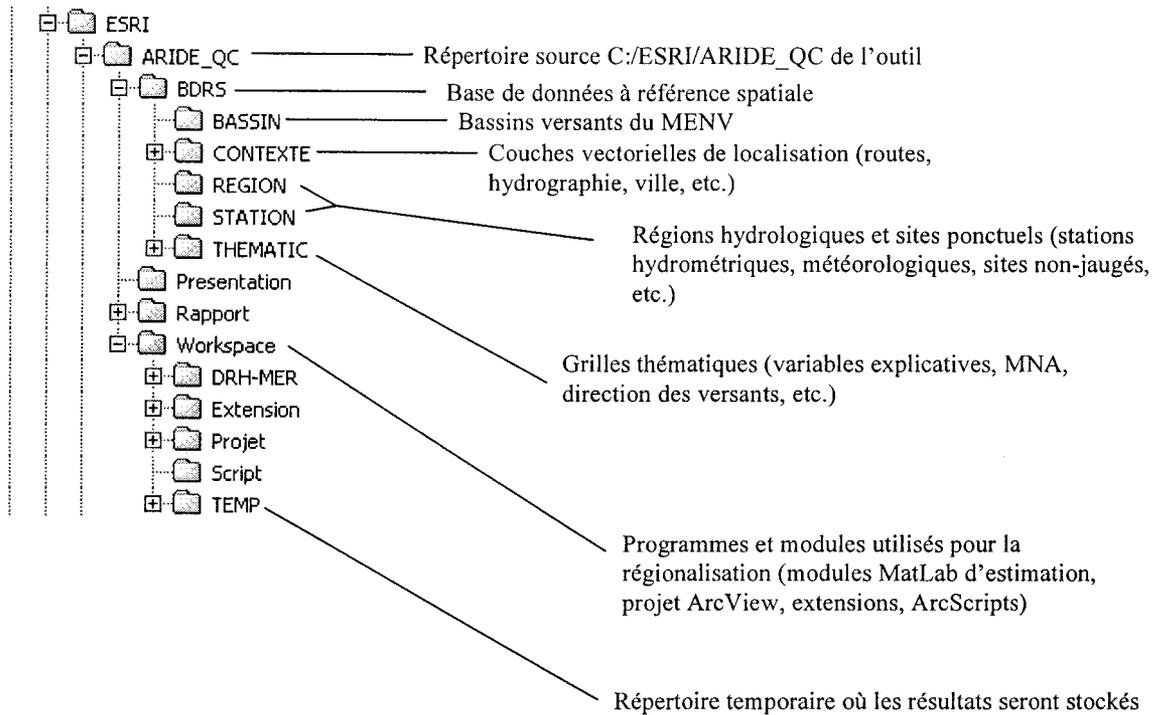
Environmental System Research Institute, <http://www.esri.com/>



ANNEXE

Dictionnaire des données géographiques

1- Configuration hiérarchique du répertoire de données



2- Métadonnées

La norme CAN/CGSB-171.3 a établie une structure décrivant les ensembles de données numériques à référence spatiale. Cette norme a été produite par le Comité mixte des organismes intéressés à la géomatique. Cette norme nationale pour les renseignements destinés au répertoire de données cartographiques sera celle employée pour le présent projet. Elle contient les champs d'informations suivants (Comité mixte des organismes intéressés à la géomatique, 1995) :

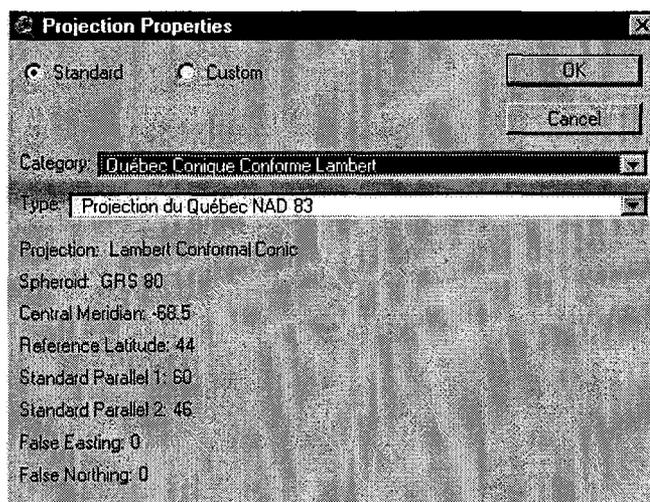
- a. Données d'identification sur l'ensemble de données, son propriétaire, le scientifique agissant à titre de personne-ressource, le gestionnaire des données et la personne avec qui communiquer pour avoir accès aux données;
 - b. Information descriptive au sujet du contenu de l'ensemble de données et détails sur la couverture spatio-temporelle des données ;
 - c. Détails concernant la mise à jour des données ;
 - d. Taille de l'ensemble de données ;
 - e. Détails relatifs à la collecte des données (ex. : fond de carte utilisé, sources de données, circonstances et détails relatifs à la collecte des données, projections cartographiques, systèmes de coordonnées, système de référence géodésique, précisions et commentaires sur la qualité des données) ;
 - f. Disponibilité de l'ensemble de données : politique d'accès, frais, communication externe, etc. ;
 - g. Information sur l'ordinateur hôte de la base de données, le système d'exploitation et la structure ;
 - h. Documentation et démonstrations destinées à aider l'utilisateur.
-
- a) Propriétaire : Centre d'Expertise Hydrique du Québec et le Ministère de l'Environnement du Québec, personne-ressource : Karem Chokmani—INRS-ETE au (418) 654-2570 ou karem_chokmani@ete.inrs.ca et Taha Ouarda—INRS-ETE au (418) 654-3842 ou taha_ouarda@ete.inrs.ca,

gestionnaire des données : William Larouche—MENV au (418) 521-3825 poste 7342 ou william.larouche@menv.gouv.qc.ca.

- b) Description : Les données du projet PARDE sur la régionalisation et la cartographie des débits d'étiages au Québec couvrent la partie habitée du Québec. Les données sont codées en format matriciel pour les éléments thématiques d'analyse (pente, précipitation, etc.) et en format vectoriel pour les couches de contexte (hydrographie, villes, stations, routes). Ces données proviennent en majorité de données du Ministère de l'Environnement (2001, 2002), Ministère des Ressources Naturelles du Québec (2002) et Ministère des Ressources Naturelles du Canada (2001, 2002). Les composantes des cartes de base sont disponibles en majorité à une échelle de 1 : 1 000 000. Ce jeu de cartes a d'abord été préparé en vue d'un objectif de régionalisation des crues extrêmes et ensuite pour les débits d'étiages au sud du Québec. Elles constituent la base officielle du projet, mais une mise à jour de ces données est à conseiller, puisque ces données datent de plusieurs années. Un CD-ROM comportant toutes les données à intégrer sera remis au CEHQ et un guide d'utilisateur est également disponible.
- c) Mise à jour : Les données sur les lacs, les cours d'eau, l'occupation forestière et l'altitude (MNA) mériteraient d'être substituées, en cas de besoin, par les bases cartographiques disponibles présentement au MENV par l'entremise du Ministère des Ressources Naturelles du Québec (MRNQ). En fait, les données cartographiques du MRNQ ont une échelle de 1 : 100 000, ce qui est nettement plus précis que l'échelle actuelle. Ce produit pourrait devenir très intéressant à intégrer dans ce projet de régionalisation et de cartographie des débits d'étiages.
- d) Taille des données : L'ensemble des données utilisé pour le projet des débits d'étiages occupe environ 700 Mo d'espace disque. Il est évident que si d'autres données plus précises viennent substituer les données actuelles la taille des données du projet sera nettement plus grande. Présentement, la combinaison entre la précision et la taille des données est en équilibre. Cependant, si on passe d'une échelle de 1 : 1 000 000 à 1 : 100 000, la

précision sera meilleure, mais la taille des données sera nettement plus grande et les temps de calculs plus longs.

- e) Collecte des données : les données vectorielles ainsi que la grille d'altitude pour tout le Québec ont été récoltés de sources gratuites du Ministère des Ressources Naturelles du Canada (2001, 2002). Les grilles des variables météorologiques (PLME, DJBZ, NJH27) proviennent de traitement d'interpolation par krigeage sur les stations météorologiques du Ministère de l'Environnement (2001). Les grilles d'occupation du sol (lac, cours d'eau, forêt) ont seulement subit une transformation du format natif vectoriel en format matriciel (Ministère des Ressources Naturelles du Canada, 2002). Par contre, les données pour les stations jaugées de référence, comme le pourcentage de lac et de forêt proviennent en majorité du document publié par Belzile *et al.* (2002). La couche des pentes pour tout le Québec provient d'un calcul de pente effectué dans *ArcView GIS 3.x* à partir de la couche d'altitude provenant du Ministère des Ressources Naturelles du Canada (2001). Les couches du réseau d'accumulation et de la direction des versants ont été créées suite à une analyse avec l'algorithme de type D8 à partir de la couche d'altitude modifiée (suppression des zones sans écoulement, hiérarchisation du réseau hydrographique en fonction de leur altitude, soustraction de la valeur 100 pour les cours d'eau, addition de la valeur 200 pour les grandes limites des bassins versants) provenant du Ministère des Ressources Naturelles du Canada (2001). Toutes les grilles sont disponibles en projection Conique conforme du Québec sous la forme suivante dans *ArcView 3.x* :



Les limites des bassins versants proviennent des fichiers cartographiques fournis par le CEHQ (Centre d'Expertise Hydrique du Québec, 2002). Enfin, les données hydrologiques et de localisation géographique pour les stations hydrométriques jaugées proviennent du rapport de Kouider *et al.* (2001) et de la banque de données hydriques (BDH) du ministère (Ministère de l'Environnement, 2002).

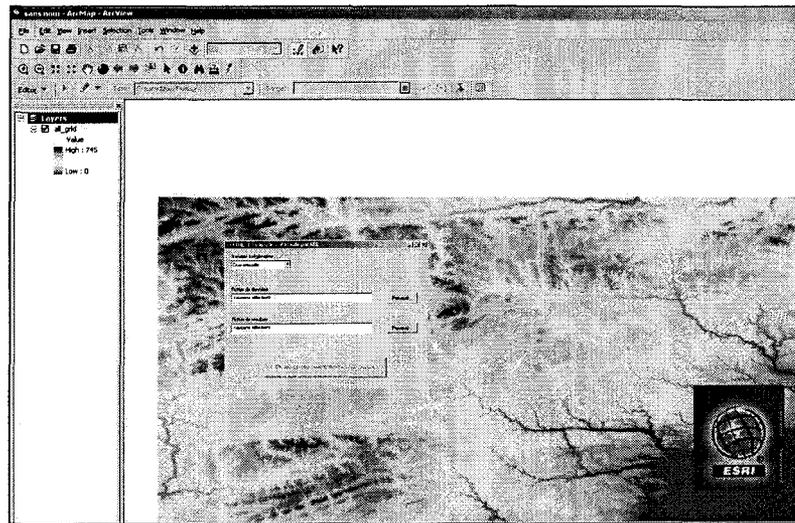
- f) Disponibilités des données : Les données sont pour l'instant la propriété du CEHQ et ne seront utilisées que dans le but du présent projet. Les données fournies à l'utilisateur (CEHQ) sont sans frais ni redevances à l'INRS-ETE. L'INRS-ETE ne peut en aucun cas utiliser ces données pour d'autres projets, sans avoir reçu l'approbation du gestionnaire des données au CEHQ.
- g) Système d'exploitation et ordinateur hôte : Ce projet demande d'abord des licences approuvées de *ArcView GIS* © 3.x pour l'ordinateur hôte. Ce poste de travail public au CEHQ devra bénéficier d'un processeur pouvant traiter une grande quantité de données. Le langage de programmation et de développement est *Avenue* pour le SIG et *MATLAB* pour le module de régionalisation. Les libraires *MATLAB* © sont nécessaires pour le module de régionalisation. Les extensions ESRI utiles pour le projet sont : *Spatial Analyst* (licence), *Grid Analyst Extension*, *Hydrologic Modeling*, *Geoprocessing Wizard*, *Kriging Interpolation* et évidemment l'extension *ARIDE-Quebec (prototype)* qui correspond à l'outil cartographique de régionalisation créé par l'INRS-ETE. Le prototype a été testé sur Windows NT. Il devrait donc fonctionner sur un poste de travail au CEHQ où MS Windows© 98/NT/2000 est installé.
- h) Aide à l'utilisateur : Un guide de l'utilisateur a été produit pour les gens du CEHQ afin qu'il puisse se référer à la procédure à suivre et se familiariser avec l'environnement du SIG et du module de régionalisation. Les personnes ressources en a) peuvent également fournir du support aux usagers du CEHQ.

ANNEXE 11

**MISE À JOUR DE L'ÉCHELLE ET NOUVEAUX
DÉVELOPPEMENTS APPORTÉS AUX OUTILS
GÉOMATIQUES DE RÉGIONALISATION DES CRUES
ET DES ÉTIAGES (ARC-QUÉBEC ET ARIDE)**

RÉGIONALISATION ET CARTOGRAPHIE DES CRUES ET DES ÉTIAGES POUR LE QUÉBEC HABITÉ

MISE À JOUR DE L'ÉCHELLE ET DÉVELOPPEMENT DE NOUVEAUX OUTILS GÉOMATIQUES (ARC-QUÉBEC ET ARIDE)



Par :

Nicolas Gignac

Chaire de recherche du Canada en estimation des variables hydrologiques
Institut National de la Recherche Scientifique, INRS-ETE
490, rue de Couronne, Québec (Québec) G1K 9A9

Avril 2005

TABLE DES MATIÈRES

1. INTRODUCTION.....	1
2. DESCRIPTION DES OBJECTIFS.....	2
3. APPROCHE MÉTHODOLOGIQUE	3
4. STRUCTURE DES DONNÉES	6
5. DÉVELOPPEMENT DU NOUVEL OUTIL.....	9
6. APPLICATION À LA RÉGIONALISATION DES CRUES ET DES ÉTIAGES	12
7. CONCLUSIONS	16
8. RÉFÉRENCES.....	17
ANNEXE 1	18
ANNEXE 2	24

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1. Inventaire des données matricielles du projet des crues/étiages.....	6
Tableau 2. Inventaire des données matricielles avec la nouvelle résolution.....	6
Tableau 3. Différence de la superficie calculée pour la station 021502.....	14
Tableau 4. Comparaison des coefficients de corrélation entre les variables indépendantes et les quantiles de débits spécifiques en situation de crues.	14

LISTE DES FIGURES

Figure 1. Organigramme pour schématiser les étapes de programmation.	9
Figure 2. Nouveau menu dans Arc-Québec dans le logiciel ArcMap 9.....	10
Figure 3. Affichage des coordonnées en géographiques (degrés, décimales).....	11
Figure 4. Organigramme du l'outil de régionalisation.....	12
Figure 5. Délimitation d'un bassin (station-021502) avec une résolution de 100 mètres (à gauche) et d'un kilomètre (à droite).	13

1. Introduction

Ce document fait suite à un projet de régionalisation et de cartographie des crues entrepris par la Chaire en Hydrologie statistique de l'INRS-ETE en collaboration avec le Centre d'Expertise Hydrique du Québec (CEHQ) attaché au ministère de l'Environnement du Québec. Cette dernière réalisation a permis au CEHQ de disposer d'un modèle statistique/hydrologique s'appuyant sur une base géomatique et qui permet l'estimation des quantiles de pointes journaliers de crues à n'importe quel endroit sur le territoire habité du Québec (Kouider *et al.*, 2002). De plus, un autre projet qui permet l'estimation régionale des débits d'étiages, répondant aux mêmes objectifs, a également été développé pour le CEHQ.

Suite aux résultats obtenus dans ces deux projets de régionalisation, l'échelle des données utilisée, soit 1 : 1 000 000, pouvait être bonifiée. Pour améliorer la gestion et la précision de l'information, une nouvelle échelle plus fine au 1 : 100 000 a été avancée par les membres du projet pour remplacer celle au 1 : 1 000 000. Ce gain informationnel permet, entre autres, d'améliorer l'efficacité de l'outil, tout en conservant une taille raisonnable dans le stockage de ces données.

Pour ce faire, le CEHQ a confié à l'équipe de l'INRS-ETE les étapes de structuration, d'intégration et de gestion des données à référence spatiale et ce, en utilisant la méthodologie développée dans les projets antérieurs de régionalisation et de cartographie des crues/étiages.

Ce travail s'est donc déroulé en trois phases :

- 1^e phase : Identification de l'approche méthodologique ;
- 2^e phase : Structuration, intégration, traitement et mise à jour des données à référence spatiale ;
- 3^e phase : Développement d'une nouvelle version de l'outil d'estimation régionale dans l'environnement *ArcGIS*® 9.

2. Description des objectifs

Le présent document a comme objectif principal de décrire l'approche méthodologie employée pour le développement de l'outil de régionalisation à une nouvelle échelle de 1 : 100 000 (résolution de 100 mètres). Ce rapport ne tente pas de revenir sur le projet de régionalisation et de cartographie des crues. Par contre, si le lecteur désire en savoir plus sur ce dernier projet, il peut se référer à Gignac *et al.* (2003).

Par ailleurs, l'outil développé intègre la même procédure du projet de régionalisation, mais il permet d'extraire une information plus précise et plus uniforme. De plus, cet outil suit la tendance de développement enclenchée par la compagnie *ESRI*[®] qui veut réorienter sa stratégie vers une version améliorée de *ArcView GIS*[®] 9 avec un langage de programmation universel, soit *Visual Basic*[®] for Application, intégrée à même le logiciel.

La priorité de ce rapport est d'améliorer la compréhension des étapes effectuées dans ce projet, tout en décrivant les nouvelles données utilisées. Il faut noter que ce document demeure également une base d'information pour les professionnels du CEHQ qui voudrait continuer le développement d'un tel outil dans l'organisation.

En somme, ce court rapport ne se veut pas un guide d'utilisateur, cependant il s'agit d'une description des transformations apportées à l'application avec des nouvelles données à référence spatiale, un nouvel environnement logiciel et un nouveau langage de programmation.

3. Approche méthodologique

Suite au rapport de Gignac *et al.* (2003), le CEHQ n'a pas jugé satisfaisante la résolution de base d'un kilomètre qui définissait les grandes caractéristiques physiographiques et météorologiques des bassins. En fait, ces données à référence spatiale étaient en majorité gratuites et recueillies dans Internet. La qualité de ces données devait donc être améliorée. Or, une rencontre entre l'équipe de recherche de l'INRS-ETE et les responsables du projet du CEHQ a permis aux deux intervenants de s'entendre sur un cadre de développement et de mise à jour de l'outil avec une résolution d'au moins 100 mètres. Ainsi, les deux équipes ont conclu une convention qui permettait une meilleure base informationnelle pour le projet de régionalisation des crues/étiages. Ce contrat donnait le droit à l'INRS-ETE d'utiliser et de développer un nouvel outil à l'aide des données à référence spatiale fournies par la Direction du patrimoine écologique et du développement durable du ministère de l'Environnement du Québec (MENV) pour la durée de la présente activité de recherche. Les données utilisées sont « la base de données pour l'aménagement du territoire 1/100 000 » ou BDAT, produite par le ministère des Ressources Naturelles, des Faunes et des Parcs du Québec (MRNFP) et qui avait préalablement été achetée par le MENV pour ses besoins organisationnels. Ces données au 1 : 100 000 deviennent alors la nouvelle base informationnelle des outils de régionalisation des crues et des étiages pour le CEHQ.

Pour comprendre l'ensemble de l'approche méthodologique employée par l'équipe de développement, il faut connaître les données à l'étude, les étapes du projet, les outils de développement et les fonctionnalités de l'outil géomatique.

D'abord, les données utilisées dans ce projet ont été colligées par la Direction du patrimoine écologique et du développement durable du MENV et transmises à l'INRS-ETE. Ces données vectorielles brutes (sous forme de point, polyligne, polygone) représentaient la majeure partie de l'aire d'étude, soit le Québec méridional. Par contre, comme entendu au début du projet entre les deux intervenants, les zones où les données n'existaient pas (le MRNFP n'a pas produit la BDAT pour tout le Québec), les données du projet de régionalisation à l'échelle 1 : 1 000 000 seraient utilisées pour couvrir le reste de la région d'étude, soit à une résolution d'un kilomètre. Les données de la BDAT ont évidemment été traitées, à l'intérieur d'un processus ayant une multitude d'étapes, avant d'être finalement

intégrées dans l'outil de régionalisation. Il a donc été important de tenir compte de plusieurs facteurs clés reliés aux données dans ce travail, comme le format, la projection, la précision, la taille et les limites des logiciels. Voici en ordre chronologique les différentes étapes qui ont été effectuées dans le but de répondre aux objectifs du projet:

- Combiner les feuillets vectoriels et les diviser en régions hydrologiques du MENV (région hydrologique de 01 à 09) ;
- Traduire les données vectorielles en format matriciel (grille) ;
- Transformer les grilles dans la projection Conique Conforme pour le Québec ;
- Modification (ex. modification locale du modèle numérique d'altitude) et calcul sur les données (ex. génération de la carte des pentes) (les détails de cette étape est présentée au prochain paragraphe) ;
- Délimitation des nouveaux bassins (utilisation des nouvelles couches d'informations reliées au MNA) pour les sites jaugés ;
- Extraction des variables explicatives (physiographiques et météorologiques) pour les stations jaugées ;
- Mise à jour des bases de données des stations jaugées utilisées dans les études d'estimation crues/étiages ;
- Développement du nouvel outil sous la plate-forme *ArcGIS 9* ;
- Programmation et personnalisation de l'application sur un poste au CEHQ avec *ArcGIS 9* et l'extension *Spatial Analyst 9* ;
- Test de performance et implantation finale du nouvel outil au sein du CEHQ ;
- Présentation du nouveau prototype de régionalisation.

Pour générer la base informationnelle du MNA modifié localement permettant la délimitation automatique du bassin versant, plusieurs tâches additionnelles ont été réalisées dans l'étape appelée « modifications et calcul sur les données ». Ainsi, la méthodologie utilisée dans le projet des crues a servi de base pour détailler ce travail important de délimitation automatique du bassin de drainage. Voici les tâches en détails sur la modification dite « locale » du MNA brut :

- Classification du réseau hydrographique selon l'altitude et soustraction d'une valeur arbitraire (ex. valeur de 25 à 225), seulement pour les pixels se retrouvant sur un cours d'eau (« effet canyon en escalier ») ;

- Addition de la valeur « 200 » à la valeur d'altitude, seulement pour les pixels se retrouvant sur les limites des grands bassins versant (niveau 01) ;
- Générer les zones de remplissage à partir du MNA modifié localement (fonction dans *ArcView* pour contrer les effets d'écoulement « sans issue ») ;
- Générer la matrice des orientations des versants à partir du MNA après le remplissage ;
- Générer la matrice d'accumulation à partir de la matrice des orientations.

Suite à ces étapes, il est possible à l'aide des deux dernières matrices celles de l'orientation des versants et de l'accumulation de générer en tout point l'aire de drainage d'un bassin versant quelconque. Pour effectuer la transformation et le calcul sur les matrices, le logiciel *ArcView 3.x* avec l'extension *Spatial Analyst* (licence) et *Hydrologic Modeling* a été utilisé pour mener à terme ces modifications. Par la suite, la phase de développement du nouvel outil s'est déroulée dans l'environnement de *ArcGIS 9*, plus spécialement dans *ArcMap 9*.

En somme, les fonctionnalités permises par l'outil de régionalisation développé dans les projets de cartographie des crues et des étiages sont semblables au nouvel outil, c'est-à-dire :

- 1) Identification des coordonnées géographiques du site cible en question et des limites du bassin versant (procédure automatisée ou manuelle) ;
- 2) Extraction des variables météorologiques et physiographiques demandées pour la régionalisation (crue ou étiage) ;
- 3) Affectation du site cible à une région homogène hydrologique et assignation du ou des paramètres utilisés dans les équations régionales ;
- 4) Estimation régionale pour le site cible ;
- 5) Analyse et sauvegarde des résultats.

4. Structure des données

La nouvelle structure de la base de données à référence spatiale (BDRS) a été créée pour uniformiser les données à référence spatiale et améliorer la précision d'extraction des caractéristiques hydrologiques, physiographiques et météorologiques. Tout d'abord, il est important de comprendre que seulement pour certaines grilles la structure des données a été changée. Il existe, entre autres, quelques différences entre les données du projet des crues/étiages (tableau 1) et les nouvelles données avec une résolution de 100 mètres (tableau 2). Les données sont présentées sous forme de grilles de type *ArctInfo* (matrice avec pixels carrés).

Tableau 1. Inventaire des données matricielles du projet des crues/étiages.

Grille	Source	Résolution	Dimension
Pente	NRCAN	1 km	2090 X 1994
Lac (surface d'eau)	NRCAN	1 km	2024 X 2005
Numéro de courbe moyen	AACAN	1 km	2024 X 2005
Forêt	NRCAN	1 km	2024 X 2005
Variables météorologiques (PTMA, PLME, DJBZ, NJH27)	MENV	1 km	1826 X 1637
MNA brut	NRCAN	1 km	2090 X 1994
MNA modifié	INRS-ETE	1 km	2090 X 1994
Orientation des versants	INRS-ETE	1 km	2090 X 1994
Réseau d'accumulation	INRS-ETE	1 km	2090 X 1994

Tableau 2. Inventaire des données matricielles avec la nouvelle résolution.

Grille	Source	Résolution	Exemple de dimension
Pente	MRNFP	100 m	Région 03 : 2012 X 4017 Région 07 : 7557 X 13256
Lac (surface d'eau)	MRNFP	100 m	Région 03 : 2006 X 4174 Région 07 : 9304 X 13211

Forêt	MRNFP	100 m	Région 03 : 2006 X 4174 Région 07 : 7482 X 11778
Autres variables climatiques (PTMA, PLME, DJBZ, NJH27) et physiographiques (NCM)	MENV	1 km	Québec entier : 1826 X 1637
MNA brut	MRNFP	100 m	Région 03 : 2012 X 4017 Région 07 : 7557 X 13256
MNA modifié localement	INRS	100 m	Région 03 : 2012 X 4017 Région 07 : 7557 X 13256
Orientation des versants	INRS	100 m	Région 03 : 2012 X 4017 Région 07 : 7557 X 13256
Réseau d'accumulation	INRS	100 m	Région 03 : 2012 X 4017 Région 07 : 7557 X 13256

En ce qui a trait aux grilles, l'échelle globale des données est passée d'une précision d'environ un kilomètre à 100 mètres, cela occasionne évidemment une augmentation importante dans la taille des données. Par conséquent, le territoire de ces grilles a été subdivisé en régions hydrologiques, dans le but de réduire la taille de ces cartes matricielles servant à l'analyse et d'optimiser la vitesse de réponse du logiciel. La projection cartographique est la même que celle des crues, c'est-à-dire Conique conforme de Lambert adaptée au Québec en NAD 83. Les métadonnées sont disponibles dans le dictionnaire des données en annexe 1. Un répertoire hiérarchisé des données a également été créé pour diviser les différents éléments cartographiques (annexe 1). Il faut noter que les données climatiques (PTMA, PLME, DJBZ, NJH27) et les caractéristiques de sol (NCM) n'ont pas été transformées à l'échelle de 100 mètres, puisque les données de base de ces variables avaient une précision maximale d'un kilomètre. Toutes ces couches matricielles servent maintenant de base pour l'analyse spatiale dans le nouvel outil de régionalisation.

5. Développement du nouvel outil

Pour la phase de migration et de re-programmation de l'outil, il faut prendre en compte que le langage de développement est différent, puisque le nouvel environnement *ArcGIS 9* n'utilise pas le code *Avenue* qui était propre au logiciel *ArcView GIS 3.x*. Comme le langage de programmation n'était pas transposable intégralement, la re-programmation de l'outil de régionalisation a été nécessaire pour sa mise à niveau technologique. Par contre, la méthodologie générale de programmation développée dans les projets des crues et des étiages a été conservée, il y a uniquement les données utilisées et l'environnement logiciel qui sont nettement différents.

Pour faciliter la re-programmation de l'outil, les programmes *Avenue* de l'outil avec *ArcView 3.x* ont servi de base schématique aux programmes de *Visual Basic for Application (VBA)* dans *ArcGIS 9*. En effet, à l'aide du code source en *Avenue* provenant des programmes antérieurs, des organigrammes ont d'abord été réalisés pour mieux schématiser les étapes de ces dernières routines (Figure 1). En annexe 2, on y retrouve l'organigramme qui sert de base pour le nouvel outil de régionalisation en format *ArcMap 9*. Dans l'avenir, ce dernier pourra servir à l'équipe de développement au CEHQ dans un but de déploiement en réseau ou de mise à jour du code source.

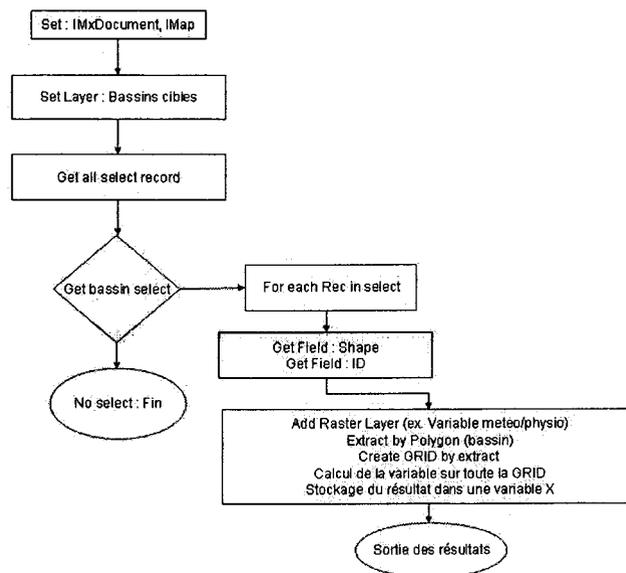


Figure 1. Organigramme pour schématiser les étapes de programmation.

Ce faisant, il a été moins ardu ensuite de re-programmer les procédures à exécuter dans l'environnement VBA de ArcMap 9. Après la re-programmation des outils (ARC-Québec et ARIDE-Québec), le nouveau menu interactif a été conçu et ce, de la même façon que celui de l'ancienne version d'ArcView 3.x (figure 2). Par contre, quelques fonctionnalités de plus ont été rajoutées pour améliorer sa mise en application. D'abord, un sous-menu « Délimiter le bassin et extraction des variables » permet de faire deux étapes en une seule, soit la délimitation automatique de l'aire de drainage et l'extraction des variables explicatives de ce bassin créé.

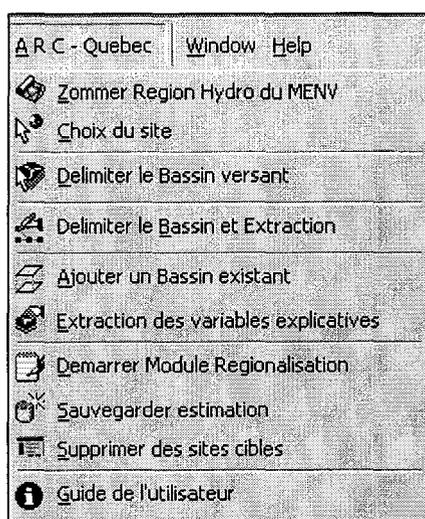


Figure 2. Nouveau menu dans Arc-Québec dans le logiciel ArcMap 9.

Le sous-menu « Supprimer des sites » a également été introduite dans cet outil, puisqu'il permet à l'usager d'enlever des sites cibles de la base de données. Il faut noter qu'une autre fonctionnalité (bouton) a été ajoutée au nouveau projet dans ArcMap 9, soit la possibilité d'afficher les coordonnées en latitude et en longitude dans la fenêtre d'affichage (figure 3). Dès lors, l'usager peut connaître les coordonnées dans une autre projection que celles des données sources, soit Conique Conforme de Lambert (coordonnées en mètres).

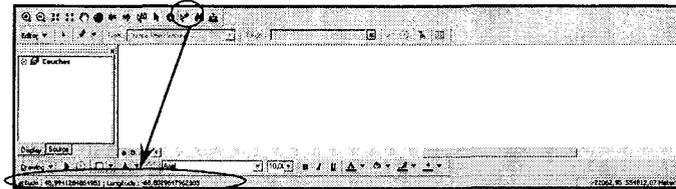


Figure 3. Affichage des coordonnées en géographiques (degrés, décimales).

Pour réaliser l'outil de régionalisation dans *ArcGIS 9*, l'extension *Spatial Analyst 9* a été utilisée pour l'analyse spatiale sur les données. Cette extension, liée aux possibilités d'analyse en modélisation hydrologique (*Hydrologic Modeling*) du logiciel *ArcMap 9*, a permis d'effectuer les tâches de délimitation automatique de l'aire de drainage des bassins versants et d'extraction des données. La reconfiguration du programme a été l'étape la plus longue et la plus ardue à ce moment. En effet, comme les langages de programmation n'ont pas les mêmes logiques, le code a dû être fait de façon différente. L'autre grande différence dans ce nouvel outil développé dans *ArcMap 9*, c'est qu'il permet d'effectuer l'analyse sur un seul site à la fois, puisque les temps de traitement devaient être optimisés avec la taille des nouvelles bases de données. De cette façon, une seule demande à la fois peut être envoyée au logiciel, de sorte qu'un seul traitement matriciel s'effectue sur une seule région. En fait, cela réduit nettement le temps de réponse qui risquait d'être trop long dans le cas de plusieurs sites cibles envoyés en requêtes en même temps. Par contre, les étapes de régionalisation sont pratiquement les mêmes pour le nouvel outil que celui réalisé dans Gignac *et al.* (2003) (figure 4).

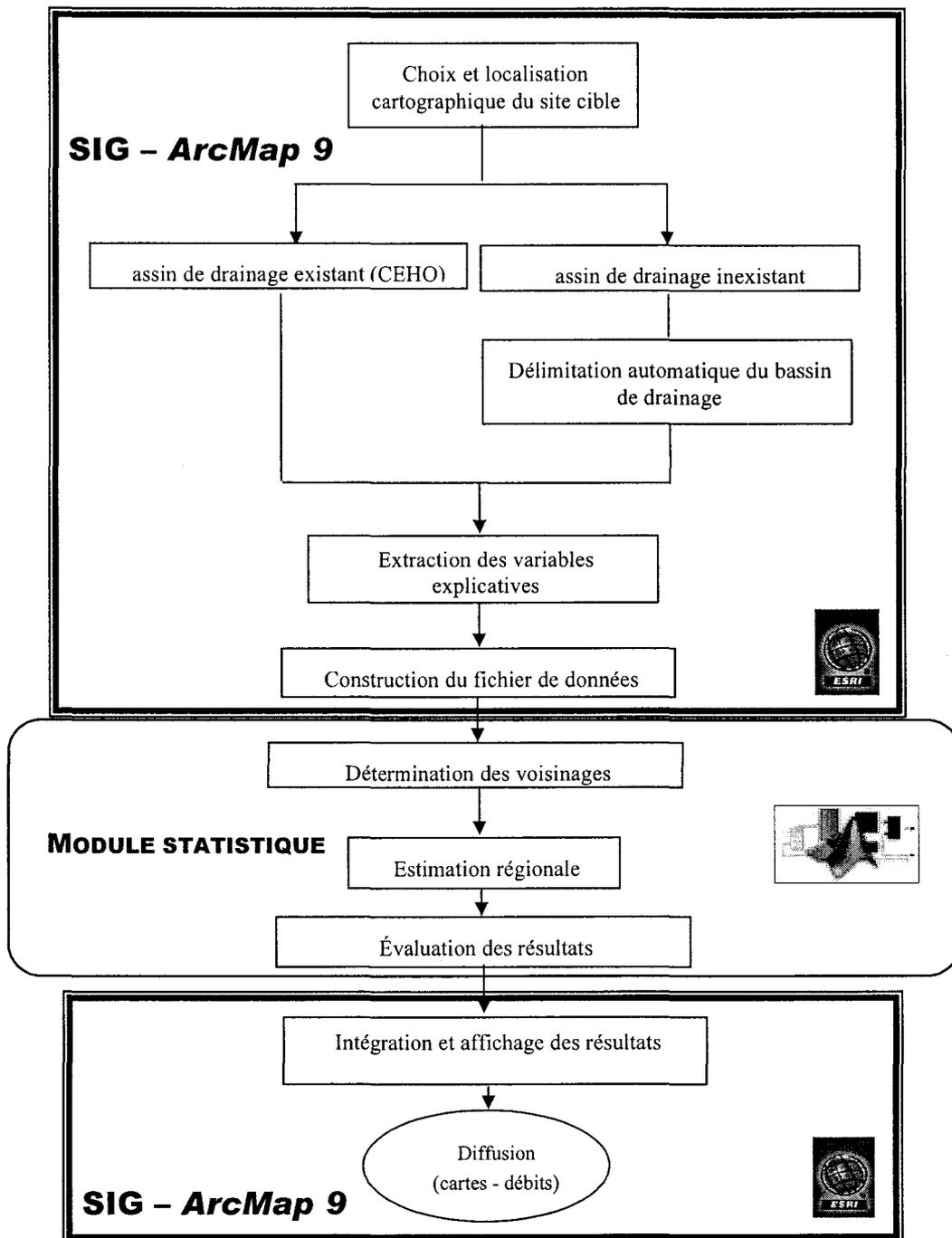


Figure 4. Organigramme de l'outil de régionalisation.

6. Application à la régionalisation des crues et des étiages

Après avoir fait la mise à jour de l'information et le développement du nouvel outil, une comparaison des résultats obtenus a été effectuée pour connaître le gain informationnel de ce travail.

D'abord, dans la délimitation automatique des bassins versants, la résolution au 100 mètres a apporté une nette amélioration tant au niveau du nombre de cours d'eau pouvant être cartographié que sur la qualité des limites de ces mêmes bassins (figure 5).

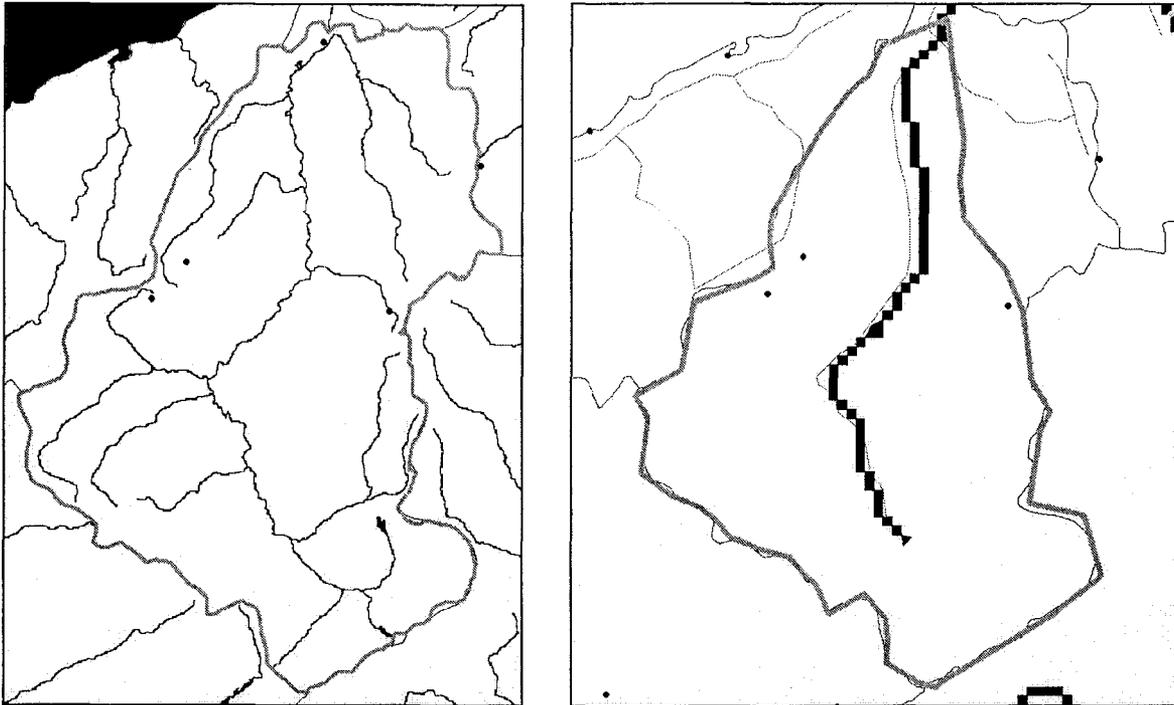


Figure 5. Délimitation d'un bassin (station-021502) avec une résolution de 100 mètres (à gauche) et d'un kilomètre (à droite).

En sachant que la variable explicative la plus importante demeure la superficie du bassin, puisqu'elle a un énorme impact sur la variance dans la réponse du débit, elle se doit d'être de bonne qualité. Dans le dernier exemple ci-dessus (station 021502), la différence de superficie entre le bassin délimité au 100 mètres et celui d'un kilomètre de résolution est très importante (tableau 3). Une différence de 16 % de la valeur a été observée avec une résolution de 1 kilomètre et de 0.6 % à l'échelle du 1 : 100 000 et ce, si on la compare à la valeur recueillie dans la Banque de Données Hydrique (BDH) du MENV (échelle du 1 : 20 000).

Tableau 3. Différence de la superficie calculée pour la station 021502.

Superficie de la BDH (1 : 20 000)	Échelle 1 : 100 000	Échelle 1 : 1 000 000
721 km ²	717 km ²	600 km ²

Pour ce qui est des autres variables explicatives, comme elles proviennent en majorité de la même source, c'est-à-dire de la base de données pour l'aménagement du territoire (BDAT) au 1 : 100 000, l'effort d'uniformisation devrait améliorer sa qualité relative. De plus, comme les bassins versants sont mieux délimités, la moyenne calculée pour ces variables sur tout le bassin versant cible devrait être plus représentative de la réalité.

Pour mieux juger de la qualité de ces données, une comparaison des corrélations entre la variable réponse (débits spécifiques en situation de crues) et les variables explicatives obtenue de l'étude de Gignac *et al.* (2003) avec une résolution de 1 kilomètre a pu être faite avec les nouvelles données à l'échelle du 1 : 100 000 (tableau 4). Ces statistiques descriptives ont été extraites pour les mêmes stations jaugées, soit celles ayant une superficie supérieure à 500 km².

Tableau 4. Comparaison des coefficients de corrélation entre les variables indépendantes et les quantiles de débits spécifiques en situation de crues.

		PMBV	Rc(PLAC)	PTMA	DJBZ
1 kilomètre	QSA100	0.415	-0.717	0.61	-0.601
	QSP100	0.444	-0.736	0.623	-0.627
100 mètres	QSA100	0.509	-0.753	0.643	-0.574
	QSP100	0.583	-0.770	0.620	-0.611

		PMBV	Rc(PLAC)	PFOR	PLME
1 kilomètre	QSE100	0.258	-0.621	-0.04	0.561
100 mètres	QSE100	0.267	-0.660	-0.04	0.523

En général, une nette amélioration a été apportée à la plupart des variables explicatives, surtout pour la variable PLAC (pourcentage de superficie occupée par

des lacs). Cette dernière représente la variable explicative ayant la corrélation la plus élevée par rapport aux débits spécifiques en situation de crues.

En somme, la qualité des cartes et des variables explicatives a été améliorée, tout en augmentant le nombre des cours d'eau pouvant être étudiés et en optimisant la délimitation automatique des bassins versants. Ce travail de mise à jour des données à référence spatiale et du développement de l'outil dans un nouvel environnement (*ArcGIS 9*) a occasionné un gain informationnel dans l'estimation régionale des bassins non-jaugés et une meilleure intégration de cet outil aux nouvelles technologies en place au CEHQ. Son temps de traitement est plus long, mais il est orienté sur l'analyse d'un seul site cible à la fois.

7. Conclusions

En ce qui a trait aux avenues futures du projet, plusieurs recommandations ont été établies pour assurer la pérennité du projet. En voici quelques-unes :

- Assurer la mise à jour continue de l'information et enrichir la base de données pour que le système ne demeure pas statique ;
- Créer un poste de travail avec un processeur de très bonne qualité au sein de l'équipe du CEHQ. Cet ordinateur public doit bénéficier d'une licence *ArcGIS 9*, des libraires ESRI, de l'extension *Spatial Analyst* et des instructions d'aide ;
- Il est possible d'étendre la présente procédure de régionalisation des débits extrêmes à d'autres données hydrologiques ou environnementales, comme le débit réservé, composition biologique de l'eau, etc. ;
- La diffusion à partir de cartes interactives à travers un réseau Intranet permettant la localisation du site cible et la production d'estimation régionale pourrait être une avenue très intéressante, dans l'avenir, pour tout projet de régionalisation. Pour ce faire, les codes utilisés dans ce module de régionalisation pourrait être transformer en *Visual Basic* afin de développer cette application en réseau et pour qu'elle fonctionne automatiquement sur un serveur dédié. Ce document pourrait servir de base pour ce genre de déploiement en réseau. Cette stratégie pourrait également devenir très enrichissante pour les demandes externes en régionalisation au CEHQ.

8. Références

Centre d'Expertise Hydrique du Québec. (2002) Limites des bassins versants (niveau 01 à 04). Gouvernement du Québec, 1 : 250 000.

Comité mixte des organismes intéressés à la géomatique (1995) *La géomatique au Canada : Nouvelle norme canadienne pour le répertoire de métadonnées*. Publication officielle du comité mixte des organismes intéressés à la géomatique, vol. 6 no. 2, hiver 1995, 1 p.

Charleux-Demargne, J. (2001) *Qualité des Modèles Numériques de Terrain pour l'Hydrologie : Application à la Caractérisation du Régime de Crues des Bassins Versants*. Université de Marne-la-Vallée, Cemagref-Engref, Marseille, 259 p.

Environmental System Research Institute (ESRI). (2004) *ArcObjects Online*. <http://arcobjectsonline.esri.com/>.

Environmental System Research Institute (ESRI). (2002) Page Web de la compagnie. www.esri.com.

Gignac, N., Ouarda, T.B.M.J., Chokmani, K., Gingras H., Hoang, V.D. et Bobée, B. (2003) *Régionalisation et cartographie des crues au Québec habité*. INRS - centre Eau, Terre et Environnement, Université du Québec, rapport de recherche no. R-636-f1, 181 p.

Kouider, A., Gingras, H., Ouarda, T.B.M.J., Ristic-Rudolf, Z. et B. Bobée (2002) *Analyse fréquentielle locale et régionale et cartographie des crues au Québec*. INRS-Eau, Terre et Environnement. Rapport de recherche No. R-627-e1, Ste-Foy, 267p.

Ministère de l'Environnement du Québec. (2001) Banque de données météorologiques du ministère de l'Environnement du Québec. Gouvernement du Québec.

Ministère de l'Environnement du Québec. (2002) Banque de données hydriques du ministère de l'Environnement du Québec. Gouvernement du Québec.

Ministère des Ressources Naturelles du Canada. (2001) CANADA3D. Modèle numérique d'altitude avec une résolution de 1 km pour tout le Canada.

Ministère des Ressources Naturelles du Canada. (2002) Cartes vectorielles de l'Atlas du Canada. VMAP0 et cartes de base de l'Atlas du Canada. 1 : 1 000 000, 1 : 2 000 000.

Ministère des Ressources Naturelles, de la Faune et des Parcs du Québec. (2003) Base de données pour l'aménagement du territoire 1/100 000 (BDAT).

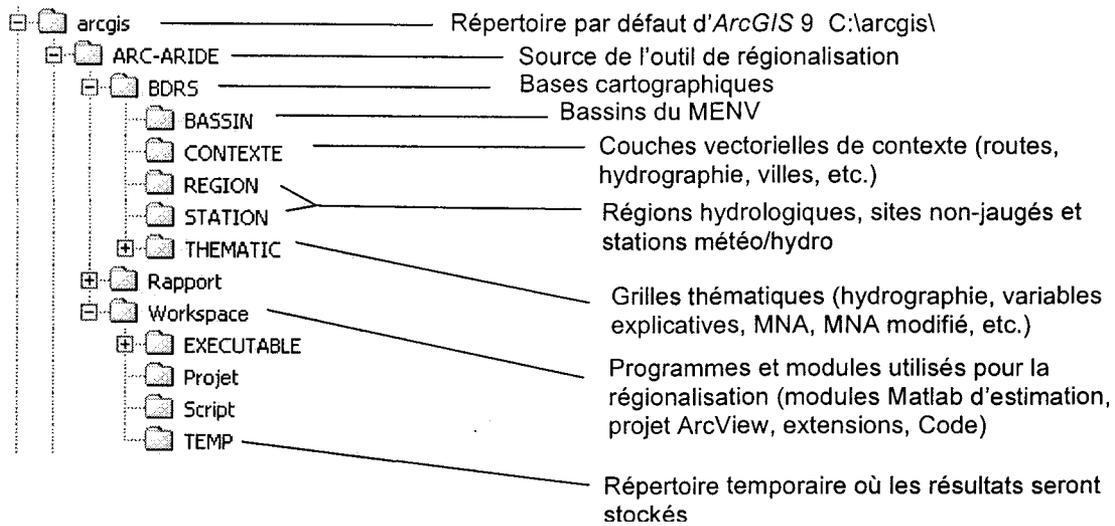
Sauquet, E. (2000) *Une cartographie des écoulements annuels et mensuels par la topologie du réseau hydrographique*. CEMAGREF-Lyon, Lyon, 352 p.

ANNEXE 1

Dictionnaire des données géographiques

1- Configuration hiérarchique du répertoire de données

(**important à prendre en compte**)



2- Métadonnées

La norme CAN/CGSB-171.3 a établie une structure décrivant les ensembles de données numériques à référence spatiale. Cette norme a été produite par le Comité mixte des organismes intéressés à la géomatique. Cette norme nationale pour les renseignements destinés au répertoire de données cartographiques a été celle employée pour la présente activité de recherche. Elle contient les champs d'informations suivants (Comité mixte des organismes intéressés à la géomatique, 1995) :

- a. Données d'identification sur l'ensemble de données, son propriétaire, le scientifique agissant à titre de personne-ressource, le gestionnaire des données et la personne avec qui communiquer pour avoir accès aux données;
 - b. Information descriptive au sujet du contenu de l'ensemble de données et détails sur la couverture spatio-temporelle des données ;
 - c. Détails concernant la mise à jour des données ;
 - d. Taille de l'ensemble de données ;
 - e. Détails relatifs à la collecte des données (ex. : fond de carte utilisé, sources de données, circonstances et détails relatifs à la collecte des données, projections cartographiques, systèmes de coordonnées, système de référence géodésique, précisions et commentaires sur la qualité des données) ;
 - f. Disponibilité de l'ensemble de données : politique d'accès, frais, communication externe, etc. ;
 - g. Information sur l'ordinateur hôte de la base de données, le système d'exploitation et la structure ;
 - h. Documentation et démonstrations destinées à aider l'utilisateur.
-
- a) Propriétaire : Centre d'Expertise Hydrique du Québec et le Ministère de l'Environnement du Québec, personne-ressource : Karem Chokmani—INRS-ETE au (418) 654-2570 ou karem_chokmani@ete.inrs.ca et Taha Ouarda—INRS-ETE au (418) 654-3842 ou taha_ouarda@ete.inrs.ca,

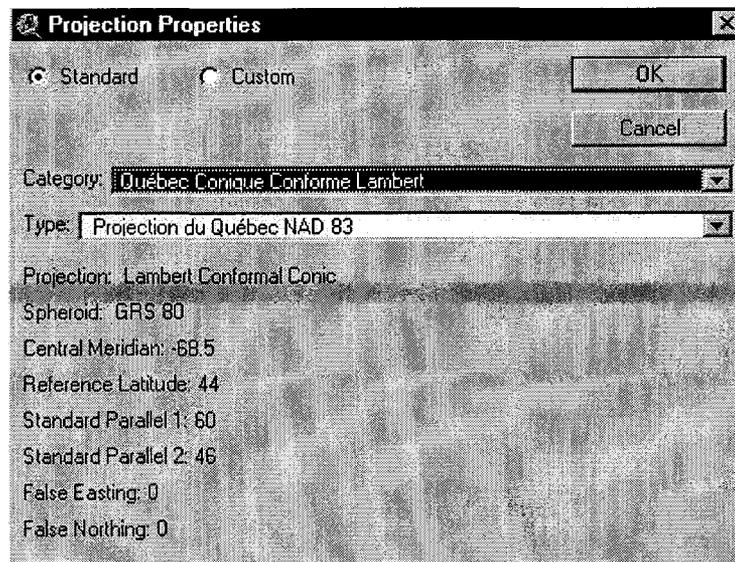
gestionnaire des données : Van-Diem Hoang—MENV au (418) 521-3825 poste 7309 ou van_diem.hoang@menv.gouv.qc.ca.

- b) Description : Les données de mise à jour et de développement du projet sur la régionalisation et la cartographie des crues/étiages au Québec couvrent la partie habitée du Québec. Les données sont codées en format matriciel pour les éléments thématiques d'analyse (forêt, lac, précipitation, etc.). Ces données proviennent en majorité de données du Ministère de l'Environnement (2001, 2002) et du Ministère des Ressources Naturelles, de la Faune et des Parcs du Québec (2003). Les composantes des cartes de base sont disponibles en majorité à une échelle de 1 : 100 000. Le nom du produit est la base de données sur l'aménagement du territoire ou BDAT. Ce jeu de cartes a d'abord été préparé en vue d'un objectif de régionalisation des crues/étiages au Québec habité. Elles constituent maintenant la base officielle de ces projets. Un DVD-ROM comportant toutes les données à intégrer sera remis au CEHQ.
- c) Mise à jour : Les données sur l'occupation forestière est la seule couche qui mérite d'être mise à jour régulièrement et seulement si le Ministère des Ressources Naturelles, de la Faune et des Parcs du Québec (MRNFP) a refait certains feuillets cartographiques à ce sujet. Il faut considérer une remise à jour à environ tous les dix ans des données climatiques et hydrologiques pour assurer la prise en compte d'effet de changement climatique local. Les données cartographiques disponibles au MENV à l'échelle du 1 : 100 000 (BDAT) sont nettement plus précises que l'échelle antérieure (1 : 1 000 000). Ce nouveau produit améliore la performance de l'outil, mais le temps de réponse est évidemment plus long.
- d) Taille des données : L'ensemble des données utilisé pour ce projet, après la mise à jour occupe environ 5 Go d'espace disque. Il est évident que si d'autres données plus précises viennent substituer les données actuelles la taille des données du projet sera nettement plus grande. Présentement, la combinaison entre la précision et la taille des données est raisonnable, si l'ordinateur qui traite l'information détient une mémoire suffisante. Cependant, si on passe d'une échelle plus fine que le 1 : 100 000, la précision sera

meilleure, mais la taille des données sera nettement plus grande et les temps de calculs beaucoup plus longs.

- e) Collecte des données : les données vectorielles ainsi que la grille d'altitude pour tout le Québec ont été colligées par la Direction du patrimoine écologique et du développement durable du MENV. Les grilles des variables météorologiques (PLME, PTMA, DJBZ) proviennent de traitement d'interpolation par krigeage sur les stations météorologiques du Ministère de l'Environnement (2001). Les grilles d'occupation du sol (lac, cours d'eau, forêt) ont seulement subit une transformation du format natif vectoriel en format matriciel. La couche des pentes pour tout le Québec provient d'un calcul de pente effectué dans *ArcView GIS* à partir de la couche d'altitude au 100 mètres provenant de la Direction du patrimoine écologique et du développement durable du MENV (2003). Les couches du réseau d'accumulation et de la direction des versants ont été créées suite à une analyse avec l'algorithme de type D8 à partir de la couche d'altitude modifiée (suppression des zones sans écoulement, soustraction de la valeur 100 pour les cours d'eau, addition de la valeur 200 pour les grandes limites des bassins versants) provenant de la Direction du patrimoine écologique et du développement durable du MENV (2003).

Toutes les grilles sont disponibles en projection Conique conforme du Québec en NAD 83 sous la forme suivante dans les propriétés d'*ArcView GIS* :



Les limites des bassins versants proviennent des fichiers cartographiques fournis par le CEHQ (Centre d'Expertise Hydrique du Québec, 2002). Enfin, les données hydrologiques et de localisation géographique pour les stations hydrométriques jaugées proviennent du rapport de Kouider *et al.* (2001) et de la banque de données hydriques (BDH) du ministère (Ministère de l'Environnement, 2002).

- f) Disponibilités des données : Les données sont pour l'instant la propriété du CEHQ et ne seront utilisées que dans le but du présent projet. Les données fournies à l'utilisateur (CEHQ) sont sans frais ni redevances à l'INRS-ETE. L'INRS-ETE ne peut en aucun cas utiliser ces données pour d'autres projets, sans avoir reçu l'approbation du gestionnaire des données au CEHQ. La convention signée entre l'INRS-ETE et le MENV pour l'utilisation des données détaille les modalités du contrat.
- g) Système d'exploitation et ordinateur hôte : Ce projet demande d'abord des licences approuvées de *ArcGIS* © 9 pour l'ordinateur hôte. Ce poste de travail public au CEHQ devra bénéficier d'un processeur pouvant traiter une grande quantité de données. Le langage de programmation et de développement est *Visual Basic for Application* pour le SIG et *MATLAB* pour le module de régionalisation. Les libraires *MATLAB* © sont nécessaires pour faire fonctionner le module de régionalisation. Les libraires d'ESRI © sont également utiles pour faire fonctionner le module de régionalisation dans *ArcGIS* 9.0. Les extensions ESRI essentielles pour le projet sont : *Spatial Analyst 9* et *Hydrologic Modeling* (gratuit). Le prototype a été testé sur Windows NT. Il devrait donc fonctionner sur un poste de travail au CEHQ où MS Windows© NT/2000/XP est installé.
- h) Aide à l'utilisateur : Un guide de l'utilisateur a été produit pour les gens du CEHQ afin qu'il puisse se référer à la procédure à suivre et se familiariser avec l'environnement du SIG et du module de régionalisation. Comme la procédure reste la même que dans le cas des projets des crues/étiages, le lecteur est référé au guide du rapport de Gignac *et al.* (2003). Les personnes ressources en a) peuvent également fournir du support aux usagers du CEHQ.

ANNEXE 2

Organigramme de l'outil de régionalisation

LÉGENDE

Sous-menu (SM) 1 : Zoomer sur une région hydrologique du MENV

SM 2 : Choisir le site cible et création du point

SM 3 : Délimitation automatique du bassin versant du site cible

SM 4 : Extraction des données physiographiques et météorologiques du bassin cible

SM 5 : Détermination des voisins hydrologiques et estimation régionale

SM 6 : Sauvegarde des résultats d'estimation et écriture dans la BD des sites estimés

