

Université du Québec

INRS - ETE

ANALYSE FRÉQUENTIELLE LOCALE DES CRUES AU QUÉBEC

Par

Aziz Kouider

Mémoire présenté
pour l'obtention
du grade de Maîtrise ès science (M.Sc)

Jury d'évaluation

- | | |
|--------------------------|--|
| Examineur externe | : Mme Andrée Bilodeau
Ministère de l'Environnement |
| Examineur interne | : M. Van Diem Hoang, professeur invité
Ministère de l'Environnement |
| Directeur de recherche | : M. Taha BMJ Ouarda, professeur
INRS-Eau, Terre et Environnement |
| Codirecteur de recherche | : M. Bernard Bobée, professeur
INRS-Eau, Terre et Environnement |

Août 2003



REMERCIEMENTS

Il serait impensable de passer sous silence les personnes qui m'ont aidé tout au long de mon travail de maîtrise et qui m'ont donné sans compter.

Tout d'abord, je témoigne ma gratitude à mon directeur de recherche, monsieur Taha Ouarda, qui m'a accompagné durant mon parcours à l'INRS. Ses commentaires perspicaces furent pour moi d'une aide précieuse.

Mes remerciements les plus chaleureux vont également à monsieur Bernard Bobée, Titulaire de la chaire en Hydrologie Statistique et codirecteur de ma mémoire pour son aide, encouragement et assistance.

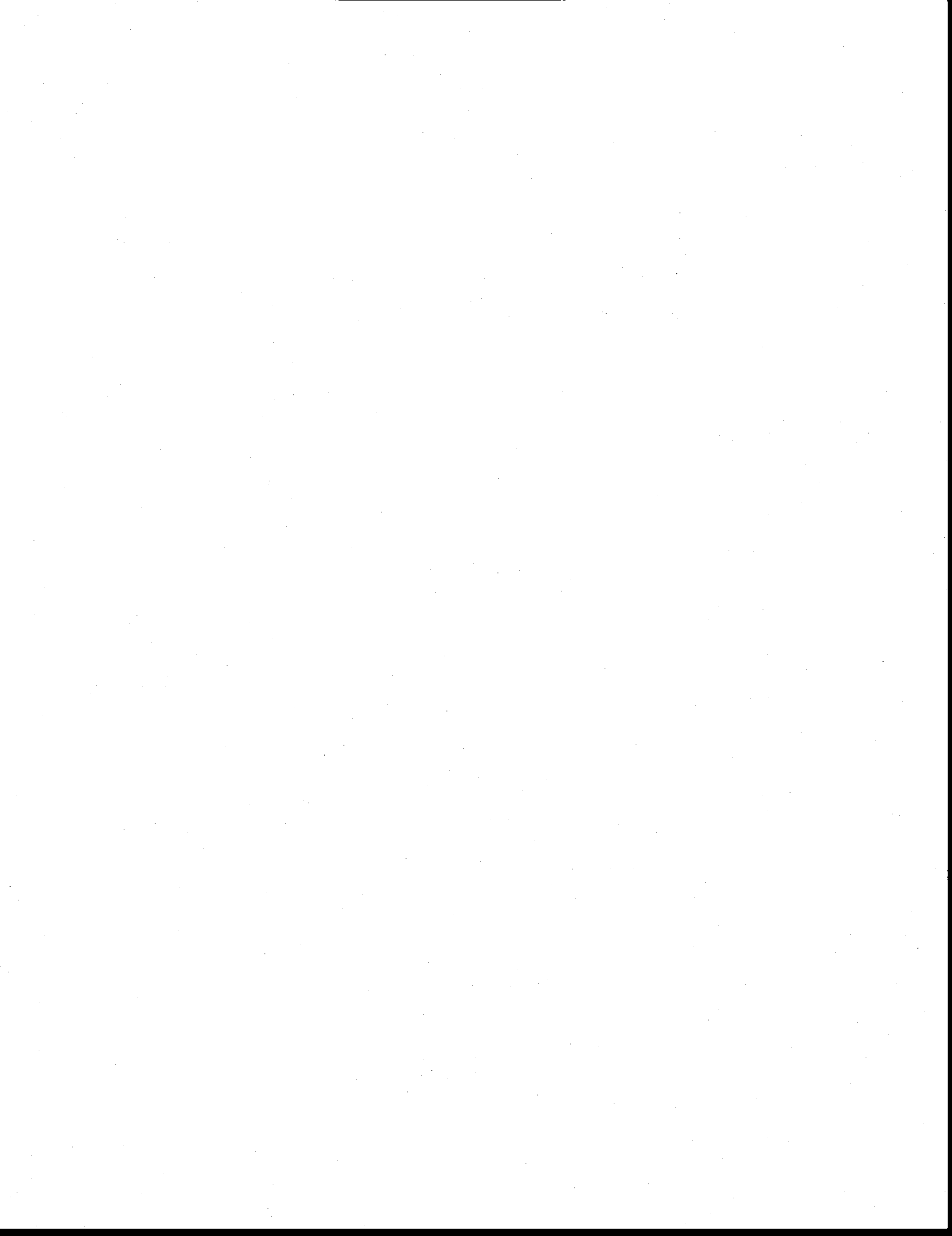
Je tiens aussi à remercier messieurs Hugo Gingras, qui m'a consacré de son temps sans limite et Van Diem Hoang pour son support et assistance.

Merci à mes amis du Québec pour leurs appui et services Abderahmane Yagouti, Samer Elniz, Ali Elbattay, Mohammed Afoundo et Azzeddine Zehrouni.

Ce travail a été réalisé grâce au support financier de l'INRS et du ministère de l'Environnement du Québec.



À ma femme.....



RESUMÉ

L'objectif du présent travail est de présenter les résultats de l'analyse fréquentielle locale aux stations sélectionnées des débits de crues, s'effectue dans le cadre d'un projet de cartographie des crues au Québec qui vise à disposer d'un modèle permettant d'estimer les débits de crues à n'importe quelle cours d'eau dans le Québec habité. Trois critères ont été utilisés pour le choix des stations à étudier : leur localisation géographique (se situant dans les zones habitées du Québec), leur niveau de contrôle (qui doit être le plus proche possible d'un régime naturel), et la taille de la série des données (15 années minimum). La base de données sélectionnée tenant compte de ces trois critères compte 183 stations hydrométriques pour les données de débit maximum de printemps et annuel et 179 stations pour l'été/automne : quatre (4) séries de données de crues d'été ont moins de 15 années de données. Ces stations drainent des bassins versants dont les superficies varient entre 1 et 100000 km². Les variables étudiées sont : le débit de crue d'été/automne, de printemps et annuel ainsi que le volume généré par les crues et le débit spécifique. Les étapes suivantes de l'analyse fréquentielle sont considérées :

- réalisation des tests d'hypothèses (IID) : les observations doivent être Indépendantes et Identiquement Distribuées;
- ajustement des distributions statistiques et sélection de la loi la plus adaptée; et
- détermination des quantiles des variables étudiées.

Les données de base (débits de crues) utilisées sont généralement de bonne qualité et ne présentent pas d'irrégularités majeures : le coefficient de variation des crues maximales étudiées est faible (il n'y a pas une variation importante de la crue maximale d'une année à l'autre).

Nous avons ajusté les données de base colligées avec l'ensemble des lois usuellement utilisées en hydrologie. Pour le choix des meilleures distributions, nous avons utilisé les tests d'adéquation Bayésien et d'Akaike. À partir de ces tests, nous avons constaté que les lois de probabilité qui représentent le mieux les données étudiées sont celles à deux paramètres comme les lois Gamma, Gamma inverse et log-normale. Nous n'avons pas pu mettre en évidence de relation entre les distributions de probabilités retenues et les régions hydrologiques ou l'aire des bassins versants.

Nous avons remarqué que les débits spécifiques issus des crues de printemps sont généralement plus importants que ceux générés par les crues d'été/automne. La moyenne de ces débits saisonniers s'élève respectivement à 162 l/s/km² et 90 l/s/km². L'écart entre ces deux débits se trouve réduit lorsque la superficie des bassins versants augmente.

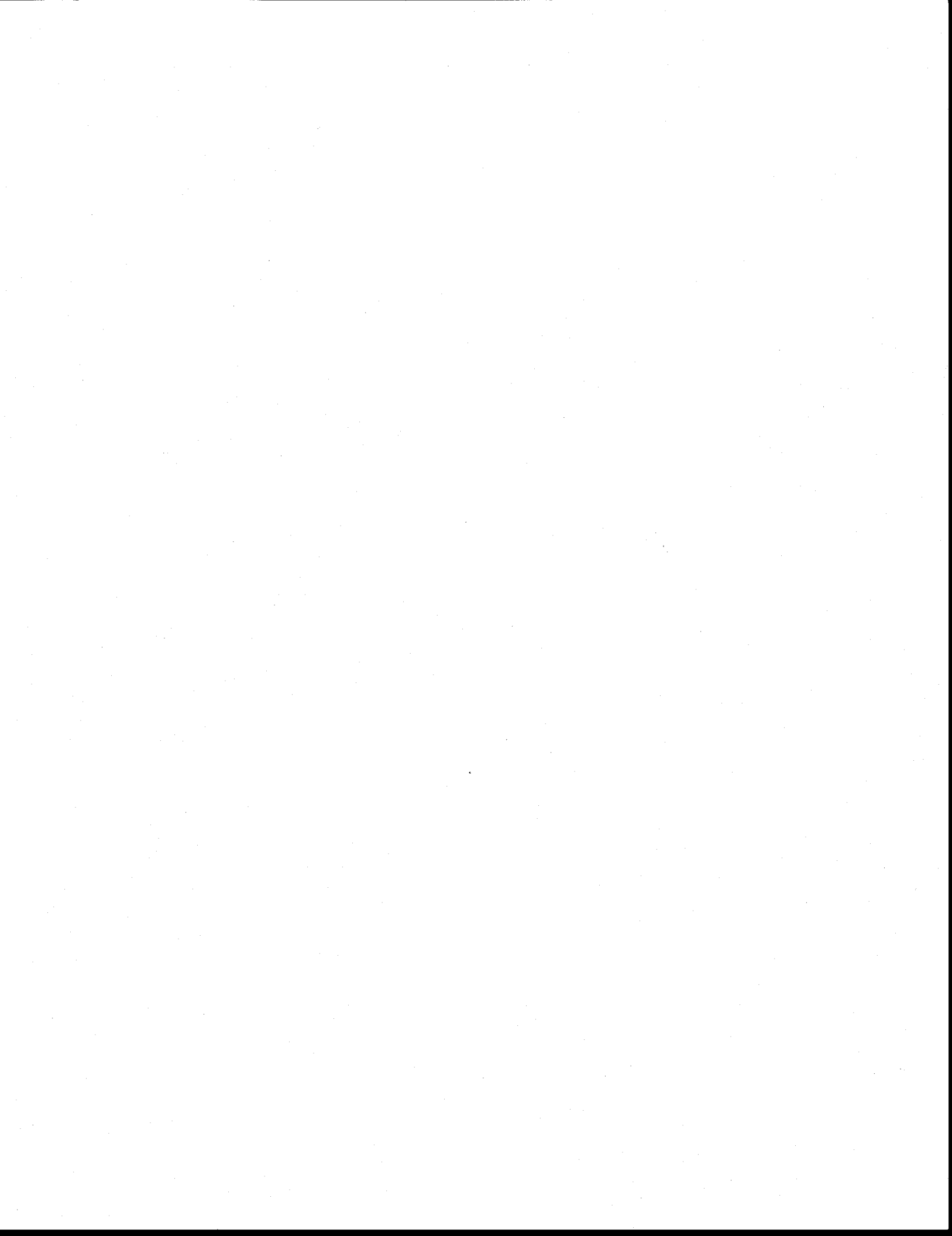


TABLE DES MATIÈRES

REMERCIEMENTS.....	I
RESUMÉ.....	I
PRÉAMBULE.....	5
1. APPROCHE MÉTHODOLOGIQUE.....	7
1.1. Choix des stations hydrométriques.....	7
1.1.1. Critères de choix.....	7
1.1.2. Fiabilité des données.....	9
1.1.3. Données manquantes.....	10
1.2. Analyse fréquentielle locale.....	11
1.2.1. Débits de crue.....	12
1.2.2. Volumes de crues.....	16
2. COLLECTE ET PREPARATION DES DONNÉES DE BASE.....	21
3. ANALYSE FRÉQUENTIELLE.....	27
3.1. Caractérisation des échantillons.....	27
3.1.1. Débits de crue.....	28
3.1.2. Débit spécifique de crue.....	31
3.1.3. Stations particulières.....	34
3.2. Vérification des hypothèses de base.....	35
3.2.1. Hypothèse de stationnarité (test de Kendall).....	36
3.2.2. Hypothèse d'indépendance (test de Wald - Wolfowitz).....	39
3.2.3. Hypothèse d'homogénéité (test de Wilcoxon).....	40
3.3. Détermination des quantiles.....	44
3.3.1. Distributions de probabilité.....	44
3.3.2. Tests de sélection du modèle.....	49
3.4. Présentation des résultats.....	51
3.4.1. Hypothèses de base.....	51
3.4.2. Estimations des quantiles.....	54
4. CONCLUSIONS.....	61
Références.....	64
Annexes.....	69

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1-1 : Extrapolation dans les courbes de tarage	10
Tableau 2-1 : Regroupement des stations	22
Tableau 2-2 : Stations sélectionnées dont le bassin versant dépasse 20.000 km ²	23
Tableau 3-1 : Répartition des stations étudiées en classes de superficies par régions hydrologiques	34
Tableau 3-2 : Quantiles de quelques bassins versants dont la superficie est voisine de 50 km ²	35
Tableau 3-3 : Lois de probabilité considérées dans l'étude	46
Tableau 3-4 : Formules de probabilités empiriques utilisées dans la pratique	48
Tableau 3-5 : Stations rejetées à un niveau de signification de 1 % par les tests de Kendall ou de Wald-Wolfowitz. Débit de crue d'été/automne	52
Tableau 3-6 : Stations rejetées à un niveau de signification de 1 % par les tests de Kendall ou de Wald-Wolfowitz. Débit de crue de printemps	52
Tableau 3-7 : Stations rejetées à un niveau de signification de à 1 % par les tests de Kendall ou de Wald-Wolfowitz. Débit de crue annuelle	52
Tableau 3-8 : Résultats du test d'homogénéité de Wilcoxon des regroupements de stations	53
Tableau 3-9 : Tests d'indépendance et de stationnarité sur les données de volume de crue	54
Tableau 3-10 : Pourcentage de sélection des distributions considérées.	55
Tableau 3-11 : Répartition des distributions retenues en fonction de la superficie des bassins versants	56
Tableau 3-12 : Loi Gumbel	57
Tableau 3-13 : Variation des quantiles de débit spécifique de crue en fonction des saisons et des périodes de retour	58

LISTE DES FIGURES

Figure 1-1 : Changement brusque de topographie dans une section de contrôle.....	10
Figure 1-2 : Analyse fréquentielle locale, organigramme simplifié.....	12
Figure 1-3 : Hydrogramme type I.....	13
Figure 1-4 : Hydrogramme type II.....	14
Figure 1-5 : Hydrogramme type III.....	14
Figure 1-6 : Estimation du temps de base d'une crue, méthode simple.....	18
Figure 1-7 : Estimation du temps de base d'une crue, méthode améliorée.....	18
Figure 1-8 : Identification des composantes d'un hydrogramme.....	19
Figure 1-9 : Estimation du temps de base (approche combinée).....	20
Figure 2-1 : Répartition de l'échantillon étudié en classes de superficies.....	23
Figure 2-2 : Stations retenues pour l'analyse fréquentielle locale - tiré de N. Gingnac et al. (2002).....	24
Figure 2-3 : Répartition en classes du nombre d'années d'observations de débits étudiés.....	25
Figure 3-1 : Coefficient de variation en fonction de la superficie du bassin versant (crue d'été/automne).....	29
Figure 3-2 : Coefficient de variation en fonction de la superficie du bassin versant (crue de printemps).....	30
Figure 3-3 : Coefficient de variation en fonction de la superficie du bassin versant (crue annuelle).....	30
Figure 3-4 : Répartition des débits spécifiques en fonction des superficies de bassin versant.....	32
Figure 3-5 : Répartition des débits spécifiques en fonction des régions hydrologiques et de la taille des bassins versants (crue d'été/automne).....	33
Figure 3-6 : Répartition des débits spécifiques en fonction des régions hydrologiques et de la taille des bassins versants (Crue de printemps).....	33
Figure 3-7 : Organigramme du test de Kendall.....	38
Figure 3-8 : Organigramme du test de Wald – Wolfowitz.....	41
Figure 3-9 : Organigramme du test de Wilcoxon.....	43
Figure 3-10 : Présentation graphique du temps de retour.....	45
Figure 3-11 : Courbe enveloppe des débits spécifiques annuels.....	60

PRÉAMBULE

L'estimation des quantiles de débit de crues et de volume de crues est une tâche fondamentale pour la conception et l'exploitation des ouvrages hydrauliques comme les évacuateurs de crues des barrages, les ouvrages de protection contre les inondations, les seuils, les prises d'eau en rivières et les ponts. Une erreur d'estimation de ces quantiles pourrait avoir des répercussions négatives sur les coûts et sur la sécurité de ces ouvrages. Au sein du ministère de l'Environnement du Québec, par exemple, organisme qui gère le plus grand nombre de stations hydrométriques de la province, la détermination des quantiles de crue trouve plusieurs applications telles que :

- l'application de la loi sur la sécurité des barrages : avec la nouvelle loi sur la sécurité des barrages qui est entrée en vigueur le 11 avril 2002, tout barrage à forte contenance doit être conçu pour résister à une « crue de sécurité » minimale, dont la récurrence est fixée selon le niveau des conséquences d'une éventuelle rupture. Cette récurrence varie entre 100 ans lorsque le risque de rupture est minimal ou faible. À 10 000 ans ou $\frac{1}{2}$ CMP si le risque est important. Lorsque les conséquences d'une rupture sont considérables, la loi exige l'utilisation de la crue maximale probable (CMP). (Articles 20 et 21 de la loi sur la sécurité des barrages).
- le programme de détermination des cotes de crues (PDCC) : il s'agit d'un programme qui vise à supporter les municipalités régionales de comté (MRC) dans l'application de la politique de protection des rives, du littoral et des plaines inondables en leur fournissant les cotes correspondant aux débits de crue de aux périodes de retour de 2, 20 et 100 ans sur différents tronçons de rivières concernés.

Le présent mémoire s'intitule "**Analyse fréquentielle locale des crues au Québec**" et s'intéresse à l'estimation des quantiles utilisés en pratique à partir de débits enregistrés sur des rivières jaugées. Une fois ces quantiles estimés, ils serviront de base, aux études de régionalisation et de cartographie des crues au Québec : techniques basées sur le regroupement de stations situées sur des rivières ou bassins versants ayant un

comportement hydrologique semblable et le transfert de l'information en régions hydrologiques homogènes des sites jaugés d'une même région vers des sites cibles non jaugés ou partiellement jaugés pour lesquels nous disposons de peu ou aucune donnée.

Ce travail s'articule autour des quatre chapitres suivants :

1. **Approche méthodologique** : Il s'agit d'une présentation de la méthodologie utilisée dans ce travail.
2. **Données de base** : Dans ce chapitre nous présentons les stations retenues, les superficies des bassins versants à ces stations, ainsi que les données de débits qui ont été colligées à partir de ces stations.
3. **Analyse fréquentielle** : Dans ce chapitre nous traitons de la caractérisation statistique des séries de données de débits à étudier; de la vérification des hypothèses de base (indépendance, stationnarité et homogénéité), des ajustements statistiques des lois de probabilité et du choix des distributions les plus adaptées ainsi que de la détermination et de l'interprétation des résultats d'estimation des quantiles de débit et de volume des crues.
4. **Conclusion** : Dans ce chapitre, nous rappelons les grandes lignes qui découlent de ce travail, et nous dressons un bilan global des résultats de cette recherche et des perspectives futur de recherche.

1. APPROCHE MÉTHODOLOGIQUE

1.1. Choix des stations hydrométriques

1.1.1. Critères de choix

Notre première préoccupation, dans le cadre de la présente étude, était d'identifier les stations hydrométriques à retenir pour la suite de cette recherche. Nous avons procédé alors au recensement de toutes les stations hydrométriques de la province. Trois critères ont été appliqués aux stations recensées, en vue de bâtir la liste finale des stations à conserver :

- Le premier critère est en relation avec la **position géographique** de la station hydrométrique concernée. Nous nous sommes limités aux zones du Québec habité. Ces zones se situent **entre le 45^e et le 55^e parallèle (zones hydrologiques 1 à 9 selon la classification du ministère de l'Environnement)**.
- le deuxième critère, fondamental pour l'étude, concerne le **régime hydrologique** du cours d'eau sur lequel est situé la station hydrométrique à étudier. Par exemple, ce régime peut être influencé par un barrage situé à l'amont de cette station. Les stations à conserver doivent être situées sur des cours d'eau où le régime hydrologique est le plus proche possible d'un **régime naturel**. Nous avons toléré au maximum une **influence sur une base journalière**. En d'autres termes, le volume d'eau retenu par les ouvrages situés à l'amont de la station à étudier ne devra pas dépasser le volume journalier véhiculé par le cours d'eau sur lequel est situé cette station;
- le troisième critère touche à la **taille des séries** de données des stations qui respectent les deux premiers critères (nombre d'années d'observations disponibles). Ce nombre d'années, pour des raisons de fiabilité des études

statistiques, doit être supérieur à un seuil minimal : un ajustement statistique est d'autant plus consistant et fiable que la taille de l'échantillon est grande. Cependant, les résultats de l'analyse fréquentielle locale serviront de base à la régionalisation des crues au Québec. Pour atteindre cet objectif, nous aurons besoin de retenir un grand nombre de stations. Afin de réaliser un compromis entre ces deux contraintes, nous avons fixé **15 années** d'observations comme critère minimal d'acceptabilité d'une station. La taille minimale, de quinze années d'observations pourra avoir des conséquences sur le choix des distributions, sur les quantiles, plus particulièrement sur ceux qui correspondent aux grandes périodes de retour, et sur l'étendue des intervalles de confiance. En guise de comparaison avec d'autres études, mentionnons que l'analyse régionale des crues journalières de la province de Québec réalisée par Anctil et al. (1998) repose sur les données issues de 136 stations offrant un minimum de 15 années complètes d'observations. D'autres part, l'*Analyse de la fréquence des crues pour le Québec* réalisée par Desforges et al. (1974), est élaborée sur la base de mesures de débits de 76 rivières offrant un minimum de 10 années d'observations.

Les débits maximums journaliers de crues, extraits à partir des séries de débits moyens journaliers (débit moyen sur une journée calculé à partir des données instantanées reçues selon un pas de temps fixe), des stations répondant à ces trois critères ont été colligés directement à partir de la Banque de Données Hydrique (BDH) du ministère de l'Environnement du Québec. Cette banque de données (BDH) regroupe les mesures de niveaux de lacs et de cours d'eau relevés par l'ensemble des stations hydrométriques exploitées par le ministère à travers toute la province. Actuellement, le ministère exploite deux cent cinquante (250) stations dont cent quarante (140) sont équipées pour une transmission automatique de données aux 15 minutes au serveur du ministère, soit par un lien téléphonique ou par satellite. Cette possibilité de transmission automatique de données est rendue possible grâce à la nouvelle génération d'instrumentation que le ministère a commencé à introduire sur son réseau hydrométriques depuis le début des années 1990 : linimètres à mémoire enregistreuse électronique (LPN8). Le principe de fonctionnement de ce type d'instrument est basé sur la mesure des variations de pression causées par les changements de niveau d'eau. Un des principaux avantages de

ce limimètre c'est qu'il permet de mémoriser les données et de les échanger avec des ordinateurs (PC). Une fois les données reçues par le serveur du ministère, les erreurs grossières sont recherchées par recoupement d'informations, détectées s'ils existent et corrigées. À l'issue de ces vérifications, les données deviennent accessibles aux utilisateurs de BDH.

1.1.2. Fiabilité des données

D'une manière générale, les données de débit et plus particulièrement les débits de pointe sont entachés d'erreurs qui peuvent être grossières. Ces erreurs découlent souvent de difficultés liées à l'estimation de certaines caractéristiques de crues exceptionnelles qu'on extrapole à partir de courbes de tarage (relation niveau – débit). Ces courbes relatent les relations qui existent entre les débits et les variations des hauteurs d'eau dans un cours d'eau donnée au droit d'une section précise. Sans appréhender des considérations en relation avec l'instrumentation de mesure de débit, deux paramètres peuvent compromettre la fiabilité de ces courbes de tarage :

1. la stabilité des sections de contrôle : les sections de contrôle peuvent varier dans le temps, en fonction de plusieurs facteurs tels que l'évolution du fond meuble, le développement de la végétation aquatique, la croissance des couches de glace en amont ou en aval des sections de mesures, l'accumulation des dépôts. L'ensemble de ces perturbations peut entraîner le "détarage de la station de contrôle". La vérification régulière de ces courbes est nécessaire.
2. l'extrapolation des données : Une courbe de tarage est d'autant plus précise que le nombre de données de jaugeage pour sa détermination est élevé et couvre une gamme étendue de valeurs de débit. Lorsqu'on interpole, nous avons moins de risque d'erreur que lorsqu'on extrapole. En règle générale, il arrive souvent qu'on soit obligé d'extrapoler sur ces courbes. Le tableau 1-1 extrait d'un échantillon de stations choisies aléatoirement au Québec donne une idée de l'étendue des extrapolations de données qu'on doit effectuer. Au voisinage du tirant d'eau où nous souhaitons extrapoler, la topographie de la section de contrôle, par exemple, peut varier considérablement à tel point que les relations mathématiques qui existent

entre le niveau de la ligne d'eau et le débit ne soient plus valables à cause de instabilité géométrique (figure 1- 1).

Tableau 1-1 : Extrapolation dans les courbes de tarage

Stations	Débit maximum		Rapport (E)/(J)
	Jaugé (J)	Extrapolé (E)	
23303	170.1	330	1.94
10801	416	765	1.84
10802	213	612	2.87
24007	425	850	2.00
80701	2470	4730	1.91

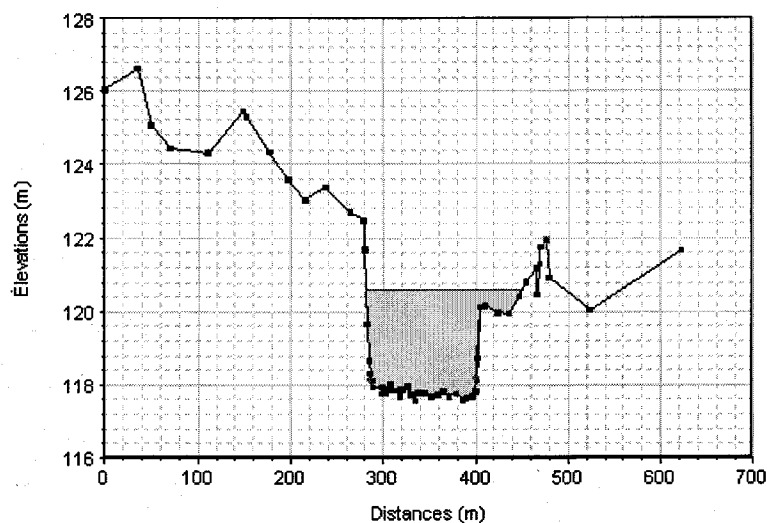


Figure 1-1 : Changement brusque de topographie dans une section de contrôle

Les données mises à notre disposition ont été validées par les experts du Centre d'Expertise Hydrique du Québec (CEHQ) minimisant et corrigeant ainsi les erreurs grossières l'effet de glace.

1.1.3. Données manquantes

Pour certaines stations, nous sommes confrontés à un problème de données manquantes. Dans ce cas, nous avons combiné les différents segments formant les séries des données, et nous les avons utilisés comme s'il s'agissait d'une série continue. En d'autres termes, les données manquantes ont été ignorées. Ceci ne pose pas un problème particulier pour une étude d'analyse fréquentielle.

1.2. Analyse fréquentielle locale

L'analyse fréquentielle locale, en hydrologie, est une approche statistique de prédiction basée sur des calculs probabilistes utilisant l'historique des événements pour prédire des fréquences d'apparitions futures. Cette analyse devra permettre, pour chacune des stations étudiées, d'estimer les quantiles correspondant aux **périodes de retour** retenues dans le cadre de la présente étude : **2, 10, 20, 100, 1000 et 10000 ans**. Les quantiles reportés aux grandes périodes de retour, qui sont nécessaires entre autres pour la conception des barrages, sont donnés à titre purement indicatif. En effet, il est pratiquement impossible avec quelques dizaines d'années d'observations de prétendre cerner le comportement hydrologique des cours d'eau pour des périodes de retour élevées. Les extrapolations théoriques faites à partir des distributions de probabilité restent approximatives et l'important écart entre les bornes inférieures et supérieures des intervalles de confiance corrobore ce fait. En vue d'appuyer ces dires, nous avons emprunté le paragraphe suivant de Klemeš (1986) : "il apparaît illusoire de croire qu'un modèle de distribution ajusté en fonction des fréquences relatives de quelques crues plutôt faibles qui ont eu lieu au cours d'une période de 20 à 50 ans puisse être utilisé pour analyser sérieusement une crue dont la période de retour serait de 1000 ans ou de 1000 000 d'années." Cet auteur ajoute que : "la notion de crue d'une période de retour de 100 ans, 1000 ans ou de 1000 000 d'années n'a vraiment qu'une importance qualitative."

L'estimation des quantiles est effectuée en considérant la méthode d'analyse fréquentielle des crues qui comprend les étapes suivantes :

1. caractérisation des échantillons étudiés et détermination des indicateurs statistiques usuels tels que la moyenne, l'écart type, le coefficient d'asymétrie et le coefficient de variation;
2. vérification des hypothèses de base des séries de données à étudier (stationnarité, indépendance et homogénéité);
3. détermination des quantiles (ajustement de distributions statistiques; estimation des paramètres des distributions; choix de la loi qui ajuste le mieux les données observées et estimation des quantiles correspondants aux périodes de retour identifiées).

À l'aide du logiciel Hyfran, qui est un logiciel d'ajustement de lois statistiques développé par l'INRS-ETE, nous avons procédé à l'ajustement des données avec l'ensemble des lois de probabilité usuellement utilisées en hydrologie et qui sont présentées au chapitre 3 du présent mémoire. Pour le choix du meilleur ajustement, nous avons utilisé les critères d'information Bayésien (BIC) et d'Akaike (AIC). Ces deux critères permettent de classer les modèles statistiques tenant compte du principe de parcimonie (donner plus de poids aux distributions à deux paramètres), et de choisir un modèle fréquentiel représentatif des données et d'obtenir une estimation de quantiles sur une base scientifique et uniforme (la même approche pour toutes les stations). Le schéma présenté à la figure 1-2 illustre la démarche que nous avons adoptée pour l'analyse fréquentielle locale.

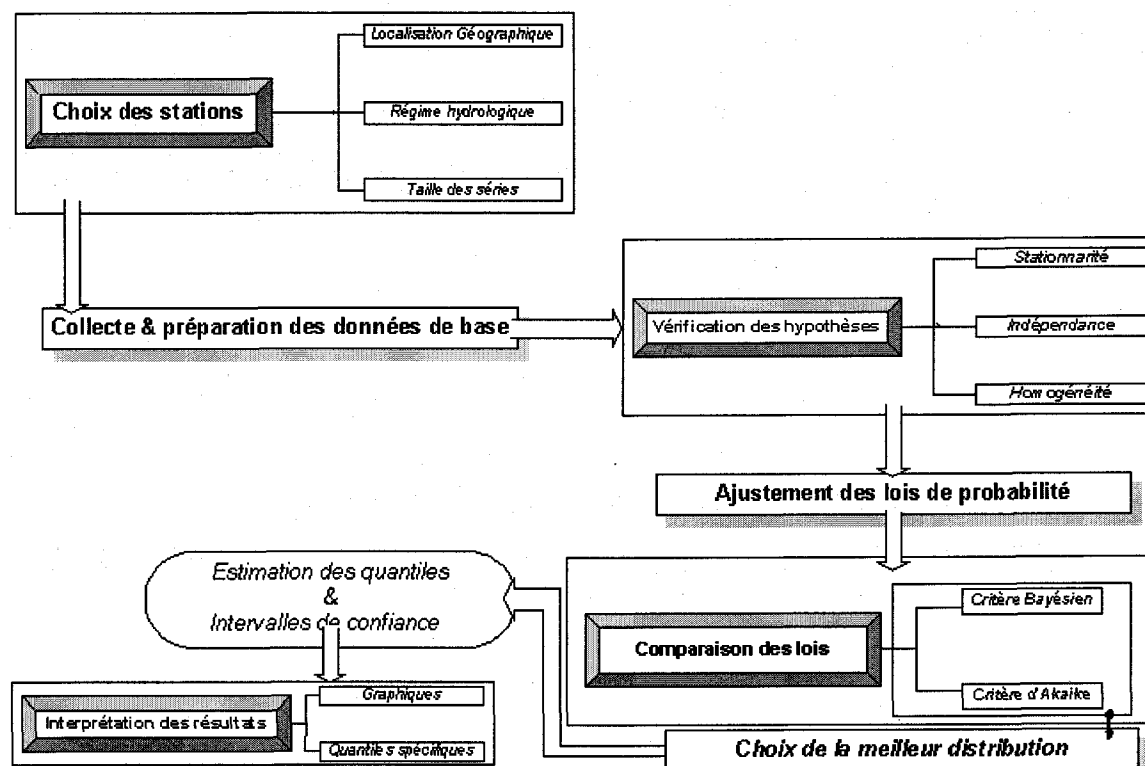


Figure 1-2 : Analyse fréquentielle locale, organigramme simplifié

1.2.1. Débits de crue

À l'échelle annuelle et d'une manière générale, comme le montrent les figures 1-3, 1-4 et 1-5 ci-jointes, les hydrogrammes de crues peuvent être classés en trois types :