

Consolidation de l'information hydrologique disponible localement et régionalement pour l'estimation probabiliste du régime des crues

Mathieu Ribatet

(B.Sc., Mathématiques, Université Lyon 1, 2002)

(M.Sc., Mathématiques, Université Lyon 1, 2003)

Thèse en cotutelle pour l'obtention du grade de
Docteur de l'Institut National Polytechnique de Grenoble
(Spécialité : Océan, Atmosphère, Hydrologie)

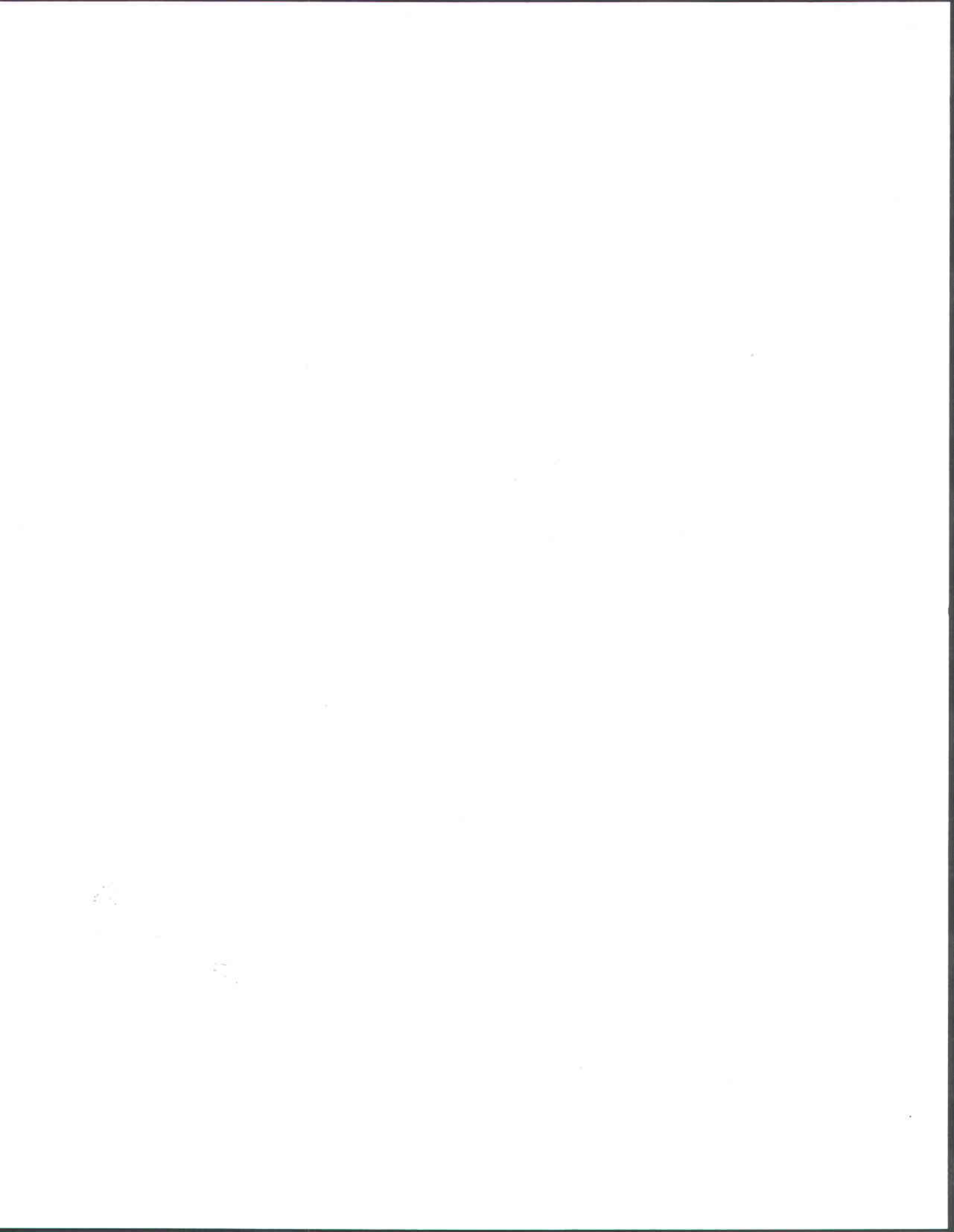
et de

Philosophiae Doctor (Ph.D.) de l'Université de Québec
(Spécialité : Sciences de l'Eau)

présentée et soutenue publiquement
le 10 Décembre 2007

JURY D'ÉVALUATION

M. Dan ROSBJERG	Danmarks Tekniske Universitet	Président et Rapporteur
M. Philippe NAVEAU	University of Colorado / CNRS	Rapporteur
M. Jean-Michel GRÉSILLON	Cemagref	Directeur de thèse
M. Taha OUARDA	INRS	Directeur de thèse
M. Bernard BOBÉE	INRS	Co-directeur de thèse
M. Éric SAUQUET	Cemagref	Co-encadrant de thèse



Remerciements

Mes premiers remerciements vont naturellement à ceux qui ont encadré cette thèse. C'est donc un grand merci que j'adresse à Éric, Jean-Michel et Taha. Grâce à eux, j'ai pu être un thésard épanoui car libre de prendre mes propres directions de recherche. Je leur en suis donc reconnaissant car je sais qu'un autre encadrement aurait abouti à une thèse différente, peut-être meilleure, mais dans laquelle j'aurais pris moins de plaisir. J'en profite pour remercier également les membres du jury de thèse Philippe Naveau et Dan Rosbjerg pour avoir accepté d'évaluer mon travail. J'espère avoir intégré au mieux leurs remarques au sein de ce document et dans les délais qui m'étaient accordés.

Mes deuxièmes remerciements vont droit à l'équipe de sauvetage administratif : Anne et Hélène du côté français mais aussi Suzanne pour le Québec. Elles ont su non seulement m'apporter toute l'aide dont j'avais besoin mais aussi rester stoïques devant mon manque d'organisation. Pas de jalousie toutefois, je suis sûr de n'avoir épargné aucun côté de l'Atlantique!

Merci aussi à tous ceux qui m'ont permis de décompresser et écouté mes (trop nombreux) grognements aussi durant ces trois années... Merci donc à mes potos d'il y a très très longtemps. Merci Antoine pour ton hospitalité à Roman comme à Valence, petites îles de repos que j'aime beaucoup. Merci aussi pour tes coups de fil directement dans mon bureau de Québec. Merci JJ et Dadoune pour les soirées musicales, j'oublierai jamais ce "Billy Jean" de 20 minutes - toi aussi JJ? Merci Foux pour sortir ensemble la planche dans les grosses conditions seulement. Merci aussi pôpa Nico pour me laisser gagner au billard et être mon coach vestimentaire... Merci aussi à toutes les buses qui sont trop loin : Fleuron, Mad Rouss', Tom-Tom, Matt Flon et la Bess'. Merci aussi à Clément et Laure pour (entre autre) les déjeuners du mardi qui vont bien.

Merci à tous ceux que j'ai croisé de plus ou moins loin dans le cadre du travail. Merci à Nadia et Michel. Merci surtout à Pap's Bertrand pour me faire (notamment) péter les scores aux analyses de Cadarache!!! Merci à Mauro pour ces maGGGnifiques moments ensemble et le si joli tour de la Gaspésie - regarde un phoque!!! Merci infiniment aussi à face de poils Palo et Valérie bien sûr car sans eux mon année à Québec aurait été nettement moins belle. Un énorme merci à Maaaaaaaaaaaaaaaaarc pour m'avoir fait partager un moment magique sur la rivière Saguenay. Merci beaucoup à toi Athmane pour ta gentillesse et ton amitié.

Merci à l'équipe so Guinness : jm, Karine, Aurélien et Stéphane. Un gros merci aussi à la Rock n' Eat family Doud, Sandra et Clotaire qui m'ont gentiment accueilli parmi eux cette dernière année. Elles sont nombreuses ces soirées et pourtant toutes différentes. Merci à Aurélie et Kamal, les plus gentils du monde. Merci au difficilement oubliable Benjamin pour la déconne du bureau

du fond - félicitation aussi futur CR! Merci à toi Sandhya pour tes mille excuses. Merci aussi à Magali et les petits déjeuners chez Cora. . . Enfin merci à Christine qui m'a permis de ne jamais faire d'hypoglycémie au bureau ainsi qu'à Bernard pour sa bienveillance.

Bref, il y en a du monde à remercier. C'est sans doute les plus belles citations que je puisse faire, les moins forcées aussi. . . Pourtant, j'en oublie forcément.

Merci à tous donc et bonjour l'avenir!

Consolidation de l'information hydrologique disponible localement et régionale-ment pour l'estimation probabiliste du régime des crues

Résumé :

Le praticien, lors de l'étape de prédétermination des débits de crue, est souvent confronté à un jeu de données restreint. Dans notre travail de recherche, nous avons proposé trois nouveaux modèles probabilistes spécialement conçus pour l'estimation des caractéristiques du régime des crues en contexte partiellement jaugé. Parmi ces modèles, deux d'entre eux sont des modèles dits *régionaux*, i.e. intégrant de l'information en provenance de stations ayant un comportement réputé similaire à celui du site étudié. Ces modèles, basés sur la théorie Bayésienne, ont montré une grande robustesse au degré d'hétérogénéité des sites appartenant à la région. De même, il est apparu que pour l'estimation des forts quantiles ($T \geq 50$ ans), l'idée d'un paramètre régional contrôlant l'extrapolation est pertinente mais doit d'être intégrée de manière souple et non imposée au sein de la vraisemblance. L'information la plus précieuse dont le praticien dispose étant celle en provenance du site d'étude, le troisième modèle proposé revient sur l'estimation à partir des seules données contemporaines au site d'étude. Ce nouveau modèle utilise une information plus riche que celle issue d'un échantillonnage classique de *v.a.i.id.* maximales puisque toute la chronique est exploitée. Dès lors, même avec seulement cinq années d'enregistrement et grâce à une modélisation de la dépendance entre les observations successives, la taille des échantillons exploités est alors bien plus importante. Nous avons montré que pour l'estimation des quantiles de crues, ce modèle surpasse très nettement les approches locales classiquement utilisées en hydrologie. Ce résultat est d'autant plus vrai lorsque les périodes de retour deviennent importantes. Enfin, part construction, cette approche permet également d'obtenir une estimation probabiliste de la dynamique des crues.

Efficient use of local and regional hydrological information for flood frequency analysis

Abstract:

To define the design flood, practitioners must often deal with only few data available. The aim of this work was to propose new classes of probabilistic models that are more accurate for this kind of applications. In this perspective, we propose three different models: two regional approaches and a fully local one. Unlike fully local models, the regional approaches include information from other gauging stations. Our results show that the proposed regional Bayesian estimators are more robust to the discordancy degree of the sites within the region. In addition, for larger quantile estimation ($T \geq 50$ years), the concept of a regional parameter which controls the tail behaviour seems to be relevant. However, this concept has to be proposed and not imposed within the likelihood function. It is overwhelmingly clear that the most important information one disposes is the target site one. To this aim, we propose a third model that is fully local, i.e., which only uses the latest recorded data. This new model is innovative as the whole time series is involved in the estimation procedure; not only cluster maxima. Consequently, even with only a five years record length time series, the sample size becomes large. Our results show that, for flood quantile estimations, this model clearly outperforms the estimators conventionally used in hydrology. Furthermore, by definition, this model allows inferences on flood dynamics.

Mots Clés : Théorie des Valeurs Extrêmes, Analyse Fréquentielle, Estimation Régionale, Méthodes MCMC

Discipline : Hydrologie Statistique

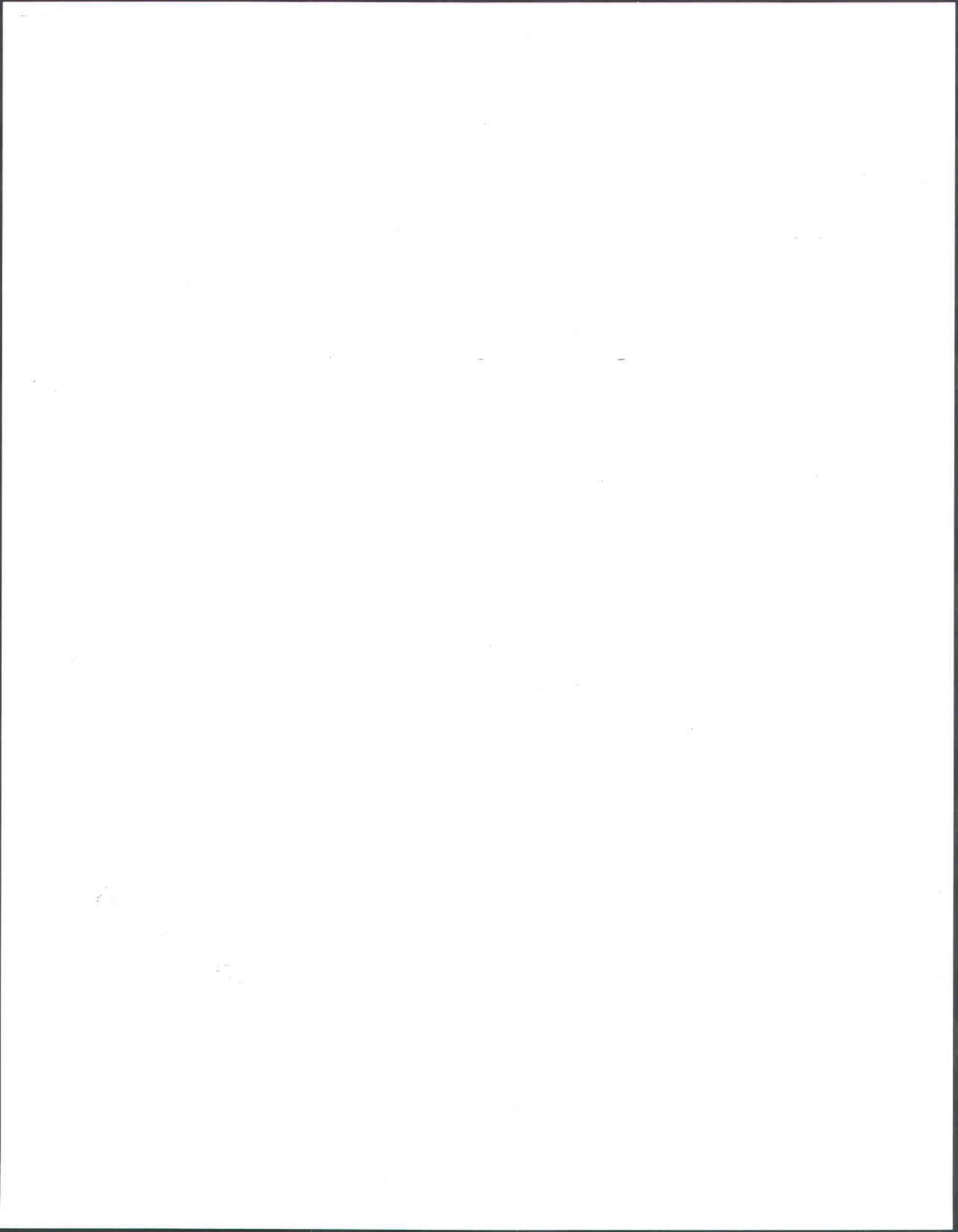


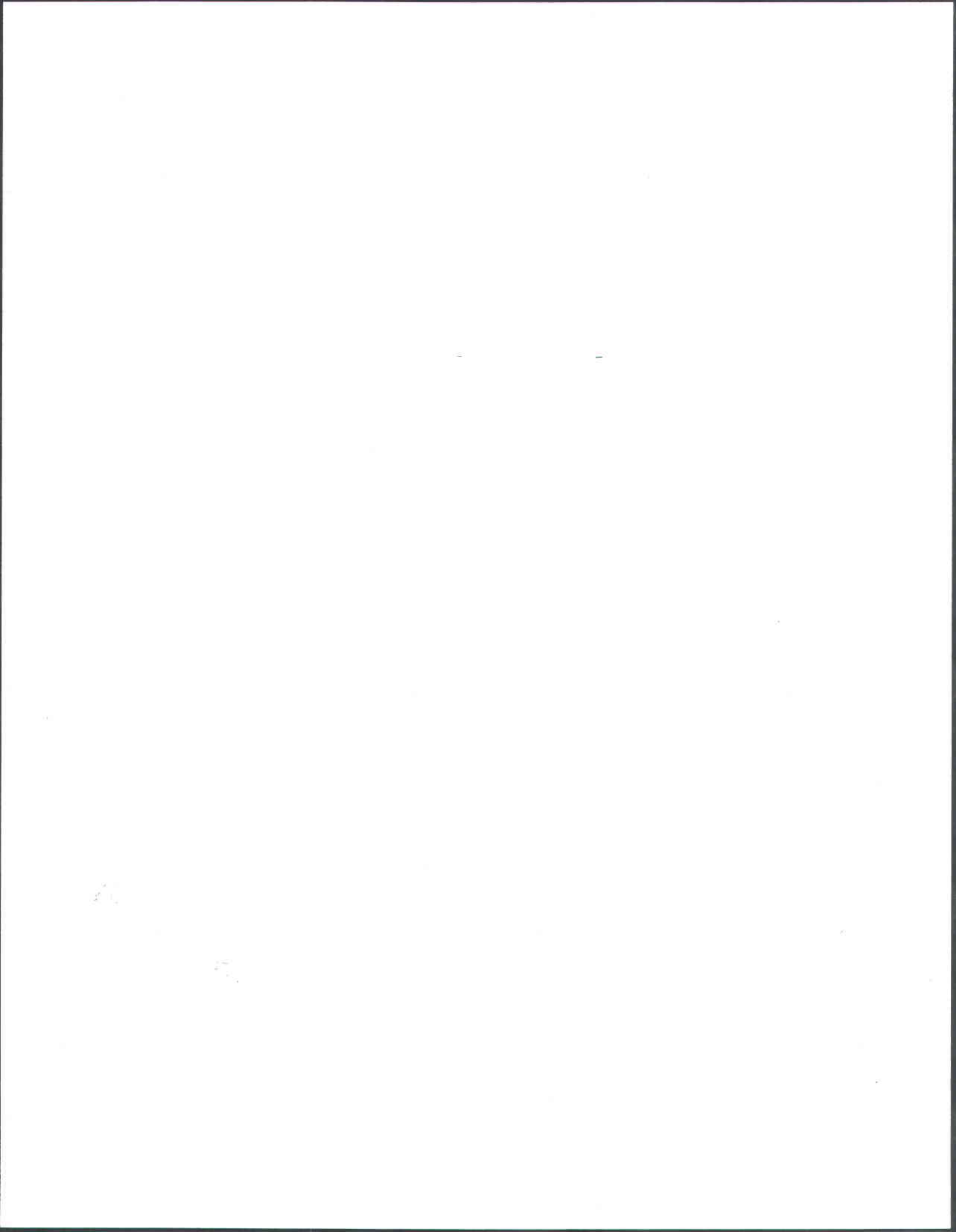
Table des matières

Remerciements.....	iii
Résumé.....	v
Table des matières.....	vii
Table des figures.....	ix
Table des tableaux.....	xi
1 Introduction	1
1.1 Les Besoins Opérationnels	5
1.2 Les Champs Explorés par ces Travaux	6
1.3 Approche de la Problématique et Plan du Mémoire	8
2 Analyse Fréquentielle Locale	9
2.1 Les Estimateurs Statistiques	9
2.1.1 Les Estimateurs Purement Locaux	10
2.1.2 L'Information Historique	11
2.2 Modélisation des Débits par les Processus	12
2.2.1 La Méthode du GRADEX	13
2.2.2 Les Modèles Pluie-Débit	16
2.2.3 La Crue Maximale Probable	17
2.3 Conclusions et Objectifs à Atteindre	19
3 Le Modèle de l'Indice de Crue	21
3.1 Les Étapes de l'Analyse Fréquentielle Régionale	21
3.1.1 La Régionalisation	21
3.1.2 L'Homogénéité en Question	23
3.1.3 L'Estimation au Site Cible	25
3.2 Les Limites de l'Indice de Crue	25
3.3 Conclusions et Objectifs à Atteindre	27
4 Éléments de Théorie Bayésienne	29
4.1 Vers les Approches Bayésiennes	29
4.2 Le Théorème de Bayes et la Loi a Priori	29
4.3 L'Inférence Bayésienne	30
4.4 Les Intervalles de Crédibilité	31
5 Un Modèle Bayésien pour l'Estimation Régionale des Débits	33
5.1 L'Importance du Site Cible et de la Région	33
5.2 Les Améliorations	34
5.2.1 Un Assouplissement des Hypothèses de l'Indice de Crue	34
5.2.2 Une Utilisation Différenciée de l'Information	35
5.2.3 Des Propriétés Asymptotiques Établies	35
5.2.4 Une Quantification des Incertitudes Rendue Possible	36

5.3	L'Article	36
5.4	Discussion	48
6	Utilisation des Sauts Réversibles pour une Prédiction Plus Robuste des Extrêmes	49
6.1	La Nécessité d'un Nouveau Modèle Régional	49
6.2	Les Apports du Nouveau Modèle	51
6.3	L'Article	52
6.4	Discussion	65
7	Modélisation de Tous les Excès Selon une Structure de Dépendance Extrême	67
7.1	Une Utilisation Totale de l'Information Purement Locale	67
7.2	La Modélisation de la Dépendance	68
7.3	La Modélisation des Hydrogrammes Rendue Possible	70
7.3.1	Deux Approches pour l'Estimation de la Dynamique des Crues	70
7.3.2	Les Possibilités Offertes par le Modèle Utilisant Tous les Excès	73
7.4	L'Article	74
7.5	Conclusion et Critique de ce Modèle	94
8	Conclusions et Perspectives	97
A	Annexe : Éléments théoriques sur les L-moments	99
B	Annexe : Méthodes d'Ajustement de la GPD	101
B.1	La Méthode des Moments (MOM)	101
B.2	La Méthode des Moments Pondérés (PWU & PWB)	102
B.3	La Méthode du Maximum de Vraisemblance (MLE)	102
B.4	La Méthode du Likelihood Moment (LME)	103
	Index	104
	Liste des symboles	105
	Bibliographie	107

Table des figures

1.1	Inondation de Paris. Janvier 1910. Cartes Postales d'époque.	1
1.2	Représentation d'une densité de probabilité f , de sa partie centrale et de sa queue de distribution - ici à droite.	2
1.3	Différentes variables d'étude synthétisant les caractéristiques de crue. Q_{pte} : débit de pointe, Q_{moy} et Q_{dep} : débits moyenné et dépassé en continu sur une durée d	5
2.1	Notion de seuil de perception et des différents types d'information historique. Figure inspirée de Brázdil <i>et al.</i> [2006].	11
2.2	Illustration de la méthode du GRADEX.	14
2.3	Schéma synthétique représentant la procédure d'estimation de la distribution des débits à l'aide de transformations pluie-débit. Figure tirée de Arnaud et Lavabre [2002].	17
4.1	Définition d'un intervalle de crédibilité $C_\alpha(x)$ connaissant la loi <i>a posteriori</i> $\pi(\theta x)$	31
5.1	Assouplissement des hypothèses du modèle de Dalrymple sur les paramètres de la GPD. Ligne verticale : contraintes de l'indice de crue. Densités : contraintes du modèle proposé.	34
5.2	Précision de l'information régionale à l'aide des données au site cible. Lignes en pointillées : lois <i>a priori</i> . Lignes pleines : lois <i>a posteriori</i> . Lignes verticales : valeurs de références.	35
6.1	Evolution de l'hyperparamètre p_ξ en fonction de la statistique H_1	52
7.1	Perte d'information : passage d'une chronique de débit à un échantillon de taille réduite. Approches classiques des maxima annuels et dépassements au dessus d'un seuil. L'Ardières à Beaujeu.	68
7.2	Différence d'utilisation de l'information entre l'approche classique POT (à gauche) et la modélisation de tous les excès (à droite). L'Ardières à Beaujeu. Losange rouge : observation exploitée lors de la procédure d'estimation.	69
7.3	Définition des 4 différentes régions du couple (y_{i-1}, y_i)	70
7.4	Illustration de la description des hydrogrammes de crue par une densité de probabilité. Panneau de gauche : hydrogramme brut. Panneau de droite : hydrogramme modifié et d'aire unité. Figure inspirée de Yuc <i>et al.</i> [2002].	71
7.5	Convergence des distributions des débits moyens associés aux durées d_1 et d_2	72
7.6	Construction de l'HSMF à partir des courbes QdF des débits continuellement dépassés.	73
7.7	Chronique de débits journaliers observés (à gauche) et simulés (à droite). La Sioule à St-Priest-des-Champs. Seuil à $46 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$	74
7.8	Valeurs supérieures à $46 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ observées (à gauche) et simulés (à droite). La Sioule à St-Priest-des-Champs.	95



Liste des tableaux

2.1	Synthèse sur la performance des différents estimateurs de la GPD.	11
2.2	Essai de détermination de la période de retour de la CMP.	18
6.1	Performance de chaque estimateur pour l'estimation des quantiles Q_2 , Q_{10} et Q_{20} . Nombre de régions simulées : 1000. Taille d'échantillon au site cible : 20.	50
6.2	Performance de chaque estimateur pour l'estimation des quantiles Q_{50} , Q_{100} et Q_{1000} . Nombre de régions simulées : 1000. Taille d'échantillon au site cible : 20.	50
6.3	Performance de chaque estimateur pour l'estimation des paramètres de la GPD. Nombre de régions simulées : 1000. Taille d'échantillon au site cible : 20.	51

