



ENSH-(n° d'ordre)

**RESUME ELARGI THESE DE DOCTORAT
DE L'ECOLE NATIONALE SUPERIEURE D'HYDRAULIQUE**

Présentée par

Monsieur **BOUKHELIFA Mustapha**

**Pour obtenir le grade de
DOCTEUR DE L'ECOLE NATIONALE SUPERIEURE D'HYDRAULIQUE**

Sujet de la thèse :

**CONSTRUCTION LOCALE ET RÉGIONALE DES COURBES INTENSITÉ-
DURÉE-FRÉQUENCE BASÉE SUR L'INVARIANCE D'ÉCHELLE :
APPLICATION À LA RÉGION CENTRE DU NORD ALGÉRIEN**

Thèse présentée et soutenue à Blida le 27/10/2020 devant le jury composé de :

M. SALAH Boualem	Professeur, ENSH Blida	Président
M. MEDDI Mohamed	Professeur, ENSH Blida	Directeur de thèse
M. GAUME Éric	HDR, Univ. G. Eiffel, Nantes, France	Co-directeur de thèse
M. AMMARI Abdelhadi	MCA, ENSH Blida	Examineur
M. BERMAD Abdelmalek	Professeur, ENP El Harrach	Examineur
M. HACHAMA Mohamed	Professeur, Univ. Khemis-Miliana	Examineur
M ^{me} . BENMAMAR Saadia	Professeur, ENP El Harrach	Invitée

Table des matières

1	<i>Introduction</i>	2
2	<i>Contexte et problématique</i>	2
3	<i>Objectifs de la thèse</i>	3
4	<i>Cadre d'étude et données</i>	3
5	<i>Méthodologie et structure de la thèse</i>	4
5.1	Invariance d'échelle simple et comportement multifractal des pluies maximales annuelles	4
5.2	Estimation Bayésienne intégrée des courbe IDF au site	5
5.3	Cartographie régionale des quantiles de pluies horaires	6
6	<i>Résultats et discussions</i>	6
6.1	Vérification de l'invariance d'échelle simple et de la multifractalité : Localement et régionalement.	6
6.2	Calage locale du modèle IDF Bayésien intégré	8
6.3	Régionalisation et cartographie des courbe IDF	10
7	<i>Discussion et conclusion</i>	10
8	<i>Liste des références bibliographiques du résumé élargi</i>	12

1 Introduction

Depuis plusieurs années, et de façon récurrente, plusieurs régions Algériennes subissent des inondations et des crues de sévérité variable. Quel que soit les conditions climatiques (méditerranéenne, aride, semi-aride, etc.) de ces lieux, le constat est toujours similaire : inondation du milieu urbain et péri-urbain, cours d'eau en crue provoquant des débordements sur les réseaux routiers et stagnation des eaux sur des terres agricoles, même l'habitat rural n'est pas épargné. Bien évidemment, cet état de fait alarmant peut être imputé à différentes causes (ou leurs conjonctures) telles que les changements climatiques, les défauts de conception et le manque de maintenance des structures de gestions des eaux de pluies, et une urbanisation toujours croissante. Cependant, il y a un fait qui ne peut être éludé, à savoir le manque de données hydro-météorologiques en termes de longueurs des séries d'observations et de densité des réseaux de mesures. Ainsi, les mesures hydrologiques sont de première importance dans les études de conception d'ouvrages hydrotechniques, d'analyse du risque et de prise de décision (Chow et al., 1988). De plus, l'utilisation des mesures de pluies, comme base de l'ingénierie hydrologique, trouve encore plus son importance dans la conception des infrastructures de gestion des eaux de pluies en milieu urbain, où l'environnement naturel a été modifié et les mesures hydrométriques historiques, quand elles existent, ne sont pas représentatives du futur système modifié (Koutsoyiannis & Langousis, 2011).

2 Contexte et problématique

Les enregistrements pluviométriques, et particulièrement pluviographiques (mesure des cumuls des pluies en fonction du temps) fournissant les mesures de pluies à des échelles temporelles très fines (de l'ordre de la minute), sont le point de départ de toute analyse d'ingénierie hydraulique pratique en milieu urbain, étant donné que les phénomènes d'inondations et de crues s'y déroulent bien souvent à une échelle infra-journalière (Willems, 2012). Ainsi, leur utilisation en analyse statistique sur les précipitations est fortement reliée à leur disponibilité et à la qualité des observations (Grimaldi et al., 2011). Aussi, la fiabilité climatologique des estimations des événements extrêmes repose essentiellement sur la longueur (en année) des séries de mesure (Meylan & Musy, 1999). En effet, les manuels des bonnes pratiques hydrologiques soulignent tous l'importance de la longueur des séries de mesures. A titre d'exemple au Royaume-Uni l'Institute of Hydrology (1999) recommande d'appliquer la règle d'une longueur d'enregistrement égale à 5 fois T (T étant la période de retour) pour déterminer la période de retour maximale qu'il est possible de calculer. De même, le CERTU (2003) en France recommande d'avoir une longueur de série de mesure de 5 à 7 fois plus grande que la période de retour avec une longueur de 3 fois T à ne jamais descendre en dessous. Aux Etats-Unis, la pratique usuelle est que la période de retour doit être inférieure ou égale à 2 fois la longueur des séries de mesures (Stedinger et al., 1993). Au-delà des définitions différentes sur la longueur minimale des séries de mesure à retenir, tous ces référentiels nationaux ont comme point commun de relier fiabilité d'estimation avec la longueur des séries de mesures. En effet, l'implémentation des méthodes d'analyse fréquentielle, sur des échantillons de tailles limitées, tend à affecter les estimations avec de

grandes incertitudes (Gaume, 2018). De même, la densité du réseau pluviographique est assez faible, ce qui limite les extrapolations vers sites non-jaugés

3 Objectifs de la thèse

Ce travail de thèse assume le parti pris de se focaliser sur un seul des aspects, cités en début de la section 1, responsables des inondations en Algérie, à savoir : comment dépasser les limitations, dues à une faible densité du réseau de mesure pluviographique et à des séries de mesures relativement courtes, pour l'application d'une analyse fréquentielle des événements pluviométriques extrêmes. Plus clairement, l'objectif à atteindre est de fournir des outils d'ingénierie permettant des conceptions d'ouvrages hydrauliques et des analyses de risques suffisamment fiables et précises, même dans les zones faiblement voire non-jaugés.

Traditionnellement, les estimations des distributions fréquentielles pour diverses durées d'agrégation sont synthétisées sous forme de courbes Intensité-Durée-Fréquence (IDF). Toutefois, les incertitudes associées à l'élaboration de ces courbes IDF, n'ont été que très rarement évaluées dans le passé. De même, la plupart des modèles de courbes IDF, ne tirent pas profit des structures probabilistes des pluies pour établir une formulation des courbes IDF théoriquement cohérente et hydrologiquement robuste. Ainsi, ce travail de thèse vise à proposer une méthodologie et des procédures permettant de faire : (a) la meilleure utilisation possible des données disponibles et de leurs propriétés dans le calage des courbes IDF, (b) une évaluation efficace des incertitudes sur les paramètres du modèle IDF et les quantiles correspondants, (c) une régionalisation des courbes IDF sur toute la zone d'étude, en combinant les incertitudes issues des estimations des distributions fréquentielles et celles issues des procédures d'interpolation, dans le but d'établir une cartographie des extrêmes pluviométriques limitant les risques de défaillances des ouvrages hydrauliques.

4 Cadre d'étude et données

La zone d'étude couvre les régions centrales du Nord de l'Algérie (Figure 1). Elle s'étend sur une superficie de 25000 km². Elle est comprise entre la mer Méditerranée au Nord et les limites Sud de la grande chaîne montagneuse de l'Atlas Tellien au Sud. En effet la zone d'étude est une sorte de succession de vallées comprises entre deux chaînes de montagnes quasi parallèles suivant une direction Ouest-Est. Au Nord s'érigent plusieurs massifs montagneux importants qui sont d'Ouest en Est : la Dahra (Mont Zeccar à 1550m), l'Atlas Blidéen (Mont Sidi Abdelkader à 1629m) et la Djurdjura (Mont Lalla Khadidja à 2308m). Dans le Sud, le massif montagneux le plus important est l'Ouarsenis qui culmine à 1985 m au Mont Sidi Amar. Au centre, la chaîne de montagne septentrionale s'écarte des cotes pour laisser place à la Mitidja, une plaine littorale séparée de mer par la chaîne collinaire du Sahel (Mont Chenoua à 905m) à l'Ouest et ouverte sur la mer à l'Est, avec une altitude moyenne de 50m. Cette dernière avec la plaine du Cheliff, représentent deux des plus importantes plaines agricoles de l'Algérie.

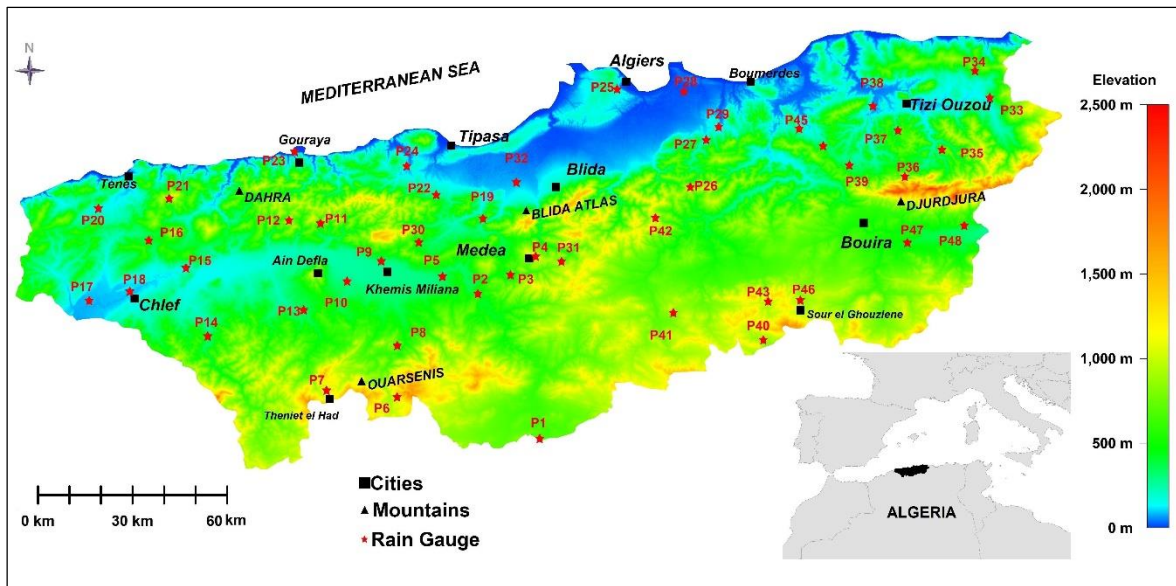


Figure 4.1 Zone d'étude, topographie et poste pluviographique (PG)

Les données pluviométriques utilisées ici ont été fournies par l'ANRH. Elles consistent dans les enregistrements de 48 postes pluviographiques répartie sur toute la zone d'étude à partir des quels sont tirés les séries des maximums annuels (SMA) des pluies sur huit durées d'agrégation (15, 30, 60, 120, 180, 360, 720 et 1440 minutes). Le nombre moyen d'année de fonctionnement est de 22 ans (maximum 38 ans, minimum 8 ans).

5 Méthodologie et structure de la thèse

Ce travail est structuré autour de 6 chapitres. Un premier chapitre introductif, suivi d'un second chapitre qui fait une synthèse bibliographique exhaustive sur l'analyse fréquentielle des événements pluviométriques extrêmes et toutes les notions reliées. Le troisième chapitre fait une large revue de la zone d'étude et des données utilisées dans ce travail. Le chapitre quatre concerne l'étude probabiliste des structures temporelles et spatiales des précipitations maximales annuelles sur diverses durées d'agrégations dans la zone d'étude. Le cinquième chapitre est quant à lui consacré à la validation du modèle de courbes IDF reposant sur les notions d'invariance d'échelle simple et de fractalité, puis à l'évaluation de ses performances et enfin à la mise en exergue des avantages d'une estimation Bayésienne intégrée des courbes IDF. Au final, le chapitre six évalue la possibilité d'une implémentation régionale du modèle IDF proposé.

5.1 Invariance d'échelle simple et comportement multifractal des pluies maximales annuelles

La notion d'invariance d'échelle, et particulièrement l'invariance d'échelle simple (*simple scaling* en anglais), est souvent considérée (Durrans, 2013) comme un costume taillé sur mesure pour atteindre la cohérence théorique dans la formulation des courbes IDF. En effet, l'invariance d'échelle simple (au sens strict) signifie que les fonctions de distribution

de probabilités sur diverses échelles (ici la durée d'agrégation) sont toutes identiques à un facteur d'échelle près. Cette définition est analogue à la notion fondamentale d'indice de crue (ou d'avverse) en analyse fréquentielle régionale (Hosking & Wallis, 1997). D'un autre côté, les propriétés multifractales aussi appelées structures probabilistes des pluies, peuvent être mise en avant à travers une analyse d'échelle des moments de pluies (Burlando & Rosso, 1996; Sivakumar, 2001). Une analyse d'échelle des moments (MSA : *Moment Scaling Analysis* en anglais) de pluies consiste à vérifier l'existence d'une fractalité et de son type (Gupta & Waymire, 1990). D'un côté, la fractalité existe si les relations entre les logarithmes des moments des cumuls/intensités des pluies d'ordre q et les durées d'agrégations sont représentées par des droites de pentes $k(q)$. Et d'un autre côté, la nature de la relation entre la fonction d'exposant d'échelle $k(q)$ et l'ordre q des moments, définit le type de la fractalité. En effet, la fractalité des pluies maximales annuelles sur diverses durées d'agrégation peut être définie comme une invariance d'échelle au sens large. Elle est dite : multifractale si la relation entre les exposants d'échelle $k(q)$ et l'ordre q des moments est non linéaire, monofractal si cette relation est une droite ne passant pas par l'origine, autosimilaire s'il y a log-log linéarité (c'est-à-dire une droite passant par l'origine) (García-Marín et al., 2013). L'hypothèse d'invariance d'échelle doit obligatoirement être concordante avec les données - au risque d'introduire des biais d'estimation- ce qui est vérifiable à travers de multiples tests, tels que l'analyse d'échelles des moments MSA, les test d'homogénéité de Hosking & Wallis (1997), etc.

L'utilisation de l'invariance d'échelle simple et les avantages en découlant présentent beaucoup plus de subtilité qu'il n'y paraît, particulièrement dans la définition du lien entre invariance d'échelle, fractalité et formulation des courbes IDF. En effet, il a été montré que seule une définition autosimilaire de la fonction d'exposant d'échelle est théoriquement cohérente (voir démonstration en §2.6.4) avec le principe d'invariance d'échelle simple au sens strict (Boukhelifa et al., 2018; Menabde et al., 1999).

5.2 Estimation Bayésienne intégrée des courbe IDF au site

Bien que présentant une incohérence théorique, la méthodologie classique d'élaboration des courbes IDF est bien maîtrisée et totalement satisfaisante particulièrement dans les régions du monde où les enregistrements de pluies sont de grandes tailles avec une faible variabilité d'échantillonnage (Koutsoyiannis et al., 1998). Cette incohérence théorique réside dans le fait que les quantiles de pluies sur une courbe de même fréquence proviennent d'ajustements différents, d'une même loi statistique, chacun correspondants aux diverses durées d'agrégations. L'invariance d'échelle simple avec une définition linéaire de la fonction d'exposant d'échelle permettent une formulation théoriquement consistante du modèle de courbes IDF. Ainsi, le modèle IDF est le produit d'une fonction de distribution de probabilités adimensionnelle des cumuls/intensités de pluies maximales annuelles et un facteur d'échelle dépendant de la durée. Ce qui permet au final de mélanger toutes les séries de diverses durées en une unique série ou un échantillon conjoint (*pooled* en anglais). Ensuite, il est possible d'inférer tous les paramètres du modèle IDF en une seule étape en maximisant le logarithme de la vraisemblance du modèle IDF à travers un algorithme de

calcul Bayésien Markov Chain Monte Carlo (MCMC). Ce processus d'inférence statistique, suscité, est considéré comme étant le mieux adapté pour un calcul efficace des incertitudes d'estimation (Coles & Pericchi, 2003; Reis & Stedinger, 2005). Cette méthodologie d'élaboration des courbes IDF est décrite de façon détaillée et évaluée de manière approfondie afin de mettre en avant tous les avantages qu'apporte une estimation Bayésienne intégrée des courbes IDF.

5.3 Cartographie régionale des quantiles de pluies horaires

De nombreux endroits de la région d'étude ne disposent pas de mesures pluviographiques, ce qui pose un problème de taille aux ingénieurs concepteurs dans leurs études. En effet, les données et estimations, issues de stations de mesures existantes, ne peuvent être directement transposées vers les lieux non-jaugés. Surtout que les stations de mesures ont des régions d'influence assez limitées, particulièrement quand il s'agit d'observations horaires, et à plus forte raison quand le relief est hétérogène. Ce qui est typiquement le cas de notre région d'étude (Meddi & Toumi, 2015). Bien évidemment, il existe des solutions, établies depuis plusieurs années maintenant, permettant de dépasser cette problématique. Ainsi, la géostatistique a permis de mettre en avant différentes techniques d'interpolation spatiale telles que la pondération inverse à la distance, le Krigeage, etc. (Diggle & Ribeiro, 2007; Kitanidis, 1997). Ces dernières techniques sont assez limitées pour des applications directes en spatialisation des extrêmes pluviométriques particulièrement quand la densité du réseau de mesure est assez faible. En effet, Hosking & Wallis (1997) montrent la supériorité de la cartographie des variables hydrologiques en combinant analyse fréquentielle régionale et procédure géostatistique. Ce qui consiste en une inférence statistique sur un échantillon unique, composé de données provenant de différents sites, sous réserves d'homogénéité de la région, puis d'interpoler, par Krigeage ou autre, le paramètre de position (typiquement la moyenne ou la médiane) de la série de données de chaque stations, et enfin, déduire le quantile de pluie – en multipliant le paramètre de position par le quantile régional adimensionnel – en chaque point de la grille interpolée et établir une cartographie des événements pluvieux extrêmes. Cette méthodologie est mise en œuvre au chapitre 6 en combinant différents schémas d'analyse statistique fréquentielle sur les pluies extrêmes avec une procédure d'interpolation par Krigeage ordinaire afin d'identifier l'approche la plus adéquate.

6 Résultats et discussions

6.1 Vérification de l'invariance d'échelle simple et de la multifractalité : Localement et régionalement.

Les hypothèses d'invariance d'échelle simple et de comportement fractal, des observations des pluies maximales annuelles sur diverses durées, sont vérifiées localement (pour chaque station seule) et régionalement (deux variantes : 1. intégration spatiale de plusieurs sites pour chaque durée séparément, 2. Intégration spatio-temporelle : toutes confondues sur plusieurs sites). Cette vérification est menée à travers deux approches

complémentaires que sont les tests d'homogénéité et de discordance de Hosking & Wallis (1997) et l'analyse d'échelle des moment MSA (Gupta & Waymire, 1990).

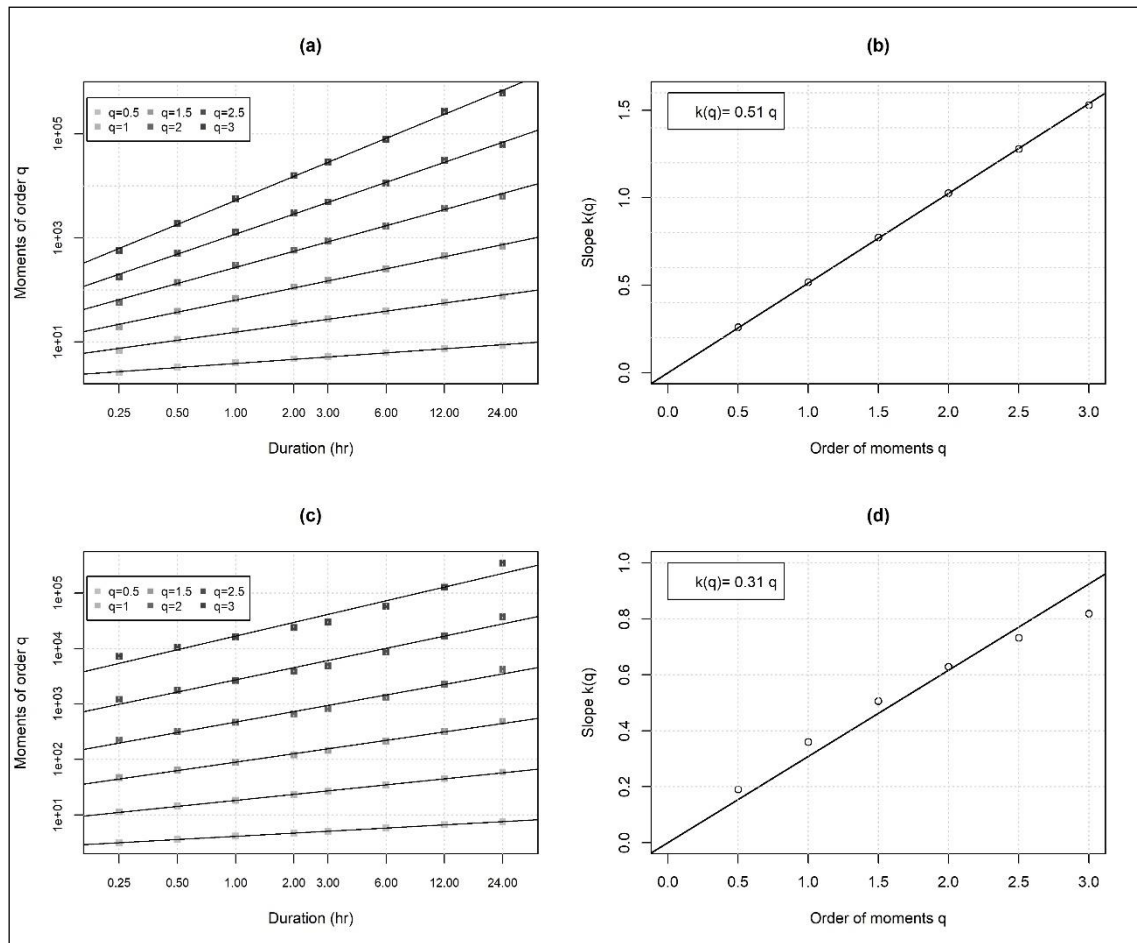


Figure 6.1 (à droite) : Régression log-log linéaire entre les moments d'ordre q et les durées d'agrégation d . (à gauche) Ajustement d'une régression linéaire à la fonction d'exposant d'échelle $k(q)$ et les ordres q des moments. (a) et (b) pour la station 33. (c) et (d) pour la station 30.

Après avoir clairement établi que les données observées localement ne rejettent pas l'invariance d'échelle simple et la linéarité de la fonction d'exposant d'échelle (voir figure 6.1), il apparaît que l'extension de ce modèle IDF Bayésien intégrée pour des estimations régionale est raisonnablement possible au sens d'un assouplissement des critères de rejet du test d'homogénéité $H1$ de Hosking & Wallis (1997). En effet, une délimitation très fine (7 stations au maximum) des sous-régions (intégration spatio-temporelle) assurant une homogénéité, même imparfaite, permet une extrapolation des estimations, via le modèle Bayésien intégré dans l'espace et le temps, vers des sites non-jaugés. Ainsi, la robustesse du modèle à travers l'incorporations de plus de données peut contrebalancer les biais d'estimation dus à de possible hétérogénéité (issues de l'assouplissement des critères d'homogénéité). Ceci doit être impérativement vérifier pour chaque cas d'application (voir chapitre 6).

6.2 Calage locale du modèle IDF Bayésien intégré

La méthodologie d'estimation Bayésienne intégrée des courbes IDF a été extensivement testée et évaluée envers un jeu relativement large et riche de données de pluies du la région centrale Nord de l'Algérie. Cette méthode permet l'évaluation de tous les paramètres des courbs IDF en une seule étape, puis fournit une estimation compréhensive et cohérente des incertitudes associées sous la forme de distribution à priori (issue de l'inférence Bayésienne MCMC) et d'intervalles de crédibilité pour les paramètres du modèles IDF et les quantiles correspondants, suivant les valeurs observées :

$$\ell(Y_d | \theta) = \prod_{i=1}^n f_{\theta}(y_d^i) \quad \text{et} \quad \ell(Y | \theta, b) = \prod_{i=1}^n \prod_{j=1}^l f_{\theta}\left(\frac{y_{d_j}^i}{a^b}\right) \quad (6.1)$$

Néanmoins, il doit être rappelé que les dépendances entre les observations sur diverses durées peuvent difficilement être prises en compte dans la procédure d'inférence, même si des travaux précédents ont apportés une solution partielle (Muller et al., 2008). Les intervalles de crédibilités postérieur résultants devraient toutefois être probablement considérés comme sous-estimés.

Excepté le calage consistant des courbes IDF, l'approche intégrée semble aussi pouvoir significativement réduire les incertitudes reliées à l'inférence statistique comparativement à l'approche traditionnelle consistant à caler les modèles statistiques sur chaque durée séparément (voir figure 6.2). Les résultats présentés confirment cela, moyennant quelques hypothèses cohérentes avec les observations (i.e. l'invariance d'échelle), les séries maximales annuelles des intensités ou cumuls de pluies sur une durée donnée contiennent une information de valeur qui aide contraindre les distributions statistiques des intensités ou cumuls de pluies maximum annuels sur d'autres durées.

Les fondamentaux de l'approche proposée ont déjà été présenté dans plusieurs autres travaux (Blanchet et al., 2016; Menabde et al., 1999; Muller et al., 2008; Van de Vyver, 2015), mais c'est la première fois, à notre connaissance, qu'elle est testée et validé sur un échantillon relativement large. Des tests et vérifications supplémentaires sur d'autres contextes climatiques seront certainement nécessaire, mais la récente confirmation que l'hypothèse d'invariance d'échelle semble raisonnablement valide sur la grande région qu'est l'Amérique du Nord (Innocenti et al., 2017) indique que de telles approches d'inférence intégrée peuvent être largement utilisées. De plus, cette approche simple proposée peut être relativement directement implémentée dans une version régionale si les homogénéités dans les distributions fréquentielle, aussi bien que dans les valeurs d'exposant d'échelle, sont identifiés entre station (Halbert et al., 2016).

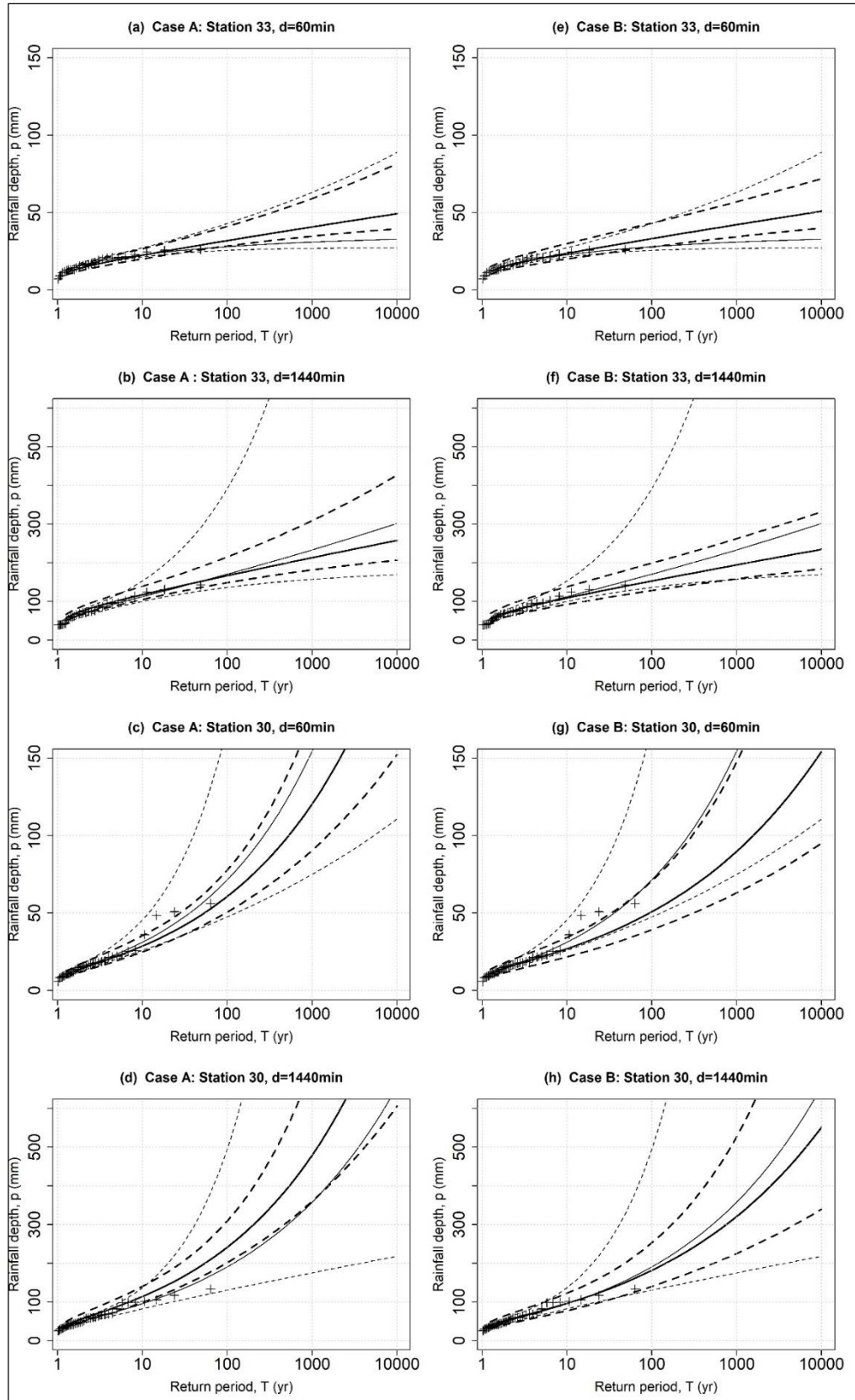


Figure 6.2 Séries des maxima annuels de cumuls de pluie ajustés à une distribution GEV. (à gauche : a, b, c, d) : Pour le cas A (15 min – 24h), (à droite : e, f, g, h) : Pour le cas B (60 min – 24 h). Les croix pour les observations. Traits fins : modèle M0. Trait gras : Modèle M1. Trait en tiret : intervalles de crédibilité.

6.3 Régionalisation et cartographie des courbe IDF

Quatre approches de cartographie des extrêmes pluviométriques ont été testés, elles combinent entre les résultats d'inférence statistique locale ou régionale et les techniques d'interpolation spatiale (Krigage). Ces approches sont définies comme suit :

- a) Modèle M0 qui consiste à interpoler par Krigage des quantiles de pluies estimés par inférence bayésienne pour chaque durée séparément au niveau de chaque poste PG,
- b) Modèle M1 qui consiste à interpoler par Krigage des quantiles de pluies estimés par inférence Bayésienne de manière intégrée (intégration temporelle) au niveau de chaque poste PG ;
- c) Modèle M2 qui consiste à interpoler par Krigage le paramètre de position local (de chaque station PG) puis inférer (Bayesian MCMC) les quantiles régionaux pour chaque durée séparément (intégration régionale) et finalement déduire les quantiles, sur la grille où un paramètre de position a été interpolé, de durées d et de période de retour T , afin d'établir différents jeux de cartes des précipitations extrêmes ;
- d) Modèle M3 qui consiste à interpoler par Krigage le paramètre de position local sur une durée d'agrégation de 24h des stations PG, puis d'inférer (Bayesian MCMC) les quantiles régionaux par intégration totale (spatiale et temporelle), et finalement déduire les quantiles de période de retour T et de durées d , sur chaque point de la grille interpolée, afin d'établir différents jeux de cartes des précipitations extrêmes.

La meilleure approche de régionalisation, parmi celle étudiées ici, semble être celle combinant de manière efficiente entre les incertitudes de l'inférence statistique et celles de l'interpolation spatiale (modèle M3). C'est la borne supérieure de l'intervalle de crédibilité à 70%, résultant de cette fusion d'incertitudes, pour différents quantiles de pluie (i.e. sur diverses durées) qui est cartographiés. En raison des faibles incertitudes sur les estimations locales des pluies et de la grande cohérence spatiale des valeurs estimées, l'approche proposée paraît significativement surpasser l'approche traditionnelle même pour des estimations sur les sites non-jaugés. A noter que les cartographies des extrêmes pluviométriques sur la base du modèle IDF M0 ne sont pas du tout préconisées, et celles basées sur les modèles M1 et M2 ne sont recommandées que pour des extrapolations sur des distances inférieures aux portées des variogrammes sous-jacents.

7 Discussion et conclusion

Les courbes intensité-durée-fréquence (IDF) représentent un des outils hydrologiques les plus couramment utilisé dans la gestion des eaux pluviales particulièrement en milieu urbain. Ainsi, il était nécessaire et utile de proposer un modèle autorisant des mises en œuvre sur des séries d'observations pluviographiques de nombre et de longueur limités.

Finalement, ce travail a abouti sur une estimation Bayésienne Intégrée des courbes Intensité-Durée-Fréquence locale et régionale. Qui consiste en un calage, en une seule étape, d'un modèle IDF à quatre paramètres (3 pour la distribution GEV et 1 pour la relation d'échelle) sur un échantillon unique composé des maxima annuels de cumuls de pluies sur huit durées d'agrégation (15, 30, 60, 120, 180, 360, 720 et 1440 minutes). C'est l'établissement de la relation de la vraisemblance sur le modèle IDF qui a permis une estimation des paramètres en une seule fois (de façon intégrée), et sa maximisation à travers le calcul inférentiel Bayesian MCMC a permis d'incorporer les incertitudes dans le processus de calcul fournissant ainsi des intervalles de crédibilité les plus fiable possible sur les paramètres et les quantiles correspondants.

Outre la cohérence théorique du modèle IDF proposé, l'approche intégrée présente une nette cohérence avec les ajustements des maxima annuels des pluies sur une durée à la fois (approche classique avec inférence Bayesian MCMC) pour l'ensemble des stations étudiées. Ce qui dénote d'un équilibre positif entre simplicité du modèle et précision d'estimation (ou statistiquement parlant entre biais et incertitudes). En effet, quelques stations limitées montrent une concordance imparfaite (léger écart) avec l'hypothèse d'invariance d'échelle simple, particulièrement quand les pluies de durées de moins d'une heure sont considérées pour le calage. Toutefois, il faut garder à l'esprit que les hypothèses d'invariance d'échelle simple et de comportement fractal des observations doivent impérativement être vérifiées (c'est-à-dire qu'elles ne sont pas rejetées par les données d'observations)

En plus de la réduction des incertitudes internes, du fait d'une inférence statistique - sur l'ensemble de la relation IDF- en une étape de calcul (1 étape dans la méthode proposée contre 2 à 3 dans l'approche classique), les incertitudes d'estimations sur les quantiles sont significativement réduites comparativement à un calage du modèle IDF sur chaque durée séparément. Un autre résultat, qui était inattendu, est que cette approche apporte indubitablement de la robustesse, dans le sens où le processus inférentiel intégré appliqué sur des séries d'observation courtes (8 à 12 années) fournit des estimations rationnelles, ce qui représente un atout non négligeable pour des applications d'ingénierie. En plus du constat empirique, cette robustesse vis-à-vis de la petitesse de la taille des enregistrements, a été observée sur quelques milliers de séries simulées.

Concernant l'application régionale du modèle IDF Bayesian intégré, il est évident que le modèle M1 (inférence intégrée) soit meilleur que le modèle M0 (inférence séparée). Cependant, la faible densité du réseau de mesure montre qu'il est assez hasardeux d'extrapoler, à travers une cartographie des quantiles de pluies pour une période de retour T et une durée d , le résultat vers des sites non-jaugés. En effet, l'analyse des cartes d'erreur, concernant le Krigeage ordinaire implémenté, montre que seul le proche voisinage des stations autorise une extrapolation avec une incertitude minimale. Pour pallier à cette problématique une première proposition de baser les conceptions et analyses du risques en zones non-jaugées, non pas sur les quantiles, mais sur la borne supérieure de l'intervalle de crédibilité à 70% majorée de l'incertitude sur le Krigeage. En dépit de la réduction de l'incertitude grâce à l'estimation Bayésienne intégrée, la valeur proposée reste assez grande, particulièrement pour le modèle M0, et n'est donc pas suffisamment efficace pour des applications d'ingénierie.

Le modèle IDF régionale avec intégration spatio-temporelle (M3), c'est à dire sur un échantillon unique d'observations sur différents sites et sur diverses durées d'agrégation, moyennant un assouplissement (dans une certaine mesure) du critère d'homogénéité, permet de considérablement surpasser l'approche traditionnelle même pour des estimations sur les sites non-jaugés. En effet, ce dernier fusionne entre les incertitudes d'estimation sur les quantiles et les incertitudes d'interpolation de manière efficiente. Ce qui fait qu'en raison des faibles valeurs d'incertitudes sur les quantiles de pluie et de la grande cohérence spatiale des valeurs estimées, le modèle M3 est assez performant pour des applications de conception d'ouvrages hydrauliques et d'analyse du risque d'inondation.

8 Liste des références bibliographiques du résumé élargi

- Blanchet, J., Ceresetti, D., Molinié, G., & Creutin, J.-D. (2016). A regional GEV scale-invariant framework for Intensity–Duration–Frequency analysis. *Journal of Hydrology*, 540, 82–95. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2016.06.007>
- Boukhelifa, M., Meddi, M., & Gaume, E. (2018). Integrated Bayesian Estimation of Intensity-Duration-Frequency Curves: Consolidation and Extensive Testing of a Method. *Water Resources Research*, 54(10), 7459–7477. <https://doi.org/10.1029/2018WR023366>
- Burlando, P., & Rosso, R. (1996). Scaling and multiscaling models of depth-duration-frequency curves for storm precipitation. *Journal of Hydrology*, 187(1–2), 45–64.
- CERTU. (2003). *La ville et son assainissement* (CEREMA (ex CERTU)). Retrieved from <https://www.eyrolles.com/BTP/Livre/la-ville-et-son-assainissement-9782110940834/>
- Chow, V., Maidment, D., & Mays, L. (1988). *Applied Hydrology* (1 edition). New York: McGraw-Hill Science/Engineering/Math.
- Coles, S., & Pericchi, L. (2003). Anticipating catastrophes through extreme value modelling. *Journal of the Royal Statistical Society: Series C (Applied Statistics)*, 52(4), 405–416. <https://doi.org/10.1111/1467-9876.00413>
- Diggle, P., & Ribeiro, P. J. (2007). *Model-based geostatistics*. New York, NY: Springer.
- Durrans, S. R. (2013). Intensity-Duration-Frequency Curves. In *Rainfall: State of the Science* (pp. 159–169). American Geophysical Union (AGU). <https://doi.org/10.1029/2009GM000919>
- García-Marín, A. P., Ayuso-Muñoz, J. L., Jiménez-Hornero, F. J., & Estévez, J. (2013). Selecting the best IDF model by using the multifractal approach: IDF MODELS AND MULTIFRACTALITY. *Hydrological Processes*, 27(3), 433–443. <https://doi.org/10.1002/hyp.9272>
- Gaume, E. (2018). Flood frequency analysis: The Bayesian choice. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Water*, e1290. <https://doi.org/10.1002/wat2.1290>
- Grimaldi, S., Kao, S.-C., Castellarin, A., Papalexiou, S. M., Viglione, A., Laio, F., et al. (2011). Statistical Hydrology. In *Treatise on Water Science* (Vol. 2, pp. 479–517). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-53199-5.00046-4>
- Gupta, V. K., & Waymire, E. (1990). Multiscaling properties of spatial rainfall and river flow distributions. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 95(D3), 1999–2009.
- Halbert, K., Nguyen, C. C., Payrastra, O., & Gaume, E. (2016). Reducing uncertainty in flood frequency analyses: A comparison of local and regional approaches involving information on extreme historical floods. *Journal of Hydrology*, 541, 90–98. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2016.01.017>

- Hosking, J. R. M., & Wallis, J. R. (1997). *Regional Frequency analysis: an approach based on L-moments*. New York: Cambridge University Press.
- Innocenti, S., Mailhot, A., & Frigon, A. (2017). Simple scaling of extreme precipitation in North America. *Hydrology and Earth System Sciences*, 21(11), 5823–5846. <https://doi.org/10.5194/hess-21-5823-2017>
- Institute of Hydrology. (1999). *Flood estimation Handbook* (Vol. Vol. 1-5). Wallingford: UK Centre for Ecology & Hydrology.
- Kitanidis, P. K. (1997). *Introduction to Geostatistics: Applications in Hydrogeology*. Cambridge: Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/CBO9780511626166>
- Koutsoyiannis, D., & Langousis, A. (2011). Precipitation. In P. Wilderer (Ed.), *Treatise on Water Science* (Vol. 2, pp. 27–77). Oxford: Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-53199-5.00027-0>
- Koutsoyiannis, D., Kozonis, D., & Manetas, A. (1998). A mathematical framework for studying rainfall intensity-duration-frequency relationships. *Journal of Hydrology*, 206(1–2), 118–135.
- Meddi, M., & Toumi, S. (2015). Spatial variability and cartography of maximum annual daily rainfall under different return periods in Northern Algeria. *Journal of Mountain Science*, 12(6), 1403–1421.
- Menabde, M., Seed, A., & Pegram, G. (1999). A simple scaling model for extreme rainfall. *Water Resources Research*, 35(1), 355–339.
- Meylan, P., & Musy, A. (1999). *Hydrologie fréquentielle* (Première). Bucarest: *H*G*A*.
- Muller, A., Bacro, J.-N., & Lang, M. (2008). Bayesian comparison of different rainfall depth–duration–frequency relationships. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 22(1), 33–46. <https://doi.org/10.1007/s00477-006-0095-9>
- Reis, D. S., & Stedinger, J. R. (2005). Bayesian MCMC flood frequency analysis with historical information. *Journal of Hydrology*, 313(1–2), 97–116. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2005.02.028>
- Sivakumar, B. (2001). Is a chaotic multi-fractal approach for rainfall possible? *Hydrological Processes*, 15(6), 943–955. <https://doi.org/10.1002/hyp.260>
- Stedinger, J. R., Vogel, R. M., & Foufoula-Georgiou. (1993). Frequency analysis of extreme events (Version McGraw-Hill). In *Handbook of hydrology* (McGraw-Hill). New York: Maidment, D.R.
- Van de Vyver, H. (2015). Bayesian estimation of rainfall intensity–duration–frequency relationships. *Journal of Hydrology*, 529, 1451–1463. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2015.08.036>
- Willems, P. (2012). Impacts of Climate Change on Rainfall Extremes and Urban Drainage Systems. *Water Intelligence Online*, 11. <https://doi.org/10.2166/9781780401263>