

Chapitre 1

Introduction

1.1 Problème général

L'hydrologie est une science qui étudie le cycle de l'eau dans tous ses aspects, vaste sujet s'étendant de l'évaporation jusqu'à la formation et la propagation des écoulements, superficiels et souterrains. Cependant cette science est aussi chargée d'apporter des réponses concrètes aux nombreuses demandes des aménageurs et des responsables locaux. Ces derniers sont en particulier préoccupés par la prédétermination et la prévision des inondations ou des sécheresses, le dimensionnement des ouvrages de franchissement ou de barrage, l'exploitation de l'eau et la gestion des réserves, l'assainissement urbain ou le drainage des terres agricoles (Réménieras, [70]).

Suite aux récentes catastrophes survenues en France, de nombreuses actions et réflexions ont été suscitées dans les milieux scientifiques. L'amélioration de la gestion du risque d'inondation est ainsi devenue une préoccupation majeure de la recherche hydrologique. Avant la réalisation de toute étude, l'hydrologue commence par la récolte de mesures et d'observations de certains phénomènes physiques ayant trait à l'eau, pour étudier le problème plus en amont, et tenter d'aboutir à une analyse de la dynamique qui les soutend. L'élaboration de modèles opérationnels de gestion des ressources hydriques, de modèles pluie débit ou de dimensionnement d'ouvrage ne constituent que la phase finale du travail de l'hydrologue, et il importe de modéliser la structure sous-jacente du phénomène pluvieux.

Cependant, on ne possède actuellement qu'une compréhension partielle des mécanismes physiques des champs de pluie (Cho, [18]). En effet, la pluie est, par sa constitution même en gouttes discrètes tombant de façon intermittente, un phénomène extrêmement variable et discontinu dans l'espace et dans le temps. La plupart des hydrologues s'orientent alors vers une approche stochastique de la modélisation, tentant d'exploiter au mieux les séries de données collectées.

Aux problèmes liés à l'incompréhension de la physique du phénomène pluvieux s'ajoute celui de sa mesure. Cette dernière est généralement effectuée en collectant des séries temporelles de variables hydrologiques telles que par exemple des cumuls de pluie ou des débits de rivières. Or ces variables résultent d'une intégration en temps ou en espace et ne rendent pas compte de la grande discontinuité du phénomène. De plus, la plupart de

des séries ne couvrent que quelques décennies, et rares sont celles qui s'étalent sur plus de 100 ans. Pour accéder à des informations plus anciennes concernant le climat ou les records météorologiques historiques, diverses voies ont été proposées telles que les méthodes de paléohydrologie. Cependant ces procédés ne permettent d'accéder qu'à des estimations grossières sur les fluctuations climatiques historiques, et ne fournissent jamais de séries temporelles hydrologiques fiables.

S'il se restreignait à une analyse fréquentiste, l'hydrologue serait obligé de se contenter des courtes séries "lissées" disponibles aujourd'hui et serait peu à même de répondre aux divers demandes évoquées précédemment. Il est donc nécessaire d'élaborer un modèle, c'est-à-dire un ensemble d'hypothèses ainsi qu'une formalisation mathématique permettant d'atteindre ces objectifs grâce aux données. Les connaissances que l'on possède à priori sur le phénomène pluvieux sont à faire figurer dans le modèle. Ces dernières peuvent être issues de la physique, mais aussi être de simples évidences liées à des symétries ou des invariances d'échelle. Cependant, l'élaboration de modèles de pluie sur de courtes séries soulève divers problèmes d'ordre statistique:

- Celui de la stationnarité ou non de séries par nature finies : La stationnarité d'une série de variables est une notion relative à la longueur de la série. En effet, lorsque l'on considère la série de la figure 1.1 avant troncature, on peut conclure à la présence d'une tendance ou d'un saut au lieu d'un cycle.
- Le problème de la qualité de l'estimation en général (des paramètres) et de la convergence des estimateurs.
- Ce dernier problème se conjugue à celui de la grande variabilité des séries.

Les récentes avancées des moyens de mesure des événements pluvieux (satellite, radar, nouveaux pluviomètres et pluviographes) orientent aujourd'hui l'hydrologue vers des modèles capables d'intégrer des données à différents pas de temps et d'espace. A ce niveau aussi, on peut d'ores et déjà énoncer les problèmes statistiques qui vont se poser :

- L'intégration de séries d'un même site issues de pas de temps différents dans un modèle pose des problèmes techniques difficiles (parfois insurmontables) dans la plupart des modèles statistiques utilisés en hydrologie.
- De même la réalisation de transfert d'information spatiale est peu aisée dans les modèles statistiques classiques.

Actuellement, la plupart des modèles hydrologiques sont développés en un site et à une certaine échelle de temps, en ajustant de façon subjective une distribution et/ou un processus stochastique à une série pluviométrique. La période de retour d'un événement est en effet fonction du modèle choisi. Les modèles exponentiels et algébriques, qui peuvent être équivalents pour l'estimation des événements fréquents, procurent des résultats fondamentalement différents pour l'estimation des grandes périodes de retour. En effet, dans un modèle exponentiel, on passe du débit de durée de retour N années au débit de durée de retour $10 \times N$ années par l'addition d'une constante alors que dans un modèle algébrique, il

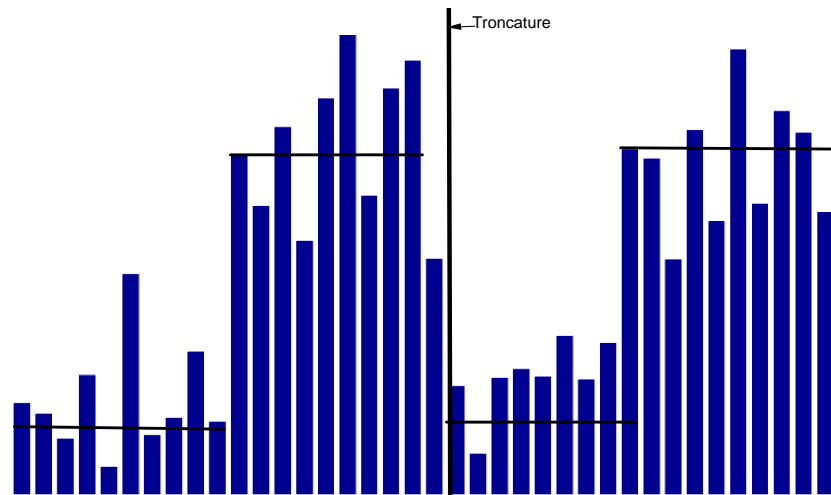


Figure 1.1: Effet de la troncature d'une série.

faut multiplier par une constante (Hubert, [43]). On a accès à l'erreur d'adéquation du modèle en comparant les périodes de retour estimées aux périodes empiriques. Les événements extrêmes recensés aujourd'hui montrent que les modèles de type exponentiel surestiment les grandes périodes de retour. On a représenté sur la figure 1.2 une comparaison des périodes de retour estimées par un modèle normal aux périodes observées sur 232 longues séries annuelles en divers endroits du globe (projet FRIEND-AMY).

Il apparaît une nette surestimation des périodes de retour, dans un rapport pouvant aller jusqu'à 40. Ces résultats sont corroborés par divers travaux dont celui de Bendjoudi et Hubert, [9].

Ces événements extrêmes (donc rares) font souvent l'objet d'études indépendantes (en chaque site et pour chaque pas de temps), alors qu'une modélisation unifiée permettrait d'intégrer plus d'information et d'extraire des caractéristiques globales qui réduiraient le nombre de paramètres de modélisation.

En fait, de récentes études montrent qu'en hydrologie (tout comme dans de nombreux domaines géophysiques d'ailleurs), les séries issues de divers régimes climatiques ou collectées selon des pas des temps différents présentent des caractéristiques invariantes. Sous un angle purement géométrique, la forme des nuages de pluie se révèle de nature fractale (Lovejoy, 83 [57]). Hubert et Carbonnel, 89 [45] ou Olsson et al., 92 [68] analysent l'occurrence temporelle de pluie et concluent à une structure mono-fractale de cette dernière, résultat qui peut être étendu à l'occurrence spatiale (Hubert et Carbonnel, 88 [44]). Mais des propriétés multifractales sont aussi décelées sur des données radar (Schertzer and Lovejoy, 87 [75]), ainsi que sur des données satellites (Lovejoy and Schertzer, 91 [58]). Plusieurs travaux concluent aussi à une invariance du paramètre de décroissance algébrique des queues de distribution sur diverses séries temporelles de cumuls pluviométriques à pas de temps

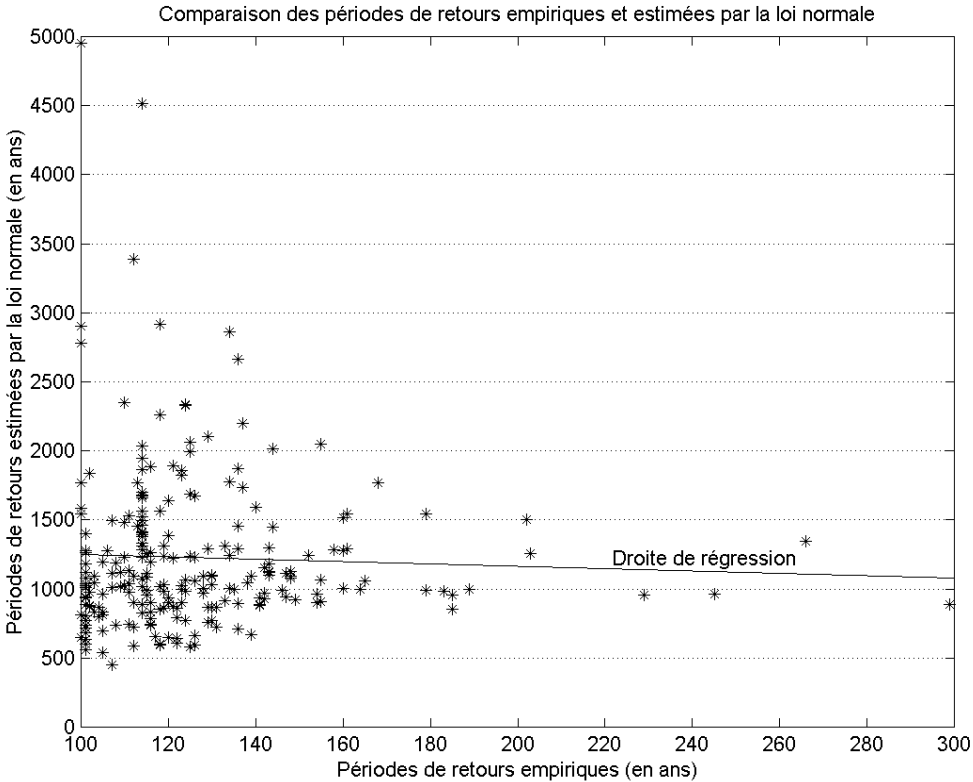


Figure 1.2: Sur-estimation des périodes de retour estimées par la loi normale.

différents (de Lima, 98 [25]).

1.2 Objectifs de la thèse

L'objectif de ce travail est de proposer un modèle stochastique de pluie qui intègre les connaissances physiques dont nous disposons a priori sur ce phénomène. En particulier, le modèle devra être multi-échelle et réagir le plus pertinemment possible par rapport aux artefacts de mesure précipités. Les modèles en cascades multifractales constituent un bon moyen d'accéder directement aux caractéristiques constatées, tout en restant proche de la réalité physique du phénomène pluvieux. Cependant, l'estimation et la prévision au sein de séries multifractales est très délicate en raison de leur grande variabilité et de leur forme de dépendance.

L'originalité de cette thèse consiste à développer une nouvelle méthode statistique d'estimation de l'indice de décroissance algébrique, paramètre entrant en jeu dans des modèles en cascades multifractales, et à effectuer une classification des formes de dépendance théoriques de tels modèles.

Cette thèse vise plus précisément les objectifs suivants :

- Pour palier les problèmes liés à la mesure et à l'irrégularité des séries, il est nécessaire d'accentuer le travail d'élaboration de méthodes d'exploration et d'estimation statistique. Un outil statistique adapté à de telles séries est donc développé.
- La notion de longue dépendance est de plus en plus abordée dans la littérature hydrologique. La mise en relation de cette propriété statistique avec les modèles en cascades constitue la second objectif de ce travail. La détermination des modèles de cascades qui possèdent ou non cette propriété permet, d'une part d'approfondir l'état des connaissances de tels modèles et d'autre part d'affiner l'estimation des paramètres du modèle (grâce à des outils statistiques appropriés existant dans la littérature).
- Ce modèle, muni de ces outils statistiques, devra être confronté à des données hydrologiques réelles (pluies et débits) issues de divers sites et à divers pas de temps : les résultats obtenus seront comparés à ceux recensés dans la littérature.
- Enfin, ce travail dressera une liste de recommandations aux ingénieurs pour aboutir au développement de modèles hydrologiques opérationnels.

1.3 Démarche proposée

Ce travail s'organise en deux parties.

Dans la première partie, on commence par rappeler les aspects météorologiques des précipitations et les limites liées à la mesure des variables hydrologiques. Puis, après une description de l'état de l'art en matière de méthodes statistiques d'estimation spatiale, une revue des principaux modèles stochastiques utilisés en hydrologie est dressée. Enfin les fractals et les modèles en cascades multifractales sont présentés sous leur forme générale ainsi qu'une revue des principaux auteurs les ayant appliquées en hydrologie. Une

structure fractale de l'occurrence de pluie est décelée sur des séries Sahéliennes (données BADINAGE).

La deuxième partie est consacrée aux lois de type algébrique (qui apparaissent dans les modèles en cascades multifractales). Dans un premier temps, elles sont définies puis on présente le cadre probabiliste dans lequel elles se développent (le domaine d'attraction de la loi de Fréchet). Une revue bibliographique des divers outils statistiques adaptés aux extrêmes est dressée. Un outil statistique original d'exploration et d'estimation du paramètre de décroissance algébrique est élaboré. Il est confronté aux autres outils sur des simulations, puis appliqué à diverses séries de pluies (pas de temps différents et 232 séries annuelles à travers le monde). Cette sous-partie descriptive conclut à :

- Un comportement algébrique des séries des extrêmes pluviométriques
- Une invariance spatiale et temporelle du paramètre de décroissance algébrique (données du projet FRIEND-AMY dans le cadre de l'UNESCO et longues séries de cumuls de pluie à pas de temps allant de la journée à la minute).
- L'exploration de la persistance de ce comportement à faible pas de temps est effectuée à partir de séries à basculement d'auget (données EPSAT-Niger et série de l'Île de la Réunion), suite à un travail préliminaire d'adaptation de l'outil aux séries de fréquence de basculement.

La troisième partie de ce travail analyse la forme de dépendance des séries hydrologiques. Les cascades multifractales sont des modèles simples qui retranscrivent l'invariance d'échelle du paramètre de décroissance algébrique constatée dans la deuxième partie. Mais rendent-ils compte d'autres propriétés statistiques constatées en pratique ? La propriété de longue dépendance est une autre caractéristique couramment abordée dans la littérature hydrologique. Il est donc intéressant d'analyser, sur un plan théorique, le type de dépendance (à court terme et à long terme) des cascades multifractales. Quelques cascades particulières sont étudiées plus en détail (log-Gamma, log-Normale ou log-Poisson). Des outils performants recensés dans la littérature statistique sont appliqués à nos séries pour l'estimation du paramètre de longue dépendance. Ils concluent à la présence de longue dépendance sur les séries de rivières sur craie.

Enfin, dans la partie "Conclusion", une synthèse des résultats est présentée, ainsi que leurs limites d'interprétation.