

Table des matières

1	Introduction	1
1.1	Risque de crue et prédétermination	1
1.1.1	Le risque inondation	1
1.1.2	Méthodes de prédétermination des crues	2
1.2	Analyse fréquentielle des crues et incertitudes associées	4
1.2.1	Incertitudes hydrométriques	4
1.2.2	Incertitude d'échantillonnage	6
1.2.3	Hypothèses de modélisation	6
1.3	Analyse fréquentielle et données historiques	7
1.4	Le risque inondation dans la basse vallée du Rhône	9
1.5	Objectifs et organisation du manuscrit	9

Introduction

1.1 Risque de crue et prédétermination

1.1.1 Le risque inondation

L'inondation est le type de catastrophe naturelle le plus fréquent dans le monde, mais également celui ayant affecté le plus de personnes au cours des 20 dernières années (UNDRR, 2020). Depuis le début du XXI^{ème} siècle, plus de 100 000 personnes ont perdu la vie dans des inondations à travers le globe. En France, il s'agit du premier risque naturel par l'importance des dommages provoqués et le nombre de communes concernées (MEDD, 2023a). Les inondations peuvent avoir des origines variées : crues, submersions marines, ruissellement, rupture de poche glaciaire, rupture d'ouvrage, etc. Parmi ces différents phénomènes, la crue est le type d'inondation le plus fréquent.

Les hydrologues utilisent les chroniques de débit enregistrées en continu aux stations limnimétriques afin de caractériser statistiquement l'aléa de crue. Cette approche probabiliste, nommée prédétermination, consiste à anticiper la magnitude d'un événement futur ainsi que sa probabilité d'occurrence, mais sans en définir une date d'occurrence, ce qui diffère du concept de prévision. La notion de probabilité d'occurrence est intimement liée au concept de "période de retour", qui est également utilisé dans de nombreux domaines liés aux risques naturels. La période de retour découle de la notion statistique de probabilité au non-dépassement : on peut dire que le débit d'une crue de période de retour T (en années) est en moyenne égalé ou dépassé toutes les T années. On peut également dire qu'un débit de période de retour T a une probabilité $p_1 = 1/T$ d'être dépassé chaque année, ou bien une probabilité $p_2 = 1 - 1/T$ de ne pas être dépassé. Il faut noter que ces affirmations ne sont valables qu'à condition que les processus à l'origine des crues soient stationnaires dans le temps et indépendants. Même s'il paraît trivial, le concept de période de retour porte souvent à confusion. Par exemple, si la dernière crue centennale de la Seine ($T = 100$ ans) a eu lieu en 1910, cela n'a aucune conséquence sur la probabilité d'observer une crue au moins centennale de la Seine en 2010. Cette probabilité reste en effet égale à $p = 1/100$, que l'on soit en 1910, 2010 ou 2023. À l'inverse, il est tout à fait possible d'observer deux crues centennales deux années de suite, même si cela est peu probable. De plus, on peut estimer qu'il y a environ 63% de chances d'observer au

moins une crue centennale en 100 ans. Ainsi, on peut considérer que des infrastructures protégeant les populations jusqu'à la crue centennale auront environ 37% de chances de couvrir efficacement leur rôle de protection au cours d'une période de 100 ans.

La notion de période de retour est utilisée pour dimensionner des infrastructures ou pour protéger les populations en fonction du risque de crue dans la zone, en tenant compte d'une marge. Par exemple, en France, l'aléa de référence pris en compte dans le Plan de Prévention du Risque Inondation (PPRI) « est déterminé à partir de l'événement le plus important connu et documenté ou d'un événement théorique de fréquence centennale, si ce dernier est plus important. » (Code de l'Environnement, article R562-11-3). La détermination du débit correspondant à une période de retour donnée (également appelé "crue de projet" ou "quantile de crue") est donc essentielle, mais il n'est pas toujours possible de l'effectuer avec une grande précision. C'est pourquoi la quantification des incertitudes de ces estimations est essentielle.

1.1.2 Méthodes de prédétermination des crues

En première approche, l'estimation des quantiles de crue peut être purement empirique. Par exemple, pour une station de mesure donnée, il est possible de calculer la fréquence cumulée des débits maximum annuels, classés par ordre croissant. On peut alors accéder à de premières estimations de la probabilité au non-dépassement pour un débit donné. Cependant, cette approche comporte de nombreuses limitations, notamment quand il s'agit d'extrapoler au-delà du plus fort débit connu. La pratique courante, appelée analyse fréquentielle des crues, consiste à estimer les paramètres d'une distribution (préalablement choisie selon la variable hydrologique étudiée) en se basant sur les observations. Cette pratique comporte l'avantage, par rapport aux estimations empiriques, d'être moins sensible à la taille de l'échantillon d'observations disponible, et d'offrir la possibilité de quantifier l'incertitude qui en résulte. De plus, elle offre la possibilité d'extrapoler au-delà de la plus forte crue connue, ce qui permet d'accéder à de grandes périodes de retour qui sont nécessaires pour le dimensionnement d'infrastructures (par exemple jusqu'à $T = 10\,000$ ans pour les barrages français (LE DELLIOU, 2014)). Cependant, l'incertitude autour de ces estimations peut être très importante, particulièrement quand la période de retour visée est grande devant la taille des chroniques de débit disponibles. Pour améliorer l'estimation des quantiles, il est possible d'élargir le jeu de données.

Tout d'abord, il est possible d'élargir spatialement le jeu de données en faisant l'hypothèse que la distribution des crues est homogène, à un facteur d'échelle près, au sein d'une région définie (HOSKING et WALLIS (1997); GAUME et al. (2010); VIGLIONE et al. (2013)) ou bien en utilisant un modèle qui prend en compte les dépendances spatiales entre les stations hydrométriques (KJELDSSEN et JONES (2009); RENARD (2011); SUN et al. (2014)). Un des aspects complexes de ce type d'analyse provient notamment de la délimitation des régions homogènes du point de vue des crues (OUARDA et al. (2001); HAN et al. (2020)). De plus, la notion de "région homogène" perd de son sens dans le cas de grands bassins versants tels que celui du Rhône, sous l'influence de nombreux facteurs hydroclimatiques.

Il est également possible d'élargir temporellement le jeu de données en utilisant des données historiques antérieures à l'installation des réseaux de mesure hydrométriques. Ces données peuvent prendre différentes formes (témoignages, repères de crue). Leur utilisation nécessite un cadre statistique adapté car ces données sont généralement sporadiques. De plus, la détermination des incertitudes autour de ces données est également nécessaire. On peut noter que l'utilisation des données historiques n'est pas réservée au domaine des crues, elle est également fréquente dans le domaine du climat (RIBES et al., 2021), ainsi que dans les autres domaines liés aux risques naturels. Nous reviendrons plus en détail sur l'analyse historique au cours de la section 1.3.

Une autre grande famille de méthodes d'analyse fréquentielle se base sur les précipitations pour définir la distribution des crues. L'hypothèse derrière ces méthodes est que, sous certaines conditions de saturation du bassin versant, la distribution des débits extrêmes est conditionnée par la distribution des pluies extrêmes. On peut notamment citer à ce sujet les méthodes françaises GRADEX (GUILLOT et DUBAND, 1967) ou AGREGEE (MARGOUM et al., 1994). D'autres méthodes plus approfondies utilisent les mêmes hypothèses et se basent sur le couplage d'un générateur stochastique d'événements de pluie extrêmes avec un modèle hydrologique afin d'obtenir une meilleure description de la réponse des bassins versants. On peut notamment citer à ce propos la méthode SCHADEX développée par EDF (Électricité De France) (PAQUET et al., 2013), et le modèle SHYPRE-SHYREG développé par INRAE (Arnaud et Lavabre, 2002 ; Aubert et al., 2014). Les besoins en données de ce type d'analyse diffèrent des méthodes classiques présentées précédemment. Il en va de même pour les limites de cette famille de méthodes, on peut citer par exemple que les données pluviométriques anciennes sont relativement rares, ou bien que le modèle hydrologique utilisé peut ne pas représenter correctement le bassin versant étudié, notamment dans le cas d'événements de crues historiques ou pour de grands bassins versants. Le choix d'une méthode de prédétermination des crues parmi les différents exemples cités précédemment dépend notamment des données disponibles, du contexte hydrologique ou de la période de retour visée.

La plupart des méthodes présentées ci-dessus nécessitent d'estimer les paramètres d'un modèle (distribution, régression utilisée pour la régionalisation, modèle pluie/débit) en se basant sur les données mesurées par les stations hydroclimatiques. L'estimation est un vaste domaine qui est ici très succinctement abordé. La détermination des paramètres des distributions utilisées en hydrologie est parfois complexe et nécessite l'utilisation de méthodes d'estimation statistique élaborées. On peut citer notamment les méthodes des moments, des L-moments, ou du maximum de vraisemblance. On peut également citer les méthodes bayésiennes qui ont pris une place importante en hydrologie au cours des dernières années, du fait de leur flexibilité et de la possibilité d'intégrer une information a priori. L'approche bayésienne est généralement couplée aux algorithmes de Monte Carlo par chaînes de Markov (MCMC). Ces algorithmes permettent de générer un grand nombre de réalisations d'une distribution, peu importe sa complexité. Ces approches seront utilisées tout au long de ce manuscrit dans le cadre de l'analyse fréquentielle des crues et de l'estimation des incertitudes.

REFS LIVRES DE METHODES D'ESTIMATION

1.2 Analyse fréquentielle des crues et incertitudes associées

L'analyse fréquentielle des crues, bien que très largement utilisée dans le monde, est affectée par plusieurs sources d'incertitude qui sont rarement considérées dans leur intégralité. De nombreuses décisions découlent des résultats de l'analyse fréquentielle : dimensionnement des digues de protection pour les populations et les infrastructures à risque (centrales nucléaires, usines chimiques...), plans d'urbanisme, dimensionnement des évacuateurs de crue des barrages, arrêtés de catastrophe naturelle, etc. Une estimation complète des incertitudes qui affectent cet exercice est donc indispensable afin d'appréhender correctement l'étendue du risque de crue. Ces incertitudes peuvent être divisées en trois catégories :

- Les incertitudes hydrométriques, qui affectent les données de débit, proviennent de la complexité d'estimer en continu le débit d'un cours d'eau en un point donné.
- L'incertitude d'échantillonnage, qui provient de la longueur limitée de l'échantillon de données disponible.
- Les hypothèses de modélisation telles que le choix d'une distribution adaptée à la variable hydrologique étudiée, l'hypothèse de stationnarité, ou l'hypothèse d'indépendance des crues.

1.2.1 Incertitudes hydrométriques

L'analyse fréquentielle des crues se base généralement sur des données de débit estimées au droit des stations hydrométriques. Le débit des cours d'eau ne peut malheureusement pas être mesuré directement et en continu. En revanche, il est possible de mesurer continuellement la hauteur d'eau en un point donné. Pour cela, les hydromètres utilisent des capteurs (flotteurs, sonde piézométrique, sonde ultra-sons, radar...) qui mesurent la hauteur d'eau par rapport à une échelle hydrométrique qui est installée à demeure et constitue un référentiel stable. Historiquement, les relevés étaient effectués visuellement, par lecture de l'échelle hydrométrique. En plus de ces mesures de hauteur d'eau, des estimations ponctuelles du débit appelées "jaugeages" peuvent être réalisées par diverses méthodes de mesure qui permettent de s'adapter à des conditions variées. Sous certaines conditions, il est possible d'établir une relation univoque entre la hauteur d'eau et le débit en un point donné. Cette relation nommée "courbe de tarage", est estimée à l'aide des jaugeages et constitue le cœur de l'hydrométrie. Il existe également des stations qui fonctionnent sur des principes différents (vélocimétrie, stations à double échelle...), mais ces dernières sont largement minoritaires. Chacune des étapes du schéma hydrométrique décrit ci-dessus est affectée par des incertitudes, qui entraînent une incertitude autour des débits estimés (MCMILLAN et al., 2012, PUECHBERTY et al., 2017).

Tout d'abord, plusieurs sources d'incertitude autour de la mesure de la hauteur d'eau sont identifiées dans la littérature (VAN DER MADE (1982); PETERSEN-ØVERLEIR et REITAN (2005); MCMILLAN et al. (2012); HORNER et al. (2018)). Elles concernent notamment la précision de la lecture visuelle de l'échelle limnimétrique, et dans le cas de mesures automatisées, la précision des capteurs et la calibration de ces derniers. On peut

aussi citer l'incertitude qui découle du nivellement de l'échelle limnimétrique. La fréquence des relevés entraîne également des erreurs d'interpolation, particulièrement dans le cas de chronique anciennes pour lesquelles les relevés étaient effectués visuellement par un opérateur, et étaient donc moins fréquents qu'avec les systèmes automatiques modernes. Cependant, ce type d'erreur n'est que très rarement abordé dans la littérature, alors qu'il peut être particulièrement impactant dans le cas de relevés anciens (HAMILTON et MOORE (2012); KUENTZ et al. (2014)).

Les courbes de tarage représentent une des plus importantes sources d'incertitude en hydrométrie. Les jaugeages, données indispensables à l'élaboration des courbes de tarage, sont eux-même impactés par des incertitudes qui dépendent de la méthode de mesure (LE COZ et al., 2014a). De plus, la réalisation de jaugeages peut devenir particulièrement complexe en situation de crue. Dans certains cas par exemple, il est seulement possible de réaliser des jaugeages de surface (flotteurs, radar vélocimétrique, analyse vidéo) qui sont plus incertains que les mesures classiques d'exploration du champ de vitesses. Le processus d'estimation de la courbe de tarage est également affecté d'incertitudes, provenant d'une part du modèle choisi pour représenter les conditions hydrauliques du cours d'eau, et d'autre part de l'estimation des paramètres de ce modèle. L'estimation de l'incertitude des courbes de tarage est très largement représentée dans la littérature de ces dernières années (PETERSEN-ØVERLEIR et al. (2009); JUSTON et al. (2014); LE COZ et al. (2014b); MORLOT et al. (2014); COXON et al. (2015); MCMILLAN et WESTERBERG (2015); MANSANAREZ et al. (2019b)). Il faut également noter qu'une courbe de tarage a une validité temporelle limitée. En effet, la relation hauteur/débit est susceptible de varier dans le temps au gré des changements morphologiques causés par les crues, des travaux dans le lit mineur, de la croissance de la végétation aquatique, etc. Ainsi, la précision des séries de débit est dépendante du contrôle fréquent de la relation hauteur/débit via la réalisation de jaugeages. Les ruptures temporelles de cette relation se nomment "détarages". Leur détection et leur impact sur l'incertitude des séries de débit constitue un sujet particulièrement étudié dans la littérature (MCMILLAN et al. (2010); WESTERBERG et al. (2011); GUERRERO et al. (2012); MORLOT et al. (2014); ŁAPUSZEK et LENAR-MATYAS (2015); DARIENZO et al. (2021)). Les fortes crues étant rares et dangereuses à jauger, la partie haute de la courbe de tarage est la plus incertaine et nécessite généralement une extrapolation. En France, la plupart des stations ne sont pas jaugées au delà de la crue de période de retour 2 ans (LANG et al., 2010). Il est possible d'améliorer la précision de ces extrapolations en utilisant des modèles hydrauliques, ou bien en utilisant des jaugeages de crue en dehors de leur période temporelle de validité. Une solution plus satisfaisante consiste en l'utilisation d'un modèle pour lequel certains paramètres de la courbe de tarage sont constants au cours des différentes périodes de stabilité, alors que d'autres sont variables (MANSANAREZ et al., 2019a). Le paramétrage de ce modèle est basée sur une connaissance fine des processus hydrauliques de la station étudiée. Il existe de nombreuses méthodes pour estimer individuellement les sources d'incertitude de nature hydrométrique listées ci-dessus. En revanche, la manière dont elles se propagent jusqu'à l'estimation des hydrogrammes, voire même jusqu'à l'estimation des quantiles de crue extrêmes n'a que très peu été étudiée (HORNER et al., 2018; STEINBAKK et al., 2016). Pourtant, l'incertitude hydrométrique peut être particulièrement importante dans le cas de relevés anciens et impacter significativement les résultats de l'analyse fréquentielle des crues.

1.2.2 Incertitude d'échantillonnage

L'incertitude d'échantillonnage est un des problèmes majeurs de l'analyse fréquentielle des crues et provient de la longueur limitée des chroniques de débit (APEL et al. (2004); KJELDSEN et al. (2011)). On peut par exemple faire le parallèle avec l'interprétation des sondages d'intentions de vote d'un petit échantillon de la population d'un pays. La plupart des stations hydrométriques françaises ayant été installées après 1960 (LE COZ, 2017), on dispose rarement de chroniques qui dépassent les 60 ans, alors que les quantiles cibles de l'analyse fréquentielle peuvent correspondre à des périodes de retour bien plus importantes (100 ans, 1000 ans, ou plus). Dans le cas de l'analyse fréquentielle des crues, plus la période de retour visée est grande devant la longueur de la chronique disponible, plus l'incertitude d'échantillonnage est importante. Cette limitation est bien connue et des méthodes existent pour quantifier l'incertitude d'échantillonnage. Par exemple, selon la réglementation anglaise, il est déconseillé d'estimer des quantiles de période de retour supérieure à la moitié de la longueur de la chronique utilisée (WHS, 2008).

1.2.3 Hypothèses de modélisation

REVOIR LES REFS

La théorie des valeurs extrêmes (Gumbel, 1958REF; COLES, 2001) repose sur l'hypothèse i.i.d que l'échantillon étudié est composé de réalisations indépendantes qui proviennent d'une seule et unique distribution. Il est possible de montrer que la variable étudiée converge en probabilité vers la loi GEV (loi généralisée des Valeurs Extrêmes) si l'on raisonne sur la valeur maximale annuelle (Fisher and Tippett, 1928 REF; Gnedenko, 1943 REF), et vers la loi GPD (loi de Pareto généralisée) avec les valeurs supérieures à un seuil (Balkema and de Haan, 1974 REF; Pickands, 1975 REF). D'autres distributions sont également utilisées suivant les pays (loi Log Normale, Pearson III, logistique... : WHS, 2008) Une bonne pratique consiste à vérifier que l'ajustement effectué est satisfaisant par rapport aux observations, ou bien à utiliser une partie du jeu de données pour le calage des paramètres, et une autre pour la validation.

L'hypothèse d'une distribution unique peut être remise en cause pour plusieurs raisons. Tout d'abord, les crues d'un même cours d'eau peuvent être la conséquence de plusieurs processus hydroclimatiques (crues nivales, orages, longues périodes de pluie...). Il est possible de conditionner l'analyse fréquentielle à un tel constat. L'utilisation de méthodes pluie/débit peut s'avérer particulièrement intéressante dans cette situation (PAQUET et al., 2013; BRIGODE, 2013). L'hypothèse peut également être mise à mal par des changements temporels des processus climatiques ou hydrologiques de la zone en question. Des variations climatiques à grande échelle et leur impact sur les précipitations intenses ou les crues ont été mises en évidence dans de nombreuses régions du globe (SUN et al., 2014; HODGKINS et al., 2017; GUDMUNDSSON et al., 2019; LUN et al., 2020; BLÖSCHL et al., 2020; TRAMBLAY et al., 2023) y compris en France. Par ailleurs, le changement climatique d'origine anthropique impacte grandement la stationnarité des crues à travers le monde, même si cet impact est très variable d'une région à une autre (MILLY et al., 2008; HALL et al., 2014; BLÖSCHL et al., 2019; GIUNTOLI et al., 2019; PÖRTNER et al.,

2022). De nombreuses approches d'analyse fréquentielle des crues en contexte de changement climatique ont vu le jour au cours des dernières années, comme en témoigne la revue bibliographique proposée par SALAS et al. (2018). Suivant les pays, les outils développés par les chercheurs pour prédéterminer les crues en contexte non stationnaire ont été – ou pas utilisés en Europe pour l'estimation réglementaire des crues de référence (MADSEN et al., 2014). La difficulté est que les tendances sur les crues ne sont pas homogènes à l'échelle du continent européen (BLÖSCHL et al., 2019)). La France en particulier connaît des évolutions en sens opposé entre le nord et le sud (GIUNTOLI et al., 2019). Par ailleurs, l'hypothèse de stationnarité des échantillons peut également être compromise par des changements d'origine anthropique du bassin versant, tels que des changements d'occupation du sol, des changements d'ordre hydro-géomorphologique ou la construction d'aménagements (HALL et al., 2014)

1.3 Analyse fréquentielle et données historiques

Compte tenu de l'importance des estimations des quantiles extrêmes pour la sécurité des populations et des infrastructures, il semble évident de vouloir en améliorer la précision. Il est complexe de réduire l'incertitude autour des données hydrométriques, celle-ci étant conditionnée par la quantité et la qualité des données disponibles. En revanche, comme cela a été décrit dans la section 1.1.2, il est possible de réduire l'incertitude d'échantillonnage en élargissant spatialement ou temporellement le jeu de données. L'approche spatiale (aussi appelée analyse régionale) est cependant peu adaptée aux grands bassins versants. En effet il est complexe de délimiter des régions homogènes du point de vue de la distribution des crues lorsque de nombreuses influences hydroclimatiques affectent le bassin versant étudié. Il en est de même pour les méthodes basées sur les précipitations. La modélisation hydrologique est en effet complexe dans le cas de grands bassins versants, pour lesquels la transformation de la pluie en débit dépend de nombreux paramètres très variables spatialement. L'approche historique est en revanche tout à fait adaptée aux grands bassins versants car elle ne nécessite pas d'hypothèse régionale ou climatique. Elle consiste en un élargissement du jeu de données par l'utilisation de données historiques, antérieures à l'installation des réseaux de mesure (BRÁZDIL et al., 2006). Ces données peuvent être de forme et de qualité très variables. De plus, leur utilisation peut nécessiter la formulation d'hypothèses plus ou moins fortes.

Dans le meilleur des cas, la recherche de données dans les archives peut conduire à retrouver des données limnimétriques continues plus anciennes que les données initialement disponibles. Cette situation est probablement plus fréquente que ce que l'on pourrait penser. Les passages de témoin à travers les époques entre les différentes entités administratives responsables de la navigation ou de la surveillance des cours d'eau n'entraînent pas systématiquement la transmission des données. De plus, le contexte culturel ou politique n'est pas toujours en faveur d'une centralisation des données hydrométriques. Enfin, les récentes (à l'échelle des crues extrêmes) avancées de stockage en base de données informatiques n'ont pas systématiquement mené à la bancarisation des données hydrométriques historiques. En France, il est par exemple fréquent que seule une part limitée des données limnimétriques existantes pour une station donnée soit disponible dans la base de données publique banque Hydro (hydro.eaufrance.fr) (LE GROS et al., 2015). Ces données

limnimétriques anciennes, lorsqu'elles sont continues, peuvent être utilisées dans le cadre de l'analyse fréquentielle classique décrit précédemment. Dans ce cas de figure, il ne faut en revanche pas négliger les incertitudes hydrométriques. En effet, les jaugeages anciens peuvent être rares, ce qui rend complexe l'estimation de la relation hauteur/débit, et les relevés de hauteur d'eau peuvent être peu fréquents.

Plus généralement, les données de crue historiques (i.e. pré-enregistrements continus) peuvent prendre des formes très variées : repères de crue (PARKES et DEMERITT (2016); PIOTTE et al. (2016); ENGELAND et al. (2020); MEDD (2023b)), témoignages et documents anciens (PICHARD (1995); NAULET et al. (2005); NEPPEL et al. (2010); KJELDSSEN et al. (2014); MACDONALD et al. (2014)), reconstructions de crues pré-historiques (ou paléocrues) issues de divers proxys tels que les dépôts sédimentaires (BAKER (1987); DEZILEAU et al. (2014); ENGELAND et al. (2020); CORELLA et al. (2021); WILHELM et al. (2022)) ou les cernes d'espèces végétales ripariennes (domaine de la dendrochronologie) (MARTENS (1992); LOOMANS (1993); BALLESTEROS-CÁNOVAS et al. (2015)). Ces données ont pour point commun de ne pas être continues, par opposition aux données des stations limnimétriques. L'exhaustivité de ces mentions ponctuelles de crues ne peut donc pas être garantie en l'état. Leur utilisation pour l'analyse fréquentielle nécessite des traitements statistiques adaptés. Pour cela, on peut formuler l'hypothèse que les données historiques décrites ci-dessus concernent uniquement des événements d'une magnitude suffisante pour avoir laissé une trace dans les écrits, les sédiments alluviaux, ou pour avoir mérité l'installation d'un repère de crue. Cette magnitude est généralement appelée "seuil de perception". Il s'agit ici de faire l'hypothèse que, durant une période historique donnée, toutes les crues dont la magnitude a dépassé le seuil de perception ont laissé une trace, ce qui permet de faire l'hypothèse d'une forme d'exhaustivité au-dessus de ce seuil. Le corollaire à cette hypothèse est que, pour toutes les années sans mention de crue, on suppose que le seuil de perception n'a pas été dépassé. Sous ce postulat, les données historiques de crue peuvent être intégrées à l'analyse fréquentielle des crues (GERARD et KARPUK, 1979; STEDINGER et COHN, 1986), qu'il soit possible d'en estimer précisément le débit, ou seulement de garantir qu'elles étaient supérieures au seuil de perception. Dans la littérature, l'utilisation des crues historiques pour l'analyse fréquentielle est courante depuis les années 1980 et cette pratique commence à entrer dans le cadre réglementaire de l'estimation des risques d'inondation dans certains pays. Néanmoins, le seuil de perception et la durée durant laquelle il est actif sont dans la grande majorité des cas supposés parfaitement connus, de même que les données historiques sont considérées comme étant parfaitement exhaustives. Dans ces cas de figure, l'incertitude des quantiles extrêmes de crue est probablement sous-estimée. Il faut ajouter que la détermination du débit de ces crues historiques est bien plus complexe que dans le cas de crues récentes, dont la hauteur a été mesurée en continu par des stations hydrométriques. Même si une détermination précise du débit n'est pas indispensable pour l'utilisation de ces données dans le cadre de l'analyse fréquentielle, il faut *a minima* en connaître l'ordre de grandeur afin de déterminer un seuil de perception. L'estimation de ces débits passe généralement par l'utilisation de modèles hydrauliques (NAULET et al., 2005; NEPPEL et al., 2010; WETTER et al., 2011; MACHADO et al., 2015; RUIZ-BELLET et al., 2017). Cependant, de nombreuses incertitudes affectent cet exercice, particulièrement dans le cas d'événements très anciens pour lesquels les conditions d'écoulement (topographie, bathymétrie,

rugosité...) sont méconnues. Il faut noter également que l'estimation de la date à partir de laquelle le seuil de perception est actif est complexe à déterminer. De plus, considérer que cette date est égale l'année d'occurrence de la première crue de l'échantillon disponible constitue généralement une erreur qui peut conduire à une surestimation des quantiles de crue (PROSDOCIMI, 2018).

1.4 Le risque inondation dans la basse vallée du Rhône

La basse vallée du Rhône, située dans le Sud-Est de la France, est une zone particulièrement exposée aux inondations : trois territoires à risque important ont été retenus lors de l'application de la Directive Inondation (2010-2015). Environ 150 ans après les crues majeures de 1840 et 1856, la récente inondation de décembre 2003 a rappelé l'importance de ce risque, avec plus de 8000 habitants inondés et un coût total des pertes dépassant le milliard d'euros, pour une période de retour d'environ 100 ans (MEDD, 2005). La caractérisation du risque inondation est donc capitale dans cette zone où les enjeux sont nombreux : zones habitées, barrages, centrales nucléaires, zones industrielles, voies de communication, agriculture... La station hydrométrique de Beaucaire est située à l'aval du dernier affluent du Rhône (le Gard ou Gardon) et à l'amont de la difffluence du delta qui forme la Camargue. Il s'agit de la station qui enregistre les plus gros débits du fleuve, ce qui en fait également la station de référence de la zone en ce qui concerne les crues. Sur le site internet de la banque Hydro (hydro.eaufrance.fr), base de données nationale d'archives hydrométriques, une série de débits journaliers est disponible depuis 1920 à Beaucaire. C'est cette chronique qui fut utilisée lors de l'Étude Globale du Rhône (EGR) en 2000 (RIGAUDIÈRE et al., 2000). Pourtant, plus de 200 ans d'archives hydrométriques continues sont désormais disponibles à Beaucaire grâce au travail de recensement d'archives de PICHARD et ROUCAUTE (2014). En effet, la station fut installée dès 1816 et les données étaient jusqu'à présent réparties entre de nombreux services d'archives. En plus de ces données continues, PICHARD et ROUCAUTE (2014) ont également collecté une immense quantité de données d'archives qui permettent de retracer plus de 1500 événements hydroclimatiques sur la période 1300-2000. Ces données sont mises à disposition publiquement au sein de la base de données HISTRHÔNE (histrhone.cerege.fr). La valorisation de ces nombreuses données historiques peut améliorer grandement l'estimation du risque inondation dans la zone, ainsi que la connaissance de la variabilité des débits du Rhône. Récemment, BARD et LANG (2018) ont valorisé les données limnimétriques de Beaucaire disponibles depuis 1816 pour l'analyse fréquentielle des crues. Cependant, de récentes avancées concernant l'estimation des incertitudes hydrométriques pourraient en permettre une estimation plus complète. De plus, les données historiques antérieures aux enregistrements continus n'ont pas été valorisées à ce jour, et pourraient apporter un réel intérêt dans l'exercice de l'analyse fréquentielle des crues.

PHOTOS CRUE 2003 ?

1.5 Objectifs et organisation du manuscrit

La valorisation des données anciennes est un des moyens permettant d'améliorer les estimations des quantiles de crue extrêmes. La détermination et la propagation de l'en-

semble des incertitudes lors de cet exercice est particulièrement importante mais elle est rarement effectuée. Un des objectifs de la thèse est de construire une méthode opérationnelle, complète et homogène, qui intègre les incertitudes à chaque étape de l'analyse fréquentielle afin de les propager jusqu'au résultat final. Dans ce contexte, l'utilisation de données historiques (pré-enregistrements continus) sera également explorée. L'utilisation de ces données est associée au concept de seuil de perception, qui est généralement supposé parfaitement connu dans la littérature. La prise en compte d'incertitudes affectant le seuil de perception et la durée de la période historique sera étudiée. La station hydrométrique du Rhône à Beaucaire constitue un cas d'étude idéal du fait de la longévité exceptionnelle des mesures de hauteur d'eau en continu (plus de deux siècles) et de l'immense patrimoine de données hydro-climatiques disponible dans la base de données HISTRHÔNE depuis le XIII^{ème} siècle. Les objectifs décrits ci-dessus seront étudiés dans ce manuscrit de thèse pour la station du Rhône à Beaucaire.

Ce manuscrit de thèse s'organise en trois parties dont les contours sont résumés dans la figure 1.1. Le premier chapitre permet de faire un bilan des données disponibles. Les relevés limnimétriques disponibles à Beaucaire depuis 1816 seront présentés en parallèle d'une étude de l'évolution des conditions d'écoulement de la zone au cours des deux derniers siècles. Les données de la base HISTRHÔNE jugées utiles à l'analyse fréquentielle des crues seront extraites et des modèles hydrauliques seront utilisés pour tenter reconstituer les débits de ces événements anciens.

Le second chapitre prend la forme d'un article scientifique soumis à "Journal of Hydrology" et accepté sous réserve de révision mineures. L'utilité des données limnimétriques historiques pour la réduction des incertitudes de l'analyse fréquentielle est explorée. La détermination et la propagation des différentes sources d'incertitude hydrométrique est effectuée pour la chronique du Rhône à Beaucaire de 1816 à 2020. On dispose alors d'une chronique continue de débits journaliers de plus de deux siècles. La part respective de l'incertitude hydrométrique et de l'incertitude d'échantillonnage au sein des estimations des quantiles de crue est ensuite examinée pour différentes tailles de chroniques.

Le troisième chapitre reprend la série de débits estimée au chapitre 2 et les données de la base HISTRHÔNE extraites au premier chapitre afin de réaliser une analyse probabiliste des crues de 1500 à 2020. Le modèle probabiliste présenté dans ce chapitre permet de considérer les incertitudes de la chronique de débits continus (1816-2020), mais également la méconnaissance du seuil de perception et de la durée de la période historique. L'apport et les limites de l'utilisation des données historiques pour l'analyse fréquentielle des crues est explorée selon différentes hypothèses.

Enfin une conclusion présente les principaux résultats et avancées obtenus pendant la thèse, puis des perspectives de travaux et études complémentaires.

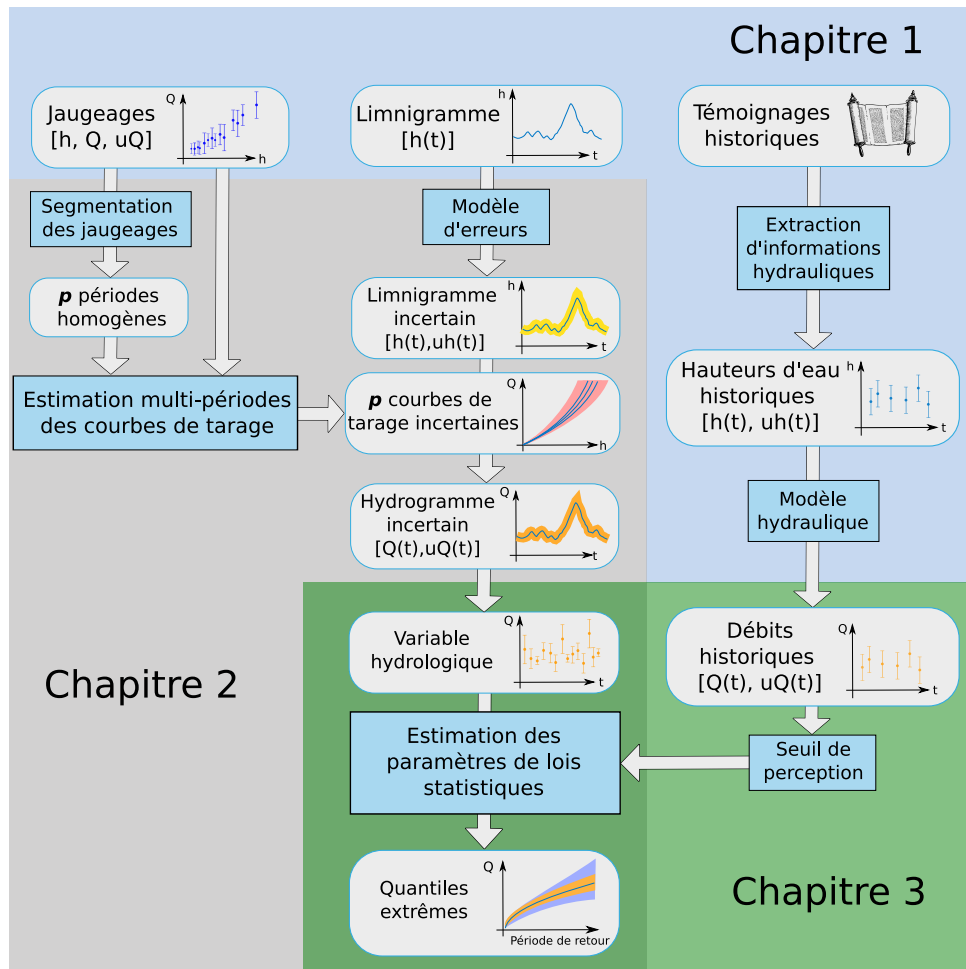


FIGURE 1.1 – Schéma d'organisation de la thèse. Les cases grises correspondent aux données et les cases bleues aux modèles et méthodes d'analyse. La lettre h correspond à la hauteur d'eau, Q au débit et t au temps. La lettre u correspond à l'incertitude qui affecte chacune de ces variables.

Bibliographie

- APEL, H., A. H. THIEKEN, B. MERZ et G. BLÖSCHL (2004). “Flood risk assessment and associated uncertainty”. In : *Natural Hazards and Earth System Sciences* 4.2. Publisher : Copernicus GmbH, p. 295-308. ISSN : 1561-8633. DOI : [10.5194/nhess-4-295-2004](https://doi.org/10.5194/nhess-4-295-2004).
- BAKER, V. R. (1987). “Paleoflood hydrology and extraordinary flood events”. In : *Journal of Hydrology. Analysis of Extraordinary Flood Events* 96.1, p. 79-99. ISSN : 0022-1694. DOI : [10.1016/0022-1694\(87\)90145-4](https://doi.org/10.1016/0022-1694(87)90145-4).
- BALLESTEROS-CÁNOVAS, J. A., M. STOFFEL, S. ST GEORGE et K. HIRSCHBOECK (2015). “A review of flood records from tree rings”. In : *Progress in Physical Geography : Earth and Environment* 39.6, p. 794-816. ISSN : 0309-1333, 1477-0296. DOI : [10.1177/0309133315608758](https://doi.org/10.1177/0309133315608758).
- BARD, A. et M. LANG (2018). *Actualisation de l'hydrologie des crues du Rhône. Analyse de la station de Beaucaire*. Irstea pour la DREAL Auvergne-Rhône-Alpes, p. 56.
- BLÖSCHL, G., J. HALL, A. VIGLIONE, R. A. P. PERDIGÃO, J. PARAJKA, B. MERZ, D. LUN, B. ARHEIMER, G. T. ARONICA, A. BILIBASHI, M. BOHÁČ, O. BONACCI, M. BORGA, I. ČANJEVAC, A. CASTELLARIN, G. B. CHIRICO, P. CLAPS, N. FROLOVA, D. GANORA, L. GORBACHOVA, A. GÜL, J. HANNAFORD, S. HARRIGAN, M. KIREEVA, A. KISS, T. R. KJELDSSEN, S. KOHNOVÁ, J. J. KOSKELA, O. LEDVINKA, N. MACDONALD, M. MAVROVA-GUIRGUINOVA, L. MEDIERO, R. MERZ, P. MOLNAR, A. MONTANARI, C. MURPHY, M. OSUCH, V. OVCHARUK, I. RADEVSKI, J. L. SALINAS, E. SAUQUET, M. ŠRAJ, J. SZOLGAY, E. VOLPI, D. WILSON, K. ZAIMI et N. ŽIVKOVIĆ (2019). “Changing climate both increases and decreases European river floods”. In : *Nature* 573.7772, p. 108-111. ISSN : 1476-4687. DOI : [10.1038/s41586-019-1495-6](https://doi.org/10.1038/s41586-019-1495-6).
- BLÖSCHL, G., A. KISS, A. VIGLIONE, M. BARRIENDOS, O. BÖHM, R. BRÁZDIL, D. COEUR, G. DEMARÉE, M. C. LLASAT, N. MACDONALD, D. RETSÖ, L. ROALD, P. SCHMOCKER-FACKEL, I. AMORIM, M. BĚLÍNOVÁ, G. BENITO, C. BERTOLIN, D. CAMUFFO, D. CORNEL, R. DOKTOR, L. ELLEDER, S. ENZI, J. C. GARCIA, R. GLASER, J. HALL, K. HASLINGER, M. HOFSTÄTTER, J. KOMMA, D. LIMANÓWKA, D. LUN, A. PANIN, J. PARAJKA, H. PETRIĆ, F. S. RODRIGO, C. ROHR, J. SCHÖNBEIN, L. SCHULTE, L. P. SILVA, W. H. J. TOONEN, P. VALENT, J. WASER et O. WETTER (2020). “Current European flood-rich period exceptional compared with past 500 years”. In : *Nature* 583.7817, p. 560-566. ISSN : 0028-0836, 1476-4687. DOI : [10.1038/s41586-020-2478-3](https://doi.org/10.1038/s41586-020-2478-3).

- BRÁZDIL, R., Z. W. KUNDZEWICZ et G. BENITO (2006). “Historical hydrology for studying flood risk in Europe”. In : *Hydrological Sciences Journal* 51.5, p. 739-764. ISSN : 0262-6667, 2150-3435. DOI : [10.1623/hysj.51.5.739](https://doi.org/10.1623/hysj.51.5.739).
- BRIGODE, P. (2013). “Changement climatique et risque hydrologique : évaluation de la méthode SCHADEX en contexte non-stationnaire”. Thèse de doct. Université Pierre et Marie Curie - Paris VI.
- COLES, S. (2001). “Classical Extreme Value Theory and Models”. In : *An Introduction to Statistical Modeling of Extreme Values*. Sous la dir. de S. COLES. Springer Series in Statistics. London : Springer, p. 45-73. ISBN : 978-1-4471-3675-0. DOI : [10.1007/978-1-4471-3675-0_3](https://doi.org/10.1007/978-1-4471-3675-0_3).
- CORELLA, J., G. BENITO, A. MONTEOLIVA, J. SIGRO, M. CALLE, B. VALERO-GARCÉS, V. STEFANOVA, E. RICO, A.-C. FAVRE et B. WILHELM (2021). “A 1400-years flood frequency reconstruction for the Basque country (N Spain) : Integrating geological, historical and instrumental datasets”. In : *Quaternary Science Reviews* 262, p. 106963. ISSN : 02773791. DOI : [10.1016/j.quascirev.2021.106963](https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2021.106963).
- COXON, G., J. FREER, I. K. WESTERBERG, T. WAGENER, R. WOODS et P. J. SMITH (2015). “A novel framework for discharge uncertainty quantification applied to 500 UK gauging stations”. In : *Water Resources Research* 51.7, p. 5531-5546. ISSN : 0043-1397, 1944-7973. DOI : [10.1002/2014WR016532](https://doi.org/10.1002/2014WR016532).
- DARIENZO, M., B. RENARD, J. LE COZ et M. LANG (2021). “Detection of Stage-Discharge Rating Shifts Using Gaugings : A Recursive Segmentation Procedure Accounting for Observational and Model Uncertainties”. In : *Water Resources Research* 57.4. ISSN : 0043-1397, 1944-7973. DOI : [10.1029/2020WR028607](https://doi.org/10.1029/2020WR028607).
- DEZILEAU, L., B. TERRIER, J. BERGER, P. BLANCHEMANCHE, A. LATAPIE, R. FREYDIER, L. BREMOND, A. PAQUIER, M. LANG et J. DELGADO (2014). “A multidating approach applied to historical slackwater flood deposits of the Gardon River, SE France”. In : *Geomorphology* 214, p. 56-68. ISSN : 0169555X. DOI : [10.1016/j.geomorph.2014.03.017](https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2014.03.017).
- ENGELAND, K., A. AANO, I. STEFFENSEN, E. STØREN et Ø. PAASCHE (2020). *New flood frequency estimates for the largest river in Norway based on the combination of short and long time series*. preprint. Catchment hydrology/Instruments et observation techniques. DOI : [10.5194/hess-2020-269](https://doi.org/10.5194/hess-2020-269).
- GAUME, E., L. GAÁL, A. VIGLIONE, J. SZOLGAY, S. KOHNOVÁ et G. BLÖSCHL (2010). “Bayesian MCMC approach to regional flood frequency analyses involving extraordinary flood events at ungauged sites”. In : *Journal of Hydrology* 394.1, p. 101-117. ISSN : 00221694. DOI : [10.1016/j.jhydrol.2010.01.008](https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2010.01.008).
- GERARD, R. et E. W. KARPUK (1979). “Probability Analysis of Historical Flood Data”. In : *Journal of the Hydraulics Division* 105.9. Publisher : American Society of Civil Engineers, p. 1153-1165. DOI : [10.1061/JYCEAJ.0005273](https://doi.org/10.1061/JYCEAJ.0005273).
- GIUNTOLI, I., B. RENARD et M. LANG (2019). “Floods in France”. In : *Changes in Flood Risk in Europe*. 1^{re} éd. CRC Press, p. 13. ISBN : 978-0-203-09809-7.
- GUDMUNDSSON, L., M. LEONARD, H. X. DO, S. WESTRA et S. I. SENEVIRATNE (2019). “Observed Trends in Global Indicators of Mean and Extreme Streamflow”. In : *Geophysical Research Letters* 46.2. _eprint : <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1029/2018GL079725>, p. 756-766. ISSN : 1944-8007. DOI : [10.1029/2018GL079725](https://doi.org/10.1029/2018GL079725).

- GUERRERO, J.-L., I. K. WESTERBERG, S. HALLDIN, C.-Y. XU et L.-C. LUNDIN (2012). "Temporal variability in stage–discharge relationships". In : *Journal of Hydrology* 446-447, p. 90-102. ISSN : 00221694. DOI : [10.1016/j.jhydrol.2012.04.031](https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2012.04.031).
- GUILLOT, P. et D. DUBAND (1967). "La méthode du GRADEX pour le calcul de la probabilité des crues à partir des pluies". In : Colloque international sur les crues et leur évaluation. Leningrad : IASH.
- HALL, J., B. ARHEIMER, M. BORGA, R. BRÁZDIL, P. CLAPS, A. KISS, T. R. KJELDSSEN, J. KRIAUCIUNIENĖ, Z. W. KUNDZEWICZ, M. LANG, M. C. LLASAT, N. MACDONALD, N. MCINTYRE, L. MEDIERO, B. MERZ, R. MERZ, P. MOLNAR, A. MONTANARI, C. NEUHOLD, J. PARAJKA, R. A. P. PERDIGÃO, L. PLAVCOVÁ, M. ROGGER, J. L. SALINAS, E. SAUQUET, C. SCHÄR, J. SZOLGAY, A. VIGLIONE et G. BLÖSCHL (2014). "Understanding flood regime changes in Europe : a state-of-the-art assessment". In : *Hydrology and Earth System Sciences* 18.7, p. 2735-2772. ISSN : 1607-7938. DOI : [10.5194/hess-18-2735-2014](https://doi.org/10.5194/hess-18-2735-2014).
- HAMILTON, A. et R. MOORE (2012). "Quantifying Uncertainty in Streamflow Records". In : *Canadian Water Resources Journal / Revue canadienne des ressources hydriques* 37.1, p. 3-21. ISSN : 0701-1784, 1918-1817. DOI : [10.4296/cwrj3701865](https://doi.org/10.4296/cwrj3701865).
- HAN, X., T. B. M. J. OUARDA, A. RAHMAN, K. HADDAD, R. MEHROTRA et A. SHARMA (2020). "A Network Approach for Delineating Homogeneous Regions in Regional Flood Frequency Analysis". In : *Water Resources Research* 56.3. eprint : <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1029/2019WR025910>, e2019WR025910. ISSN : 1944-7973. DOI : [10.1029/2019WR025910](https://doi.org/10.1029/2019WR025910).
- HODGKINS, G. A., P. H. WHITFIELD, D. H. BURN, J. HANNAFORD, B. RENARD, K. STAHL, A. K. FLEIG, H. MADSEN, L. MEDIERO, J. KORHONEN, C. MURPHY et D. WILSON (2017). "Climate-driven variability in the occurrence of major floods across North America and Europe". In : *Journal of Hydrology* 552, p. 704-717. ISSN : 0022-1694. DOI : [10.1016/j.jhydrol.2017.07.027](https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2017.07.027).
- HORNER, I., B. RENARD, J. LE COZ, F. BRANGER, H. K. MCMILLAN et G. PIERREFEU (2018). "Impact of Stage Measurement Errors on Streamflow Uncertainty". In : *Water Resources Research* 54.3, p. 1952-1976. ISSN : 0043-1397, 1944-7973. DOI : [10.1002/2017WR022039](https://doi.org/10.1002/2017WR022039).
- HOSKING, J. R. M. et J. R. WALLIS (1997). *Regional Frequency Analysis : An Approach Based on L-Moments*. Cambridge : Cambridge University Press. ISBN : 978-0-521-43045-6. DOI : [10.1017/CB09780511529443](https://doi.org/10.1017/CB09780511529443).
- JUSTON, J., P.-E. JANSSON et D. GUSTAFSSON (2014). "Rating curve uncertainty and change detection in discharge time series : case study with 44-year historic data from the Nyangores River, Kenya". In : *Hydrological Processes* 28.4, p. 2509-2523. ISSN : 08856087. DOI : [10.1002/hyp.9786](https://doi.org/10.1002/hyp.9786).
- KJELDSSEN, T., N. MACDONALD, M. LANG, L. MEDIERO, T. ALBUQUERQUE, E. BOGDANOWICZ, R. BRÁZDIL, A. CASTELLARIN, V. DAVID, A. FLEIG, G. GÜL, J. KRIAUCIUNIENĖ, S. KOHNOVÁ, B. MERZ, O. NICHOLSON, L. ROALD, J. SALINAS, D. SARAUSKIENE, M. ŠRAJ, W. STRUPCZEWSKI, J. SZOLGAY, A. TOUMAZIS, W. VANNEUVILLE, N. VEIJALAINEN et D. WILSON (2014). "Documentary evidence of past floods in Europe and their utility in flood frequency estimation". In : *Journal of Hydrology* 517, p. 963-973. ISSN : 00221694. DOI : [10.1016/j.jhydrol.2014.06.038](https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2014.06.038).

- KJELDSSEN, T. R. et D. A. JONES (2009). "An exploratory analysis of error components in hydrological regression modeling". In : *Water Resources Research* 45.2. _eprint : <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1029/2007WR006283>. ISSN : 1944-7973. DOI : [10.1029/2007WR006283](https://doi.org/10.1029/2007WR006283).
- KJELDSSEN, T. R., R. LAMB et S. D. BLAZKOVA (2011). "Uncertainty in Flood Frequency Analysis". In : *Applied Uncertainty Analysis for Flood Risk Management*. Imperial college press, p. 153-197. ISBN : 978-1-84816-270-9.
- KUENTZ, A., T. MATHEVET, D. CŒUR, C. PERRET, J. GAILHARD, L. GUÉRIN, Y. GASH et V. ANDRÉASSIAN (2014). "Hydrométrie et hydrologie historiques du bassin de la Durance". In : *La Houille Blanche* 100.4, p. 57-63. ISSN : 0018-6368, 1958-5551. DOI : [10.1051/lhb/2014039](https://doi.org/10.1051/lhb/2014039).
- LANG, M., K. POBANZ, B. RENARD, E. RENOUF et E. SAUQUET (2010). "Extrapolation of rating curves by hydraulic modelling, with application to flood frequency analysis". In : *Hydrological Sciences Journal* 55.6, p. 883-898. ISSN : 0262-6667, 2150-3435. DOI : [10.1080/02626667.2010.504186](https://doi.org/10.1080/02626667.2010.504186).
- ŁAPUSZEK, M. et A. LENAR-MATYAS (2015). "Methods of analysis the riverbed evolution. a case study of two tributaries of the upper Vistula river". In : *Infrastruktura i Ekologia Terenów Wiejskich / Infrastructure and ecology of rural areas* (IV/3/2015), p. 1313-1327. ISSN : 1732-5587. DOI : [10.14597/infraeco.2015.4.3.095](https://doi.org/10.14597/infraeco.2015.4.3.095).
- LE COZ, J. (2017). *Quantifying discharges and fluxes of matters in rivers*. Habilitation à Diriger des Recherches. Université Grenoble Alpes, p. 93.
- LE COZ, J., P.-M. BECHON, B. CAMENEN et G. DRAMAIS (2014a). "Quantification des incertitudes sur les jaugeages par exploration du champ des vitesses". In : *La Houille Blanche* 100.5, p. 31-39. ISSN : 0018-6368, 1958-5551. DOI : [10.1051/lhb/2014047](https://doi.org/10.1051/lhb/2014047).
- LE COZ, J., B. RENARD, L. BONNIFAIT, F. BRANGER et R. LE BOURSICAUD (2014b). "Combining hydraulic knowledge and uncertain gaugings in the estimation of hydro-metric rating curves : A Bayesian approach". In : *Journal of Hydrology* 509, p. 573-587. ISSN : 00221694. DOI : [10.1016/j.jhydrol.2013.11.016](https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2013.11.016).
- LE DELLIOU, P. (2014). "Recommandations pour le dimensionnement des évacuateurs de crues de barrages". In : *La Houille Blanche* 100.5, p. 54-58. ISSN : 0018-6368, 1958-5551. DOI : [10.1051/lhb/2014050](https://doi.org/10.1051/lhb/2014050).
- LE GROS, C., E. SAUQUET, M. LANG, A.-L. ACHARD, E. LEBLOIS et B. BITON (2015). "Les annuaires hydrologiques de la Société hydrotechnique de France : une source d'information patrimoniale pour la connaissance de l'hydrologie en France". In : *La Houille Blanche* 4, p. 66-77. ISSN : 0018-6368, 1958-5551. DOI : [10.1051/lhb/20150048](https://doi.org/10.1051/lhb/20150048).
- LOOMANS, S. A. (1993). "Flood Reconstruction in Southern Illinois Using Tree Rings". In.
- LUN, D., S. FISCHER, A. VIGLIONE et G. BLÖSCHL (2020). "Detecting Flood-Rich and Flood-Poor Periods in Annual Peak Discharges Across Europe". In : *Water Resources Research* 56.7. _eprint : <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1029/2019WR026575>, e2019WR026575. ISSN : 1944-7973. DOI : [10.1029/2019WR026575](https://doi.org/10.1029/2019WR026575).
- MACDONALD, N., T. R. KJELDSSEN, I. PROSDOCIMI et H. SANGSTER (2014). "Reassessing flood frequency for the Sussex Ouse, Lewes : the inclusion of historical flood information since AD 1650". In : *Natural Hazards and Earth System Sciences* 14.10, p. 2817-2828. ISSN : 1684-9981. DOI : [10.5194/nhess-14-2817-2014](https://doi.org/10.5194/nhess-14-2817-2014).

- MACHADO, M. J., B. A. BOTERO, J. LÓPEZ, F. FRANCÉS, A. DÍEZ-HERRERO et G. BENITO (2015). "Flood frequency analysis of historical flood data under stationary and non-stationary modelling". In : *Hydrology and Earth System Sciences* 19.6, p. 2561-2576. ISSN : 1607-7938. DOI : [10.5194/hess-19-2561-2015](https://doi.org/10.5194/hess-19-2561-2015).
- MADSEN, H., D. LAWRENCE, M. LANG, M. MARTINKOVA et T. R. KJELDSEN (2014). "Review of trend analysis and climate change projections of extreme precipitation and floods in Europe". In : *Journal of Hydrology* 519, p. 3634-3650. ISSN : 0022-1694. DOI : [10.1016/j.jhydrol.2014.11.003](https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2014.11.003).
- MANSANAREZ, V., B. RENARD, J. L. COZ, M. LANG et M. DARIENZO (2019a). "Shift Happens! Adjusting Stage-Discharge Rating Curves to Morphological Changes at Known Times". In : *Water Resources Research* 55.4, p. 2876-2899. ISSN : 0043-1397, 1944-7973. DOI : [10.1029/2018WR023389](https://doi.org/10.1029/2018WR023389).
- MANSANAREZ, V., I. K. WESTERBERG, N. LAM et S. W. LYON (2019b). "Rapid Stage-Discharge Rating Curve Assessment Using Hydraulic Modeling in an Uncertainty Framework". In : *Water Resources Research* 55.11, p. 9765-9787. ISSN : 0043-1397, 1944-7973. DOI : [10.1029/2018WR024176](https://doi.org/10.1029/2018WR024176).
- MARGOUM, M., G. OBERLIN, M. LANG et R. WEINGARTNER (1994). "Estimation des crues rares et extrêmes : principes du modèle AGREGEE". In : *Hydrologie continentale* 9.1, p. 85.
- MARTENS, D. M. (1992). "Dendrochronological Flood-frequency Analysis : An Australian Application". In : *Australian Geographical Studies* 30.1. _eprint : <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/j.1467-8470.1992.tb00733.x>, p. 70-86. ISSN : 1467-8470. DOI : [10.1111/j.1467-8470.1992.tb00733.x](https://doi.org/10.1111/j.1467-8470.1992.tb00733.x).
- McMILLAN, H. K. et I. K. WESTERBERG (2015). "Rating curve estimation under epistemic uncertainty". In : *Hydrological Processes* 29.7, p. 1873-1882. ISSN : 08856087. DOI : [10.1002/hyp.10419](https://doi.org/10.1002/hyp.10419).
- McMILLAN, H., J. FREER, F. PAPPENBERGER, T. KRUEGER et M. CLARK (2010). "Impacts of uncertain river flow data on rainfall-runoff model calibration and discharge predictions". In : 24. DOI : <https://doi.org/10.1002/hyp.7587>.
- McMILLAN, H., T. KRUEGER et J. FREER (2012). "Benchmarking observational uncertainties for hydrology : rainfall, river discharge and water quality". In : *Hydrological Processes* 26.26, p. 4078-4111. ISSN : 08856087. DOI : [10.1002/hyp.9384](https://doi.org/10.1002/hyp.9384).
- MEDD (2005). *Débit du Rhône à Beaucaire pour la crue de Décembre 2003*. Conférence de consensus. Ministère français de l'écologie et du développement durable.
- (2023a). *Prévention des risques naturels*. Ministère de l'écologie et du développement durable. URL : <https://www.ecologie.gouv.fr/prevention-des-risques-naturels> (visité le 13/04/2023).
- (2023b). *Repères de crues, plateforme collaborative de référence pour le recensement des repères de crues en France*. URL : <https://www.reperesdecruces.developpement-durable.gouv.fr/>.
- MILLY, P. C. D., J. BETANCOURT, M. FALKENMARK, R. M. HIRSCH, Z. W. KUNDZEWICZ, D. P. LETTENMAIER et R. J. STOUFFER (2008). "Stationarity Is Dead : Whither Water Management ?" In : *Science* 319.5863, p. 573-574. ISSN : 0036-8075, 1095-9203. DOI : [10.1126/science.1151915](https://doi.org/10.1126/science.1151915).
- MORLOT, T., C. PERRET, A.-C. FAVRE et J. JALBERT (2014). "Dynamic rating curve assessment for hydrometric stations and computation of the associated uncertainties :

- Quality and station management indicators”. In : *Journal of Hydrology* 517, p. 173-186. ISSN : 00221694. DOI : [10.1016/j.jhydrol.2014.05.007](https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2014.05.007).
- NAULET, R., M. LANG, T. B. OUARDA, D. COEUR, B. BOBÉE, A. RECKING et D. MOUSSAY (2005). “Flood frequency analysis on the Ardèche river using French documentary sources from the last two centuries”. In : *Journal of Hydrology* 313.1, p. 58-78. ISSN : 00221694. DOI : [10.1016/j.jhydrol.2005.02.011](https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2005.02.011).
- NEPPEL, L., B. RENARD, M. LANG, P.-A. AYRAL, D. COEUR, E. GAUME, N. JACOB, O. PAYRASTRE, K. POBANZ et F. VINET (2010). “Flood frequency analysis using historical data : accounting for random and systematic errors”. In : *Hydrological Sciences Journal* 55.2, p. 192-208. ISSN : 0262-6667, 2150-3435. DOI : [10.1080/02626660903546092](https://doi.org/10.1080/02626660903546092).
- OUARDA, T. B. M. J., C. GIRARD, G. S. CAVADIAS et B. BOBÉE (2001). “Regional flood frequency estimation with canonical correlation analysis”. In : *Journal of Hydrology* 254.1, p. 157-173. ISSN : 0022-1694. DOI : [10.1016/S0022-1694\(01\)00488-7](https://doi.org/10.1016/S0022-1694(01)00488-7).
- PAQUET, E., F. GARAVAGLIA, R. GARÇON et J. GAILHARD (2013). “The SCHADEX method : A semi-continuous rainfall-runoff simulation for extreme flood estimation”. In : *Journal of Hydrology* 495, p. 23-37. ISSN : 0022-1694. DOI : [10.1016/j.jhydrol.2013.04.045](https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2013.04.045).
- PARKES, B. et D. DEMERITT (2016). “Defining the hundred year flood : A Bayesian approach for using historic data to reduce uncertainty in flood frequency estimates”. In : *Journal of Hydrology* 540, p. 1189-1208. ISSN : 00221694. DOI : [10.1016/j.jhydrol.2016.07.025](https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2016.07.025).
- PETERSEN-ØVERLEIR, A. et T. REITAN (2005). “Uncertainty in flood discharges from urban and small rural catchments due to inaccurate head measurement”. In : *Hydrology Research* 36.3, p. 245-257. ISSN : 0029-1277, 2224-7955. DOI : [10.2166/nh.2005.0018](https://doi.org/10.2166/nh.2005.0018).
- PETERSEN-ØVERLEIR, A., A. SOOT et T. REITAN (2009). “Bayesian Rating Curve Inference as a Streamflow Data Quality Assessment Tool”. In : *Water Resources Management* 23.9, p. 1835-1842. ISSN : 0920-4741, 1573-1650. DOI : [10.1007/s11269-008-9354-5](https://doi.org/10.1007/s11269-008-9354-5).
- PICHARD, G. (1995). “Les crues sur le bas Rhône de 1500 à nos jours. Pour une histoire hydro-climatique”. In : *Méditerranée* 82.3, p. 105-116. ISSN : 0025-8296. DOI : [10.3406/medit.1995.2908](https://doi.org/10.3406/medit.1995.2908).
- PICHARD, G. et E. ROUCAUTE (2014). “Sept siècles d’histoire hydroclimatique du Rhône d’Orange à la mer (1300-2000). Climat, crues, inondations.” In : *Presses Universitaires de Provence* (Hors-série de la revue Méditerranée), p. 194. DOI : <https://doi.org/10.4000/geocarrefour.9491>.
- PIOTTE, O., C. BOURA, A. CAZAUBON, C. CHALÉON, D. CHAMBON, G. GUILLEVIC, F. PASQUET, C. PERHERIN et E. RAIMBAULT (2016). “Collection, storage and management of high-water marks data : praxis and recommendations”. In : *E3S Web of Conferences* 7. Publisher : EDP Sciences, p. 16003. ISSN : 2267-1242. DOI : [10.1051/e3sconf/20160716003](https://doi.org/10.1051/e3sconf/20160716003).
- PÖRTNER, H.-O., D. ROBERTS, H. ADAMS, I. ADELEKAN, C. ADLER, R. ADRIAN, P. ALDUNCE, E. ALI, R. A. BEGUM, B. B. FRIEDL, R. B. KERR, R. BIESBROEK, J. BIRKMANN, K. BOWEN, M. CARETTA, J. CARNICER, E. CASTELLANOS, T. CHEONG, W. CHOW, G. C. G. CISSÉ et Z. Z. IBRAHIM (2022). *Climate Change 2022 : Impacts, Adaptation and Vulnerability*. Technical Summary. Type : Book. Cambridge, UK et New York, USA : Cambridge University Press. 37-118. ISBN : 978-1-00-932584-4.

- PROSDOCIMI, I. (2018). "German tanks and historical records : the estimation of the time coverage of ungauged extreme events". In : *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment* 32.3, p. 607-622. ISSN : 1436-3240, 1436-3259. DOI : [10.1007/s00477-017-1418-8](https://doi.org/10.1007/s00477-017-1418-8).
- PUECHBERTY, R., C. PERRET, S. P. PITSCH, P. BATTAGLIA, A. BELLEVILLE, P. BOMPART, G. CHAUVEL, J. COUSSEAU, G. DRAMAS, G. GLAZIOU, A. HAUET, S. HELOUIN, M. LANG, F. LARRARTE, J. L. COZ, P. MARCHAND, P. MOQUET, O. PAYRASTRE, P. PIERREFEU et G. RAUZY (2017). *Charte qualité de l'hydrométrie. Guide de bonnes pratiques*. Ministère de l'environnement, de l'énergie et de la mer, France. 86 p.
- RENARD, B. (2011). "A Bayesian hierarchical approach to regional frequency analysis". In : *Water Resources Research* 47.11. _eprint : <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1029/2010WR010089>. ISSN : 1944-7973. DOI : [10.1029/2010WR010089](https://doi.org/10.1029/2010WR010089).
- RIBES, A., S. QASMI et N. P. GILLET (2021). "Making climate projections conditional on historical observations". In : *Science Advances* 7.4, eabc0671. ISSN : 2375-2548. DOI : [10.1126/sciadv.abc0671](https://doi.org/10.1126/sciadv.abc0671).
- RIGAUDIÈRE, P., A. DEKERGARIOU, C. LAROCHE, N. CAZE, J. BRUN, J. LABORDE et W. BEROLO (2000). *Etude globale des crues du Rhône*. Tech. rep. SAFEGE Cetiis et Université de Nice.
- RUIZ-BELLET, J. L., X. CASTELLTORT, J. C. BALASCH et J. TUSET (2017). "Uncertainty of the peak flow reconstruction of the 1907 flood in the Ebro River in Xerta (NE Iberian Peninsula)". In : *Journal of Hydrology* 545, p. 339-354. ISSN : 00221694. DOI : [10.1016/j.jhydrol.2016.12.041](https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2016.12.041).
- SALAS, J. D., J. OBEYSEKERA et R. M. VOGEL (2018). "Techniques for assessing water infrastructure for nonstationary extreme events : a review". In : *Hydrological Sciences Journal* 63.3, p. 325-352. ISSN : 0262-6667. DOI : [10.1080/02626667.2018.1426858](https://doi.org/10.1080/02626667.2018.1426858).
- STEDINGER, J. R. et T. A. COHN (1986). "Flood Frequency Analysis With Historical and Paleoflood Information". In : *Water Resources Research* 22.5, p. 785-793. ISSN : 1944-7973. DOI : [10.1029/WR022i005p00785](https://doi.org/10.1029/WR022i005p00785).
- STEINBAKK, G. H., T. L. THORARINSDOTTIR, T. REITAN, L. SCHLICHTING, S. HØLLELAND et K. ENGELAND (2016). "Propagation of rating curve uncertainty in design flood estimation". In : *Water Resources Research* 52.9, p. 6897-6915. ISSN : 00431397. DOI : [10.1002/2015WR018516](https://doi.org/10.1002/2015WR018516).
- SUN, X., M. THYER, B. RENARD et M. LANG (2014). "A general regional frequency analysis framework for quantifying local-scale climate effects : A case study of ENSO effects on Southeast Queensland rainfall". In : *Journal of Hydrology* 512, p. 53-68. ISSN : 00221694. DOI : [10.1016/j.jhydrol.2014.02.025](https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2014.02.025).
- TRAMBLAY, Y., P. ARNAUD, G. ARTIGUE, M. LANG, E. PAQUET, L. NEPPEL et E. SAUQUET (2023). *Changes in Mediterranean flood processes and seasonality*. preprint. Catchment hydrology/Modelling approaches. DOI : [10.5194/hess-2023-46](https://doi.org/10.5194/hess-2023-46).
- UNDRR (2020). *The human cost of disasters : an overview of the last 20 years (2000-2019)*.
- VAN DER MADE, J. (1982). "Determination of the accuracy of water level observations". In : *IAHS Publications*. Proceedings of the Exeter Symposium 134, p. 172-184.
- VIGLIONE, A., R. MERZ, J. L. SALINAS et G. BLÖSCHL (2013). "Flood frequency hydrology : 3. A Bayesian analysis". In : *Water Resources Research* 49.2, p. 675-692. ISSN : 1944-7973. DOI : [10.1029/2011WR010782](https://doi.org/10.1029/2011WR010782).

- WESTERBERG, I., J.-L. GUERRERO, J. SEIBERT, K. J. BEVEN et S. HALLDIN (2011). “Stage-discharge uncertainty derived with a non-stationary rating curve in the Choluteca River, Honduras”. In : *Hydrological Processes* 25.4, p. 603-613. ISSN : 08856087. DOI : [10.1002/hyp.7848](https://doi.org/10.1002/hyp.7848).
- WETTER, O., C. PFISTER, R. WEINGARTNER, J. LUTERBACHER, T. REIST et J. TRÖSCH (2011). “The largest floods in the High Rhine basin since 1268 assessed from documentary and instrumental evidence”. In : *Hydrological Sciences Journal* 56.5. Publisher : Taylor & Francis _eprint : <https://doi.org/10.1080/02626667.2011.583613>, p. 733-758. ISSN : 0262-6667. DOI : [10.1080/02626667.2011.583613](https://doi.org/10.1080/02626667.2011.583613).
- WHS (2008). *Flood Estimation Handbook*. WHS. Section : Software. URL : https://www.hydrosolutions.co.uk/software/flood_estimation_handbook/ (visité le 10/03/2023).
- WILHELM, B., B. AMANN, J. P. CORELLA, W. RAPUC, C. GIGUET-COVEX, B. MERZ et E. STØREN (2022). “Reconstructing Paleoflood Occurrence and Magnitude from Lake Sediments”. In : *Quaternary* 5.1. Number : 1 Publisher : Multidisciplinary Digital Publishing Institute, p. 9. ISSN : 2571-550X. DOI : [10.3390/quat5010009](https://doi.org/10.3390/quat5010009).