

# Introduction

Mathieu

April 20, 2023

## Contents

<b>1</b>	<b>L'estimation du risque inondation</b>	<b>2</b>
<b>2</b>	<b>Analyse fréquentielle des crues et incertitudes</b>	<b>3</b>
2.1	Incertitudes hydrométriques . . . . .	3
2.2	Incertitude d'échantillonnage . . . . .	4
2.3	Hypothèses de modélisation . . . . .	5
<b>3</b>	<b>Solutions pour la réduction de l'incertitude des quantiles extrêmes</b>	<b>5</b>
3.1	Analyse régionale . . . . .	5
3.2	Analyse historique . . . . .	5
<b>4</b>	<b>Élaboration des chroniques de débit</b>	<b>6</b>
4.1	Schéma hydrométrique usuel . . . . .	6
4.2	Quantification des incertitudes . . . . .	6
4.3	Hydrométrie en contexte historique . . . . .	6
<b>5</b>	<b>Analyse fréquentielle des crues en contexte historique</b>	<b>7</b>
5.1	Intérêt de l'utilisation des données historiques . . . . .	7
<b>6</b>	<b>Le risque inondation dans la basse vallée du Rhône</b>	<b>7</b>
<b>7</b>	<b>Organisation du manuscrit</b>	<b>7</b>

# 1 L'estimation du 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<sup>ème</sup> 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, 2023). 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 le risque de crue. Pour cela, ils utilisent le concept de "période de retour", qui est également utilisé dans de nombreux domaines liés aux risques naturels. La période de retour est intimement liée à 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. Même si 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 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. 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) "correspond à un phénomène ayant une probabilité de survenance de 1 chance sur 100 chaque année. S'il existe une crue historique dont la période de retour est supérieure à la crue centennale, cet événement historique est retenu comme aléa de référence". (MEDD, 2023). Étant donné qu'il y a environ 63% de chances d'observer au moins une crue centennale en 100 ans, 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 détermination précise du débit correspondant à une période de retour donnée (également appelé "crue de projet" ou "quantile de crue") est donc essentielle.

À l'origine, l'estimation des quantiles de crues était purement empirique. Il s'agissait par exemple, pour une station de mesure donnée, de calculer la fréquence cumulée des débits maximum annuels, classés par ordre croissant. On pouvait 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. Désormais, la pratique courante, appelée analyse fréquentielle des crues, consiste à estimer les paramètres d'une distribution statistique (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. 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)).

**A REVOIR** Une autre famille de méthodes probabilistes d'estimation des crues se base sur l'utilisation de modèles hydrologiques (ou modèles pluie/débit) qui simulent la transformation de la pluie en débit au sein de bassin versant. Il s'agit, dans le cas de l'estimation du risque de crue, de simuler une pluie extrême dans un contexte de saturation en eau du bassin versant. Sous cette hypothèse, la distribution des débits est conditionnée à la distribution des pluie extrêmes. Il n'existe pas de consensus scientifique en faveur des méthodes classiques d'analyse fréquentielle (basées uniquement les chroniques de débit), ou en faveur des méthodes pluie/débit. La présente thèse s'intéresse uniquement aux méthodes d'analyse fréquentielle classiques.

SHYREG, GRADEX, SHADEX, etc

## 2 Analyse fréquentielle des crues et incertitudes

L'analyse fréquentielle des crues, bien que très largement utilisée dans le monde, est affectée par plusieurs sources d'incertitudes qui sont bien souvent négligées. De nombreuses décisions découlent des résultats de l'analyse fréquentielle : dimensionnement des digues de protection pour les populations et les infrastructures à risque, 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 quatre 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 statistique adaptée à la variable hydrologique étudiée, ou l'hypothèse de stationnarité, qui garantit que les données utilisées sont des représentations d'une variable aléatoire indépendante et identiquement distribuée (ou iid).

### 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 naturels ne peut malheureusement pas être mesuré en continu. En revanche, il est possible de mesurer continuellement la hauteur d'eau en un point donné à l'aide d'une échelle limnimétrique installée à demeure. De plus, des estimations ponctuelles du débit peuvent être réalisées via diverses méthodes de mesure appelées "jaugeages". Sous certaines conditions, il est possible d'établir une relation univoque entre la hauteur d'eau et le débit en un point donné à l'aide des jaugeages. Cette relation nommée "courbe de tarage", constitue le cœur de l'hydrométrie. 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'incertitudes autour de la mesure de la hauteur d'eau sont identifiées dans la littérature (Van Der Made (1982); Petersen-Øverleir and 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. 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 and 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 est particulièrement complexe en situation de crue. 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 étudiée dans la littérature (Petersen-Øverleir et al. (2009); Juston et al. (2014); Le Coz et al. (2014b); Morlot et al. (2014); Coxon et al. (2015); McMillan and 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 and 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). 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 étudié. 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.

## 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)). La longueur des chroniques de débit atteint en moyenne 50 ans en France (Le Coz, 2017) alors que les quantiles cibles de l’analyse fréquentielle peuvent correspondre à des périodes de retour bien plus importantes (i.e. 100 ans, 1000 ans, ou plus). 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. 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 prise en compte dans les études opérationnelles. 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).

La quantification probabiliste de ce type d'incertitude est nécessaire et a été largement étudiée dans la littérature (Renard et al., 2006). Il existe diverses méthodes pour réduire l'incertitude d'échantillonnage dans le cadre de l'analyse fréquentielle des crues. Cette réduction est généralement obtenue en élargissant les échantillons de données sous différentes hypothèses.

### 2.3 Hypothèses de modélisation

distribution, max an ou sup-seuil, hypothèse de stationnarité (climat, anthropique, autre)  
description rapide, pas abordé dans la thèse.

Sharma et al, 2018 : Despite evidence of increasing precipitation extremes, corresponding evidence for increases in flooding remains elusive.

bloeshl nature 2019

## 3 Solutions pour la réduction de l'incertitude des quantiles extrêmes

**A ECRIRE** cible principale : U échantillonnage

### 3.1 Analyse régionale

Afin de réduire l'incertitude d'échantillonnage lors de l'analyse fréquentielle des crues d'une station hydrométrique donnée, il est possible d'élargir spatialement le jeu de données en faisant l'hypothèse que la distribution des crues est homogène au sein d'une région définie Hosking and Wallis (1997); Gaume et al. (2010); Viglione et al. (2013)) ou bien en utilisant un modèle qui prend en compte les dépendances spatiales inter-stations Kjeldsen and 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 fleuves sous l'influence de nombreux facteurs hydro-climatiques.

### 3.2 Analyse historique

Une autre approche fréquemment utilisée consiste à élargir temporellement le jeu de données par l'utilisation de données historiques 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 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 très limitée des données limnimétriques potentiellement disponibles pour une station données soit disponible dans la base de données publique ([hydro.eaufrance.fr](https://hydro.eaufrance.fr)). Ces données limnimétriques anciennes, lorsqu'elles sont continues, rentrent dans le cadre de l'analyse fréquentielle classique décrit précédemment. Il ne faut en revanche pas négliger les incertitudes hydrométriques dans ce cas. En effet, les jaugeages anciens peuvent être rares et la relation hauteur-débit complexe à estimer.

Plus généralement, les données de crue historiques (i.e. pré-enregistrements continus) peuvent prendre des formes très variées : repères de crues (Parkes and Demeritt (2016); Piotte et al. (2016); Engeland et al. (2020); MEDD (n.d.)), témoignages de crues (Pichard (1995); Naulet et al. (2005); Neppel et al. (2010); Kjeldsen et al. (2014); Macdonald et al. (2014)), reconstructions de crues pré-historiques ("paléofloods" en anglais) 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 traces ponctuelles de crues ne peut donc pas être garantie et leur utilisation pour l'analyse fréquentielle nécessite des traitements statistiques adaptés. Pour cela, on peut formuler l'hypothèse que les données décrites ci-dessus concernent uniquement des événements d'une magnitude suffisante pour avoir laissé une trace dans les écrits, les sédiments de la plaine alluviale, 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 formaliser une forme d'exhaustivité au-dessus de ce seuil. Le corolaire 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 crues peuvent être intégrées à l'analyse fréquentielle des crues (Gerard and Karpuk (1979); Stedinger and Cohn (1986)), qu'il soit possible d'en estimer précisément le débit, ou seulement de garantir qu'elle étaient supérieures au seuil de perception. Dans la littérature, l'utilisation des crues historique pour l'analyse fréquentielle est très fréquente 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 crues est probablement sous-estimée.

## 4 Élaboration des chroniques de débit

### 4.1 Schéma hydrométrique usuel

charte de l'hydrométrie et refs internationales (article JOH)

### 4.2 Quantification des incertitudes

uH, u jau, u RC, détarages, SPD

### 4.3 Hydrométrie en contexte historique

incertitude sur les débits de pointe histo : pas d'échelle

difficulté d'avoir un échantillon exhaustif

reconstitutions par la modélisation

## 5 Analyse fréquentielle des crues en contexte historique

### 5.1 Intérêt de l'utilisation des données historiques

Illustration avec l'exemple de l'Ahr en 2021 : Ludwig et al, 2023 - Figure 7 "Again, this underlines the challenges of extreme value statistics and the large uncertainties when estimating return periods for the 2021 event. It also indicates the need for even longer historical time series and reconstructions as far as possible and/or the examination of the completeness of the events between 1804 and 1946 as well as before 1804, where there is evidence that over 70 floods occurred in the Ahr river basin since the year 1500, including the large 1601 event (Seel, 1983). In addition, 1818 and 1848 were also large events with currently no reconstructed streamflows."

## 6 Le risque inondation dans la basse vallée du Rhône

## 7 Organisation du manuscrit

### References

- Apel, H., A. H. Thielen, B. Merz, and G. Blöschl (2004). "Flood risk assessment and associated uncertainty". In: *Natural Hazards and Earth System Sciences* 4.2. Publisher: Copernicus GmbH, pp. 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, pp. 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, and K. Hirschboeck (2015). "A review of flood records from tree rings". In: *Progress in Physical Geography: Earth and Environment* 39.6, pp. 794–816. ISSN: 0309-1333, 1477-0296. DOI: [10.1177/0309133315608758](https://doi.org/10.1177/0309133315608758).
- Brázdil, R., Z. W. Kundzewicz, and G. Benito (2006). "Historical hydrology for studying flood risk in Europe". In: *Hydrological Sciences Journal* 51.5, pp. 739–764. ISSN: 0262-6667, 2150-3435. DOI: [10.1623/hysj.51.5.739](https://doi.org/10.1623/hysj.51.5.739).
- Corella, J., G. Benito, A. Monteoliva, J. Sigro, M. Calle, B. Valero-Garcés, V. Stefanova, E. Rico, A.-C. Favre, and 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, and P. J. Smith (2015). "A novel framework for discharge uncertainty quantification applied to 500 UK gauging stations". In: *Water Resources Research* 51.7, pp. 5531–5546. ISSN: 0043-1397, 1944-7973. DOI: [10.1002/2014WR016532](https://doi.org/10.1002/2014WR016532).
- Dariento, M., B. Renard, J. Le Coz, and 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, and J. Delgado (2014). "A multidating approach applied to historical slackwater flood deposits of the Gardon River, SE France". In: *Geomorphology* 214, pp. 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, and 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 and 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, and G. Blöschl (2010). “Bayesian MCMC approach to regional flood frequency analyses involving extraordinary flood events at ungauged sites”. In: *Journal of Hydrology* 394.1, pp. 101–117. ISSN: 00221694. DOI: [10.1016/j.jhydrol.2010.01.008](https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2010.01.008).
- Gerard, R. and E. W. Karpuk (1979). “Probability Analysis of Historical Flood Data”. In: *Journal of the Hydraulics Division* 105.9. Publisher: American Society of Civil Engineers, pp. 1153–1165. DOI: [10.1061/JYCEAJ.0005273](https://doi.org/10.1061/JYCEAJ.0005273).
- Guerrero, J.-L., I. K. Westerberg, S. Halldin, C.-Y. Xu, and L.-C. Lundin (2012). “Temporal variability in stage–discharge relationships”. In: *Journal of Hydrology* 446–447, pp. 90–102. ISSN: 00221694. DOI: [10.1016/j.jhydrol.2012.04.031](https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2012.04.031).
- Hamilton, A. and R. Moore (2012). “Quantifying Uncertainty in Streamflow Records”. In: *Canadian Water Resources Journal / Revue canadienne des ressources hydriques* 37.1, pp. 3–21. ISSN: 0701-1784, 1918-1817. DOI: [10.4296/cwrj3701865](https://doi.org/10.4296/cwrj3701865).
- Han, X., T. B. M. J. Ouara, A. Rahman, K. Haddad, R. Mehrotra, and 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).
- Horner, I., B. Renard, J. Le Coz, F. Branger, H. K. McMillan, and G. Pierrefeu (2018). “Impact of Stage Measurement Errors on Streamflow Uncertainty”. In: *Water Resources Research* 54.3, pp. 1952–1976. ISSN: 0043-1397, 1944-7973. DOI: [10.1002/2017WR022039](https://doi.org/10.1002/2017WR022039).
- Hosking, J. R. M. and 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, and 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, pp. 2509–2523. ISSN: 08856087. DOI: [10.1002/hyp.9786](https://doi.org/10.1002/hyp.9786).
- Kjeldsen, T., N. Macdonald, M. Lang, L. Mediero, T. Albuquerque, E. Bogdanowicz, R. Brázdil, A. Castellarin, V. David, A. Fleig, G. Gül, J. Kriauciuniene, S. Kohnová, B. Merz, O. Nicholson, L. Roald, J. Salinas, D. Sarauskiene, M. Šraj, W. Strupczewski, J. Szolgay, A. Toumazis, W. Vanneuville, N. Veijalainen, and D. Wilson (2014). “Documentary evidence of past floods in Europe and their utility in flood frequency estimation”. In: *Journal of Hydrology* 517, pp. 963–973. ISSN: 00221694. DOI: [10.1016/j.jhydrol.2014.06.038](https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2014.06.038).
- Kjeldsen, T. R. and 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).
- Kjeldsen, T. R., R. Lamb, and S. D. Blazkova (2011). “Uncertainty in Flood Frequency Analysis”. In: *Applied Uncertainty Analysis for Flood Risk Management*. Imperial college press, pp. 153–197. ISBN: 978-1-84816-270-9.
- Kuentz, A., T. Mathevet, D. Cœur, C. Perret, J. Gailhard, L. Guérin, Y. Gash, and V. Andréassian (2014). “Hydrométrie et hydrologie historiques du bassin de la Durance”. In: *La Houille Blanche* 100.4, pp. 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, and E. Sauquet (2010). “Extrapolation of rating curves by hydraulic modelling, with application to flood frequency analysis”. In: *Hydrological Sciences Journal* 55.6, pp. 883–898. ISSN: 0262-6667, 2150-3435. DOI: [10.1080/02626667.2010.504186](https://doi.org/10.1080/02626667.2010.504186).
- Lapuszek, M. and 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), pp. 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, and G. Dramais (2014a). “Quantification des incertitudes sur les jaugeages par exploration du champ des vitesses”. In: *La Houille Blanche* 100.5, pp. 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, and R. Le Boursicaud (2014b). “Combining hydraulic knowledge and uncertain gaugings in the estimation of hydrometric rating curves: A Bayesian approach”. In: *Journal of Hydrology* 509, pp. 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, pp. 54–58. ISSN: 0018-6368, 1958-5551. DOI: [10.1051/lhb/2014050](https://doi.org/10.1051/lhb/2014050).
- Loomans, S. A. (1993). “Flood Reconstruction in Southern Illinois Using Tree Rings”. In:
- Macdonald, N., T. R. Kjeldsen, I. Prosdocimi, and 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, pp. 2817–2828. ISSN: 1684-9981. DOI: [10.5194/nhess-14-2817-2014](https://doi.org/10.5194/nhess-14-2817-2014).
- Mansanarez, V., B. Renard, J. L. Coz, M. Lang, and M. Darienzo (2019a). “Shift Happens! Adjusting Stage-Discharge Rating Curves to Morphological Changes at Known Times”. In: *Water Resources Research* 55.4, pp. 2876–2899. ISSN: 0043-1397, 1944-7973. DOI: [10.1029/2018WR023389](https://doi.org/10.1029/2018WR023389).
- Mansanarez, V., I. K. Westerberg, N. Lam, and S. W. Lyon (2019b). “Rapid Stage-Discharge Rating Curve Assessment Using Hydraulic Modeling in an Uncertainty Framework”. In: *Water Resources Research* 55.11, pp. 9765–9787. ISSN: 0043-1397, 1944-7973. DOI: [10.1029/2018WR024176](https://doi.org/10.1029/2018WR024176).
- Martens, D. M. (1992). “Dendrochronological Flood-frequency Analysis: An Australian Application”. In: *Australian Geographical Studies* 30.1. eprint: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1111/j.1467-8470.1992.tb00733.x>, pp. 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. and I. K. Westerberg (2015). “Rating curve estimation under epistemic uncertainty”. In: *Hydrological Processes* 29.7, pp. 1873–1882. ISSN: 08856087. DOI: [10.1002/hyp.10419](https://doi.org/10.1002/hyp.10419).
- McMillan, H., J. Freer, F. Pappenberger, T. Krueger, and 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, and J. Freer (2012). “Benchmarking observational uncertainties for hydrology: rainfall, river discharge and water quality”. In: *Hydrological Processes* 26.26, pp. 4078–4111. ISSN: 08856087. DOI: [10.1002/hyp.9384](https://doi.org/10.1002/hyp.9384).
- MEDD (n.d.). *Repères de crues, plateforme collaborative de référence pour le recensement des repères de crues en France*. URL: <https://www.reperesdecrues.developpement-durable.gouv.fr/>.
- (2023). *Site hydrométrique - V720 0010 : Le Rhône à Tarascon - Fiche de synthèse - Données hydrologiques de synthèse — SCHAPI - HydroPortail*. URL: <https://www.hydro.eaufrance.fr/sitehydro/V7200010/synthese> (visited on 03/16/2023).
- Morlot, T., C. Perret, A.-C. Favre, and 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, pp. 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, and 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, pp. 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. Ayrat, D. Coeur, E. Gaume, N. Jacob, O. Payrastre, K. Pobanz, and F. Vinet (2010). “Flood frequency analysis using historical data: accounting for random and

- systematic errors”. In: *Hydrological Sciences Journal* 55.2, pp. 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, and B. Bobée (2001). “Regional flood frequency estimation with canonical correlation analysis”. In: *Journal of Hydrology* 254.1, pp. 157–173. ISSN: 0022-1694. DOI: [10.1016/S0022-1694\(01\)00488-7](https://doi.org/10.1016/S0022-1694(01)00488-7).
- Parkes, B. and 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, pp. 1189–1208. ISSN: 00221694. DOI: [10.1016/j.jhydrol.2016.07.025](https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2016.07.025).
- Petersen-Overleir, A. and T. Reitan (2005). “Uncertainty in flood discharges from urban and small rural catchments due to inaccurate head measurement”. In: *Hydrology Research* 36.3, pp. 245–257. ISSN: 0029-1277, 2224-7955. DOI: [10.2166/nh.2005.0018](https://doi.org/10.2166/nh.2005.0018).
- Petersen-Overleir, A., A. Soot, and T. Reitan (2009). “Bayesian Rating Curve Inference as a Streamflow Data Quality Assessment Tool”. In: *Water Resources Management* 23.9, pp. 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, pp. 105–116. ISSN: 0025-8296. DOI: [10.3406/medit.1995.2908](https://doi.org/10.3406/medit.1995.2908).
- Piotte, O., C. Boura, A. Cazaubon, C. Chaléon, D. Chambon, G. Guillevic, F. Pasquet, C. Perherin, and 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).
- Puechberty, R., C. Perret, S. P. Pitsch, P. Battaglia, A. Belleville, P. Bompert, G. Chauvel, J. Cousseau, G. Dramais, G. Glaziou, A. Hauet, S. Helouin, M. Lang, F. Larrarte, J. L. Coz, P. Marchand, P. Moquet, O. Payraastre, P. Pierrefeu, and 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 pp.
- 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).
- Renard, B., V. Garreta, and M. Lang (2006). “An application of Bayesian analysis and Markov chain Monte Carlo methods to the estimation of a regional trend in annual maxima”. In: *Water Resources Research* 42.12. ISSN: 00431397. DOI: [10.1029/2005WR004591](https://doi.org/10.1029/2005WR004591).
- Stedinger, J. R. and T. A. Cohn (1986). “Flood Frequency Analysis With Historical and Paleoflood Information”. In: *Water Resources Research* 22.5, pp. 785–793. ISSN: 1944-7973. DOI: [10.1029/WR022i005p00785](https://doi.org/10.1029/WR022i005p00785).
- Sun, X., M. Thyer, B. Renard, and 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, pp. 53–68. ISSN: 00221694. DOI: [10.1016/j.jhydrol.2014.02.025](https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2014.02.025).
- 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, pp. 172–184.
- Viglione, A., R. Merz, J. L. Salinas, and G. Blöschl (2013). “Flood frequency hydrology: 3. A Bayesian analysis”. In: *Water Resources Research* 49.2, pp. 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, and S. Halldin (2011). “Stage-discharge uncertainty derived with a non-stationary rating curve in the Choluteca River, Honduras”. In: *Hydrological Processes* 25.4, pp. 603–613. ISSN: 08856087. DOI: [10.1002/hyp.7848](https://doi.org/10.1002/hyp.7848).
- WHS (2008). *Flood Estimation Handbook*. WHS. Section: Software. URL: [https://www.hydrosolutions.co.uk/software/flood\\_estimation\\_handbook/](https://www.hydrosolutions.co.uk/software/flood_estimation_handbook/) (visited on 03/10/2023).

Wilhelm, B., B. Amann, J. P. Corella, W. Rapuc, C. Giguet-Covex, B. Merz, and 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).