

# Introduction

Mathieu

April 19, 2023

## Contents

<b>1</b>	<b>L'estimation du risque inondation</b>	<b>3</b>
<b>2</b>	<b>Analyse fréquentielle des crues et incertitudes</b>	<b>4</b>
2.1	Incertitudes hydrométriques . . . . .	4
2.2	Incertitude d'échantillonnage . . . . .	5
2.2.1	Analyse régionale . . . . .	5
2.2.2	• . . . . .	5
2.3	Hypothèses de modélisation . . . . .	5
<b>3</b>	<b>Estimation du risque inondation</b>	<b>5</b>
3.1	Concept de période de retour . . . . .	5
3.2	Estimations empiriques . . . . .	5
3.3	Ajustements statistiques . . . . .	5
3.4	Méthodes régionales . . . . .	6
3.5	Méthodes pluie/débit . . . . .	6
<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</b>	<b>6</b>
5.1	Méthodes d'échantillonnage . . . . .	6
5.1.1	Max annuels . . . . .	6
5.1.2	Sup-seuil . . . . .	6
5.2	Sources d'incertitude . . . . .	6
5.2.1	Chroniques de débit . . . . .	6
5.2.2	Échantillonnage . . . . .	6
5.2.3	Choix de distribution . . . . .	6
5.2.4	Respect de l'hypothèse de stationnarité . . . . .	6

<b>6</b>	<b>Analyse fréquentielle des crues en contexte historique</b>	<b>7</b>
6.1	Intérêt de l'utilisation des données historiques . . . . .	7
6.2	Données continues anciennes . . . . .	7
6.3	Données pré-enregistrements continus . . . . .	7
6.4	Incertitudes autour de l'analyse fréquentielle historique . . . . .	7
<b>7</b>	<b>Le risque inondation dans la basse vallée du Rhône</b>	<b>7</b>
<b>8</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)).

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.

## 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 (Westerberg et al. (2011); Guerrero et al. (2012); Morlot et al. (2014); Lapuszek and Lenar-Matyas (2015); McMillan et al. (2010); Darienzo et al. (2021); Mansanarez et al. (2019a)). Lorsqu'on s'intéresse particulièrement aux crues

en france la plupart des stations ne sont pas jaugées sous Q2

liste et limitations dans la littérature extrapolation CT (lang 2010)

## 2.2 Incertitude d'échantillonnage

taille chronique kjeldsen et autres

### 2.2.1 Analyse régionale

### 2.2.2 •

## 2.3 Hypothèses de modélisation

distribution, max an ou sup-seuil, hypothèse de stationnarité (climat, anthropique, autre)

description rapide, pas abordé dans la thèse.

## 3 Estimation du risque inondation

### 3.1 Concept de période de retour

Cours Benjamin + Thèse brigode

### 3.2 Estimations empiriques

Cours Ben + biblio anciennes stedinger etc

### 3.3 Ajustements statistiques

cours ben + livres FFA : Hamed 2019; Jain 2019 ajuster une distribution : block maxima ou Over threshold

### **3.4 Méthodes régionales**

Thèse pierre

### **3.5 Méthodes pluie/débit**

thèse pierre

SHYREG, GRADEX, SHADEX, etc

Quelle que soit la méthode d'estimation du risque retenue, des chroniques de débit sont nécessaires.

## **4 Élaboration des chroniques de débit**

### **4.1 Schéma hydrométrique usuel**

charte de l'hydrométrie et refs internationnales (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**

### **5.1 Méthodes d'échantillonnage**

#### **5.1.1 Max annuels**

#### **5.1.2 Sup-seuil**

ATTENTION AUX DOUBLONS AVEC SECTION 2

### **5.2 Sources d'incertitude**

#### **5.2.1 Chroniques de débit**

#### **5.2.2 Échantillonnage**

#### **5.2.3 Choix de distribution**

#### **5.2.4 Respect de l'hypothèse de stationnarité**

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

## 6 Analyse fréquentielle des crues en contexte historique

### 6.1 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."

### 6.2 Données continues anciennes

Nombreuses données qui dorment dans les archives : illustrations ? Données dispo en banque hydro VS réalité

### 6.3 Données pré-enregistrements continus

Liste d'études histo dans le monde, en europe et en France

### 6.4 Incertitudes autour de l'analyse fréquentielle historique

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

## 8 Organisation du manuscrit

## References

- 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).
- 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).
- 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).
- 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).

- 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).
- 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., 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).
- 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).
- 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 (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).
- 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).
- Puechberty, R., C. Perret, S. P. Pitsch, P. Battaglia, A. Belleville, P. Bompard, 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.



- 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.
- 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).