



## Proposition de sujet de thèse (2019/2022)

**Titre de la thèse** : Réanalyse historique des débits du Rhône à Beaucaire : crues extrêmes et variabilité climatique

**Laboratoire d'accueil** : Equipe hydrologie des bassins versants et équipe hydraulique des rivières, IRSTEA, Lyon-Villeurbanne, France

**Encadrants** : M. Lang, J. Le Coz, B. Renard

**Directeur de thèse** : M. Lang

**Ecole doctorale** : MEGA (Mécanique Energétique, Génie Civil et Acoustique), Lyon

**Profil du doctorant recherché** :

- Titulaire d'un Master 2 recherche ou équivalent.
- Bases solides en hydraulique fluviale et en hydrologie statistique.
- Aptitudes pour la recherche scientifique : rigueur de raisonnement, rédaction scientifique, anglais lu écrit et parlé, informatique scientifique, goût pour les questions ouvertes, créativité.
- Aptitude et goût pour la programmation. Une expérience en Fortran et/ou R serait appréciée.
- Goût pour le travail en équipe et les applications de terrain en hydrologie

**Résumé** : Une première étape de la thèse consistera à étudier la série continue de débits disponible sur la période 1816-2019 et à faire la part de la variabilité liée au climat et celle induite par les aménagements de l'homme sur le corridor fluvial (épis Girardon, endiguements, barrages sur le Rhône) et l'ensemble du bassin versant (barrages alpins, occupation du sol). Dans un second temps, un travail de reconstitution du débit du Rhône à Beaucaire et des incertitudes associées sera réalisé à l'aide d'un modèle hydraulique et de géométries historiques. On exploitera une chronologie des événements hydro climatiques de 1300 à nos jours sur le Rhône inférieur, issue du projet HISTRHONE. Enfin, une analyse statistique sera menée sur les crues extrêmes, à l'aide d'un modèle probabiliste permettant de traiter un échantillon mixte composé d'une série continue (1806-2019) et d'une collection d'événements (période 1300-1800).



## 1. Contexte et enjeux

La sécurité du territoire exposé aux inondations sur la partie aval du Rhône a été jugée préoccupante puisque pas moins de trois Territoires à Risque Important ont été retenus dans ce secteur (Montélimar, Avignon, Delta du Rhône), lors de la première mise en application de la Directive Inondation (2010-2015). Les crues importantes du Rhône, susceptibles d'inonder tout ou partie de la plaine d'inondation, peuvent être sources de dommages majeurs. Ainsi, le coût total des pertes liées aux inondations de la crue du 1 au 4 décembre 2003 sur le Rhône inférieur est estimé à 1,1 milliard d'euros. Cette crue, de période de retour d'environ 100 ans, reste inférieure en niveau de submersion à l'inondation historique de mai 1856.

Suivant la nature des aménagements dans la vallée du Rhône (zones cultivées, voies de communication, zones industrielles, zones habitées...), il est d'usage de raisonner sur des crues de référence plus ou moins importantes, et de chercher à protéger les zones exposées ou du moins à définir une stratégie pour atténuer les conséquences des inondations. Les Plans de Prévention du Risque Inondation retiennent la crue historique la plus forte connue, ou la crue centennale si celle-ci est plus forte. Des équipements sensibles (barrages, centrales nucléaires) sont conçus pour fonctionner correctement jusqu'à la crue millénaire, voire davantage.

Le bassin du Rhône inférieur constitue un cas paradoxal. Il s'agit d'un des bassins les plus anciennement instrumentés en France, avec de premières échelles hydrométriques installées dans la première moitié du XIXe siècle et une série de débits journaliers sur le Rhône à Beaucaire disponible sur la banque HYDRO seulement depuis 1920. C'est un secteur également stratégique car il intègre d'une certaine manière l'ensemble des effets cumulés du bassin. L'étude Globale des Crues du Rhône (EGR) (SAFEGE -CETTIS, 2000) n'a exploité qu'une série de valeurs de crues de 78 ans (1920-1997), alors que potentiellement aujourd'hui près de 200 années d'observations hydrométriques sont disponibles, sous réserve de pouvoir passer des mesures de hauteurs aux débits. Dès lors l'enjeu scientifique consiste à valoriser tout ce patrimoine d'informations historiques pour conforter la connaissance du régime des eaux du Rhône inférieur.



A une échelle plus large, il est même possible de remonter bien plus loin que le seul XIXe siècle sur la connaissance des grandes inondations, sécheresses et étiages du Rhône. On peut citer les travaux de Pichard (1995, 1999), puis le projet HISTRHÔNE et la base de données associée (Pichard et Roucaute, 2014), qui ont conduit, à partir d'un très gros travail de collecte des données, à recenser près de 1500 événements hydro climatiques sur la période 1300-2000 : 1068 crues et inondations, 234 événements de basses eaux, 174 épisodes de glace (gel ou transport de glace) et 8 submersions marines. Ces informations sont intéressantes dans la mesure où elles peuvent compléter utilement les prédictions des modèles climatiques pour le XXIe siècle, qui indiquent par exemple sur la France une forte augmentation des températures (+2 à +4 °C) et une modification du régime des eaux (Chauveau et al., 2013). De plus, elles peuvent contribuer à mieux définir les politiques de restauration du fleuve en intégrant à la fois les enjeux écologiques et de sécurité des biens et des personnes. L'analyse de la variabilité climatique du régime du Rhône à l'échelle de plusieurs siècles peut permettre de mieux comprendre les forçages climatiques sur le régime des eaux du Rhône. Cela sera possible de façon précise sur la période 1812-2020 à l'aide de relevés hydrométriques journaliers en continu sur le Rhône à Beaucaire, et à une résolution temporelle moins fine sur la période 1300-1800 (zoom sur les événements extrêmes).

## 2. Objectifs de la thèse et verrous scientifiques à lever

L'objectif de la thèse est dans un premier temps d'approfondir le travail sur la reconstitution du débit du Rhône à Beaucaire à l'aide de modélisations hydrauliques s'appuyant sur des géométries anciennes, et d'évaluer du mieux possible le niveau d'incertitude associé à chaque valeur de débit pour les différents états reconstitués. La série de débit reconstituée en continu sur la période 1816-2020 sera alors exploitée pour analyser ce qui relève de la variabilité climatique « naturelle » et ce qui résulte des aménagements réalisés sur le lit du Rhône et des modifications intervenues sur le bassin versant. Dans un second temps, c'est l'ensemble de la période 1300-2016 qui sera analysée du point de vue du régime des crues. La morphologie du lit du Rhône étant bien différente avant le XIXe siècle, avec un lit tressé et un débouché à la mer en de multiples bras, il est vraisemblable que les données les plus anciennes seront entachées d'erreurs importantes sur la reconstitution des débits. Ceci étant, si les données anciennes sur la période 1300-1800 (base HISTRHÔNE) permettent de positionner les crues de 1840, 1856 et 2003, non pas seulement comme les plus fortes depuis deux siècles mais sur une période beaucoup plus large, il est vraisemblable que cette information modifie notre estimation de la distribution des crues et des incertitudes associées.

- **Verrou n°1 : Reconstitution des débits anciens**



Un travail interdisciplinaire sera nécessaire pour exploiter et interpréter les sources d'information existantes sur les événements anciens issus de la base HISTRHÔNE. Rappelons qu'en l'état, les événements ont été répartis de façon qualitative en 5 grandes catégories (Pichard et al., 2017) : étiage, hautes-eaux, crue débordante, crue sévère, crue extrême, et en distinguant les crues avec présence de blocs de glace. L'objectif ici est de quantifier le débit des crues, avec l'incertitude associée. Le principe sera de partir du modèle hydraulique 1D MAGE existant, du Rhône du Léman à la mer, développé par Irstea dans le cadre de l'Observatoire des Sédiments du Rhône (OSR), en se focalisant sur le Rhône inférieur. A partir d'une analyse géomorphologique sur l'état du lit du Rhône à différentes époques et de discontinuités éventuelles dans les niveaux de basses-eaux, de données géométriques combinées à une analyse de la sédimentation des marges en s'appuyant sur les travaux de l'OSR, plusieurs modèles hydrauliques anciens seront établis pour estimer la relation hauteur-débit, par période homogène. Cette information sera ensuite incorporée dans la méthode BaRatin (Le Coz et al., 2014), avec un travail spécifique pour inclure dans la procédure bayésienne le calage des paramètres du modèle hydraulique et le calcul des incertitudes sur les débits (Westerberg et al., 2019).

- **Verrou n°2 : Analyse fine de la variabilité du régime du Rhône inférieur sur deux siècles (période 1816-2020)**

La série continue de débits de 1816 à 2020 sera croisée dans un premier temps avec l'historique connu des aménagements sur le lit du Rhône et sur le bassin versant. On s'intéressera à l'étude des crues morphogènes qui façonnent le lit du Rhône, et on regardera dans quelle mesure les ouvrages Girardon (épis transversaux réalisés au fin du XIXe siècle pour fixer le lit du Rhône) ont modifié les conditions de transfert amont-aval et in fine le régime aval du Rhône. Dans un second temps, la série de 1816-2020 sera croisée avec les reconstitutions d'étiages historiques issues du travail de thèse de Caillouet (2016) sur la période 1871-2012 (modèle SCOPE-Climat), l'analyse d'un siècle de variabilité hydro-climatique sur le bassin de la Durance (thèse de Kuentz, 2013), et les travaux de Brönnimann et al. (2019) sur la fréquence des crues en Europe centrale au XIXe siècle. On cherchera à faire la part de ce qui relève de la variabilité climatique « naturelle » et de celle liée aux impacts anthropiques (ouvrages hydrauliques, occupation du sol).

- **Verrou n°3 : Analyse à grande échelle sur sept siècles du régime des crues du Rhône et intérêt de l'information historique pour l'estimation des crues extrêmes**



A l'issue de la première étape, on disposera (cf. verrou n°1) de la plus longue série hydrométrique reconstituée en France, avec une quantification des incertitudes associées à chaque valeur. On s'intéressera à la variabilité climatique du régime du Rhône depuis sept siècles et à sa mise en relation avec des « proxys » climatiques disponibles par ailleurs (Bhend et al., 2012 ; Brönnimann, 2015). Puis un travail spécifique sera réalisé pour intégrer les événements de crue antérieurs de la période 1300-1800. L'analyse statistique devra être adaptée en conséquence (cf. fonction de vraisemblance utilisée dans le modèle fréquentiel ainsi que le modèle d'erreur) pour permettre de traiter un échantillon mixte composé d'une série continue (période récente 1816-2020) et d'une collection censurée de données (période ancienne 1300-1800). On pourra ensuite comparer les estimations de débits de crue de référence à partir de différentes périodes, montrer précisément le gain apporté par un recul chronologique plus large (cf. réduction de l'incertitude finale) et préciser les limites d'utilisation de données anciennes (cf. cas où l'incertitude finale augmente). L'hypothèse de stationnarité climatique sera discutée ainsi que des possibilités de s'en affranchir pour l'analyse statistique via l'introduction de co-variables climatiques.

### **3. Insertion du sujet de thèse dans le projet scientifique de l'UR**

#### **3.1 Cohérence avec les activités des équipes de recherche**

Le sujet de thèse mobilise des compétences de l'équipe « Hydrologie des bassins versants » en hydrologie statistique, analyse des incertitudes et hydroclimatologie, et de l'équipe « Hydraulique des rivières » en modélisation hydraulique et analyse du transport sédimentaire. Il se situe dans la continuité de travaux existants des deux équipes :

- Analyse des incertitudes en hydrométrie : Alliau *et al.* (2015), Horner *et al.* (2018), Kiang *et al.* (2018), Le Coz *et al.* (2014) ; Mansanarez *et al.* (2016), Mc Millan *et al.* (2017), Renard *et al.* (2006) ;
- Analyse fréquentielle avec information historique : Benito *et al.* (2004), Kjeldsen *et al.* (2010), Lang *et al.* (2010), Neppel *et al.* (2010), Naulet *et al.* (2005) ;
- Reconstitution hydro-climatique : Caillouet *et al.* (2016, 2017).

#### **3.2 Profil scientifique du doctorant à l'issue de sa thèse**

Le doctorant recherché devra être titulaire d'un Master 2 Recherche ou équivalent. Il devra avoir des bases solides en hydraulique fluviale et en hydrologie statistique.



Le caractère transversal du sujet de thèse, en lien avec l'hydrométrie, l'hydraulique fluviale, la géomorphologie, l'hydrologie statistique et l'hydro-climatologie, devrait donner plusieurs pistes de débouché professionnel au doctorant. Il pourra envisager un approfondissement sur l'une des thématiques traitées en poursuivant dans le domaine de la recherche, ou valoriser ses connaissances et savoir-faire en bureau d'étude ou en service opérationnel.

### 3.3 Valorisation scientifique et technique de la thèse

L'intérêt de l'approche développée pendant la thèse est de mettre au point un cadre d'analyse probabiliste qui intègre les incertitudes et de pouvoir apprécier l'apport et les limites des données anciennes pour l'étude du régime des cours d'eau. A ce titre, cette méthodologie pourra être exploitée et reprise sur d'autres grands fleuves français (Loire, Garonne, Seine, Rhin) ou internationaux (Danube, Yangtze...) pour lesquels on dispose d'informations qualitatives sur plusieurs siècles.

Par ailleurs, comme souligné par le GIEC (2012, p111) : *"Many weather and climate extremes are the result of natural climate variability, which provides the backdrop for anthropogenic climate changes"*. Le dernier rapport du GIEC (2014, fig. 5.14) mentionne l'existence de variabilités-oscillations climatiques en Europe à l'échelle de plusieurs décennies, ce qui montre bien la difficulté d'inférer les caractéristiques du climat à partir de séries courtes.

La longue série de débits reconstitués – avec incertitudes - sur le Rhône sur la période 1300-2020 pourra être partagée au sein du réseau international PAGES (<http://www.pages-igbp.org>), constitué d'environ 5000 scientifiques de 125 pays. Ce réseau s'intéresse à l'étude du climat passé, à partir de données historiques et paléo-climatiques. Cette série pourra faire l'objet de cas d'étude pour des cours d'hydrologie (ENTPE, Univ. Lyon) ou une école d'été sur le climat (réseau international PAGES, école universitaire H2O'Lyons).

D'un point de vue opérationnel, les éléments produits pendant la thèse pourront être utiles pour l'estimation des crues extrêmes, et recoupés avec les valeurs de référence retenues actuellement sur le Rhône aval, pour l'aménagement du territoire et la sécurité des personnes (digues, barrages, centrales nucléaires).

## 4. Faisabilité de la thèse

### 4.1 Partenariat

Des contacts exploratoires ont été pris avec les partenaires suivants :

- Georges Pichard (Université Aix-Marseille) : cf. verrou N°1 (accord de principe pour analyser en commun les données de la base HISTRHÔNE de la période 1300-2000) ;



- Hervé Piégay (ENS Lyon, UMR5600) et J.F. Berger, B. Mourier, T. Winiarski (scientifiques impliqués dans l'Observatoire des Sédiments du Rhône) : cf. verrou N°2 (accord de principe pour être associé à l'analyse géomorphologique du lit du Rhône à différentes époques) ;
- Jean-Philippe Vidal (Iristea Lyon) : cf. verrou N°2 (accord de principe pour croiser les résultats obtenus pendant la thèse avec la réanalyse climatique 20CR, période 1871-2016).

Par ailleurs, d'autres personnes seront sollicitées pour le comité de suivi : Robin Naulet (CNR Lyon), Pascal Billy (DREAL ARA), Thibaut Mallet (Symadrem), Vazken Andréassian (Iristea Antony), Stefan Brönnimann (Univ. Bern, Suisse).

## 4.2 Financement de la thèse

Cette thèse bénéficie d'une bourse de l'Ecole Universitaire de Recherche des Sciences de l'Eau et des Hydrosystèmes, EUR H2O'Lyon. Elle s'inscrit dans la continuité d'une première étude (Bard et Lang, 2017) commanditée par la DREAL Auvergne-Rhône-Alpes pour l'actualisation de l'étude globale des crues du Rhône (Safege Cettis, 2000) et de travaux exploratoires conduits à Péage-de-Roussillon dans le cadre de l'OSR.

## 4.3 Calendrier prévisionnel de la thèse

<b>Année 1 : Maîtrise des outils statistiques Collecte et analyse des données anciennes / Reconstitution des débits anciens</b>	Prise en main de la méthode BaRatin et de la chaîne de propagation des incertitudes jusqu'à l'estimation de la distribution des débits (cf. outils développés à Iristea Lyon)
	Prise en main du modèle hydraulique 1D MAGE existant, du Rhône du Léman à la mer, développé par Iristea dans le cadre de l'OSR, en se focalisant sur le Rhône inférieur
	Collecte et analyse des données anciennes (topographie du lit du Rhône, cotes d'inondation) en lien avec les travaux de l'Université d'Aix-Montpellier (cf. base HISTRHÔNE) et l'UMR5600 EVS dans le cadre de l'OSR
<b>Année 2 : Analyse fine de la période 1816- 2016</b>	Etablissement de modèles hydrauliques « anciens » pour la reconstitution des débits à Beaucaire sur plusieurs siècles, avec l'estimation des incertitudes associées (travail spécifique sur le couplage de Baratin avec un modèle hydraulique). Le repérage de détarages éventuels sera réalisé à partir d'informations sur la morphologie passée du Rhône et de discontinuités dans les niveaux de basses-eaux. Une chronologie complète des débits a été reconstituée sur le Rhône à Beaucaire depuis 1812. Elle sera complétée d'une estimation de débits sur les événements marquants de la période 1300-1800
	Définition des petites crues (dites morphogènes) qui façonnent le lit du Rhône. Analyse de l'évolution de leur occurrence et de leurs caractéristiques (durée, montée vs descente de crue...), qui pourra pour partie être liée aux évolutions morphologiques du lit. L'une des hypothèses est que les ouvrages Girardon réalisés à la fin du 19ème siècle ont profondément modifié la géométrie du lit (déconnexion des bras secondaires, incision du lit, accroissement de la granulométrie des fonds) conduisant à réduire le temps de transfert et <i>in fine</i> à modifier les hydrogrammes aval. C'est le changement morphologique le plus important sur le continuum Lyon - Arles.
	Mise en évidence de variabilités climatique dans le régime du Rhône à Beaucaire au



	<p>cours des deux derniers siècles. Croisement de la série de débits sur la période 1816-2016 avec les reconstitutions d'étiages historiques issues du travail de thèse de Caillouet (2016) sur la période 1871-2012 (modèle SCOPE-Climat), l'analyse d'un siècle de variabilité hydro-climatique sur le bassin de la Durance (thèse de Kuentz, 2013), et les réanalyses climatiques sur le Rhône amont (Brönnimann <i>et al.</i>, 2019). Recherche de causalités sur les changements du régime du Rhône, par exemple en termes de saisonnalité ou d'occurrence et de caractéristiques des petites crues, à relier avec de grandes modifications survenues sur le bassin ou sur le continuum rhodanien (barrages, endiguement, couverture glaciaire, couverture végétale...) ou de variabilités climatiques.</p>
<b>Année 3 : Etude de la variabilité du régime des du Rhône sur sept siècles et étude des crues extrêmes</b>	<p>Analyse de la variabilité climatique du régime du Rhône depuis sept siècles et mise en relation avec des « proxys » climatiques disponibles par ailleurs.</p>
	<p>Adaptation de la chaîne de propagation des incertitudes (hauteur, débit, distribution des débits) au cas de données censurées.</p>
	<p>Comparaison de l'estimation de la distribution des crues avec différents jeux de données (période des séries de données, seuil de perception des données anciennes, lois de probabilité). Un recouplement régional sur les estimations de quantiles de crue sera réalisé sur un secteur plus large (mer-Beaucaire-Avignon-Montélimar) à partir des séries hydrométriques disponibles sur le Rhône inférieur.</p>
	<p>Publication scientifique via 3 articles : Chaîne de propagation des incertitudes pour l'analyse fréquentielle de longues séries hydrométriques // Impact des aménagements réalisés sur le lit du Rhône au XIXe siècle sur le régime des crues // Variabilité climatique du régime du Rhône sur la période 1300-2020.</p>

## 5. Direction de la thèse

Le directeur de thèse sera Michel Lang (HdR en hydrologie statistique, 2000), avec deux co-encadrants : Jérôme Le Coz (HdR en hydrométrie et modélisation hydraulique, 2017) et Benjamin Renard (chargé de recherche en hydrologie statistique, spécialiste des incertitudes).

Chercheur	Direction de thèse	Co-encadrement de thèse
M. Lang	M. Darienzo (2017-2020)	/
J. Le Coz	/	L. Gond (2018-2021), M. Darienzo (2017-2020), G. Dramais (2016-2020), S. Pouchoulin (2016-2019)
B. Renard	/	M. Darienzo (2017-2020)

Benjamin Renard a obtenu une bourse Marie-Curie pour une mobilité de 2 ans en Australie (Université Adelaïde), à compter de mai 2019. Il sera associé à distance au suivi de la thèse, en particulier sur le verrou N°3.





## 6. Informations pratiques

Le doctorant est lié à IRSTEA par un contrat à durée déterminée donnant lieu à la protection sociale de droit commun. La durée du contrat est de trois ans. La rémunération mensuelle (janvier 2019) est de 1 874,41 € bruts (1506,46 € nets).

Le candidat devra avoir soutenu son master (ou équivalent) lors de la constitution de dossier de recrutement.

Les candidatures sont à adresser à [michel.lang@irstea.fr](mailto:michel.lang@irstea.fr) et à [jerome.lecoz@irstea.fr](mailto:jerome.lecoz@irstea.fr) avant le 30 juin 2019. Le dossier devra comprendre les pièces suivantes :

- Dossier de candidature ci-joint (4 pages) : Etat civil, Formations, Stages, Emplois, Langues, autres informations
- CV;
- Photocopies de la carte d'identité ou de la carte de séjour ;
- Version électronique d'un rapport de stage ou mémoire de Master ou article... qui donne une idée des travaux déjà réalisé par le candidat ;
- Projet de thèse en 2-3 pages.

Un entretien aura lieu dans la première semaine de juillet pour les candidats ayant été sélectionnés après examen du dossier. La décision finale sera communiquée d'ici mi-juillet.



## Références bibliographiques des chercheurs d'Irstea Lyon sur le sujet de thèse

- Alliau *et al.*, 2015. Etude du risque d'inondation d'un site industriel par des crues extrêmes : de l'évaluation des valeurs extrêmes aux incertitudes hydrologiques et hydrauliques. *La Houille Blanche*, 2, 70-77, doi : [10.1051/lhb/2015021](https://doi.org/10.1051/lhb/2015021)
- Bard A., Lang M., 2017. *Actualisation de l'hydrologie du Rhône. Analyse de la station de Beaucaire*. Rapport Hydro-Consultant, Irstea pour la DREAL Auvergne-Rhône-Alpes, 56p.
- Benito G. *et al.*, 2004. Use of Systematic, Palaeoflood and Historical data for the improvement of flood risk estimation. Review of scientific methods. *Natural Hazards, Special Issue on Strategies and applications in Natural Hazard Research Using Historical Data*. Ed. Glade T. and Lang M., Kluwer Academic Publishers, 31 (3), March, 623-643.
- Caillouet *et al.*, 2016. Probabilistic precipitation and temperature downscaling of the Twentieth Century Reanalysis over France. *Climate of the Past*, vol. 12, n° 3, p. 635-662
- Caillouet *et al.*, 2017. Ensemble reconstruction of spatio-temporal extreme low-flow events in France since 1871. *Hydrology and Earth System Sciences*, vol. 21, n° 6, p. 2923-2951
- Chauveau *et al.*, 2013. Quels impacts des changements climatiques sur les eaux de surface en France à l'horizon 2070 ? *La Houille Blanche*, 4 : 5-15, doi: [10.1051/lhb/2013027](https://doi.org/10.1051/lhb/2013027).
- Horner I. *et al.*, 2018. Impact of stage measurement errors on streamflow uncertainty, *Water Resources Research*, 54, 1952-1976
- Kiang J. *et al.*, 2018. A comparison of methods for streamflow uncertainty estimation, *Water Resources Research*, 54, 7149– 7176. <https://doi.org/10.1029/2018WR022708>
- Kjeldsen T. R. *et al.*, 2014. Documentary evidence of past floods in Europe and their utility in flood frequency estimation *J. Hydrology*, 517, 963-973, doi : [10.1016/j.jhydrol.2014.06.038](https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2014.06.038)
- Lang M. *et al.*, 2010. Extrapolation of rating curves by hydraulic modelling, with application to flood frequency analysis. *Hydrological Science Journal*, 55(6), 883-898, doi : [10.1080/02626667.2010.504186](https://doi.org/10.1080/02626667.2010.504186)
- Le Coz J. *et al.*, 2014. Combining hydraulic knowledge and uncertain gaugings in the estimation of hydrometric rating curves: a Bayesian approach, *Journal of Hydrology*, 509, 573–587, doi: [10.1016/j.jhydrol.2013.11.016](https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2013.11.016).
- Mansanarez V. *et al.*, 2016. Bayesian analysis of stage-fall-discharge rating curves and their uncertainties, *Water Resources Research*, 52, 7424-7443, doi : [10.1002/2016WR018916](https://doi.org/10.1002/2016WR018916)
- McMillan H. *et al.*, 2017. How uncertainty analysis of streamflow data can reduce costs and promote robust decisions in water management applications?, *Water Resour. Res.*, 53, 5220-5228, doi: [10.1002/2016WR020328](https://doi.org/10.1002/2016WR020328)
- Naulet R. *et al.*, 2005. Flood frequency analysis on the Ardèche river using French documentary sources from the two last centuries. *Journal of Hydrology*, 313 (1-2), 58-78, doi: [10.1016/j.jhydrol.2005.02.011](https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2005.02.011)
- Neppel L. *et al.*, 2010. Flood frequency analysis using historical data: accounting for random and systematic errors. *Hydrological Science Journal*, 55 :2, 192-208., doi : [10.1080/02626660903546092](https://doi.org/10.1080/02626660903546092)
- Renard B. *et al.*, 2006. An application of Bayesian analysis and Markov chain Monte Carlo methods to the estimation of a regional trend in annual maxima. *Water Resources Research*, 42:W12422, doi: [10.1029/2005WR004591](https://doi.org/10.1029/2005WR004591)

## Références bibliographiques externes sur le sujet de thèse

- Bhend J., Franke J., Folini D., Wild, M., Brönnimann S., 2012.: An ensemble-based approach to climate reconstructions, *Clim Past* 8, 963–976, 2012, <https://doi.org/10.5194/cp-8-963-2012>
- Brönnimann S., 2015. *Climatic changes since 1700*. Springer, Advances in Global Change Research Vol. 55, xv + 360 pp.
- Brönnimann S., Frigerio L., Schwander M., Rohrer M., Stucki P., Frankeet J., 2019. Causes for increased flood frequency in central Europe in the 19th century, *Clim. Past Discuss.*, <https://doi.org/10.5194/cp-2019-17>
- GIEC, 2012. *Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance Climate Change Adaptation*. Special Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, 582 p., <https://www.ipcc.ch/report/managing-the-risks-of-extreme-events-and-disasters-to-advance-climate-change-adaptation/>
- GIEC, 2014. Climate Change 2013: *The Physical Science Basis*, Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, 1585p., <https://www.ipcc.ch/report/ar5/wg1/>
- Kuentz A., 2013. *Un siècle de variabilité hydro-climatique sur le bassin de la Durance : Recherches historiques et reconstitutions*. Thèse AgroParisTech, 345p.
- Pichard G., 1995. Les crues sur le bas-Rhône de 1500 à nos jours. Pour une histoire hydro-climatique, *Méditerranée*, 3-4, 1995, 105-116.
- Pichard G., 1999. *Espaces et nature en Provence – L'environnement rural 1540-1789*, Thèse, Université de Provence, 1999, 1713p.
- Pichard G., Arnaud-Fassetta G., Moron V., Roucaute E., 2017. Hydroclimatology of the Lower Rhône Valley: historical flood reconstruction (AD 1300–2000) based on documentary and instrumental sources, *Hydrological Sciences Journal*, 62:11, 1772-1795, doi: [10.1080/02626667.2017.134931](https://doi.org/10.1080/02626667.2017.134931)
- Pichard G., Roucaute E., 2014. Sept siècles d'histoire hydroclimatique du Rhône d'Orange à la mer (1300-2000) : climat, crues, inondations. *Méditerranée, revue géographique des pays méditerranéens*. Numéro hors-série, Université Aix-Marseille, 192 p.
- Safege Cettis, 2000. *Etude globale pour une stratégie de réduction des risques dus aux crues du Rhône. Analyse hydrologique*. Territoire Rhône, 200 p.
- Westerberg I, Mansanarez V., Lyon S., 2019. Cost-effective gauging strategies for reduction of uncertainty in streamflow estimation, *Geophysical Research Abstracts*, Vol. 21, EGU2019-13566.