



Actualisation de l'hydrologie des crues du Rhône

Rapport général Phase 1 : Collecte, analyse et critique des données de base



La crue du Rhône en 1856, Quai des Célestins à Lyon (BDHI 2016)

Titre : Actualisation de l'Hydrologie des crues du Rhône
Sous-Titre : Rapport Phase 1 : Collecte, analyse et critique des données de base
Objet : Rapport général
Client : Dreal Auvergne-Rhône-Alpes
Date : 25/04/2018
Version : Finale
Auteur : Antoine Bard (Hy-dro Consultant)
Michel Lang (Irstea)
Ref : Rhone_A01

HY-DRO CONSULTANT

756 Route du Pey, 383350 Lavalens, France
07 82 56 66 63 | antoine.bard@hydro-consultant.com

Irstea – Unité Hydrologie – Hydraulique

5 Rue de la Doua, 69616 Villeurbanne, France

ORGANISATION DES ÉLÉMENTS DE RESTITUTION

A Rapports généraux

- [A01 Rapport général Phase 1 : Collecte, analyse et critiques des données de base](#)
- [A02 Rapport général Phase 2 : Hydrologie des crues du Rhône](#)
- [Annexes A - Archives consultées](#)

B Rapports détaillés

- [B01 Rapport détaillé - Analyse de la station de Pougny](#)
 - [B02 Rapport détaillé - Analyse de la station de Bognes](#)
 - [B03 Rapport détaillé - Analyse de la station de Seyssel](#)
 - [B04 Rapport détaillé - Analyse de la station de Châteaufort](#)
 - [B05 Rapport détaillé - Analyse de la station de Brens](#)
 - [B06 Rapport détaillé - Analyse de la station de Lagnieu](#)
 - [B07 Rapport détaillé - Analyse de la station de Lyon](#)
 - [B08 Rapport détaillé - Analyse de la station de Ternay](#)
 - [B09 Rapport détaillé - Analyse de la station de Valence](#)
 - [B10 Rapport détaillé - Analyse de la station de Chusclan](#)
 - [B12 Rapport détaillé - Analyse de la station de Beaucaire](#)
-
- [Annexes B I - Courbes de tarage](#)
 - [Annexes B II - Débits réestimés](#)
 - [Annexes B III - Echantillon de crue](#)
 - [Annexes B IV - Quantiles extrapolés](#)
 - [Annexes B V - Hydrogrammes de crue](#)

Table des matière

[Collecte des données4](#)

[Sources et archives consultées4](#)

[Archives CNR4](#)

[Archives Départementales de l'Hérault5](#)

[Archives Départementales du Rhône5](#)

[Données de l'Observatoire des sédiments du Rhône5](#)

[Travaux de Georges Pichard à Beaucaire5](#)

[Point sur la collecte par station6](#)

[Connaissance des stations6](#)

[Bilan de la collecte de données6](#)

[Stations additionnelles de Châteaufort et Chusclan7](#)

Données collectées et méthode d'estimation des incertitudes	8
Conclusion sur la collecte de données	9
Méthode BaRatin : réestimation des courbes de tarage et des débits	11
Principes de la méthode BaRatin	11
Courbe de tarage simple	11
Courbe de tarage double niveau	12
Propagation des incertitudes aux hydrogrammes	13
Structure des résultats de la méthode BaRatin	17
Application de la méthode BaRatin aux stations du Rhône	18
Stations simples / doubles	18
Incertitudes liées aux jaugeages	19
Bilan de la réestimation des débits par la méthode BaRatin	20
Réestimations des courbes de tarage par la méthode BaRatin	20
Adéquation débits réestimés et débits de référence	22
Modèle d'incertitude	26
Principe du modèle d'incertitude	26
Evolution de l'incertitude en fonction du temps, cas des stations de Bognes et Beaucaire	27
Elaboration d'un scénario hydrométrique historique simplifié	29
Facteurs d'inflation des incertitudes reconstituées pour les périodes anciennes	29
Conclusions	34
Collecte de données	34
Estimation des incertitudes par la méthode BaRatin	34
Bibliographie.....	33

INTRODUCTION

Historiquement l'hydrologie du Rhône était établie par la Compagnie Nationale du Rhône, gestionnaire de la plupart des stations hydrométriques, depuis les études des aménagements. La CNR reprenait elle-même depuis 1933 la tâche confiée auparavant au Service Spécial du Rhône des Ponts et Chaussées depuis le XVIII^{ème} siècle.

En 2000, l'étude globale sur le Rhône (EGR)[CITATION Rigaudiere2000 \l 1036] a repris toute l'étude hydrologique du Rhône (réalisé par SAFEGE). Les résultats sont cependant restés proches des données antérieures du fait de l'utilisation de la même méthode de calcul. Seules des approches complémentaires ont été menées sur les hydrogrammes de crue : hydrogrammes synthétiques mono-fréquence, et sur la caractérisation des crues historiques. Cette étude était jusqu'aujourd'hui l'étude hydrologique de référence pour la connaissance des valeurs de quantiles de crue (périodes de retour 10, 100 et 1000 ans) sur le cours principal du Rhône et ses affluents.

L'État (SAFEGE, prestataire de l'EGR, pour la DREAL RA/SPR/Mission Rhône) a procédé en 2014 à une mise à jour de l'hydrologie EGR consistant à intégrer les données post EGR (2000 à 2013) sur les stations aval (Viviers et Beaucaire) où des crues significatives se sont produites pour disposer d'une actualisation minimale en vue des dossiers d'opérations sur les ouvrages. Les résultats ont montré une évolution peu significative des débits caractéristiques (2 à 3%). Cependant, cette actualisation n'a pas inclus de réflexion méthodologique, ni de critique des échantillons exploitées (crues de 1993 et 1994 et conclusions de la conférence de consensus) ou d'intégration de crues plus anciennes (1840) dans la série.

Depuis, les résultats du projet EXTRAFLO[CITATION Lang_2014 \l 1036] , lancé dans le cadre du programme Risques Naturels de l'Agence Nationale de la Recherche, conduit par IRSTEA avec la participation de la CNR, d'EDF et de bureaux d'études (ARTELIA), ont amenés de nouveaux éléments méthodologiques par la comparaison des méthodes d'estimation des événements extrêmes en France.

Objectifs d'une actualisation plus générale

La DREAL Auvergne-Rhône-Alpes/SBRMPR/Pôle Plan Rhône a piloté une réflexion sur la question de l'actualisation globale de l'hydrologie du Rhône, en examinant les aspects méthodologiques, dans le cadre des objectifs d'amélioration de la connaissance du Plan Rhône. Cette réflexion préalable a été menée avec les services de prévision des crues Rhône-amont Saône et Grand Delta, la CNR et le SYMADREM (principaux acteurs sur le Rhône).

Il en est ressorti un consensus sur le besoin et la pertinence de données hydrologiques actualisées, communes et partagées sur le Rhône. L'actualisation de l'hydrologie du Rhône doit ainsi bénéficier des apports méthodologiques récents et s'appuie sur :

- Une mise à jour des données exploitées dans l'EGR par les données nouvellement observées mais également par l'intégration de données anciennes. Une critique qualitative de ces données notamment par la caractérisation des incertitudes associées,
- L'exploitation des conclusions de la démarche EXTRAFLO d'inter-comparaison des méthodes pour l'élaboration des quantiles (débits caractéristiques) et des hydrogrammes synthétiques de crue, avec une évaluation de la cohérence des résultats entre stations,

- Une évaluation des apports méthodologiques de l'opération et une évaluation des possibilités de prolonger la démarche en intégrant des données historiques plus anciennes qui seront à collecter ou à reconstituer.

Etude d'actualisation de l'hydrologie du Rhône

Ce travail d'actualisation est mené sur le cours du Rhône, en exploitant les données de dix stations hydrométriques principales sur le Rhône :

- Pougny,
- Bognes,
- Pont de Seyssel,
- Brens,
- Pont de Lagnieu,
- Lyon Perrache,
- Ternay – Givors,
- Valence,
- Viviers,
- Beaucaire-Tarascon,

Complété par deux stations additionnelles :

- Chateaufort,
- Chusclan.



Figure 0-1 : Carte de localisation des stations

La particularité du travail réalisé ici est de prendre en considération les incertitudes sur la reconstitution des débits, qui varient suivant la qualité des courbes de tarage et la fréquence-précision des relevés de hauteur. Plusieurs auteurs [CITATION Lang_2010 \l 1036][CITATION doi:10.1080/02626660903546092 \l 1036] ont souligné que la qualité de l'estimation des quantiles de crue varie en fonction de la longueur de la série disponible (distribution d'échantillonnage) et également des incertitudes propres à chaque valeur de crue de l'échantillon.

Les crues survenues depuis 20 ans sur le bassin du Rhône, notamment en décembre 2003 ont rappelé les problématiques de l'aléa inondation, ainsi que la difficulté de mesurer directement les forts débits sur le fleuve [CITATION Anselmo2005 \l 1036]. Dans ce contexte la présente étude propose de réviser les débits caractéristiques de crue du Rhône en prenant compte dans l'ensemble de la chaîne d'incertitude depuis la mesure jusqu'à l'estimation des débits via les courbes de tarage puis à l'extrapolation statistique des quantiles de crues.

Cette première partie est dédiée à la collecte et à la critique de données sur douze stations. Nous présenterons d'abord l'ensemble des données qui ont pu être collectées dans le cadre de l'étude au paragraphe 1. Nous détaillerons, au paragraphe 2, la méthode BaRatin qui permet le traitement des incertitudes au travers de l'estimation de la courbe de tarage. Nous ferons ensuite un bilan des réestimations de débits par cette méthode par rapport aux débits précédemment estimés aux

stations d'étude, paragraphe 3. Enfin nous présenterons, au paragraphe 4, le modèle d'erreur qui a été mis en place pour se substituer à la méthode BaRatin lorsque celle-ci n'est pas applicable.

1 COLLECTE DES DONNÉES

Le Rhône fait l'objet d'une attention constante de la part de la Compagnie National du Rhône (CNR) pour la navigation et la gestion des ouvrages hydro-électriques, par les services de l'état : DREAL et les Services de Prévisions des Crues (SPC) pour la gestion et la prévision du risque, ainsi que par le SYMADREM pour le suivi de 240 km de digues sur le delta du Rhône. L'étude s'inscrit également à la suite de l'Etude Globale du Rhône (EGR) achevée en 2000 et révisée en partie en 2014.

L'objectif de la collecte de données a été de rassembler les données existantes et en particulier les données relatives aux crues historiques avec pour ambition l'application de la méthode BaRatin développée par l'IRSTEA. Pour son application trois types de données sont nécessaires :

- Les mesures brutes, dans la plupart des cas les données limnimétriques à la station,
- Les données relatives à l'établissement des courbes de tarage à savoir les jaugeages,
- L'information sur l'environnement hydraulique au droit de la station, en particulier ses caractéristiques géométriques de la section d'écoulement.

Ainsi les données recherchées dans le cadre de l'étude doivent idéalement permettre d'appréhender l'ensemble de la chaîne de reconstitution des débits (via les hauteurs et les courbes de tarage), et ce **pour l'ensemble de la période temporelle considérée.**

1.1 Sources et archives consultées

En première approche, et comme prévu initialement, les sources suivantes ont été consultées :

- **L'étude Globale du Rhône [CITATION Rigaudiere2000 \l 1036],**
- **Les archives de l'Institut Rhône Saône**, versées aux Archives Départementales de la Drôme,
- **Archives numériques de la CNR.**

Le travail de critique des données hydrométriques réalisé lors de l'Etude Globale du Rhône n'a malheureusement pas été retrouvé, y compris dans les archives départementales de la Drome qui héberge désormais les documents de l'EPTB Rhône Saône.

Pour la période temporelle récente, toutes les informations numériques sont disponibles afin de pouvoir réaliser une analyse des incertitudes par la méthode BaRatin, avec comme limitation que cette période est relativement restreinte. Dans le cas des stations les mieux renseignées cette durée est au maximum de 45 ans (depuis les années 70, date de création des bases numériques).

Un second travail de recherche en archives a dû être mené afin de pouvoir étendre les perspectives d'application de la méthode, sans quoi l'étude n'aurait eu que peu d'intérêt. L'ensemble des sources d'archives consultées est listé ci-dessous, ainsi que les types de données disponibles puis la synthèse des données collectées par station est présentée.

1.1.1 Archives CNR

Un important travail a été menée en collaboration avec la CNR sur ses fonds d'archives propres, qui a permis le recensement et la numérisation des archives pour les stations principales du Rhône. De manière exhaustive le fond d'archive des services généraux, ainsi que les archives « vives » du service d'hydrométrie ont été prospectées. L'ensemble des archives numérisées est listé en Annexe A.

D'un point de vue général, ceci a permis d'étendre la connaissance des stations souvent jusqu'à l'implantation des stations de mesures. Néanmoins le bilan de la numérisation doit être nuancé par type de données. Les données de jaugeages sont « facilement » numérisées car existant sous la forme de tableau de synthèse annuelle et représentant un volume restreint de données à saisir. Pour les données limnimétriques le format est difficilement exploitable car sous la forme de tracé continu sur rouleau papier, dont la numérisation se révèle trop longue, et trop imprécise avec les recalages

temporels et d'échelle. Toutefois des tableaux de synthèse de crue annuelle permettent de reconstituer un jeu de données limnimétriques dans le temps, mais celui-ci reste limité pour la phase n°2 de l'étude aux données maximales annuelles.

1.1.2 [Archives Départementales de l'Hérault](#)

Pour la station de Beaucaire, les limnigrammes papier de la station, reprenant soit la cote moyenne journalière, soit les trois cotes journalières sont disponibles pour la période 1830-1928. Néanmoins leur exploitation retombe sur les problématiques citées précédemment : effort de numérisation important et imprécision conséquente sur le tracé.

1.1.3 [Archives Départementales du Rhône](#)

De nombreuses archives sont disponibles sur les stations de l'ensemble du linéaire du Rhône. Trois types de données principales sont rencontrés :

- Relevés trois cotes journalières pour 34 stations de 1884-1976,
- Tableaux des hauteurs classées pour 22 stations de 1845-1975,
- Autres données dont relevés des maxima aux échelles du Rhône 1840-1950 et tableaux des crues importantes de 1840-1957.

L'ensemble des documents est détaillé en Annexe A. La numérisation des relevés des trois cotes journalières a été entreprise par la DREAL AURA, mais n'a pas abouti à l'heure actuelle, l'acquisition de ces données reste donc en suspens. Les relevés de maxima aux échelles sont par contre exploités dans cette étude.

1.1.4 [Données de l'Observatoire des sédiments du Rhône](#)

L'Observatoire des sédiments du Rhône a mis en place une base de données, hébergée par l'Ecole Normale Supérieure de Lyon. Cette base est particulièrement fournie en données géographiques relatives à la morphologie du Rhône. Les données suivantes ont été collectées :

- Carte topographique de l'intégralité du linéaire du cours du Rhône (1860), dressée par les Services Spéciaux du Rhône,
- Cartes bathymétriques du Rhône de Lyon à la mer (1897-1908),
- Autres données :
 - Lignes d'eau à l'étiage de 1867-1868 sur le Haut-Rhône et de 1902-1903 sur le Bas-Rhône,
 - Profil en travers disponibles ponctuellement sur la période 1860, 1960, 2009 sur le tronçon Vallabrègues - Beaucaire.

Il s'agit d'une source d'information pertinente au regard de la compréhension hydraulique des sites d'étude.

1.1.5 [Travaux de Georges Pichard à Beaucaire](#)

Les travaux de l'historien Georges Pichard croisent plusieurs sources de données, notamment les archives des services de navigation et des services spéciaux des Ponts et Chaussées ainsi que du Syndicat des Chaussées de Beaucaire à la mer. Cet important travail a permis de reconstituer une chronique limnigraphique journalière à Beaucaire sur la période 1816-1967, combinant à la fois un relevé journalier à plusieurs relevés journaliers lors des crues [CITATION Pichard2017 \l 1036].

1.2 Point sur la collecte par station

1.2.1 Connaissance des stations

Une première difficulté pour retracer l'historique des stations de mesure est liée aux changements de localisation des sites, s'accompagnant la plupart du temps d'un changement du nom de la station. Ainsi sur les dix stations principales du Rhône aucune n'est restée inchangée depuis son implantation. Les regroupements des séries de mesures issue d'une station proche au nouveau site sont nombreux. La liste suivante donne les principaux changements rencontrés :

- Pougny PK 186.6 -> Pougny PK 189.78,
- Génissiat PK 161.816 -> Bognes PK 160.775 -> Bognes PK 160.625,
- Pont de Seyssel PK 150.29 -> Corbonod PK 151.3,
- Pont de St Blaise -> Balme PK 116.260 -> Brens PK 114.6,
- Le Sault PK 62.3 -> Sault-Brenaz PK 61.5 -> Pont de Lagnieu PK 56,
- Lyon Perrache Pont Morand, les mesures aux échelles de Poincaré, Saint Clair, et de la Feuillée se chevauchent chronologiquement,
- La Mulatière PK 0.7 -> Givors PK 19.07 -> Ternay PK 15.2,
- Pont de Valence PK 109.7 -> Cornas PK 104.3 -> Bourg les Valence PK 120.2,
- Le Teil PK 158 -> Le Teil Joviac 158.4 -> Pouzin PK 132.8 -> Viviers PK 166.5,
- Pont de Beaucaire PK 267.7 -> Beaucaire Restitution PK 269.6.

D'un point de vue général, les modifications des stations de mesure sont bien renseignées, néanmoins ces changements rendent difficile la recherche des valeurs limnigraphiques ainsi que les jaugeages.

1.2.2 Bilan de la collecte de données

Le Tableau 1-2 résume l'ensemble des chroniques limnigraphiques, hydrographiques et les jaugeages collectés aux stations.

La relation hauteur-débit au droit de chaque station est appréciée de manière relative car elle résulte à la fois d'un savoir expert sur le fonctionnement hydraulique et du croisement de sources d'information qui varient selon les stations. La méthode BaRatin a été appliquée pour l'estimation des courbes de tarage et des incertitudes associées de chaque station lorsque les données disponibles le permettaient. Dans le cas contraire, des hypothèses forfaitaires sur les incertitudes ont été retenues, par analogie entre périodes ou entre stations.

La profondeur de l'historique des stations a pu être améliorée au-delà de 45 ans sur le XX^{ème} siècle sans pour autant que la couverture soit complète. Alors que la collecte des données de jaugeages a permis de combler les vides depuis le milieu du XX^{ème} siècle, les lacunes sont souvent situées de la fin du XIX^{ème} au début du XX^{ème} siècle. On retrouve également, de façon quasi systématique, une période manquante dans les années 1980-1990. En ce qui concerne les données limnigraphiques, en dehors du fait que les chroniques continues ne sont pas numérisées, les documents de synthèse sur la crue annuelle permettent de remonter dans tous les cas jusqu'en 1840. Toutefois sauf pour la station de Beaucaire, entre 10 et 30 ans de données sont généralement manquants des années 1950 aux années 1990.

La station de Beaucaire est finalement la mieux renseignée ; l'historique des jaugeages et les chroniques limnigraphiques peuvent permettre une réestimation des débits de manière continue depuis 1874 à nos jours en disposant de toutes les données nécessaires. En faisant des suppositions sur la relation hauteur débit on pourra réestimer les valeurs de débit depuis les premières mesures disponibles en 1816, et depuis 1840 pour les fortes valeurs de crue en exploitant les annuaires de crues.

En considérant les chroniques les plus longues qui correspondent aux débits maximaux annuels, la collecte de données a permis l'ajout de 472 années supplémentaires aux échantillons vis-à-vis de l'étude EGR.

Station hydrométrique	Étude EGR 2000	Étude 2017	Ajouts (ans)
Pougny	1925-1998	1925-2016	+18
Bognes	1904-1998	1853-2015	+68
Seyssel	1958-1993	1841-2016	+140
Châteaufort	non étudiée	1953-2016	
Brens	1953-1998	1953-2016	+18
Lagnieu	1891-1998	1891-2016	+18
Lyon	1900-1998	1840-2015	+77
Ternay	1895-1998	1840-2016	+73
Valence	1855-1998	1855-2016	+18
Viviers	1910-1998	1910-2016	+18
Chusclan	non étudiée	1950-2015	
Beaucaire	1840-1998	1816-2016	+42
		TOTAL	+472

Tableau 1 : Bilan de la collecte de données

1.2.3 Stations additionnelles de Châteaufort et Chusclan

Station de Châteaufort

Cette station se situe à la confluence entre le Rhône et le Fier en rive droite, juste en aval de la station de Seyssel sur le Rhône. Très peu d'éléments sur l'historique de cette station ont été collectés. Son implantation date au moins des années 1950, car des jaugeages ont été retrouvés pour la période 1950-1980. On ne retrouve pas cette station dans les annuaires de crues maximales annuelles. Aucun limnigramme n'a pu être collecté. Cette station se situe aujourd'hui dans la retenue de Chautagne (mise en service en 1980). Les débits y sont reconstitués par addition des débits du Rhône (vraisemblablement pris à Seyssel) et des débits du Fier (pris à l'usine de Motz) sur la période 1992-2016. En l'état seules les chroniques fournies par la CNR sont exploitées.

Station de Chusclan

Cette station se trouve sur le Rhône proche du PK 208, en amont de la confluence avec la Cèze en rive droite. On ne trouve que peu d'information sur l'historique de cette station. Celle-ci n'apparaît dans aucun des annuaires de crue annuelle collectés. L'échelle historique la plus proche serait éventuellement celle de Roquemaure mais cette dernière n'intègre pas les apports de la Cèze. Aucun jaugeage ni aucun limnigramme n'a été trouvé pour cette station. Une chronique de débit maximum annuel a été fournie par la CNR sur la période 1950-2016. Aujourd'hui la station se situe dans la retenue de Caderousse, et il s'agit d'une station à ultra-sons.

Pour la station de Chusclan les possibilités de reconstitution des débits sont limitées, les chroniques de débit sur la Cèze ne permettent pas d'étendre la période avant 1950 : les mesures à Chusclan de la Cèze sont disponibles depuis 1993 et la plus longue chronique en banque hydro remonte à 1961 à Roque sur Cèze. Une autre possibilité serait de reconstituer le débit depuis les mesures aval Roquemaure ou Arles, mais elle est trop incertaine du fait des affluents en jeu : l'Aigues et la Durance, en plus des apports directs drainés par le Rhône. En l'état seules les chroniques fournies par la CNR sont exploitées.

1.2.4 Données collectées et méthode d'estimation des incertitudes

Il convient de distinguer deux types de situations. Premièrement, lorsque les données disponibles permettent de réestimer les débits et les incertitudes associées par la méthode BaRatin ; ce sont les périodes vertes sur la Figure 1-2. Il s'agit soit de périodes où les chroniques limnigraphiques sont disponibles en continu (au pas de temps horaire), soit de l'exploitation des cotes ponctuelles, extraites des annuaires de crues et donc uniquement pour la réestimation des débits de pointe.

Dans les autres cas toutes les données nécessaires à l'application de BaRatin n'ont pas pu être collectées, seules les données de débits sont présentes, soit de manière continue au pas de temps horaires pour la période récente ou au pas de temps journalier depuis le début du XX^{ème} siècle, soit de manière ponctuelle mais sur une période ancienne comme pour les débits de pointe tirés des annuaires de crue. Dans ce deuxième cas les incertitudes seront estimées via le modèle d'erreur décrit au paragraphe 4.

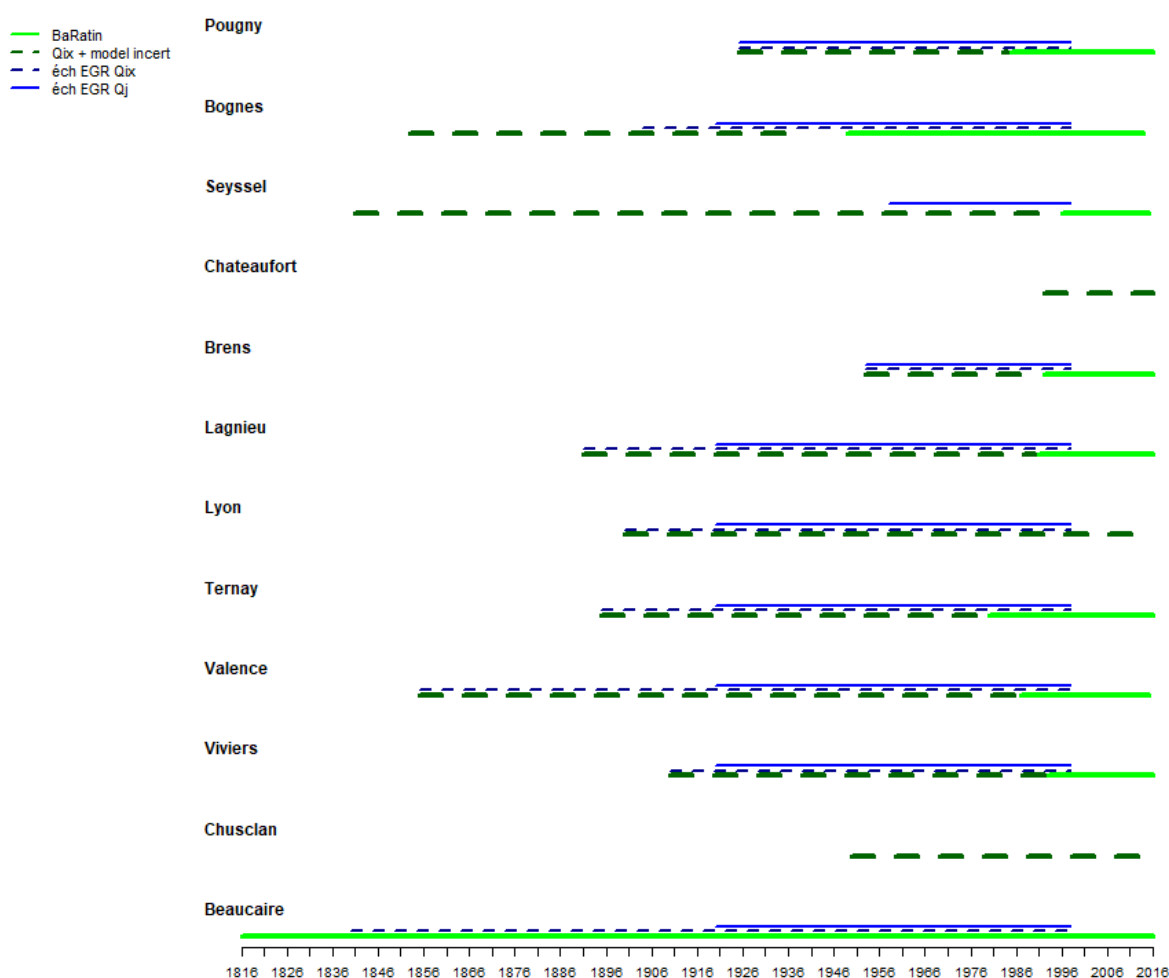


Figure 1-2 : disponibilité des données par station et par type de chronique

Station	Pougny	Bognes	Pont de Seyssel	Brens (Balme)	Pont de Lagnieu	Lyon rache Morand	Per-Pont	Ternay-Givors-La latière
Données limni								
> Moyen Horaire	1985-2016	1969-2016	1984-2016	1988-2016	1987-2016	1992-2014		1980-2016
> Moyen journalier								

> Maxi Annuel		1949-1969	1840-1977	1840-1955	1840-1977	1840-1955	1840-1969
> Sup-seuil							1895-1955
Données hydro							
> Moy Journalier	1925-2016	1920-2016	1958-2016	1956-2016	1920-2016	1920-2016	1920-2016
> Moy Horaire	1985-2016	1969-2016	1984-2016	1988-2016	1991-2016	1992-2016	1980-2016
> Maxi Mensuel	1963-2016	1948-2016	1985-2016	1956-2016	1954-2016	1920-2016	1918-2016
> Maxi Annuel	1925-2016	1853-2016	1958-2016	1953-2016	1891-2015	1900-2015	1895-2016
Jaugeages							
> Courant	1990-2016	1990-2014	1993-2013	1994-2016	1993-2016	1994-2016	1993-2016
> Historique	1964-1987	1948-1987	1968-1987	1954-1987	1948-1987	1858-1911 / 1956-1987	1955-1969 / 1980-1987
Périodes manquantes							
Données limni			1978-1983	1956-1987	1978-1986	1956-1991	1965-1977
Jaugeages			1840-1967	1840-1953	1840-1947	1840-1857	1840-1955
	1988-1989	1988-1989	1988-1992	1988-1993	1987-1992	1912-1955	1970-1977
						1988-1993	1988-1993

Tableau 1-2 : Synthèse des données collectées au 10 stations principales du Rhône

1.3 Conclusion sur la collecte de données

En ce qui concerne la collecte des données, les principales sources de données accessibles ont été exploitées. De nombreux efforts ont été consacrés à l'acquisition de données d'archives permettant d'étendre la période d'analyse plus en profondeur sur le XX^{ème} siècle et jusqu'au milieu du XIX^{ème} siècle pour le cas particulier de la station de Beaucaire.

En termes d'analyse il sera nécessaire de distinguer l'utilisation des données ponctuelles, des données continues. Les premières sont bien renseignées pour les crues ou les étiages au travers des annuaires hydrologiques qui ont facilement perduré jusqu'à aujourd'hui. Les secondes sont plus difficilement exploitables, les relevés journaliers à l'échelle puis les tracés limnigraphiques ont souvent été conservés, mais leur exploitation nécessite la numérisation de l'ensemble de ces documents. De nombreuses archives sont identifiées mais la numérisation des limnigraphes papiers est trop chronophage pour être pour le moment envisagée. L'application de techniques de numérisation avec reconnaissance graphique avancée ou des campagnes de saisie de grande ampleur pourraient palier à cette limite.

Les données de jaugeages ou relatives à l'établissement des relations hauteur-débit sont également vitales et difficilement disponibles. La recherche en archives devra être approfondie puisque ces documents n'ont pas été aujourd'hui tous recensés. Le champ d'action pourrait être étendu aux directions locales de la CNR, dont les archives n'ont pas été consultées, en tenant compte des changements d'appellation et de localisation des stations. Une autre piste pourrait être la numérisation des tracés de courbe de tarage anciennes sur lesquelles les valeurs de jaugeages sont

souvent reportées. Mais celles-ci n'indiquent pas forcément ni leur date ni le type de mesure effectué, ce qui est pénalisant pour l'estimation des incertitudes.

Pour ce qui est de l'évolution morphologique des tronçons au droit des stations, une nouvelle source de données pourrait se trouver dans l'exploitation des orthophotographies de la base BD HISTO de l'IGN. Si quelques clichés ont été exploités de façon ponctuelle, leur utilisation systématique par SIG sur l'ensemble de la période temporelle n'a pas encore été explorée.

2 MÉTHODE BARATIN : RÉESTIMATION DES COURBES DE TARAGE ET DES DÉBITS

La méthode BaRatin (pour BAYesian RATINg curve analysis, Le Coz, et al. 2014) repose sur l'inférence bayésienne. Elle permet de prendre en compte d'une part la connaissance sur le fonctionnement hydraulique du site et d'autre part les jaugeages (avec leur incertitude) pour estimer une courbe de tarage et une enveloppe d'incertitude associée.

2.1 Principes de la méthode BaRatin

Les éléments explicatifs suivants sont tirés du rapport Horner et al. (2015).

2.1.1 Courbe de tarage simple

Une analyse du fonctionnement hydraulique de la station permet d'identifier les différents contrôles hydrauliques en jeu selon le régime d'écoulement, des plus faibles aux plus forts débits. Selon le type de contrôle, différentes formules hydrauliques classiques, pouvant se mettre sous la forme $Q = a(h - b)^c$ peuvent être utilisées (voir Tableau 2-3). La topographie et/ou la géométrie des contrôles font qu'ils s'activent et se désactivent (Figure 2-3) selon la hauteur d'eau. Ces successions ou ajouts de contrôle sont pris en compte et permettent ainsi de décrire le fonctionnement hydraulique du site via des équations par segments. Les valeurs moyennes (ainsi que des écarts-types associés) de tous les paramètres a , b et c sont déterminés a priori à partir de l'analyse hydraulique du site.

Type de contrôle	Hypothèses idéales	a	b	c
Chenal	Large chenal rectangulaire, écoulement stationnaire et uniforme	$KB\sqrt{J}$	Hauteur moyenne du fond du chenal	1.6 7
Section « rectangle »	Perpendiculaire à l'écoulement, pas d'influence aval, $V^2/2g \ll H$	$CB\sqrt{2g}$	Hauteur de la crête du seuil	1.5
Section « triangle »	Perpendiculaire à l'écoulement, pas d'influence aval, $V^2/2g \ll H$	$C \tan(\alpha/2) \sqrt{2g}$	Hauteur du sommet bas du triangle	2.5
Orifice	Perpendiculaire à l'écoulement, pas d'influence aval, $V^2/2g \ll H$	$CS\sqrt{2g}$	Hauteur du centre de l'orifice	0.5

Tableau 2-3 : Valeurs des paramètres a , b et c données par les formules hydrauliques correspondant aux contrôles les plus classiques (pour plus de détails, voir Le Coz et al., 2014)

- (*) K : coefficient de Strickler
 B : largeur de la section d'écoulement
 J : pente du fonds du lit
 C : coefficient d'écoulement du seuil
 α : angle d'ouverture du triangle
 S : section d'écoulement

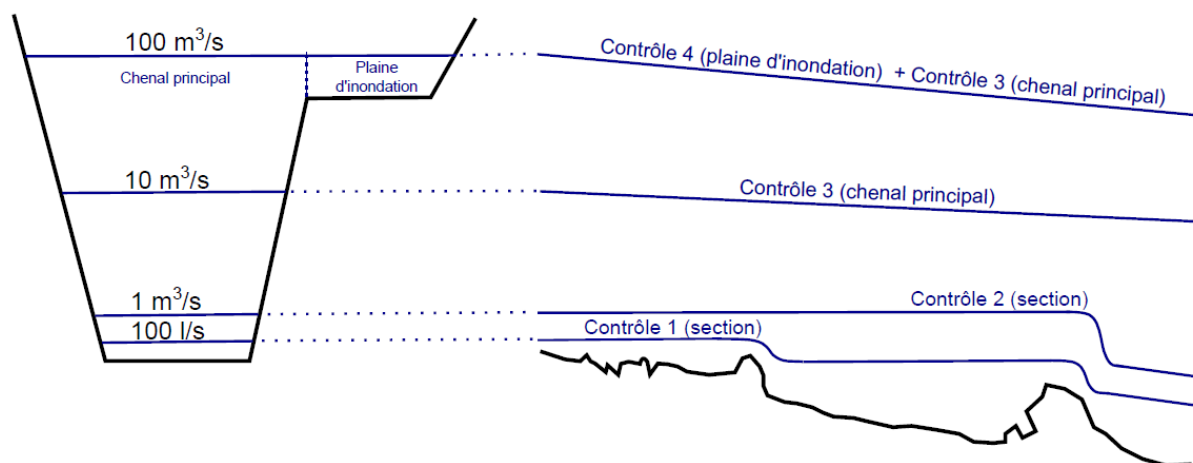


Figure 2-3 : Succession de contrôles par sections et chenaux pour une station hydrométrique classique sans contrôle artificiel. Le fond du cours d'eau et les lignes d'eau pour différents débits sont représentés sur une section (à gauche) et sur un profil en long du cours d'eau (à droite). (d'après Le Coz et al., 2014).

Par ailleurs, les jaugeages (dont les incertitudes associées sont également estimées avant l'application de BaRatin) sont exploités par BaRatin, qui calcule une distribution a posteriori des paramètres a , b et c . Cette distribution a posteriori combine l'information apportée d'une part par les jaugeages et d'autre part par les a priori hydrauliques.

En pratique, à partir d'un jeu de paramètres (a , b , c) a priori (moyennes et écart-types) et de l'information contenue dans les jaugeages, BaRatin produit une multitude de jeux de paramètres, chacun correspondant à une courbe de tarage possible. Une des courbes de tarage, appelée courbe de tarage MaxPost, est proposée comme étant la plus probable. Elle est calculée à l'aide de l'équation du modèle hauteur-débit et du jeu de paramètres ayant la plus forte densité de probabilité a posteriori. A partir de l'ensemble des échantillons de courbes de tarage, pour une hauteur donnée, on peut calculer l'incertitude à 95% associée à la conversion hauteur-débit à l'aide des quantiles 2.5% et 97.5%, ainsi que toute autre enveloppe d'incertitude en adaptant les quantiles souhaités.

Notons que deux incertitudes distinctes affectent la courbe de tarage : l'incertitude paramétrique (liée aux nombreux jeux de paramètres possibles) et l'incertitude structurelle (liée à l'imperfection de l'équation choisie pour représenter la courbe de tarage). Cette dernière est modélisée par un bruit gaussien centré sur zéro dont l'écart-type est une loi affine proportionnelle au débit (les deux paramètres de l'écart-type sont estimés par BaRatin). La combinaison des deux incertitudes constitue l'incertitude totale associée à la courbe de tarage.

2.1.2 Courbe de tarage double niveau

Les courbes de tarage simple niveau (voir la section 2.1.1) ne sont applicables que dans les cas où la relation hauteur-débit est gouvernée par une section de contrôle ou bien un chenal de contrôle avec une pente d'énergie constante. Dans le cas idéal, la pente d'énergie est parallèle à la pente de la ligne d'eau et au fond du lit du cours d'eau. Or, dans certaines conditions, la pente de la ligne d'eau varie du fait de conditions aval variables : barrage, confluence avec un autre cours d'eau, estuaire-delta... Dans ces conditions d'influence aval variable, les courbes de tarage « classiques » ne permettent pas une prédiction correcte du débit. Parmi les développements réalisés dans le cadre de la thèse de V. Mansanarez (2016), l'étude du cas de l'influence aval variable a conduit à un modèle de courbe de tarage prenant en compte deux hauteurs d'eau permettant le calcul de la pente de la ligne d'eau et ainsi d'approcher la pente d'énergie variable : le modèle SFD (Stage-Fall-Discharge).

La situation la plus courante pour les stations soumises à des influences aval variables est le cas de deux contrôles distincts. Le premier contrôle est assuré par un chenal « classique », i.e. sans aucune influence aval variable, tandis que le second contrôle prend en compte une pente d'énergie variable.

Tout comme dans le formalisme de BaRatin, le contrôle par chenal est approché par une loi de Manning-Strickler simplifiée pour un chenal rectangulaire, de largeur constante et homogène (Tableau 2.1). Le modèle SFD ainsi développé repose sur l'équation suivante :

$$Q(h_1, h_2) = \begin{cases} K_s B \sqrt{(h_1 - h_2 - \delta_h)/L} (h_1 - h_0)^M & \text{si } h_1 < k(h_2) \\ K'_s B' \sqrt{J} (h_1 - h_0')^{M'} & \text{si } h_1 \geq k(h_2) \end{cases} \quad (1)$$

Équation 1 : Courbe double niveau définie par BaRatin-SFD

où :

Q , h_1 et h_2 sont respectivement le débit, la hauteur mesurée à la station principale (amont) et celle mesurée à la station aval.

K_s , B et h_0 sont respectivement le coefficient de rugosité, la largeur et le niveau moyen du fond pour le chenal de contrôle en cas d'influence aval

L la distance séparant les deux points de mesures des deux hauteurs d'eau (h_1 et h_2)

δ_h est l'écart du zéro des deux échelles de mesures des hauteurs h_1 et h_2

K'_s , B' , J et h_0' sont respectivement le coefficient de rugosité, la largeur, la pente et le niveau moyen du fond pour le chenal de contrôle en l'absence d'influence aval.

M et M' sont les exposants respectifs des deux lois puissances. Une valeur proche de 5/3 est attendue pour ces deux paramètres.

Il est important de noter que la hauteur de transition entre les deux contrôles (avec ou sans une influence aval) est déterminée par une condition de continuité de la courbe de tarage par la fonction $k(h_2)$.

Tout comme pour les courbes de tarage simple niveau (paragraphe 2.1.1), BaRatin nécessite la définition d'a priori sur les valeurs des paramètres de l'équation (1) et des données de calage (elles-mêmes incertaines) : les jaugeages. Les a priori (moyennes et écart-types) sur les 8 paramètres doivent donc être déterminés d'après les caractéristiques physiques du cours d'eau et les connaissances des écoulements pour le site étudié. Les incertitudes associées aux jaugeages, qui comprennent 3 valeurs (deux hauteurs d'eau h_1 et h_2 et un débit Q) doivent également être estimées. BaRatin fournit un ensemble de 500 jeux de paramètres a posteriori. Une incertitude structurelle (imperfection du modèle) affine est également estimée dans l'inférence bayésienne permettant une estimation de l'incertitude totale associée à la courbe de tarage.

2.1.3 Propagation des incertitudes aux hydrogrammes

Pour estimer les incertitudes associées aux hydrogrammes, il convient de propager les incertitudes associées à la courbe de tarage, estimées précédemment, et les incertitudes associées à la chronique de hauteur d'eau ou limnigramme. Un récent développement de la méthode BaRatin s'est concentré sur les erreurs associées aux limnigrammes et à la propagation de toutes les incertitudes aux chroniques de débit ou hydrogrammes.

2.1.3.1 Origines des erreurs affectant les mesures de hauteurs d'eau

Aux abords d'une station hydrométrique, une échelle graduée, appelée échelle limnimétrique, est classiquement fixée sur une pile de pont ou sur la berge. Cette échelle permet une lecture directe de la hauteur d'eau. Elle constitue la référence de mesure des hauteurs d'eau pour la station. Cependant, elle ne permet qu'une lecture ponctuelle dans le temps. Les mesures des hauteurs d'eau en continu sont réalisées par un limnigraphe (souvent appelé capteur dans la suite du texte), enregistrant les hauteurs d'eau à pas de temps fixe ou variable. Le capteur nécessite un calage avec l'échelle extérieure, la référence. Ce calage est le plus souvent vérifié et ajusté périodiquement.

Les limnigrammes ainsi obtenus sont affectés par des erreurs ayant des origines et des caractéristiques diverses. Ci-dessous, nous passons en revue les principales sources d'erreur :

(1) Erreurs instrumentales ou « bruit de mesure »

Quel que soit le type de technologie utilisé (flotteur, capteur de pression à membrane ou pneumatique, radar, ultrasons, télémétrie satellitaire...), même dans des conditions d'écoulement idéales (niveau d'eau parfaitement constant) et une calibration parfaite du capteur (avec l'échelle extérieure), une mesure sera toujours affectée d'une erreur. Un ensemble de mesures successives d'une même hauteur d'eau réelle constituera un jeu de valeurs légèrement différentes les unes des autres. Ces erreurs sont complètement indépendantes d'un pas de temps à un autre. Il est communément admis que la distribution de ces erreurs est gaussienne centrée sur zéro.

(2) Erreurs sur la représentativité de la hauteur d'eau mesurée

La surface libre d'un cours d'eau est rarement complètement plane. Les conditions d'écoulement ainsi que d'autres variables environnementales telles que le vent rident et incurvent la surface de l'eau. A l'endroit précis où a lieu la mesure, le niveau d'eau change continuellement et évolue autour d'une valeur moyenne que l'on suppose représentative du niveau d'eau de la section transversale (supposée représentative des conditions 1D d'écoulement). De ce fait, supposant que le capteur mesure parfaitement la hauteur d'eau réelle locale, la mesure, supposée représentative de la hauteur d'eau de l'ensemble de la section transversale, sera affectée d'une erreur liée aux variations locales de la hauteur. Il est raisonnable de supposer que ces erreurs, indépendantes d'un pas de temps à un autre, suivent une distribution gaussienne centrée sur zéro.

(3) Erreurs de calibration du capteur

Le calage du capteur consiste à s'assurer du bon accord entre le capteur et l'échelle limnimétrique. La calibration n'est jamais parfaite en raison de l'erreur faite lors de la lecture de l'échelle limnimétrique : résolution de celle-ci, son encrassement, faible éclairage, eau très claire, vaguelettes... Entre deux recalages du capteur, les mesures sont donc affectées par une erreur qui est la même pour chaque pas de temps. Cependant, à chaque recalage, cette erreur change. On a ainsi, pour chaque période séparant deux recalages, une erreur systématique inconnue différente. On suppose alors que l'ensemble des valeurs que peut prendre cette erreur (pour chacune des périodes identifiées) suit une distribution gaussienne centrée sur zéro.

(4) Erreurs dues à la dérive du calage

Si l'on suppose tout bruit de mesure absent, une surface libre complètement plane (absence de vaguelettes) et la calibration parfaite du capteur, faite lors d'une précédente visite terrain, il est tout de même possible de constater un écart entre échelle et capteur lors d'une nouvelle visite terrain : on parle alors de la dérive du calage. Ces écarts peuvent être dus au vieillissement ou au dysfonctionnement de certains composants du capteur ou encore à une accumulation progressive de sable dans le puits de stabilisation du capteur. Il est très difficile de quantifier cette erreur du fait de son évolution inconnue au cours du temps (évolution lente, de quelques jours à quelques semaines, ou très soudaine). La description de tels comportements n'étant pas évidente, cette erreur a été approximée par une erreur inconnue et constante (la même pour chaque pas de temps) sur la période séparant deux recalages. On considère alors une erreur systématique inconnue qui est différente pour chacune de ces périodes. On suppose que toutes les valeurs que peut prendre cette erreur (sur une très longue période) suivent une distribution gaussienne centrée sur zéro.

2.1.3.2 Du limnigramme incertain à l'hydrogramme incertain

La description des différentes erreurs faites ci-dessus permet d'identifier deux types d'erreurs distincts : les erreurs non-systématiques (1) et (2) et les erreurs systématiques (3) et (4). Cette analyse a conduit à construire un modèle d'erreur parcimonieux comportant deux termes d'erreur :

- Un terme d'erreur non-systématique : les erreurs varient d'un pas de temps au suivant et englobent les erreurs de type (1) et (2).

- Un terme d'erreur systématique : les erreurs sont constantes dans le temps, ou tout du moins constantes sur une période largement plus longue que la durée moyenne d'un pas de temps. Ce terme englobe les erreurs de type (3) et (4).

Le modèle d'erreur est le suivant :

$$h(t) = \tilde{h}(t) + \epsilon(t) + \delta \quad (2)$$

où

$h(t)$ est le vrai limnigramme

$\tilde{h}(t)$ est le limnigramme mesuré

$\epsilon(t)$ est le terme d'erreur non-systématique : $\epsilon(t) \sim N(0, \sigma_A^h)$

δ est le terme d'erreur systématique : $\delta \sim N(0, \sigma_B^h)$

A chaque pas de temps, $\epsilon(t)$ est ré-échantillonné alors que δ ne l'est que pour certains pas de temps, correspondant, idéalement, aux dates réelles des recalages du capteur. La méthode d'échantillonnage est définie de façon à prendre en compte le caractère non-systématique de $\epsilon(t)$ et inversement le caractère systématique de δ .

Notons également qu'à un pas de temps donné, l'erreur totale est égale à $\epsilon(t) + \delta$. Conditionnellement à δ , cette erreur totale suit une loi normale de moyenne δ et d'écart-type σ_A^h . On voit ici le rôle fondamentalement différent que jouent les erreurs systématiques et non-systématiques : en un pas de temps donné, l'erreur systématique δ donne la moyenne (inconnue !) de l'erreur totale, tandis que l'erreur non-systématique $\epsilon(t)$ donne l'écart-type σ_A^h de l'erreur totale.

Ainsi BaRatin, à partir ...

- des 500 échantillons de courbes de tarage estimées par BaRatin précédemment, voir paragraphes 2.1.1 et 2.1.2,
- du limnigramme mesuré $\tilde{h}(t)$,
- de la valeur de σ_A^h ,
- de la valeur de σ_B^h ...
- ... ainsi que de la liste des pas de temps où ce dernier doit être ré-échantillonné,

... calcule 500 hydrogrammes possibles combinant toutes les sources d'incertitude (paramétrique, structurelle, limnimétrique systématique, limnimétrique non-systématique). Tout comme les courbes de tarage, un hydrogramme *MaxPost* est également calculé à partir du jeu de paramètres le plus probable (le jeu de paramètres *MaxPost*) et du limnigramme mesuré supposé sans erreur. A chaque pas de temps, le calcul des quantiles 2.5% et 97.5% sur les 500 valeurs possibles de débit permet d'obtenir l'enveloppe d'incertitude à 95%. Toute autre enveloppe d'incertitude peut être calculée de même.

2.1.3.3 Quantification des erreurs de mesures des hauteurs d'eau

Il est nécessaire d'estimer les deux écarts-types décrivant les erreurs associées aux mesures des hauteurs d'eau, σ_A^h et σ_B^h , et de connaître les pas de temps de recalage du capteur (ou à défaut, une périodicité moyenne) pour mettre en œuvre la propagation des incertitudes par BaRatin. Les deux écarts-types doivent idéalement être estimés au cas par cas, pour chaque station :

Les erreurs non-systématiques (σ_A^h)

Les deux composantes constitutives de ces erreurs (bruit de mesure, σ_{A1}^h et déformations incohérentes de la surface, σ_{A2}^h) peuvent être estimées séparément (si indépendantes l'une de l'autre). Dans ce cas, $\sigma_A^h = \sqrt{(\sigma_{A1}^h)^2 + (\sigma_{A2}^h)^2}$, avec :

- **Erreur (σ_{A1}^h).** Selon le type de technologie et les informations fournies par le fabricant sur la précision du capteur, une quantification de l'écart-type associé au bruit de mesure peut être faite. Il est également possible de le mesurer directement en laboratoire par des essais en conditions de répétabilité.

- **Erreur (σ_{A2}^h)**. Les conditions d'écoulement, la présence ou l'absence d'un puits de stabilisation conditionnent l'estimation de la seconde composante contribuant aux erreurs non-systématiques : les vaguelettes, batillage, toute déformation incohérente de la surface. Pour ce terme d'erreur, il est difficile de faire une estimation directe et précise de l'écart-type. Ce dernier peut être estimé à dire d'expert et par observation de l'écoulement in situ.

Une estimation directe de σ_A^h peut aussi être faite. Celle-ci peut en effet être estimée avec l'écart-type d'une série de mesures successives, directement dans le cours d'eau, dans des conditions de batillage représentatives sur une période où la hauteur d'eau ne varie pas. De telles mesures engloberaient les deux sources d'erreurs non-systématiques.

Il est également possible que la valeur de σ_A^h dépende de la hauteur d'eau h . BaRatin prévoit cette possibilité, proposant à l'utilisateur de faire varier sa valeur selon h pour inclure, par exemple, des erreurs bien plus importantes en crue où les vaguelettes seraient beaucoup plus importantes.

Les erreurs systématiques (σ_B^h)

L'estimation de cet écart-type nécessite d'avoir les dates des recalages du capteur et les écarts constatés entre capteur et échelle à l'occasion des visites terrain depuis la mise en service du capteur. L'écart-type de ces écarts peut alors être pris directement pour estimer σ_B^h . Les dates de recalage permettent de définir les points de ré-échantillonnage de δ . Il est important de noter qu'une visite terrain n'ayant pas entraîné de recalage n'est pas à prendre en compte.

Attention : les deux incertitudes-types (σ_A^h et σ_B^h) ne peuvent en aucun cas être « additionnées » (même en somme quadratique) pour estimer l'incertitude totale affectant les mesures des hauteurs d'eau du fait de leurs dynamiques temporelles complètement différentes. Par exemple une incertitude de +/- 2cm pour les erreurs non-systématiques et une incertitude de +/- 3cm pour les erreurs systématiques ne donnent pas une incertitude totale de +/- 5cm sur les mesures des hauteurs d'eau. On doit plutôt interpréter l'erreur systématique comme la moyenne inconnue de l'erreur totale sur la hauteur d'eau (cf. discussion en section 2.1.3.2).

2.1.4 [Structure des résultats de la méthode BaRatin](#)

Synthétiquement la méthode BaRatin permet de prendre en compte :

- Les erreurs aléatoires et systématiques sur la mesure limnigraphiques ; appelée incertitude limnimétrique,
- Les incertitudes sur les jaugeages et le calage de la courbe de tarage ; appelée incertitude paramétrique,
- Les incertitudes sur le fonctionnement hydraulique de la station via l'expression analytique de la courbe de tarage ; traduit par l'incertitude restante.

L'ensemble de ces incertitudes est regroupé sous le terme d'incertitude totale. La méthode BaRatin produit un faisceau de valeur qui représente la dispersion de l'erreur totale. Dans la détermination de l'ensemble des courbes de tarage on peut distinguer une configuration particulière qui maximise la vraisemblance, on appelle ainsi Maxpost le jeu de paramètre qui conduit à la courbe de tarage la plus probable statistiquement. On peut ainsi se rattacher à une valeur de débit centrale également nommée par extension Maxpost qui est la valeur du débit **issue de la courbe de tarage la plus probable, sans tenir compte de l'incertitude limnimétrique**. Cette valeur ne tenant pas compte des erreurs sur la mesure, elle est donc à considérer avec précaution. Toutefois ce raisonnement se rapproche d'une estimation classique du débit pour laquelle cette incertitude n'est pas non plus prise en compte. C'est pourquoi c'est la valeur qui est employée pour comparer les débits réestimés par la

méthode BaRatin aux débits définis par les services opérationnels. Néanmoins, on perdrait l'intérêt de la démarche à considérer uniquement cette seule valeur.

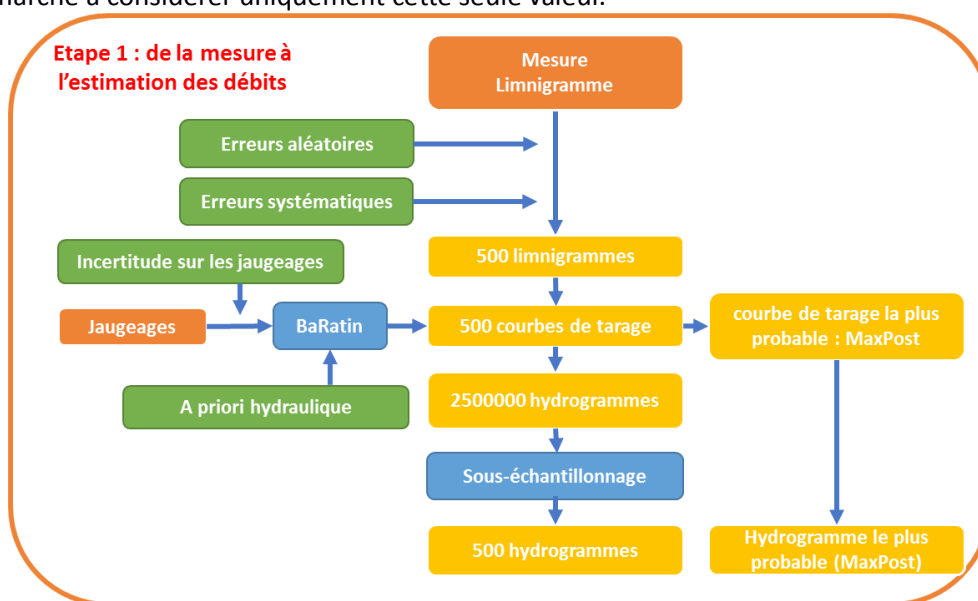


Figure 2-4 : Principe de la méthode BaRatin

2.2 Application de la méthode BaRatin aux stations du Rhône

2.2.1 Stations simples / doubles

Les stations sont dites simples lorsqu'elles ne subissent aucune influence hydraulique par un aménagement situé à la leur aval. A l'opposé les stations dont la ligne d'eau est conditionnée par le niveau d'un aménagement situé à l'aval sont appelés doubles. Celles-ci requièrent l'utilisation de deux échelles pour définir la pente de la ligne d'énergie, cf 2.1.2. Le Tableau 2-4 dresse le bilan de la situation actuelle des stations étudiées. Bien évidemment l'ensemble des stations étaient à simple niveau avant les aménagements hydro-électriques du Rhône. On peut donc retrouver les deux types de configuration pour une même station en fonction de la période.

La station de Chateaufort est une station virtuelle, elle ne fait donc pas l'objet d'un traitement par la méthode BaRatin. Il est de même pour les stations de Lyon Perrache et Chusclan qui mesurent directement un champ de vitesse par ultra-son. En toute logique le traitement de ces stations pourrait être possible par la méthode mais les équations nécessaires au traitement de ces mesures ne sont pas encore implémentées. Ceci fait partie des futurs développements de la méthode BaRatin.

Le site de Lyon, présente également quelques problématiques. D'une part, les sites entre Pont-Morand et confluence subissent partiellement l'influence de la retenue de Pierre-Bénite, ce qui imposerait un traitement en double niveau pour la période récente. D'autre part historiquement les sites de mesure à Lyon ont énormément varié au cours du temps ; pour le XXème siècle on dénombre au moins quatre échelles de mesure : Beaume des Pigeons, Pont Sainte-Clair, Waisse, Poincare... Cette configuration impose la collecte de nombreuses données, zéro d'échelle, correspondance entre site, jaugeages. S'ajoute à cela que les modifications du chenal, aménagements et dragages apportent un niveau de complexité supplémentaire. A ce jour, l'ensemble de ces facteurs ne permettent pas la reconstruction continue des courbes de tarage et des débits sur le XXème siècle à Lyon par la méthode BaRatin.

Station	Echelle principale actuelle	Echelle secondaire si double niveau
Pougny	Pk 186.78	
Bognes	Pk 160.625	
Seyssel-Corbonod	Pk 151.315	Point de réglage amont barrage de Motz, Pk 145.840
Chateaufort	Station reconstituée virtuellement	
Brens	Pk 114.6	Point de réglage amont Barrage de Champagneux, Pk 103.200
Pont de Lagnieu		
Lyon Perrache / Pont-Morand	Mesure de vitesse par ultra-son à Perrache /Echelle de mesure à Pont-Morand ¹	
Ternay (Givors)	Pk 15.2	Point de réglage Pont de Vienne, Pk 28.56
Valence	Pk 109.7	Pk 113.6
Viviers	Pk 166.5	Pont SNCF Bollène au Pk 4.3 du canal de Donzère Mondragon
Chusclan	Mesure de vitesse par ultra-son	
Beaucaire	Pk 269.6	

Tableau 2-4 : Bilan des stations à simple et double niveaux.

2.2.2 Incertitudes liées aux jaugeages

L'incertitude sur les jaugeages dépend de deux facteurs principaux : d'une part la méthode de mesure et l'appareillage qui ont évolué dans le temps ,et d'autre part des conditions de réalisation de la mesure. On peut distinguer trois périodes qui s'applique aux données collectées.

Avant 1936, les mesures de vitesse sont faites soit par mesure de la dérive d'un flotteur superficiel, soit à l'aide d'un hydrotachymètre (ancêtre du moulinet).

Ensuite entre 1940 et 1990, les mesures sont réalisées à l'aide de moulinets : soit en surface uniquement, soit à 60% de la profondeur et en surface, soit point par point sur toute la profondeur. Dans cette période les jaugeages de type inconnus se voient affectés de la même incertitude qu'une mesure en surface uniquement.

A partir des années 1990 (et plus précisément en 1995 sur le Rhône), l'utilisation des appareils ADCP (Acoustic Doppler Current Profiler) se généralise.

Le tableau suivant résume les incertitudes associées pour les différents types de mesure dans de bonnes conditions. Dans certains cas spécifique ces intervalles de confiance ont pu être revus à la hausse d'après les données fournies par le jaugeur, ou sur la base d'éléments physiques (variation du niveau d'eau pendant la mesure par exemple).

1 La mesure de hauteur à Pont-Morand est en partie influencée par le niveau de la retenue de Pierre Bénite.

Type de jaugeage	Incertitude exprimée en demi intervalle à 95%
Flotteurs superficiels avant 1936	+/- 20%
Hydrotachymètre avant 1936	+/- 20%
Moulinet en Surface ou méthode inconnue	+/- 15%
Moulinet à 0.6h et surface	+/- 10%
Moulinet point par point toute profondeur	+/- 7%
ADCP	+/- 5%

Tableau 2-5 : Incertitudes associées aux types de jaugeages

3 BILAN DE LA RÉESTIMATION DES DÉBITS PAR LA MÉTHODE BARATIN

Cette partie aborde le bilan des courbes de tarage et des débits réestimés par la méthode BaRatin.

3.1 Réestimations des courbes de tarage par la méthode BaRatin

Le principe fondamental de l'établissement d'une courbe de tarage est la stabilité de la relation hauteur débit dans le temps. Cette condition n'est pas toujours garantie dans un milieu naturel fluvial comme Rhône. Les modifications du lit par les phénomènes naturels, notamment les processus sédimentaires ou bien d'origine anthropique : modifications du lit, corrections, dragages... participent fortement à la modification des conditions hydrauliques et donc à la perturbation de la relation hauteur débit. Sans oublier les modifications profondes que peuvent engendrer les aménagements hydrauliques.

Ainsi, au fil du temps les courbes de tarage d'un même site, sont amenées à être sans cesse réestimées. Pour chaque station l'analyse des données de jaugeages, ainsi que d'autres paramètres physiques comme l'évolution des profils en travers permet d'établir les périodes homogènes sur lesquelles se base l'estimation des courbes de tarage. Ainsi pour les stations du Rhône le bilan est le suivant :

Station	Nbre de Courbes de tarage estimées	Périodes identifiées
Pougny	3	1985-1995 / 1996-2000 / 2001-2017
Bognes	5	1948-1952 / 1952-1960 / 1960-1980 1980-1990 / 1990-2016
Seyssel	1	1990-2016
Brens	1	1994-2016
Lagnieu	1	1987-2016
Ternay	3	1980-1983 / 1984-1996 / 1997-2017
Valence	1	1993-2016
Viviers	1	1993-2016
Beaucaire	8	(Pt de Beaucaire) 1874-1911 / 1914-1936 / 1954-1969 (Beaucaire Restitution) 1974-1981 / 1982-1990 / 1991-1996 1997-2004 / 2005-2016

Tableau 3-6 : Périodes pour l'estimation des courbes de tarage par BaRatin.

Pour la période récente, la référence reste les estimations faites par la CNR pour les courbes de tarage et les débits qui en découlent. C'est pourquoi nous comparons les résultats à ces valeurs. La

méthode BaRatin est appliquée a posteriori, le découpage temporel ne correspond pas forcément au découpage fait par la CNR pour les besoins opérationnels. La comparaison des courbes a donc ses limites.

La Figure 3-5 présente à ce titre les courbes de tarage estimées par BaRatin et celles fournies par la CNR pour le Haut-Rhône. Ne sont reportées ici que les courbes de la période la plus récente. Dans le cas des courbes doubles niveaux (i.e. Seyssel et Brens), les courbes CNR sont tracées sous forme de point afin de représenter la multitude de courbes selon la variation de la hauteur aval. Il y a globalement une bonne adéquation entre les deux approches ce qui permet de valider les résultats de BaRatin pour le Haut-Rhône.

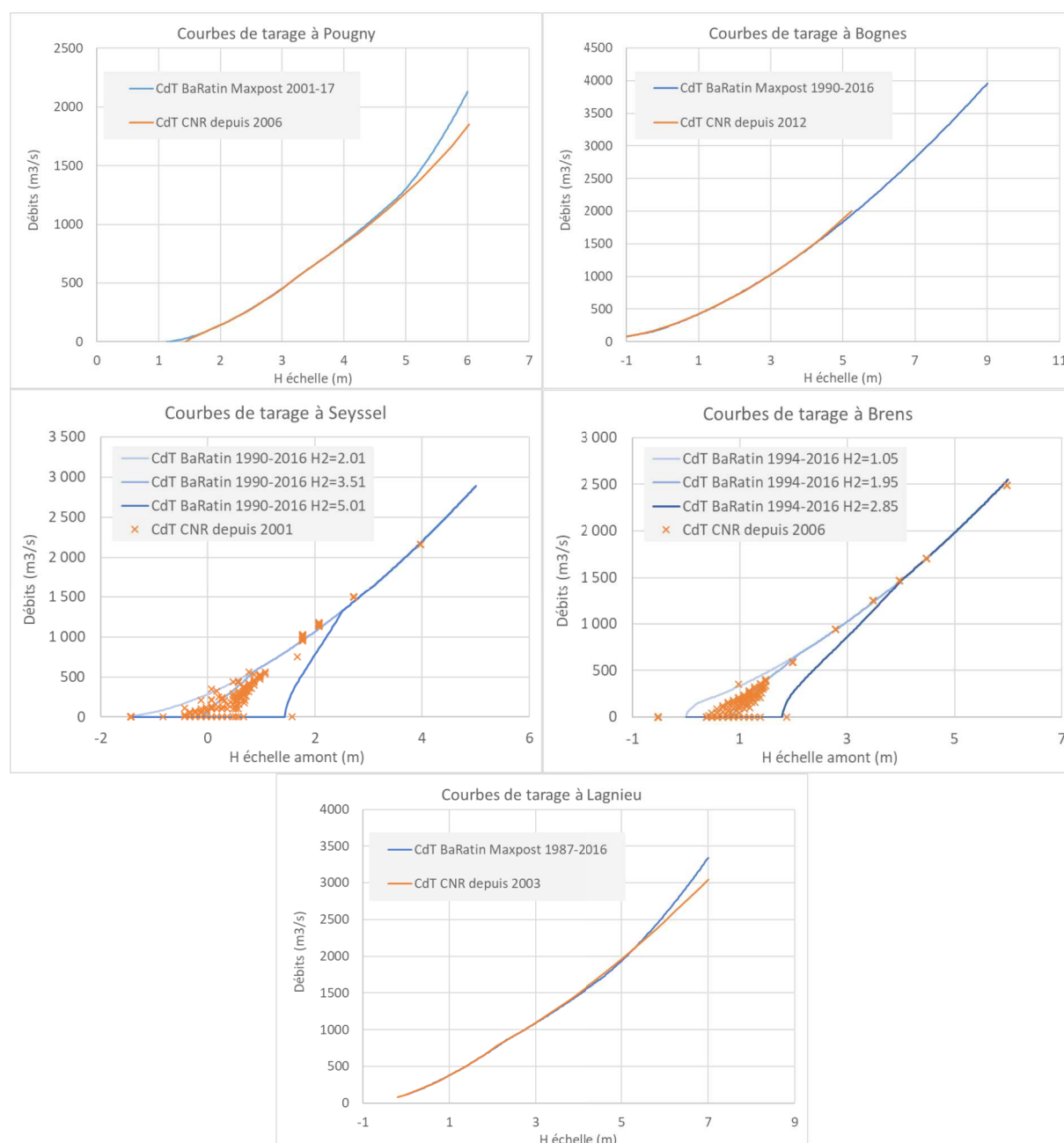


Figure 3-5 : Comparaison des courbes de tarage BaRatin versus CNR - période récente - Haut-Rhône.

La Figure 3-6 présente la comparaison entre courbe de tarage BaRatin et référence CNR pour le Bas-Rhône. L'adéquation est jugée plutôt bonne dans son ensemble. Des divergences peuvent être

observées, notamment à Ternay, la courbe de tarage BaRatin étant inférieure pour les fortes valeurs de débits, d'environ 6%, à celles de la CNR. Ce cas illustre bien la problématique du découpage temporel pour les périodes dites stables ou homogènes pour l'établissement de la relation hauteur débit. En effet, la courbe CNR étant établie à partir de 2003 celle-ci est construite sur des jaugeages dont la valeur maximale ne dépasse pas 3200 m³/s la partie haute de la courbe est donc extrapolée à partir de là. A l'inverse, la courbe BaRatin est construite sur une période plus large prenant en compte des jaugeages plus élevés, mais dont l'effet est une relation à la baisse pour les forts débits.

Toutefois, pour l'étude des crues, un contrôle supplémentaire est effectué lors de la constitution des échantillons servant à l'analyse fréquentielle. Dans le cas de Ternay, la période post 2003 n'est pas la plus fournie en crues, l'impact de la divergence des courbes est donc limité, les valeurs de débit maximum annuel ne s'écartant pas plus de 2% en moyenne pour cette période. Dans ces conditions l'estimation BaRatin est jugée acceptable même si en toute rigueur les divergences devraient être approfondies et réglées.

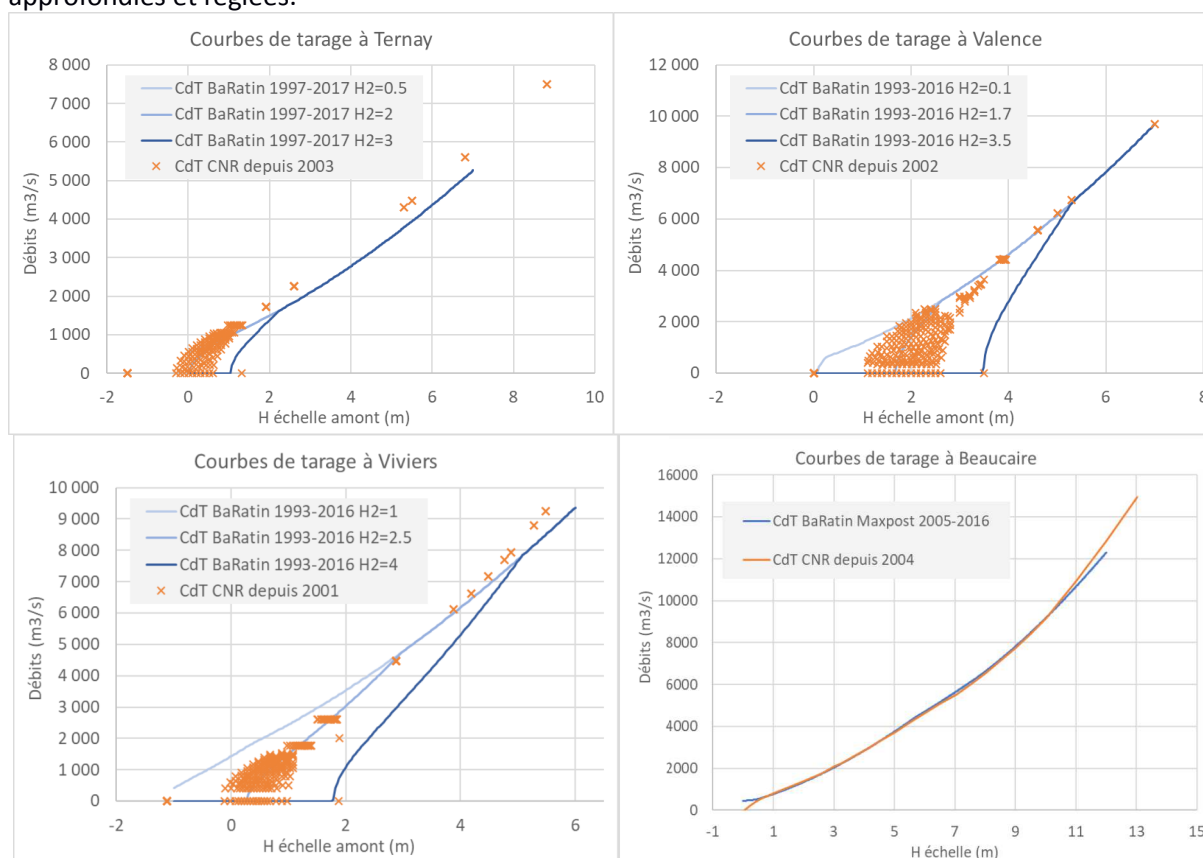


Figure 3-6 : Comparaison des courbes de tarage BaRatin versus CNR - période récente - Bas-Rhône.

3.2 Adéquation débits réestimés et débits de référence

Les Figure 3 -7Figure 3 -8, présentent l'intégralité des débits *Maxpost* réestimés par la méthode BaRatin comparés aux débits de références fournis par la CNR. Les réestimations sont faites au pas de temps horaire et au pas de temps journalier (constituées de la moyenne par jour calendaire des données horaires). Rappelons que l'objectif de l'étude n'est pas la réestimation intégrale des débits par la méthode BaRatin, mais bien l'utilisation de cette méthode pour la caractérisation des incertitudes. Toutefois cette confrontation permet de juger de la performance mais aussi des limites de la méthode.

Au pas de temps horaire, les stations les plus problématiques sont à l'amont : Pougny, Bognes, et Seyssel. La colorisation par décennie permet de situer temporellement les comparaisons. La station de Pougny, concentre le plus de divergence, en particulier sur les débits faibles et moyens entre 2000 et 2010. On peut voir très clairement des divergences structurées qui indiquent des biais systématiques. Une explication possible pour cette station est la mise en place du seuil et du déplacement de la station début 2000, qui aurait pu fausser la relation hauteur débit. Pour la station de Bognes des dérives ponctuelles et régulières sont également observées, mais globalement les écarts restent dans une fourchette de +/- 10%. Ce qui est moins le cas pour Seyssel, où les données post 2010 jusqu'à 750 m³/s sont un peu surestimées par BaRatin. La station de Brens est entachée de quelques divergence pour les bas débits uniquement. Phénomène qu'on retrouve dans une moindre mesure aux stations de Ternay, Valence et Viviers. Les stations de Lagnieu et de Beaucaire présentent de très bonnes adéquations au pas de temps horaire. En dehors des dérives mentionnées, les comparaisons convergent globalement très bien pour les forts débits.

Une difficulté majeure est que les hauteurs peuvent être entachée d'erreurs qui impactent les résultats BaRatin mais qui sont corrigées a posteriori dans les débits de référence CNR, d'où des écarts parfois importants. Cela illustre la complexité de la chaîne de traitement et l'important travail réalisé par la CNR sur la validation des données de débit par comparaison des sources de données (station limnimétrique, débits aux ouvrages...). Travail fait quotidiennement et qui n'est pas intégré à la réestimation brute des données par la méthode BaRatin.

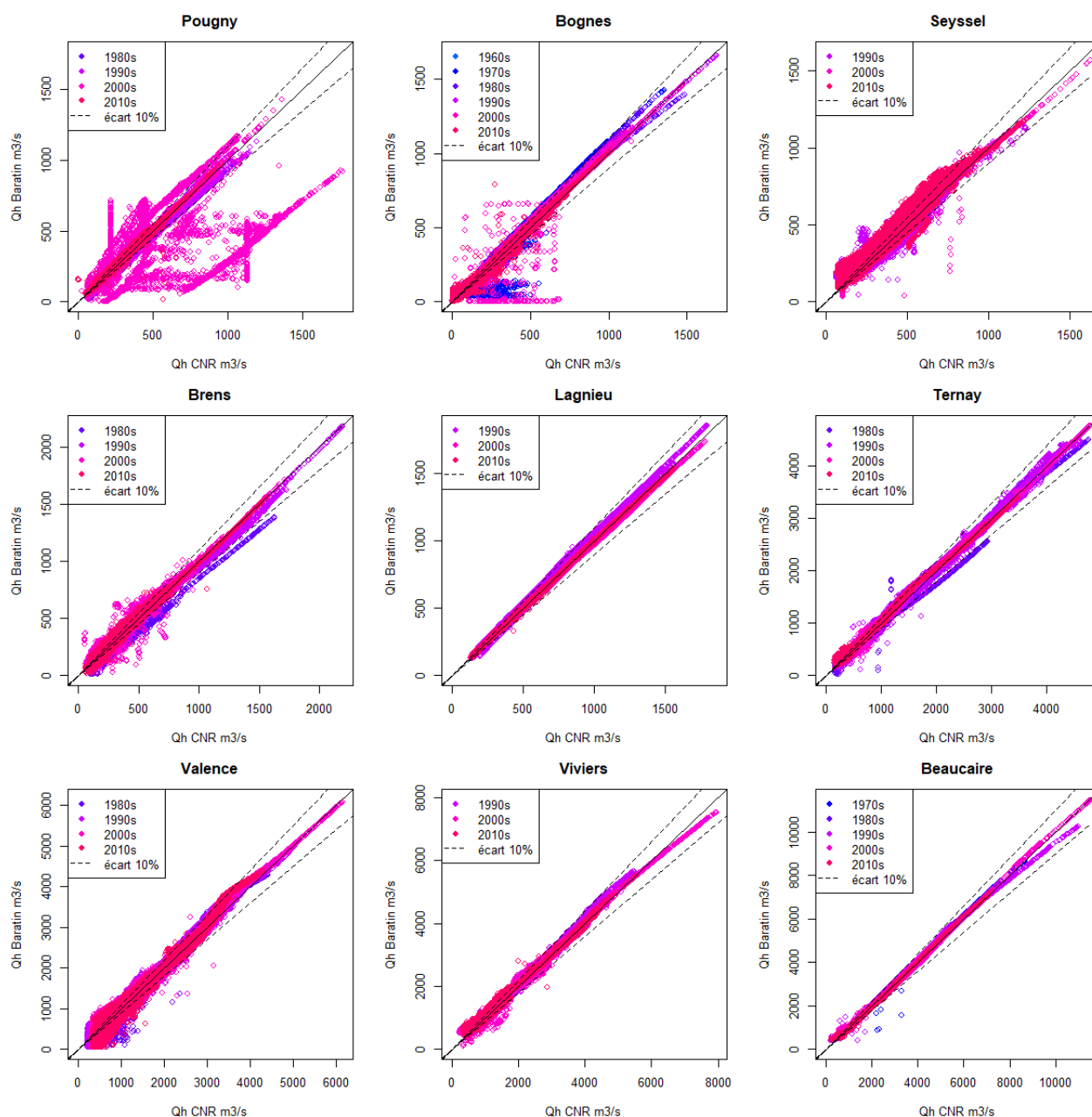


Figure 3-7 : Bilan des réestimations des débits horaires via BaRatin versus débits moyen horaires CNR

Au pas de temps journalier, deux nouveaux effets s'ajoutent. Le premier est que les écarts sont souvent lissés par la moyenne des données, ce qui est le cas entre autres pour la station de Pougny. Le deuxième est que la chronique de données est allongée parfois de manière substantielle avec des données anciennes dont la relation d'origine n'est pas toujours parfaitement renseignée ; cas de Seyssel et Beaucaire. Dans ce dernier cas, les écarts les plus importants sont observés pour les années 1920 et autour du transfert de station en 1970. Pour la première période, rappelons que nous ne disposons que de trois cotes journalières avant 1969. Pour ce qui concerne les années 1970 lors des travaux sur le Rhône en amont du Delta, il n'est pas certain que l'ensemble des débits était bien comptabilisé à la station de Beaucaire pendant les périodes de travaux. Néanmoins malgré ces divergences, les réestimations sont plutôt plus fiables pour les forts débits.

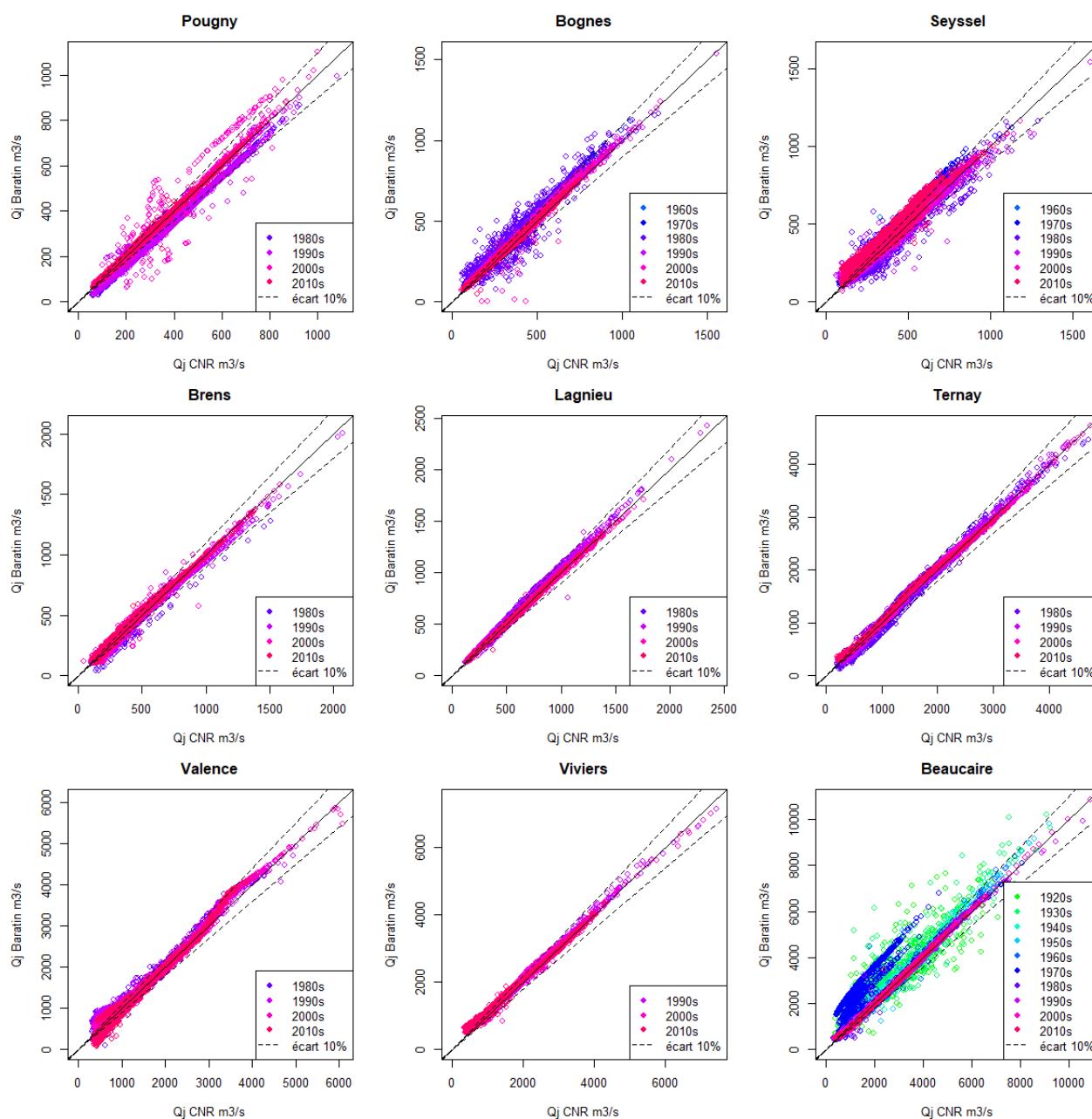


Figure 3-8 : Bilan des réestimations des débits journaliers via BaRatin versus débits moyen journalier CNR

4 MODÈLE D'INCERTITUDE

Dans de nombreux cas la réestimation des débits par la méthode BaRatin n'est pas possible faute de données disponibles. Pour pallier à ce problème un modèle a été mis en place afin d'estimer l'incertitude autour d'une valeur de débit déjà estimée.

Le modèle présenté permet de reproduire la structure de l'incertitude telle que déterminée par la méthode BaRatin et de la transposer, éventuellement de l'amplifier, hors des périodes d'application initiale de la méthode. L'avantage principal du modèle est ainsi de conserver la structure de l'incertitude en fonction du débit. Elle n'est pas linéaire mais dépendante de plusieurs facteurs et donc variable selon la gamme de débit donnée.

4.1 Principe du modèle d'incertitude

Le modèle se base donc sur des résultats de BaRatin déjà établis. Que ce soit d'une période bien caractérisée ou bien d'une station hydrométrique proche. Le modèle reprend donc la structure de l'incertitude totale telle qu'estimée par la méthode BaRatin : au sein d'un faisceau d'hydrogrammes, appelés spaghetti, représentant la dispersion de l'incertitude autour d'une valeur de référence, nous prenons comme référence la valeur de débit Maxpost. Ainsi pour une période homogène le modèle réalise une régression (non linéaire) de la différence entre chaque spaghetti et les débits Maxpost.

Cette différence est décomposée en une composante aléatoire (notée *res sigma*) et une composante systématique (notée *res mu*). La composante systématique est obtenue à l'aide d'une régression moyenne par spline (ajustement par morceau et par polynôme) qui s'ajuste à la structure de spaghetti en fonction du débit. La différence entre spaghetti et composante systématique donne un résidu. La composante aléatoire est un tirage aléatoire dans la plage de variation de ce résidu².

La décomposition pour un spaghetti est illustrée à Figure 4 -9. L'opération est ensuite répétée pour l'ensemble des 500 spaghetti qui constituent le faisceau d'incertitude produit par BaRatin. Cet ensemble de régressions permet ensuite de reconstituer un faisceau incertain autour d'un débit de référence donné. Un exemple de spaghetti reconstitués à la station de Viviers est présenté Figure 4 -10.

2 Et non la différence entre spaghetti et composante systématique

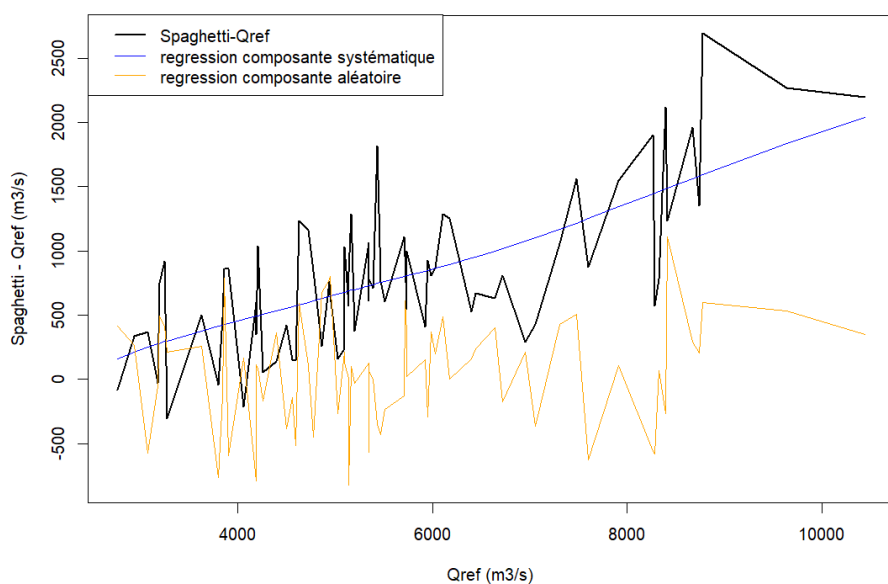


Figure 4-9 : Modèle d'incertitude, décomposition de la régression pour un spaghetti, exemple à la station de pont de Beaucaire (Pk267.7) sur la période 1840-1910

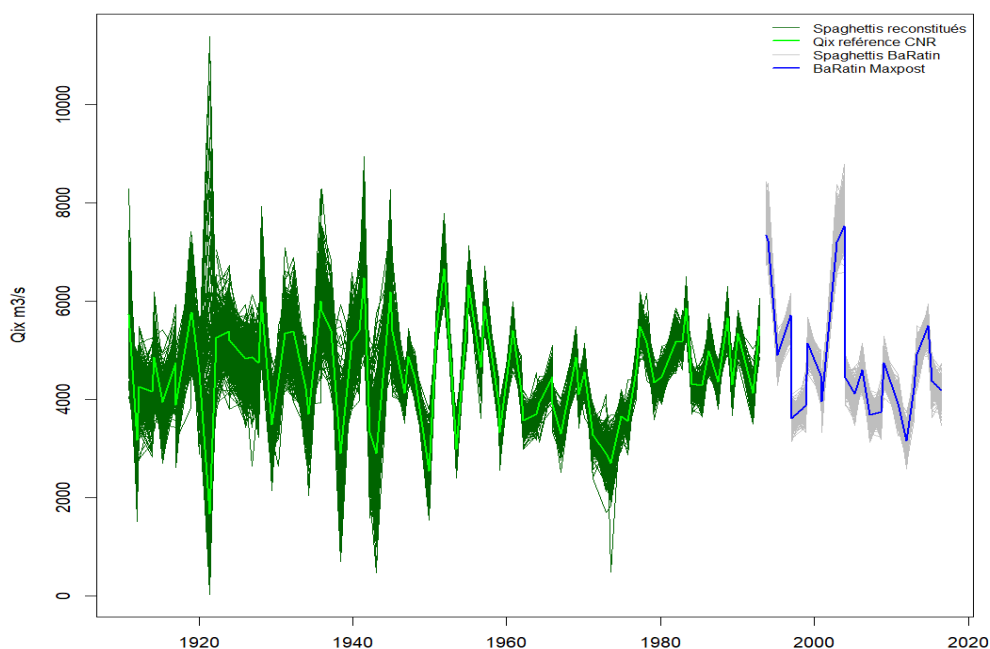


Figure 4-10 : Exemple de spaghettis reconstitués par le modèle d'incertitudes pour les débits maximums annuels à Viviers

4.2 Evolution de l'incertitude en fonction du temps, cas des stations de Bognes et Beaucaire

Aux deux stations test de Bognes et Beaucaire, il est possible de réaliser des réestimations de débits pour les périodes antérieures aux années 80 à l'aide de la méthode BaRatin. En l'absence de données

anciennes détaillées pour les autres points de mesure, ces deux stations vont être exploitées pour permettre de caractériser l'évolution de l'incertitude dans le temps et ainsi de définir un scénario historique applicable à travers le modèle d'incertitude.

Deux types de variables sont étudiées : les débits maximums instantanés et les débits moyens journaliers. La structure des incertitudes étant différente selon ces deux variables, il conviendra par la suite de distinguer l'application du modèle en conséquence. Dans le cas des débits instantanés nous nous limitons aux maximums pour les besoins de l'étude³. Pour les débits moyens journaliers, il est nécessaire de caractériser l'incertitude sur l'ensemble des valeurs car ces données sont à la base du calcul des débits moyens sur des durées plus longues.

La Figure 4 -11 présente les intervalles de confiance à 95% de l'incertitude totale issue de BaRatin pour les débits maximum instantanés et débits journaliers aux stations de Bognes et Beaucaire. On remarque que l'incertitude sur les débits instantanés est plus importante que l'incertitude sur les débits moyens journaliers.

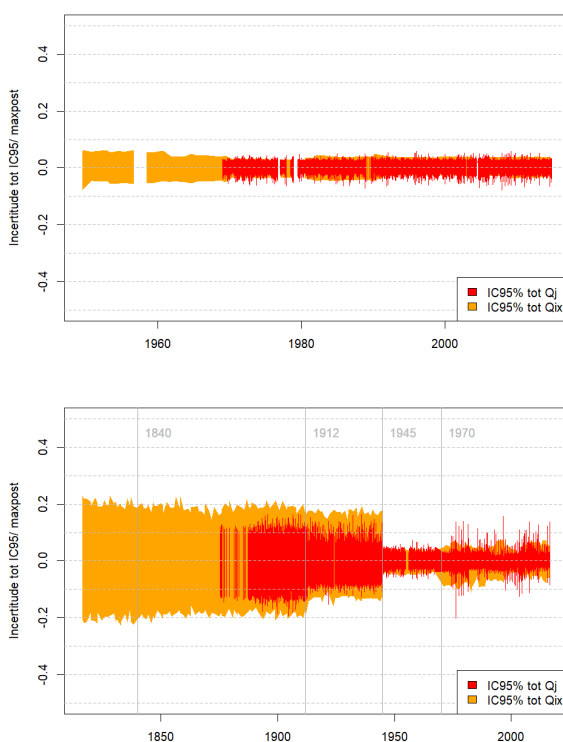


Figure 4-11 : Evolution de l'incertitude totale (IC95%) centrée sur la maxpost à Bognes (gauche) et à Beaucaire (droite) (sites du Pont de Beaucaire et de Restitution confondus) pour les débits max instantanés ainsi que les débits moyens journaliers

Du point de vue de l'évolution de l'incertitude dans le temps, à Bognes les variations sont infimes et restent de l'ordre de +/- 5% autour de la valeur maxpost pour les deux types de variables. On n'observe pas de variation structurelle ni pour les débits maximums instantanés, ni pour les débits moyens journaliers.

Les résultats à Beaucaire permettent d'explorer plus en avant la variation de l'incertitude totale dans le temps. Celle-ci est à l'instar de Bognes relativement stable pour la période récente et ce jusqu'en 1945, pour les données instantanées en moyenne de +/- 6% autour de la maxpost. Pour la période

³ Egalement afin de limiter les besoins de calcul conséquents pour traiter ces données via le modèle d'erreur.

1913-1944 cette valeur monte à +/- 15% et à +/-19% pour la période 1840-1912. Cette évolution se retrouve pour les données journalières, avec une incertitude de l'ordre de +/- 6% jusqu'en 1945, puis une augmentation à +/- 10% jusqu'en 1912, puis encore quelques % au-delà de cette date.

4.2.1 Elaboration d'un scénario hydrométrique historique simplifié

Ainsi en croisant ces facteurs, nous pouvons retenir le scénario historique simplifié suivant :

- De 1840 à 1910 ; les relevés de hauteurs sont réalisés à l'échelle par un observateur à intervalle régulier : trois cotes par jour, des relevés spéciaux sont également mis en place pendant les crues et sont relativement détaillés lorsque collectés. En revanche, les jaugeages sont peu nombreux (en moyenne un par an) et souffrent d'incertitudes relativement importantes liées aux méthodes employées.
- De 1911 aux années 1950, c'est la période « creuse » entre les deux guerres mondiales. Les observations à l'échelle sont malgré tout continues et identiques à la période précédente. Il y a très peu de jaugeages : 23 mesures jusqu'en 1936 puis aucune jusqu'en 1953.
- Fin des années 1950 et années 1960/1970, période de renouveau hydrométrique. Les relevés sont réalisés par un observateur à l'échelle puis remplacé par les relevés automatiques au début des années 60. La précision des jaugeages est nettement améliorée par l'utilisation du moulinet, les jaugeages sont fréquents voire plus fréquents que sur la période contemporaine, et permettent ainsi une bonne définition de la relation hauteur débit. Les incertitudes sur les débits sont quasi-identiques à celles de la période actuelle.
- Entre 1948 et 1986 c'est la construction des grands aménagements sur le Rhône par la CNR, à quelques exceptions près les ouvrages sont réalisés en 3 ans, mise en eau comprise.
- Depuis les années 1990, les relevés sont automatisés. La précision des jaugeages progresse avec l'utilisation de la méthode ADCP.

Nous pouvons ainsi établir que du point de vue des incertitudes associées aux débits, la période de référence est la période récente, depuis les années 1950/1960, ce qui est confirmé pour les stations de Beaucaire et de Bognes. Nous pouvons grâce au travail réalisé à Beaucaire relier l'augmentation des incertitudes pour les périodes anciennes avec les méthodes utilisées et les événements historiques.

Ce scénario simplifié nous semble cohérent historiquement et techniquement, bien qu'il puisse être affiné, par un travail d'archive plus poussé. Nous supposons ainsi qu'il est généralisable aux autres stations traitées dans l'étude, lorsqu'aucun élément historique n'a pu être collecté. Nous nous servons ainsi de la réestimation des débits à Pont de Beaucaire pour caler le modèle d'incertitudes pour les données anciennes lorsque la méthode BaRatin ne peut être appliquée, et en particulier pour les facteurs d'inflation des incertitudes reconstituées.

4.2.2 Facteurs d'inflation des incertitudes reconstituées pour les périodes anciennes

4.2.2.1 *Au pas de temps horaire (instantané)*

L'analyse porte ici sur l'incertitude affectant les débits réestimés par BaRatin à la station de Pont de Beaucaire (Pk 267.7). Nous reprenons ici le découpage du scénario hydrométrique simplifié et celui des courbes de tarages réestimées à Beaucaire : 1840-1910, 1911-1942 et 1943-1969. La période 1943-1969 est prise comme période de référence.

Le modèle d'incertitude est appliqué pour chacune des périodes indiquées afin d'être comparé aux résultats de BaRatin. La décomposition des incertitudes par le modèle est présentée à la Figure 4 -12. On distingue clairement que la composante aléatoire augmente en remontant vers le passé (Figure 4 -12 - 1^{er} ligne). Pour la composante systématique la période 1911-1942 est notoirement plus incertaine (Figure 4 -12 - 2^{ème} ligne), ceci est probablement dû au faible nombre de jaugeages sur

cette période. Pour les trois périodes testées l'adéquation entre le modèle d'incertitude et le faisceau de spaghetti BaRatin est très satisfaisant (Figure 4 -12 - 3^{ème} ligne).

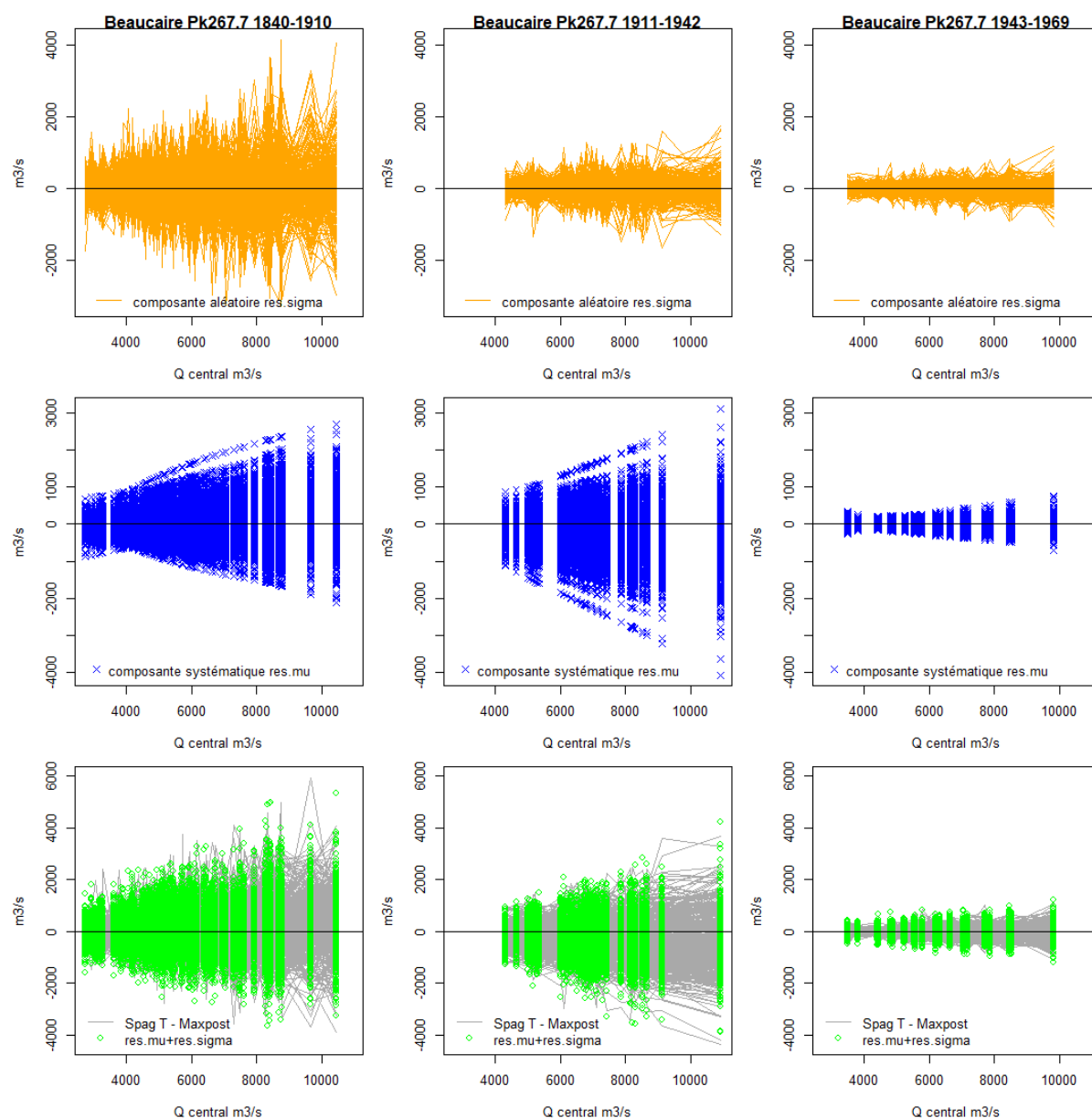


Figure 4-12 : Application du modèle d'incertitude aux débits maximum instantanés annuels, à la station de Pont de Beaucaire (Pk 267.7) pour les périodes 1840-1910, 1911-1942 et 1943-1969 ; décomposition et évolution des composantes du modèle

Le modèle d'incertitude est jugé bon, la largeur de l'intervalle d'incertitude à 95% par rapport au débit de référence permet de caractériser l'évolution de l'incertitude sur les trois périodes temporelles (voir Figure 4 -13). Les intervalles sont bien individualisés pour chacune des périodes, et l'évolution des moyennes de ceux-ci permettent de définir le facteur d'inflation pour chacune des composantes du modèle par rapport à la période de référence (voir Tableau 4 -7). Les facteurs d'inflation entre période, définissent ainsi le scénario d'évolution de l'incertitude en fonction du temps.

Période	Moyenne de IC95%/débit de référence		Facteur d'inflation	
	comp. systématique	comp.aléatoire	comp. systématique	comp.aléatoire
1840-1910	27.9%	34.5%	4.0	3.3
1911-1942	33.4%	14.1%	4.8	1.4
1943-1969	7%	10.5%	1	1

Tableau 4- 7 : Evolution des composantes du modèle d'incertitude appliqué aux débits maximum instantanés à Pont de Beaucaire.

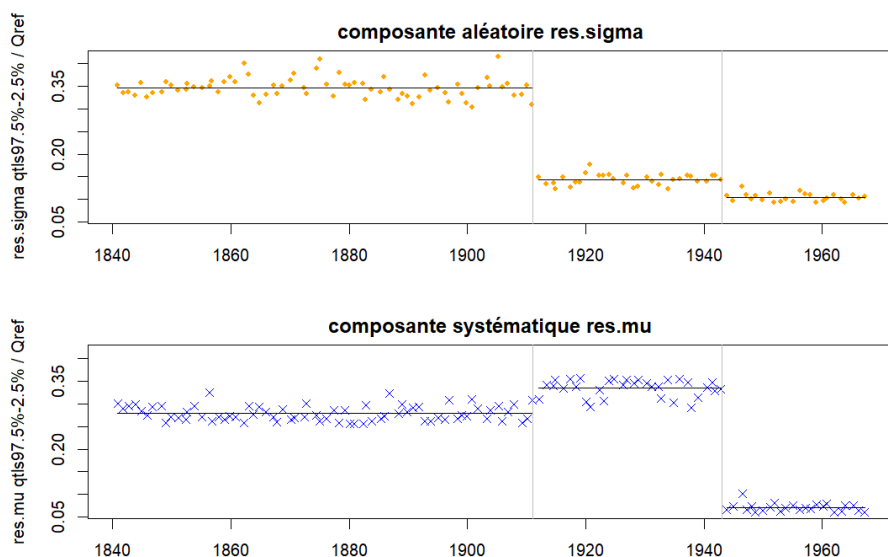


Figure 4-13 : Evolution de l'intervalle d'incertitude à 95% par rapport au débit de référence pour les composantes du modèle d'incertitude appliqué aux débits maximum instantanés à Pont de Beaucaire.

Un test de sensibilité sur l'utilisation du modèle d'erreur pour l'extrapolation des quantiles de crue a été testé et est présenté en Annexe 12-B Analyse de la station de Beaucaire. Les résultats montrent que son utilisation n'entraîne pas de biais significatif sur l'estimation des quantiles : les écarts sur les quantiles moyens sont compris entre -3 et 2% pour les périodes de retours entre 1 et 1000 ans. Une augmentation de l'intervalle d'incertitude à 95% sur les quantiles est décelable, toutefois celle-ci est tout à fait acceptable dans le cadre de l'utilisation d'un modèle simplifié et reste du même ordre de grandeur que les résultats issus de la méthode BaRatin.

4.2.2.2 Au pas de temps journalier

La méthode est similaire au cas précédent sur les données instantanées, à la différence près que l'application du modèle se fait sur l'ensemble des débits journaliers et donc de la plage de débit. L'évolution temporelle de la décomposition des incertitudes est présentée Figure 4 -15. La période de référence (1946-2016) a la particularité d'avoir une incertitude très faible.

La composante aléatoire (Figure 4 -13 - 1^{ère} ligne) varie peu entre la période de référence et la période 1913-1945, elle augmente ensuite plus significativement pour la période 1840-1912. Pour la composante systématique l'augmentation est très marquée entre période de référence et les périodes antérieures. L'augmentation paraît d'autant plus forte que l'amplitude des incertitudes de la période de référence est faible. Caractéristique que l'on retrouve dans les facteurs d'inflation ; i.e. les augmentations sont numériquement supérieures aux résultats du modèle appliqué aux données instantanées alors que l'amplitude des incertitudes reste inférieure dans ce cas d'application.

Période	Moyenne de IC95%/débit de référence		Facteur d'inflation	
	comp. systématique	comp.aléatoire	comp. systématique	comp.aléatoire
1840-1912	13.1%	22.6%	5.1	2.25
1913-1945	16.8%	10%	6.5	1
1946-2016	2.6%	10%	1	1

Tableau 4-8 : Evolution des composantes du modèle d'incertitude appliqué aux débits journaliers à Pont de Beaucaire

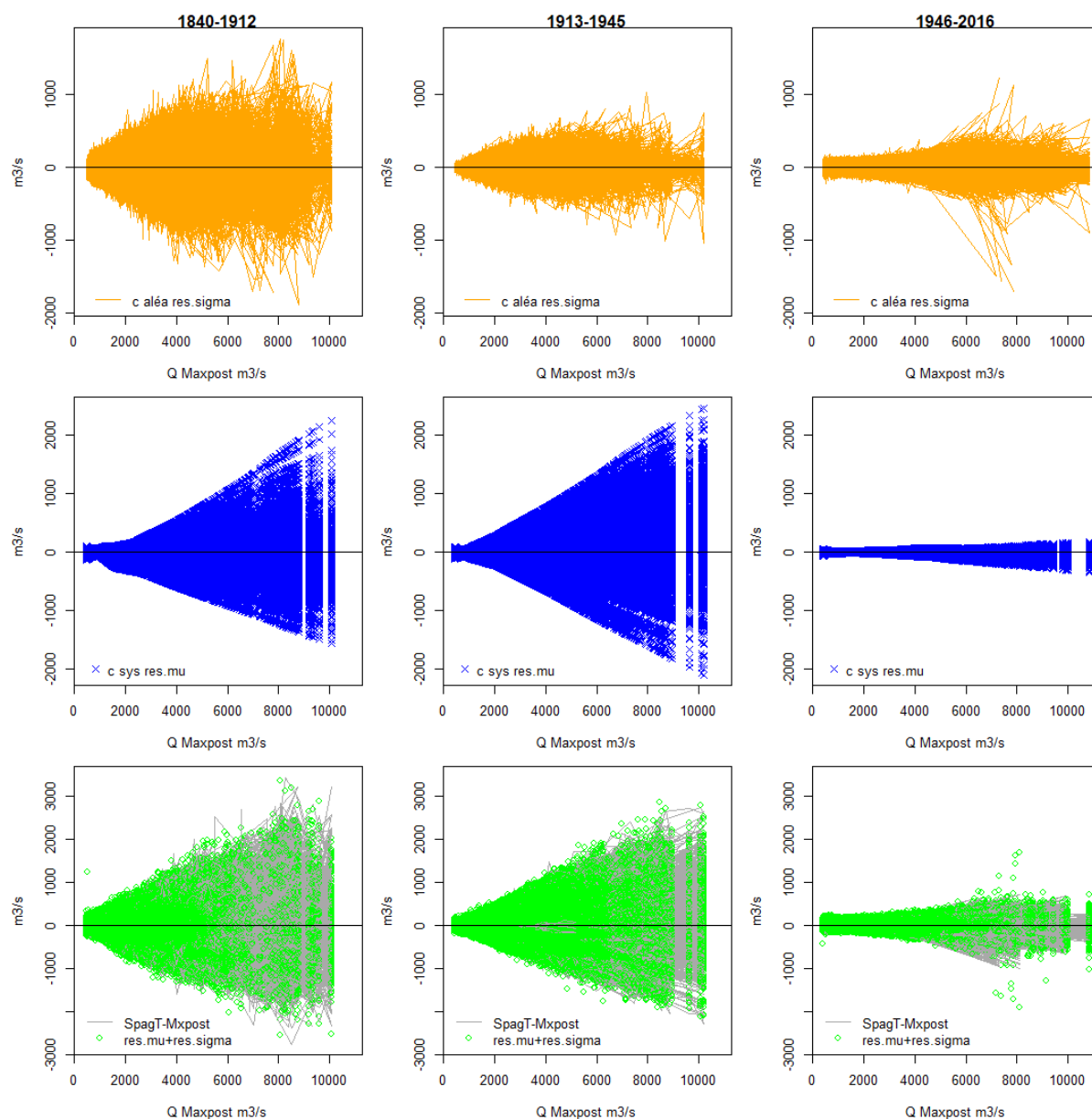


Figure 4-14 : Application du modèle d'incertitude aux débits journaliers à la station de Pont de Beaucaire (Pk 267.7) pour les périodes 1840-1910, 1911-1942 et 1943-1969 ; décomposition et évolution des composantes du modèle

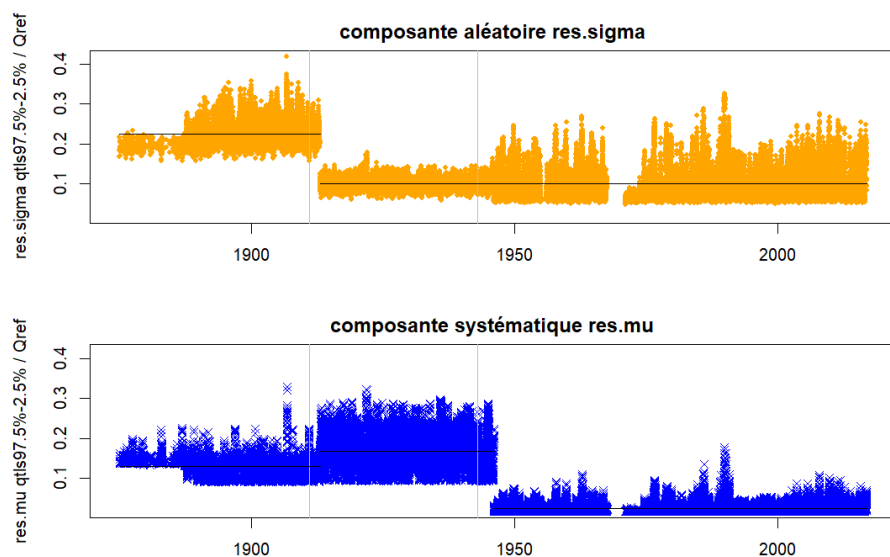


Figure 4-15 : Evolution de l'intervalle d'incertitude à 95% par rapport au débit de référence pour les composantes du modèle d'incertitude appliqué aux débits journaliers à Beaucaire

5 CONCLUSIONS

5.1 Collecte de données

En ce qui concerne la collecte des données, les principales archives vivantes ont été exploitées. De nombreux efforts ont été consentis pour l'acquisition de données d'archives permettant d'étendre la période d'analyse plus en profondeur sur le XX^{ème} siècle et jusqu'au milieu du XIX^{ème} siècle pour le cas particulier de la station de Beaucaire.

Il y a deux contraintes principales à l'application de la méthode de la méthode BaRatin pour les données anciennes.

Premièrement, la disponibilité des chroniques limnigraphiques. Du point de vue des crues celles-ci ont pu être reconstituées grâce aux annuaires de crues qui constituent une formidable source d'information. Cependant l'information reste bien souvent cantonnée à la seule valeur de la pointe de crue stricto sensu. Les limnigrammes papiers sont une ressource relativement abondante et bien conservée pour la plupart des stations. Son exploitation souffre aujourd'hui du problème de la numérisation automatique, face à la quantité de données à saisir, en particulier lorsqu'il s'agit de tracé bobine ou papier. L'échec des méthodes automatiques disponibles [CITATION Ullmann2005 \l 1036] laisse le champ libre aux améliorations sur ce plan. Une campagne de saisie manuelle de grande ampleur, bien que rébarbative, pourrait permettre de compléter les données limnigraphiques.

Deuxièmement, la limitation la plus importante reste la connaissance des relations hauteur-débit dans le passé. Les données de jaugeages, ou les courbes de tarages estimées sont les données essentielles à la réestimation des débits et à la compréhension des conditions hydrauliques des sites. Les lacunes pour ces données sur les périodes antérieures aux années 60 sont relativement importantes. Un travail de recherche d'archive ciblé pourrait permettre de combler ce manque. Plusieurs fonds documentaires pourraient être candidat à ces recherches : archives départementales pour celles des services spéciaux du Rhône du corps des Ponts et Chaussée, mais également les directions locales de la CNR.

Un des facteurs les plus importants pour ces perspectives sera de bien prendre en compte les changements de site de mesure, en particulier au niveau des appellations. En effet les appellations locales sont bien souvent utilisées comme clé de référence pour le classement documentaire, ce qui implique de connaître à minima l'historique des sites en amont des recherches documentaires.

Une autre piste exploratoire sur ce point pourrait être la reconstitution des conditions passées par la modélisation numérique. Bien que celle-ci demande également une connaissance relativement fine de la géographie des sites. A ce titre il est intéressant de mentionner les bases de données ortho photographiques de l'IGN (BD HISTO), ainsi que celle du Groupe de Recherche Rhône Alpes sur les Infrastructures et l'Eau (GRAIE) qui compile une importante base d'informations géographiques, en particulier sur la morphologie du Rhône.

5.2 Estimation des incertitudes par la méthode BaRatin

La méthode BaRatin s'est avérée être un outil performant pour l'estimation des incertitudes liées aux données de débits sur le Rhône. Nous avons vu que son application sur les données brutes donne des résultats tout à fait cohérents avec les estimations faites par la CNR, que ce soit au niveau des courbes de tarage ou des débits réestimés. Dans tous les cas les divergences observées ont pu être

expliquées, soit par la prise en compte de correction d'erreurs sur les données brutes, soit par des différences dans l'établissement des courbes de tarage, soit par la perturbation des conditions hydrauliques non connues lors de l'application de la méthode.

Outre l'importance des données nécessaires à son application, un des freins à l'utilisation de cette méthode vient de la difficulté de découper l'historique de la station en période homogène pour l'établissement de la relation hauteur-débit. Cette opération reste en partie à l'appréciation de l'opérateur à partir de sa connaissance du site. Cette difficulté pourrait être levée par les futurs développements de la méthode BaRatin sur les problématiques de détarage. Une option future devrait permettre de caler en une seule étape l'ensemble des paramètres de courbes de tarage successives. Cela évitera de recourir aux recyclages de paramètres entre périodes.

Les principaux avantages de l'utilisation de BaRatin sont :

- La quantification des incertitudes totales sur les valeurs de débit. Ceci est particulièrement intéressant lors d'événements historiques, pour lesquels les estimations sur les grandes crues peuvent varier dans la littérature. La méthode BaRatin permet ici la prise en compte de la diversité des estimations possibles des débits.
- La souplesse d'intégration des jaugeages pour l'établissement des courbes de tarage. Alors que certaines valeurs peuvent être de moins bonne qualité ou même être questionnées, la prise en compte des incertitudes sur les jaugeages permet la valorisation de l'information pour un plus grand nombre de données que le simple raisonnement binaire exclusion/intégration.
- La prise en compte des incertitudes sur la hauteur, les jaugeages et les courbes de tarage permet d'avoir une approche plus qualitative et traçable de l'ensemble des incertitudes. A titre d'exemple le recyclage des paramètres de courbe de tarage a posteriori d'une période comme a priori d'une période voisine permet de formaliser une démarche effectuée couramment de manière experte pour les extrapolations de courbes de tarage dans les domaines peu ou pas jaugeés.

6 BIBLIOGRAPHIE

- Anselmo, V., et al. «Conférence de consensus. Débit maximal de la crue du Rhône de décembre 2003 à Beaucaire.» 2005.
- Coz, J. Le, B. Renard, L. Bonnifait, F. Branger, et R. Le Boursicaud. «Combining hydraulic knowledge and uncertain gaugings in the estimation of hydrometric rating curves: A Bayesian approach.» *Journal of Hydrology* (Elsevier BV) 509 (2 2014): 573-587.
- Horner, I., Jérôme Le Coz, et B. Renard. «Estimation des incertitudes sur les hydrogrammes avec BaRatin.» Tech. rep., IRSTEA, 2015.
- Lang, M., et D. Coeur. *Les inondations remarquables en France. Inventaire 2011 pour la directive Inondation*. Quae, 2014.
- Lang, Michel, et al. «Résultats du projet ExtraFlo (ANR 2009-2013) sur l'estimation des pluies et crues extrêmes.» *La Houille Blanche* (EDP Sciences), 4 2014: 5-13.
- Lang, Michel, Karine Pobanz, Benjamin Renard, Elodie Renouf, et Eric Sauquet. «Extrapolation of rating curves by hydraulic modelling, with application to flood frequency analysis.» *Hydrological Sciences Journal* (Informa UK Limited) 55 (8 2010): 883-898.
- Le Coz, Jérôme, et al. «Analyse bayésienne des courbes de tarage et de leurs incertitudes : la méthode BaRatin.» *La Houille Blanche* (EDP Sciences), dec 2013: 31-41.
- Mansanarez, V. «Non-unique stage-discharge relations: Bayesian analysis of complex rating curves and their uncertainties.» Ph.D. dissertation, Université Grenoble Alpes, 2016.
- Neppel, Luc, et al. «Flood frequency analysis using historical data: accounting for random and systematic errors.» *Hydrological Sciences Journal* (Taylor & Francis) 55 (2010): 192-208.
- Olivier, A., G. Pierrefeu, et M. Scotti. «Conférence de consensus sur le débit du Rhône à Beaucaire pour la crue de Décembre 2003, Contribution CNR, Pièce 2, Evaluation de la crue de décembre 2003 – Analyse hydrométrique.» Tech. rep., COMPAGNIE NATIONALE DU RHONE Département Laboratoire d'Essais – Mesures - Contrôles, 2005.
- Pardé, Maurice. «Les crues du Rhône de novembre 1944 à février 1945.» *Les Etudes rhodaniennes* (PERSEE Program) 23 (1948): 69-76.
- Pardé, Maurice. «Les crues du Rhône en décembre 1925 et février 1928.» *Les Etudes rhodaniennes* (PERSEE Program) 4 (1928): 3-46.
- Pichard, Georges, et Émeline Roucaute. *Sept siècles d'histoire hydroclimatique du Rhône d'Orange à la mer (1300-2000) : Climat, crues, inondations*. Édité par Gilles Arnaud-Fassetta. Géomorphologie : relief, processus, environnement, 2017.
- Rigaudière, P., et al. «Etude Globale des crues du Rhône.» Tech. rep., SAFEGE Cetiis and Université de Nice, 2000.
- Ullmann, Albin, Frédéric Pons, et Vincent Moron. «Tool kit helps digitize tide gauge records.» *Eos, Transactions American Geophysical Union* (Wiley-Blackwell) 86 (2005): 34

