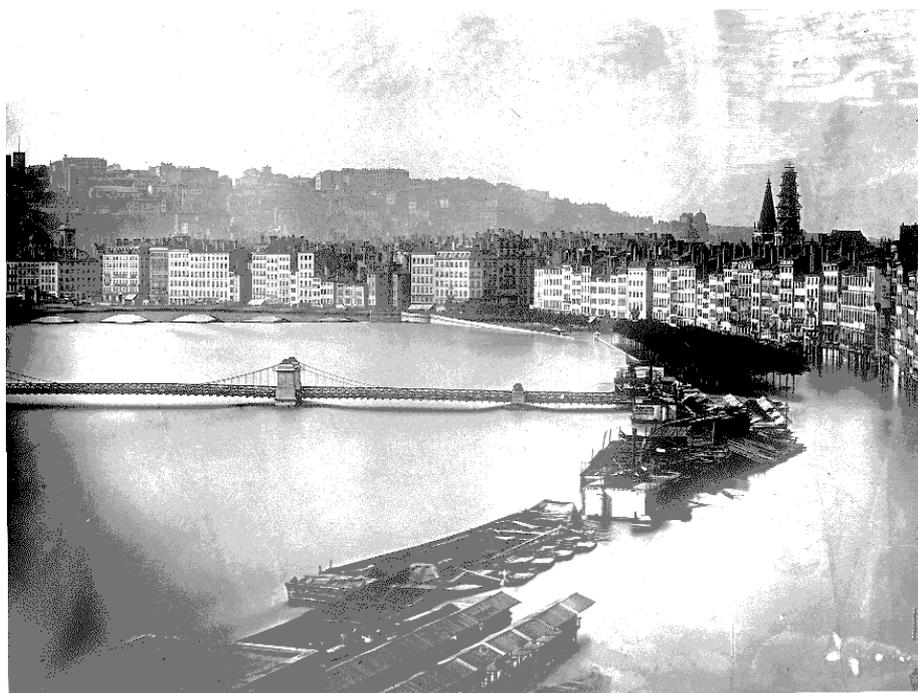




Actualisation de l'hydrologie des crues du Rhône

C - Rapport Synthétique de diffusion des résultats

DÉCEMBRE 2018



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 Synthétique de diffusion des résultats
Objet : Rapport Synthétique
Client : Dreal Auvergne-Rhône-Alpes
Date : 10/12/2018
Version : Finale
Auteur : Antoine Bard (Hy-dro Consultant)
Michel Lang (Irstea)
Ref : Rhone_RS4

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
- A03 Rapport général Phase 3 : Analyse Méthodologique
- 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 Viviers
- B11 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
- Annexe B V - Hydrogrammes de crue

C - Rapport synthétique de diffusion des résultats

Table des matières

Organisation des éléments de restitution.....	3
1 Contexte & objectifs.....	5
2 Résultats de la Phase 1.....	7
2.1 Source d'archives consultées.....	7
2.2 Disponibilité des données hydrométriques sur le Rhône.....	7
2.3 Méthodologie de reconstitution des débits.....	9
2.4 Analyse des principales sources d'incertitudes.....	10
2.5 Estimation des courbes de tarage.....	10
2.5.1 Propagation des incertitudes sur les débits.....	11
2.5.2 Evolution des incertitudes sur 200 ans à Beaucaire et élaboration d'un modèle historique	12
3 Résultats de la Phase 2.....	14
3.1 Méthode de propagation des incertitudes aux quantiles théoriques de crue.....	14
3.2 Constitution des échantillons de crue.....	15
3.3 Comparaison des ajustements de Gumbel et GEV.....	15
3.4 Réduction des incertitudes grâce aux données anciennes.....	18
3.5 Réduction des incertitudes grâce à l'approche régionale.....	18
4 Synthèse des estimations des quantiles de crue.....	20
5 Hydrogrammes de crue.....	21
6 Bibliographie.....	22

1 CONTEXTE & OBJECTIFS

Le Rhône s'écoule sur 545 km depuis la frontière franco-suisse en aval du Lac Léman, jusqu'au delta camarguais et la Méditerranée. Le fleuve traverse 305 communes, dont 194 seraient concernées par une inondation exceptionnelle impactant près de 250 000 personnes (étude ARAVIR Plan Rhône 2018).

La connaissance du fonctionnement du Rhône et de ses crues s'appuie sur les observations de longues séries temporelles, qui donnent le recul nécessaire pour apprécier leur périodicité et leur intensité. L'approfondissement de ces connaissances est donc en perpétuelle amélioration. Historiquement l'étude hydrologique du fleuve commence officiellement au XVIII^{ème} par la création du Service Spécial du Rhône des Ponts et Chaussées. Ces études se poursuivent avec notamment les travaux de Maurice Pardé au début du XX^{ème} siècle. Elles sont ensuite reprises par la Compagnie Nationale du Rhône dès 1933 avec les aménagements hydro-électriques.

En 2000, l'étude globale sur le Rhône (EGR) réalisée par SAFEGE[CITATION Rigaudiere2000 \ | 1036] a permis d'actualiser les valeurs des quantiles de crue (périodes de retour 10, 100 et 1000 ans) sur le cours principal du Rhône et ses affluents. Cette étude, actualisée en 2014 sur les stations de Viviers et Beaucaire, était jusqu'aujourd'hui l'étude hydrologique de référence sur les caractéristiques de crue.

Nécessité d'une actualisation plus profonde

Le projet ExtraFlo (Lang *et al.*, 2014), lancé dans le cadre du programme Risques Naturels de l'Agence Nationale de la Recherche, a apporté de nouveaux éléments méthodologiques sur l'estimation des valeurs extrêmes de pluie et de crue, à partir d'un travail de comparaison et d'évaluation des principales méthodes d'estimation existantes en France. Ces éléments ont amené la DREAL Auvergne-Rhône-Alpes/SBRMPR/Pôle Plan Rhône à définir les objectifs d'une actualisation approfondie basée 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 révision méthodologique de l'élaboration des quantiles (débits caractéristiques) et des hydrogrammes synthétiques de crue d'après les conclusions de la démarche du projet Extra-Flo,
- Une évaluation des apports méthodologiques de l'opération et une évaluation des possibilités de prolonger la démarche en intégrant des données historiques plus anciennes.

Les stations hydrométriques sur le Rhône

L'étude porte sur douze stations hydrométriques (cf. Figure 1). Traditionnellement les hauteurs d'eau sont mesurées par un limnigraphe à une échelle de référence ; station dite à simple niveau. C'est le cas des stations de Pougny, Bognes, Lagnieu et Beaucaire. Lorsque la zone de mesure se situe dans le plan d'eau d'une retenue artificielle, deux points de mesure distants sont nécessaires, il s'agit de station dite double niveau. On retrouve cette configuration à Seyssel, Brens, Ternay, Valence et Viviers. La station de Lyon, elle aussi influencée, est une station de mesure des vitesses par ultra-sons. Enfin deux stations virtuelles, Chateaufort et Chusclan, viennent compléter le panel de l'étude : les débits y sont reconstitués en fonction des points de mesure avoisinants (amont, aval et affluents).

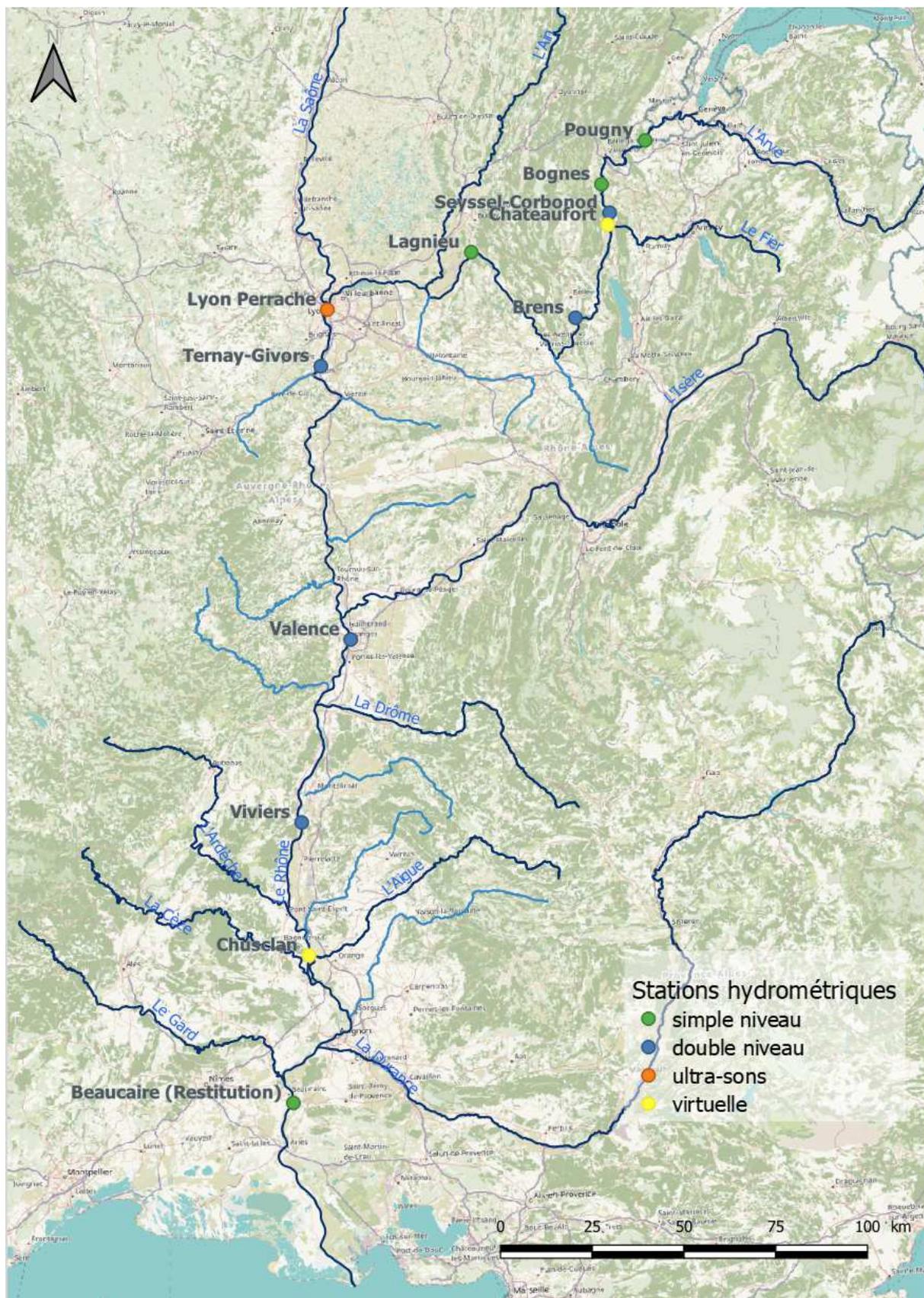


Figure 1 : Carte générale du cours du Rhône et des stations hydrométriques étudiées

2 RÉSULTATS DE LA PHASE 1

La première phase de l'étude a porté sur la collecte, l'analyse et la critique des données hydrométriques, c'est-à-dire l'ensemble des données qui permettent le calcul des débits sur les différentes stations du Rhône. L'objectif a été d'intégrer les données anciennes mais également d'évaluer leurs incertitudes.

2.1 Source d'archives consultées

Un important travail a été mené sur **les archives de la CNR**, à la fois sur le fond d'archives des services généraux que les archives « vives » du service d'hydrométrie. Celles-ci ont fourni une grande partie des données exploitées ici ; notamment les jaugeages anciens et les annuaires de crues. Ces archives sont extrêmement riches et denses, les limnigraphes pour l'ensemble des stations d'intérêt pour la période contemporaine (1950-1990) y sont entreposés et pourraient faire l'objet de numérisation afin de compléter les séries continues.

Les archives départementales du Rhône ont été exploitées par la DREAL AURA, en complément des données déjà collectées. Ces archives sont riches notamment de relevés limnigraphiques. Les relevés depuis 1884 sont disponibles pour les stations de Seyssel, Lagnieu, Lyon, Valence, Viviers, Chusclan, et Beaucaire, et à partir de 1911 pour la totalité des stations sur le fleuve. Des perspectives de numérisation permettraient de compléter les séries actuelles.

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 hébergent désormais les documents de l'ancien EPTB Rhône Saône.

Les archives départementales de l'Hérault disposent pour la station de Beaucaire des limnigrammes papier de la station, reprenant soit la cote moyenne journalière, soit les trois cotes journalières pour la période 1830-1928. Ces données pourraient venir compléter la série de la station, mais non pas été exploitées directement.

Les travaux des historiens G. Pichard et E. Roucaute (Univ. Aix-Marseille) ont apporté une plus-value importante pour la série de Beaucaire, permettant de remonter jusqu'en 1816 et ainsi de reconstituer une série de donnée inédite de plus de deux cent ans.

Le fond Pardé a également été utilisé, notamment via les archives numérisées et disponibles sur **le portail Persée** (Université de Lyon, CNRS et ENS de Lyon).

2.2 Disponibilité des données hydrométriques sur le Rhône

L'étude s'est focalisée sur les données du XIX^{ème} au XXI^{ème} siècle. Les données de débit sont classiquement obtenues à partir des enregistrements de hauteur d'eau (horaire *Hh* ou instantanée *Hi*) et de courbes de tarage (*CdT*) (cf. Figure 3) construites à partir de jaugeages (*Jgg*). Les stations à double niveau permettent d'estimer la pente de la ligne d'eau et le débit est reconstitué à l'aide d'une courbe de tarage à double niveau (cf. Figure 4).

La méthode développée pour l'étude permet d'utiliser à la fois les données de débits estimées à l'époque par les services ad hoc, mais également de recalculer les débits en reconsidérant les données de hauteur initialement observées ainsi que l'estimation des courbes de tarage sur la base des jaugeages de l'époque. A noter enfin le cas de la station hydrométrique de Lyon-Perrache, avec

une mesure instantanée du champ de vitesse par ultrasons (à une profondeur donnée), qui permet de reconstituer le débit à l'aide d'une hypothèse sur le profil vertical de vitesse.

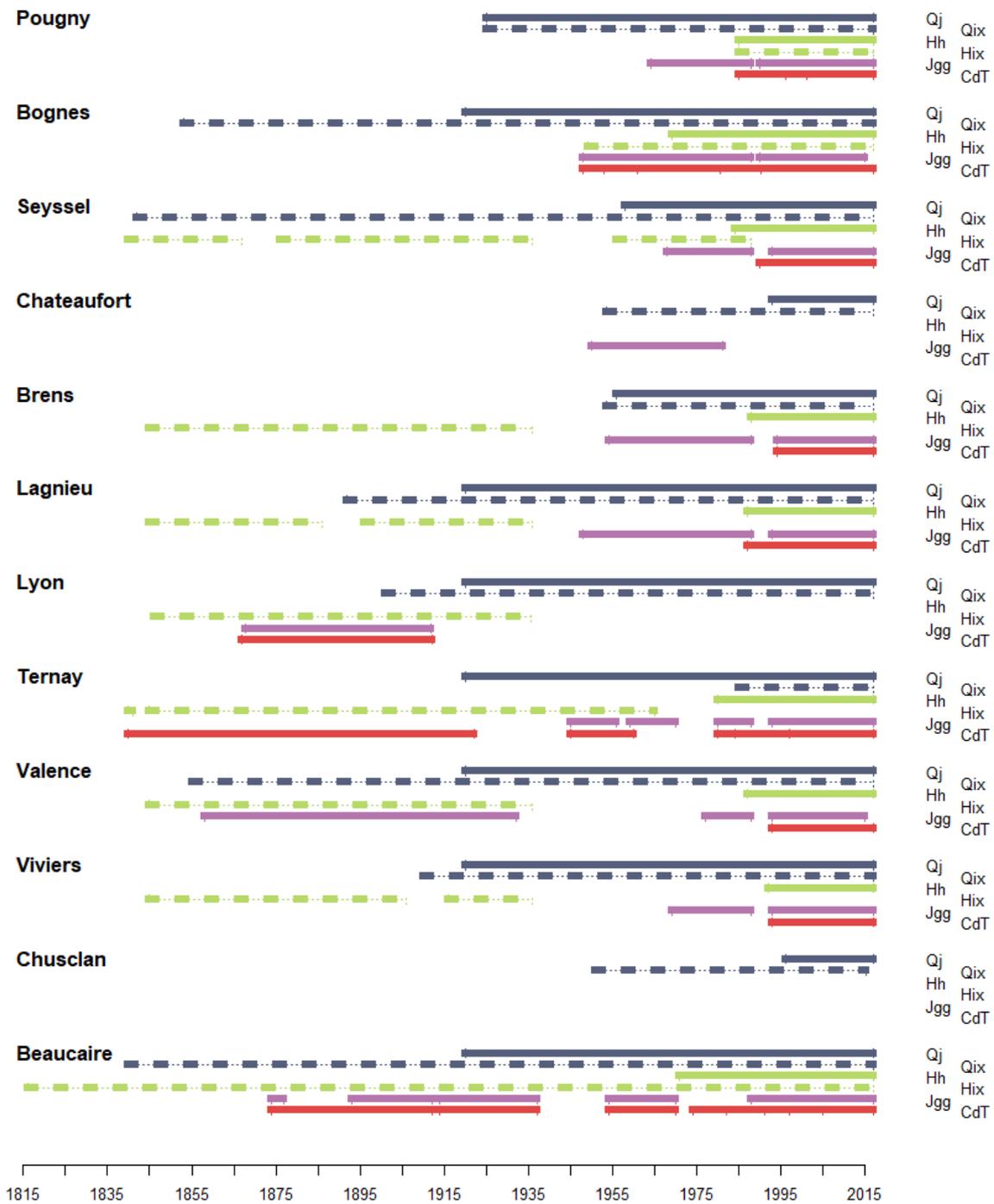


Figure 2 : Disponibilité des données dans le temps Débit journalier (Qj), Débit maximum annuel (Qix), Hauteur horaire (Hh), Hauteur maximum annuel (Hix), Jaugeages (Jgg), et bilan des courbes de tarage (CdT) réestimées dans le cadre de l'étude aux stations du Rhône

2.3 Méthodologie de reconstitution des débits

La méthode BaRatin (Le Coz, et al. 2014) développée par Irstea permet la combinaison d'une expertise humaine a priori sur le fonctionnement hydraulique du site, avec des jaugeages pour estimer les courbes de tarage avec incertitudes. Cette chaîne permet in fine de prendre en compte l'ensemble des incertitudes dans le calcul des débits à partir des mesures de hauteur.

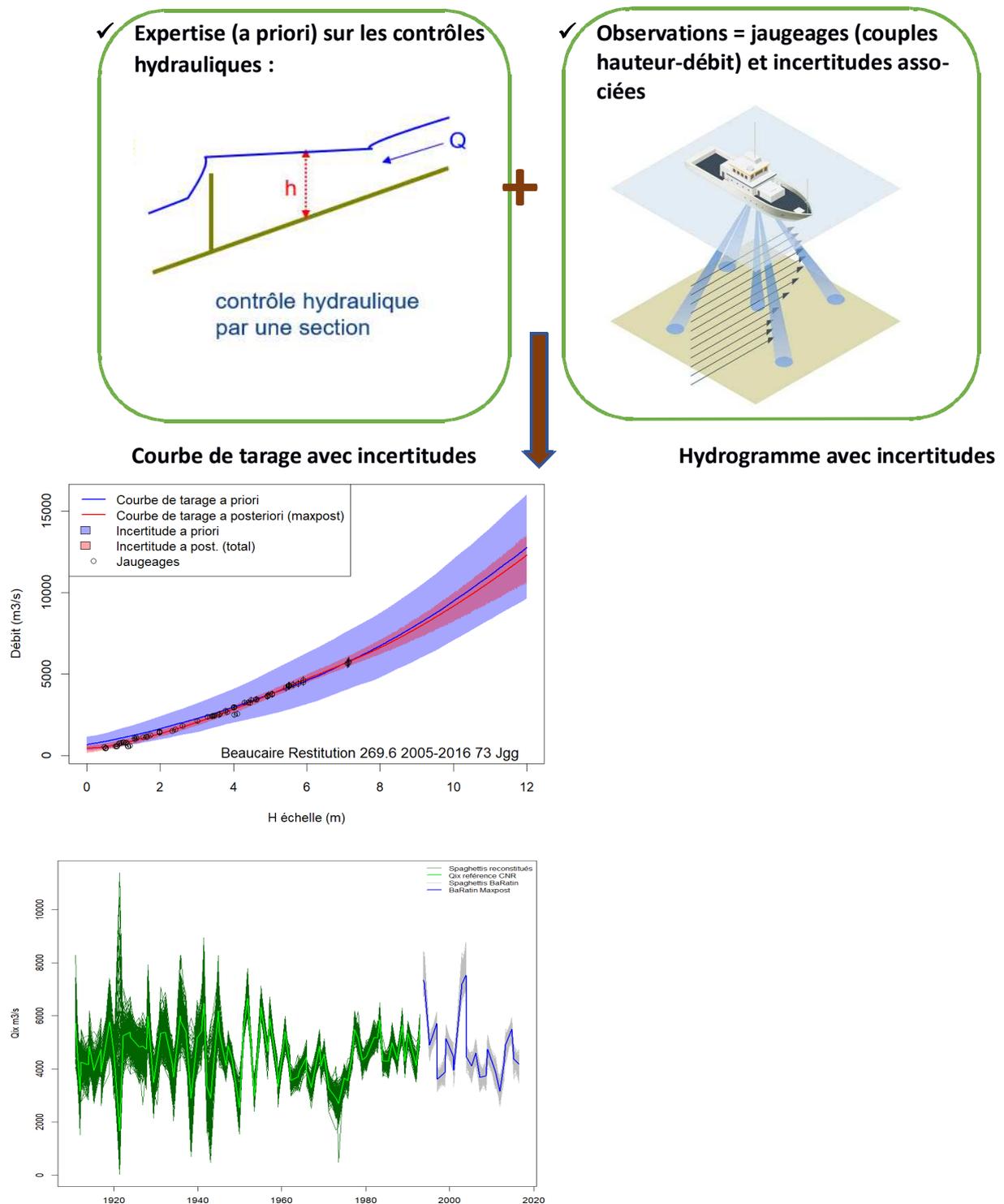


Figure 3 : Processus de calcul des débits avec incertitude selon la méthode BaRatin

2.4 Analyse des principales sources d'incertitudes

L'analyse a permis de propager les sources d'incertitude sur les jaugeages et les hauteurs d'eau et d'estimer les incertitudes finales à la fois sur la courbe de tarage et sur les hydrogrammes.

Les erreurs sur les débits jaugés ont été évaluées d'après le type de jaugeage, qui dépend généralement de la période temporelle.

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 1 : Incertitudes sur les jaugeages

Deux types d'incertitudes ont été pris en compte sur les hauteurs d'eau : les erreurs aléatoires liées à l'imprécision de la mesure et les erreurs systématiques liées à la dérive des instruments de mesure. Ces erreurs varient selon la période considérée en fonction des moyens de mesure. Pour les périodes anciennes, les erreurs systématiques correspondent aux mouvements d'échelles où à l'actualisation de l'altitude des barreaux de mesure. Sur ce sujet seule la station historique de Beaucaire est suffisamment documentée pour obtenir une estimation pour les erreurs systématiques anciennes, ces valeurs ont donc été reprises par défaut pour d'autres stations. Les erreurs aléatoires peuvent également être plus importantes sur les crues historiques, dont les hauteurs ont fluctué au cours de l'évènement, en particulier lors de rupture des digues de protection.

	Erreurs aléatoires	Erreurs systématiques
Après 1960	2 cm	5 cm recalage tous les 6 mois
De 1840 à 1960	Entre 5 et 10 cm	7 cm recalage tous les 25 ans ¹
De 1816 à 1839	30 cm	

Tableau 2 : Incertitudes sur les hauteurs d'eau

La méthode BaRatin inclut l'incertitude liée à l'expertise humaine sur les contrôles hydrauliques et également l'incertitude liée à la formalisation du modèle hydraulique de courbe de tarage.

2.5 Estimation des courbes de tarage

L'estimation des courbes de tarage par la méthode Baratin est au cœur de l'analyse qualitative et de la valorisation des données de cette étude. Elle offre une formalisation de l'ensemble des sources d'incertitude et leur propagation aux débits estimés. Des développements récents de la méthode BaRatin ont permis de traiter les stations influencées par les aménagements hydrauliques, stations dites à doubles niveaux, que l'on retrouve à Seyssel, Brens, Ternay, Valence et Viviers.

Les courbes de tarage simple niveau (cf. Figure 3) décrivent une relation univoque entre hauteur d'eau mesurée et débit transitant au droit du point de mesure ($Q = f(H)$). Les courbes de tarage à double niveau (cf. Figure 4) sont quant à elles composées de deux parties : une première partie influencée par le niveau aval ; $Q = f(H, H_{aval})$ et une seconde partie non influencée par l'aval (pour les hauteurs importantes) où l'on retrouve une relation hauteur-débit univoque.

1 Estimation basée sur les recherches historiques à Beaucaire

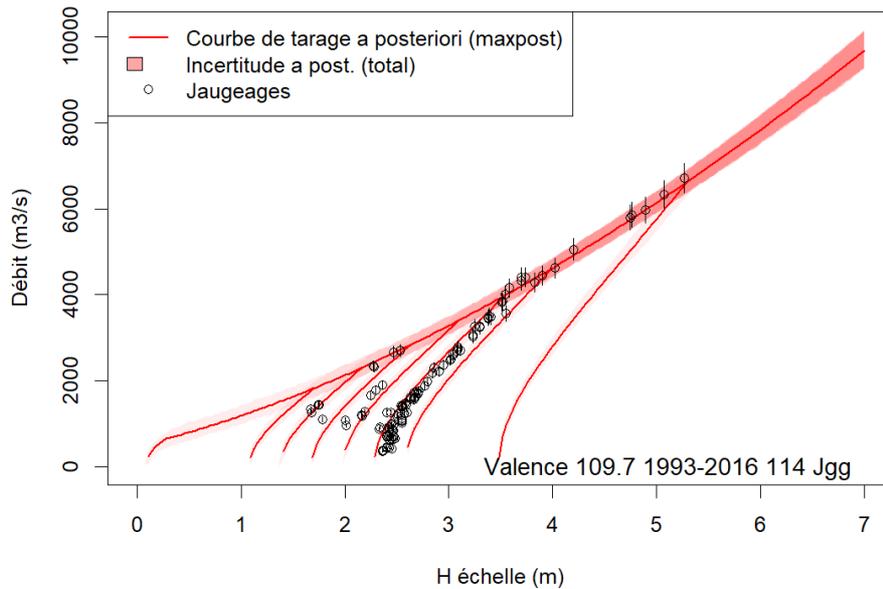


Figure 4 : Courbe de tarage double niveau à Valence pour la période 1993-2016

Le bilan des courbes de tarage estimées est synthétisé dans le tableau suivant et également reporté à la Figure 2.

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
Seysssel	1	1990-2016
Chateaufort		Aucune
Brens	1	1994-2016
Lagnieu	1	1987-2016
Lyon Perrache	1	1867-1911
Ternay	5	1840-1921 / 1945-1959 / 1980-1983 / 1984-1996 / 1997-2017
Valence	1	1993-2016
Viviers	1	1993-2016
Chusclan		Aucune
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 : Courbes de tarage réestimées par la méthode BaRatin

2.5.1 Propagation des incertitudes sur les débits

A partir de la formalisation des erreurs sur les mesures de hauteur et les jaugeages, la méthode BaRatin permet la propagation des différentes sources d'incertitude et de connaître l'importance de celles-ci sur les débits réestimés. On distingue ainsi sur les débits estimés les composantes suivantes :

- Incertitude limnigramme, résultant de la propagation des erreurs sur les hauteurs d'eau (aléatoires et systématiques),
- Incertitude paramétrique, résultant de la propagation des incertitudes liées à l'estimation des paramètres de la courbe de tarage et des jaugeages,
- Incertitude restante, à relier à l'incertitude sur les a priori exprimés et sur le choix de la formulation analytique pour la courbe de tarage.

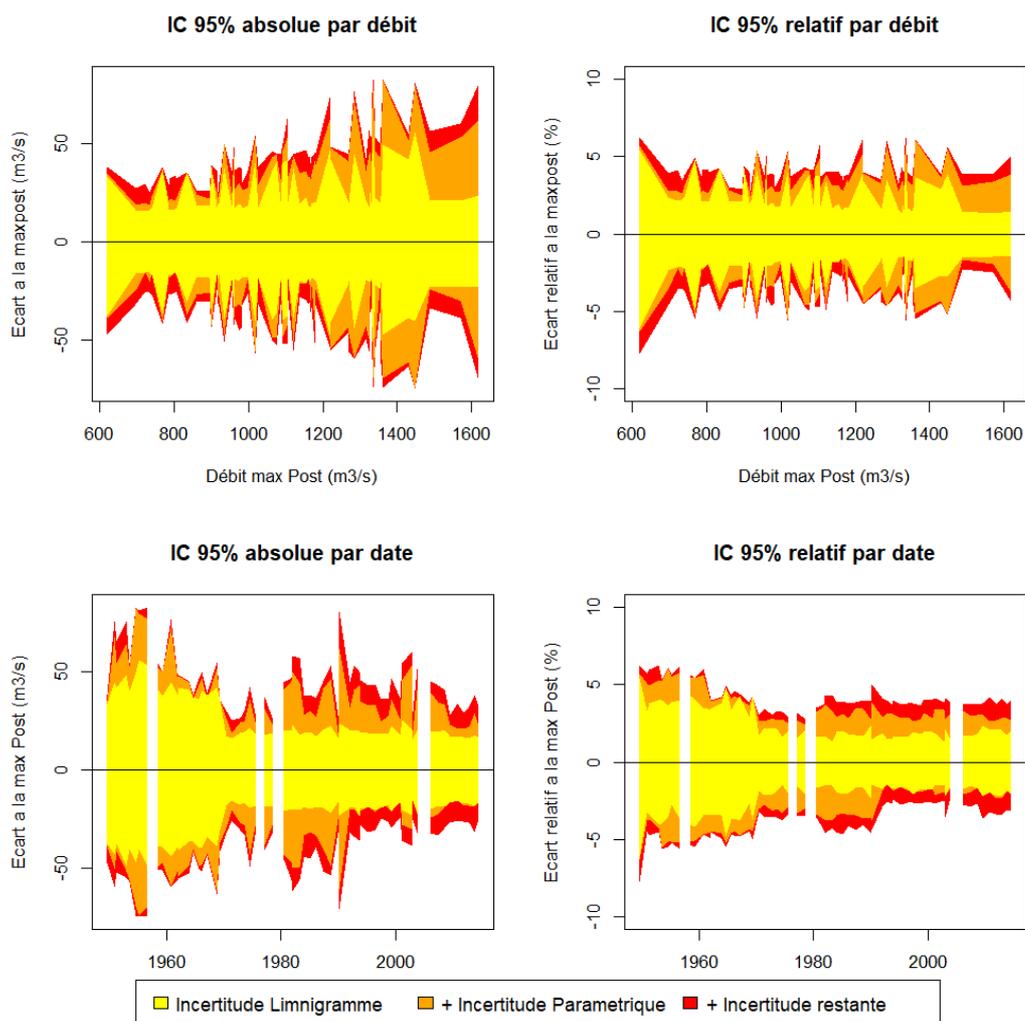


Figure 5 : Résultats de la propagation des incertitudes aux débits estimés, exemple de la station de Bognes

La propagation des erreurs en fonction de la source, de la période temporelle et de l'importance des débits, permet de cibler les efforts à fournir pour améliorer l'estimation des débits.

2.5.2 [Evolution des incertitudes sur 200 ans à Beaucaire et élaboration d'un modèle historique](#)

La station de Beaucaire-Tarascon offre une perspective historique exceptionnelle par la richesse des archives disponibles. Le dépouillement des données réalisé sur le bas Rhône, notamment par [CITATION doi:10.1080/02626667.2017.1349314 | 1036], et ceux menés dans la présente étude, ont permis la reconstruction d'une chronique de débit sur 200 ans de 1816 à 2016. Les incertitudes estimées par la méthode BaRatin à la fois sur les débits journaliers et sur les débits de pointe sont reportées sur la figure suivante.

Sur la base de cette chronique un modèle d'incertitude historique est construit. Ce modèle sera ensuite réutilisé pour estimer l'incertitude sur les périodes anciennes pour les stations dont on ne dispose que de valeurs de débit en archive. Ce qui permettra d'utiliser en complément de la méthode BaRatin l'ensemble des données historiques disponibles.

Pour la station de Beaucaire, l'évolution des incertitudes sur les débits maximums augmente globalement en remontant dans le passé, même si on note un petit extrémum pour la période 1946-1971, pendant laquelle le suivi hydrométrique en termes de nombre de jaugeage était plus important qu'à présent. Cette évolution est ensuite traduite par le modèle d'erreur en distinguant les deux composantes d'erreur (aléatoire et systématique).

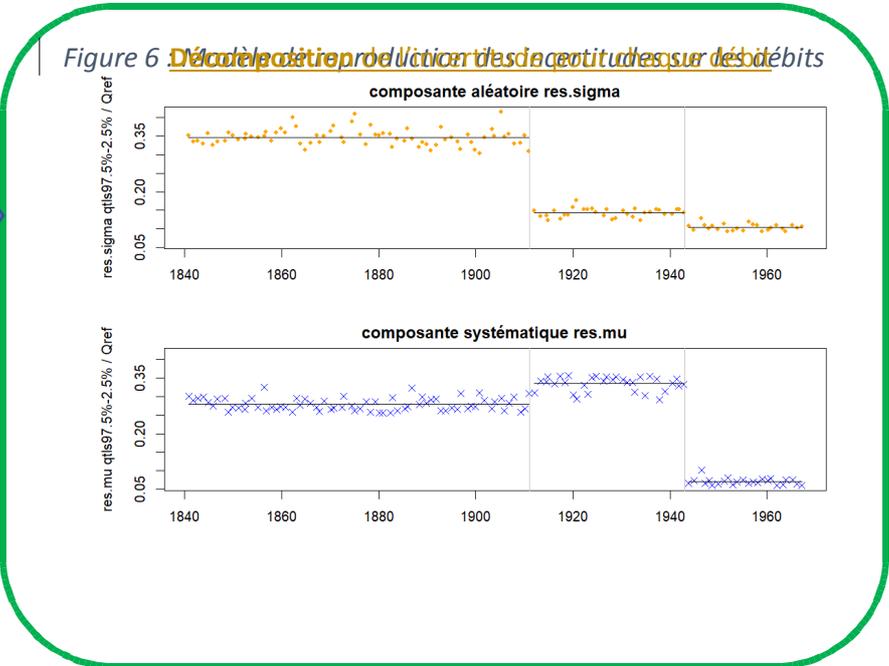
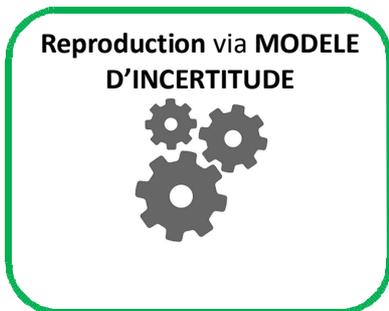
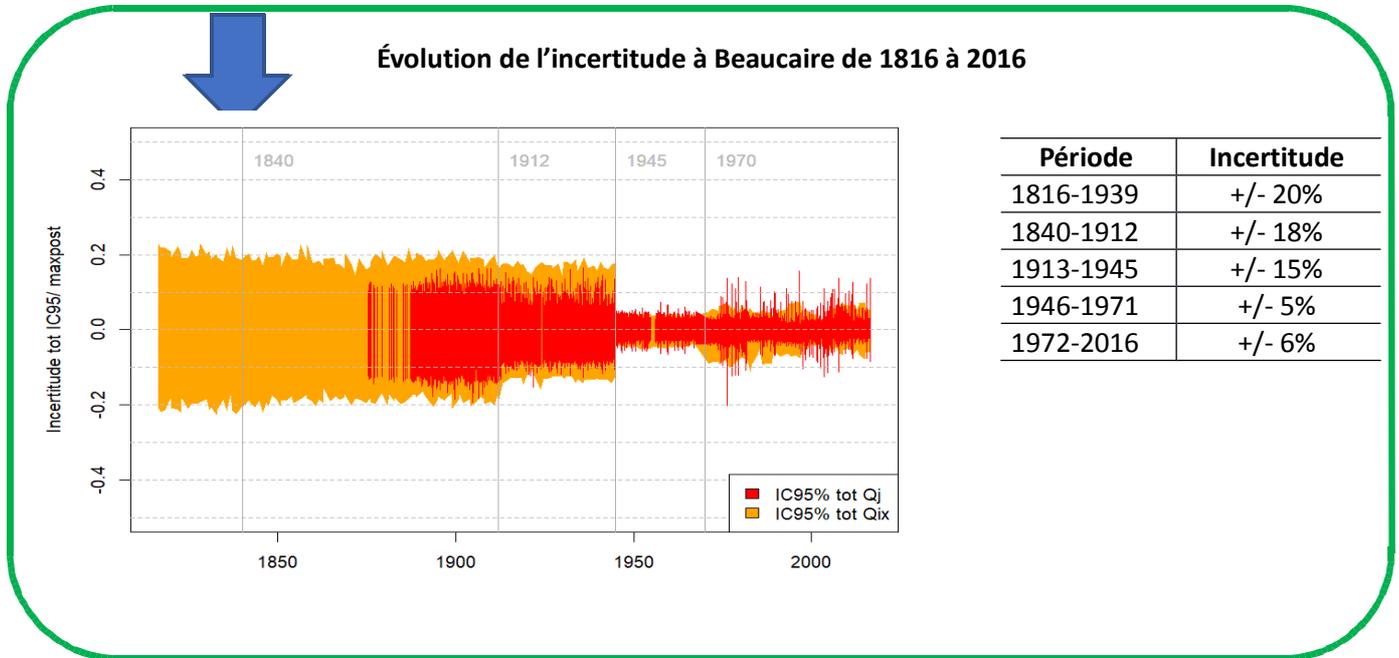


Figure 7 : Modèle de reproduction des incertitudes sur les débits historiques à Beaucaire

3 RÉSULTATS DE LA PHASE 2

La phase 2 de l'étude a permis de réviser les estimations des caractéristiques théoriques de crue à partir des nouvelles données collectées en phase 1 et en prenant en compte les incertitudes affectant les débits.

3.1 Méthode de propagation des incertitudes aux quantiles théoriques de crue

La méthode se développe autour d'un schéma classique de l'estimation statistique des quantiles de crue.

Schéma classique	Méthodologie développée
1- Constitution des échantillons de crue	> Prise en compte de l'incertitude sur les débits par la déclinaison des échantillons en 500 variations
2- Ajustement d'une loi statistique aux échantillons	> Estimation des paramètres de loi avec incertitude > Confrontation de deux lois statistiques : Gumbel et GEV
3- Extrapolation des quantiles de période de retour cible	> Combinaison de l'ensemble des incertitudes affectant les résultats > Test de sensibilité sur la prise en compte des données anciennes dans le processus d'estimation

L'estimation des paramètres de loi avec incertitude est réalisée via les outils développés par Irstea (Renard 2017). Le principe de la démarche est synthétisé ici :

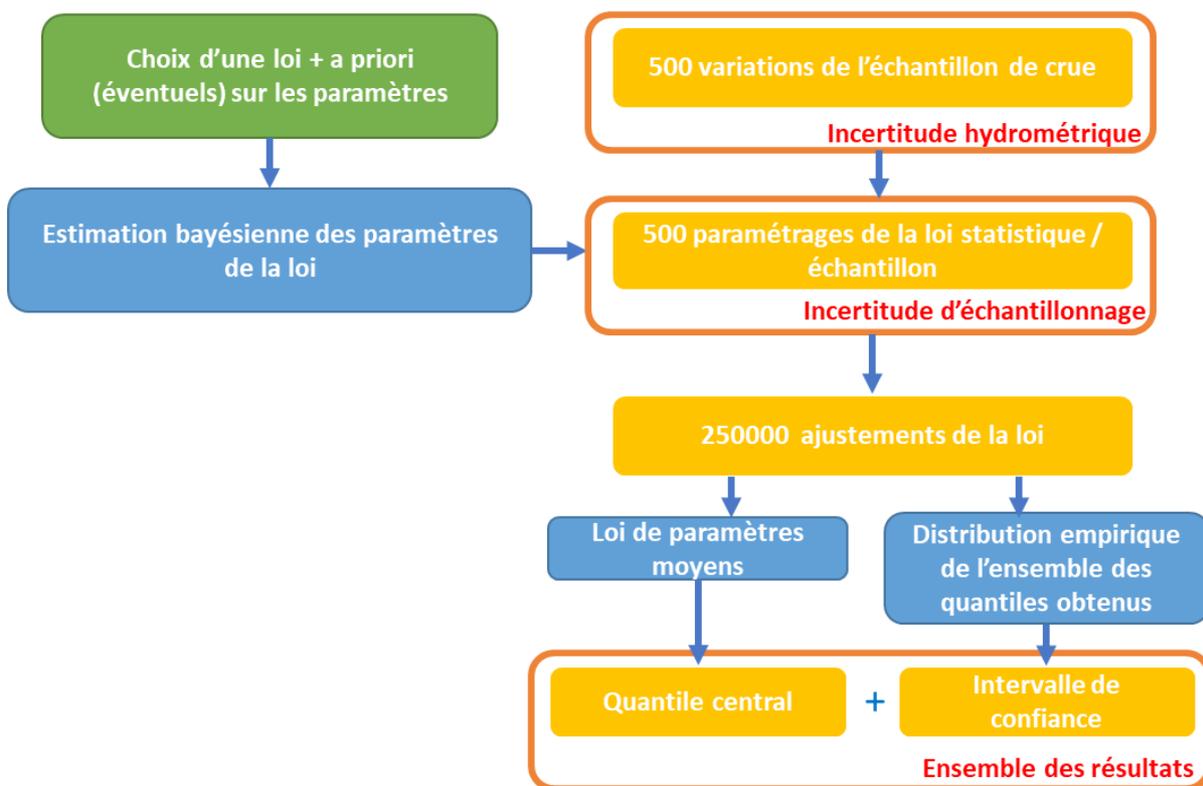


Figure 8 : Schéma de propagation des incertitudes

3.2 Constitution des échantillons de crue

Les données disponibles conditionnent fortement la constitution des échantillons de crue pour les douze stations étudiées sur le Rhône ; l'utilisation des annuaires historique de crue pour un grand nombre de station a pour conséquence de limiter les échantillons étudiés aux crues maximums annuelles. Les données collectées ont permis d'augmenter de manière significative les échantillons avec l'ajout de plus de 472 années de données sur les dix principales stations du Rhône par rapport à la précédente étude (EGR 2000) et d'inclure en plus les stations de Chateaufort et Chusclan. L'origine des données exploitées étant soit les données de débits avec incertitudes issues des estimations de la méthode BaRatin, soit des valeurs historiques avec les incertitudes estimées par le modèle d'erreur présenté en section 2.5.2.

Station hydrométrique	Étude EGR 2000	Étude 2017	Ajout (ans)
Pougny	1925-1998	1925-2016	+18
Bognes	1904-1998	1853-2015	+68
Seysssel	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 4 : Bilan de la collecte des échantillons constitués pour les débits maximums de crue

3.3 Comparaison des ajustements de Gumbel et GEV

Le choix d'une loi statistique pour l'extrapolation des quantiles de crue est un point capital qui a un poids élevé sur les résultats finaux. La loi de Gumbel et la loi GEV (Generalized Extreme Value) sont toutes deux usuellement utilisées et recommandées dans le cas des débits maximums annuels ; la seconde étant une généralisation de la première. La loi GEV peut être utilisée, à condition de raisonner sur un échantillon de grande taille pour permettre une estimation fiable du paramètre de forme ξ de la distribution, qui pilote l'extrapolation aux crues extrêmes.

Les estimations de quantiles de crue réalisées lors de l'étude EGR (2000) ont toutes été établies sur le Rhône à partir de la loi de Gumbel, en raison de sa robustesse. Le recul historique apporté par les longues séries de données constituées dans cette étude ouvre la perspective de réviser ce choix. Nous proposons donc la comparaison de ces deux lois ajustées localement à chaque station, présentée .

La loi de Gumbel a dans le cas du Rhône tendance à produire des résultats surestimés par rapport aux données observées dans le domaine des périodes de retour importantes, et ce de manière généralisée pour l'ensemble des stations étudiées, à l'exception de Chusclan. A l'inverse la loi GEV avec un paramètre d'ajustement supplémentaire, reste plus fidèle aux données observées. Du point de vue des incertitudes la loi GEV est souvent assortie d'une plus grande incertitude car elle nécessite plus de données. Toutefois cet aspect diminue au-delà d'une centaine d'années d'observation, et peut être réduit par d'autres procédés (cf. sections 3.4 et 3.5).

Il ressort que l'utilisation de la loi GEV est plus pertinente dans le cas des longues séries de données reconstituées sur le Rhône. Le choix d'une loi privilégiant la justesse sur la robustesse est également en accord avec les conclusions du projet ExtraFlo sur les méthodes de prédétermination des crues (Lang *et al.*, 2014).

A noter que l'intervalle de confiance obtenu avec une loi de Gumbel est probablement sous-estimé, du fait de l'hypothèse forte sur le choix de cette distribution. En effet, la loi de Gumbel est un cas particulier de la loi GEV, avec un paramètre de forme égal à zéro. Au vu des résultats obtenus sur l'ensemble des stations hydrométriques du Rhône, cette hypothèse apparaît comme peu probable (cf. figure 8). La valeur moyenne du paramètre de forme (égal à 0.117) est significativement différente de zéro, et son intervalle de confiance à 80% ne contient pas la valeur nulle.

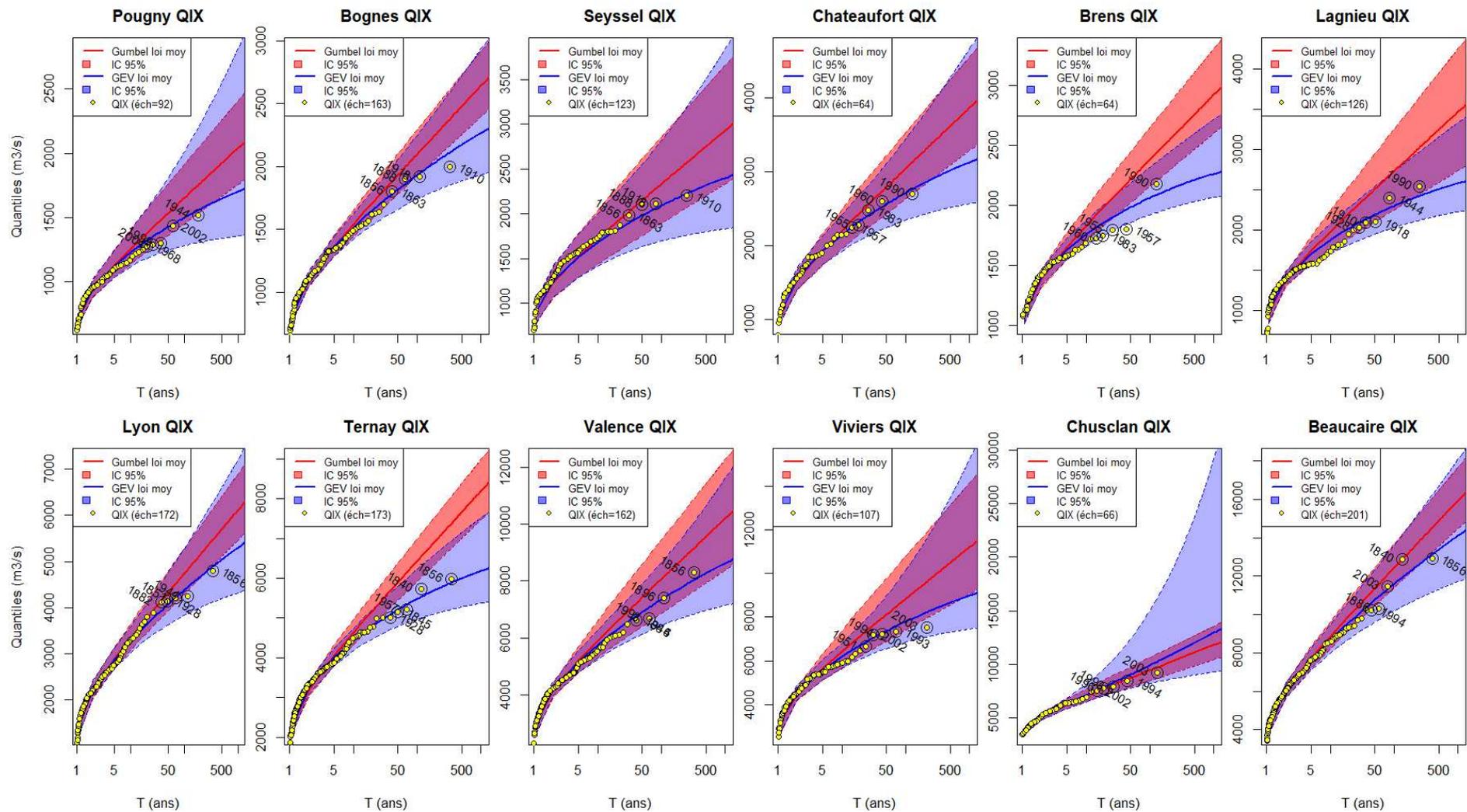


Figure 9 : Ajustements des lois de Gumbel (rouge) et GEV (bleue) avec incertitudes pour les débits maximums annuels (QIX) sur l'ensemble des stations du Rhône. Les dates cerclées indiquent les cinq plus fortes crues observées pour chaque station

3.4 Réduction des incertitudes grâce aux données anciennes

Sur douze stations étudiées, huit présentent des échantillons dont la longueur dépasse cent ans, avec en moyenne 126 années de données pour l'ensemble des stations. L'exploitation des données anciennes peuvent toutefois être à double tranchant, elles fournissent à la fois un recul historique précieux mais sont entachées d'incertitude importante qui peut parfois être pénalisante. L'intérêt de la prise en compte de l'incertitude sur les débits dans l'analyse fréquentielle développée ici permet de conclure sur le gain issu du rajout de données anciennes.

Les tests effectués sur la station de Beaucaire montrent que l'exploitation d'un échantillon de 46, 74, 177 et 201 années de données permet de réduire l'incertitude sur l'ajustement d'une loi GEV. Ceci montre l'intérêt de la prise en compte des données anciennes malgré leur incertitude plus forte (cf. Figure 6). Les données du XIX^{ème} siècle présentent pour cela le double intérêt d'offrir un recul historique remarquable avec une incertitude associée restreinte pour un coût de travail modéré.

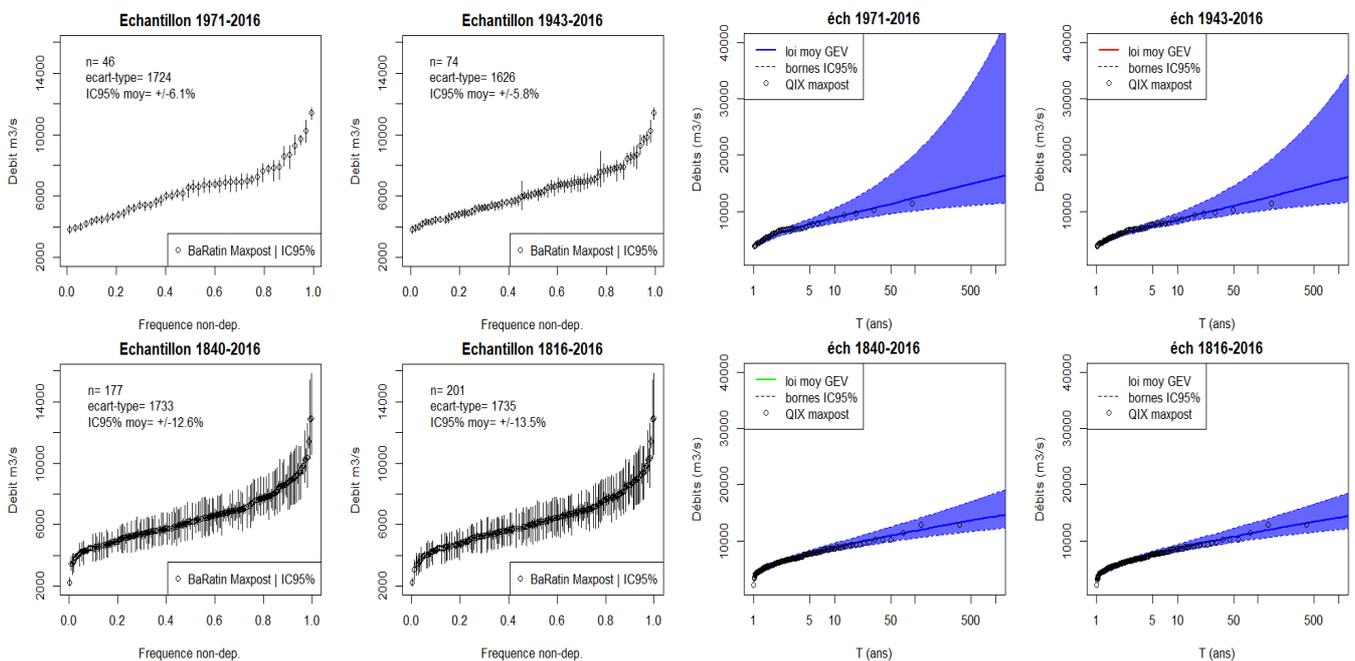


Figure 10 : Sensibilité des ajustements d'une loi GEV à différents échantillons à Beaucaire

Si la démarche est logiquement envisageable sur de plus longues séries temporelles, notamment dans la lignée du projet HISTRHONE qui constitue une incroyable base de données sur les crues depuis le XIV^{ème} siècle, il ne faut pas oublier que la caractérisation des incertitudes sur ces données demandera un travail de reconstitution plus conséquent qui sera difficilement généralisable à l'ensemble du cours du Rhône.

3.5 Réduction des incertitudes grâce à l'approche régionale

La démarche est ici de valoriser les informations apportées par chaque station pour améliorer les ajustements statistiques de la loi GEV. Dans ce cadre, les distributions locales du paramètre forme de la loi GEV sont utilisées pour construire une distribution empirique régionale. Celle-ci est ensuite réutilisée comme a priori pour conditionner une loi GEV régionale appliquée de nouveau à chaque station.

La démarche apporte à la fois une cohérence régionale à l'ensemble des estimations de chaque station, une réduction de l'incertitude finale sur les estimations de crue et une amélioration de la robustesse de la loi GEV. Cette méthode d'ajustement est retenue in fine pour l'estimation des quantiles de crues pour les stations du Rhône dans le cadre de cette étude.

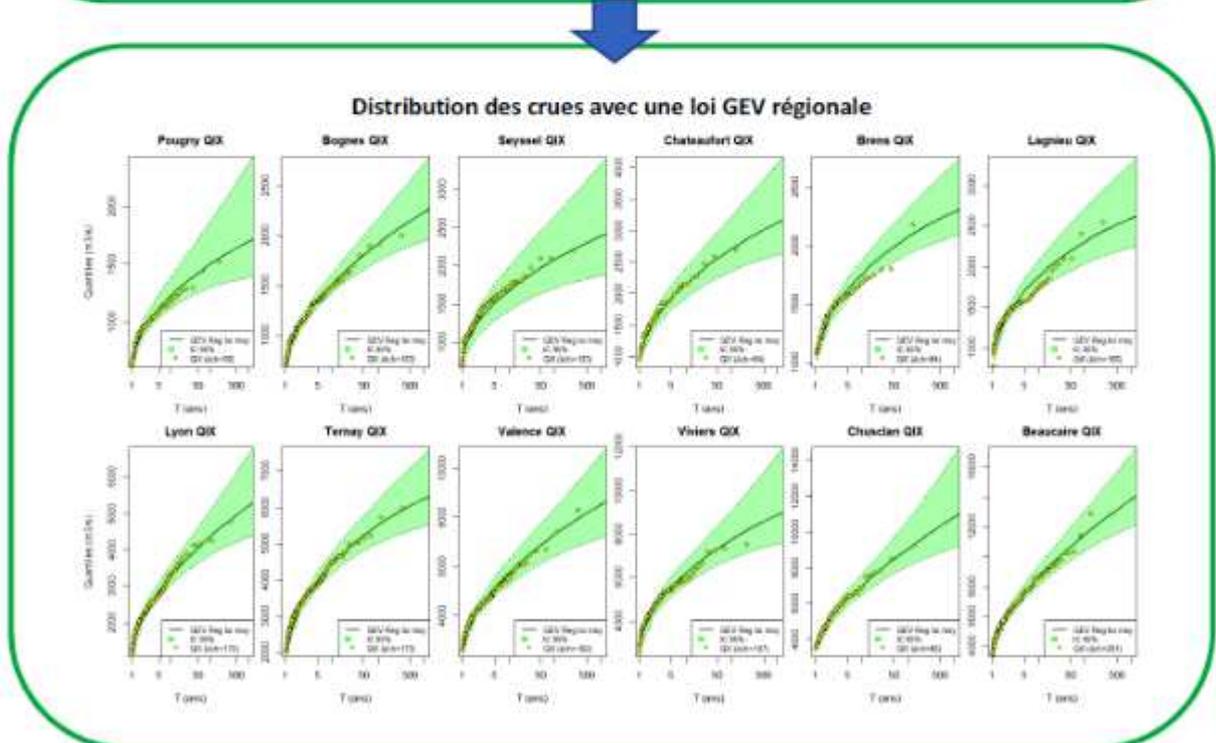
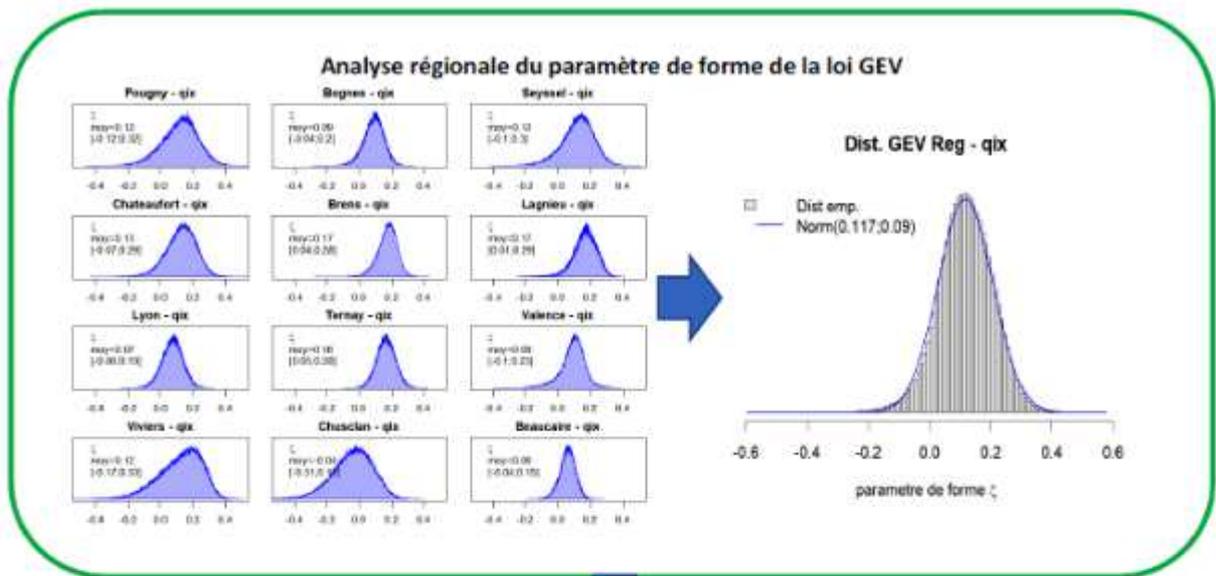


Figure 10 : Approche régionale basée sur une estimation a priori régionale du paramètre de forme de la loi GEV

4 SYNTHÈSE DES ESTIMATIONS DES QUANTILES DE CRUE

L'actualisation des quantiles de crue est une démarche nécessaire dès lors que de nouveaux éléments viennent apporter des informations sur la connaissance du risque. Ces estimations sont donc soumises à une révision périodique en fonction des nouvelles données et méthodes disponibles. La présente étude a permis l'enrichissement des échantillons exploités par l'ajout de données anciennes et l'intégration des derniers événements survenus sur le Rhône, et également d'estimer les incertitudes rattachées à tous les débits de crue. La méthodologie développée a permis ensuite de propager ces incertitudes sur l'ensemble de la chaîne d'estimation des débits, ainsi que sur l'ajustement de lois statistiques.

Ces éléments ont conduit à retenir la loi GEV au détriment de la loi de Gumbel utilisée jusqu'à présent. Cette modification a prouvé son intérêt afin d'estimer les quantiles de crue au plus juste des échantillons observés. Enfin une méthode de valorisation de l'information régionale a été proposée afin de réduire les incertitudes liées à l'utilisation de la loi GEV. Ces dernières pourront être exploitées pour faire des hypothèses sur le choix de la crue de projet (valeur médiane, valeur majorée-minorée du fait des incertitudes) adaptées au domaine d'application et pour étudier la sensibilité des modélisations à l'incertitude hydrologique.

Station	Etude EGR (2000) selon loi de Gumbel				Etude Hydro-Consultant & Irstea (2018) selon loi GEV régionale			
	Echantillon	Q(10)	Q(100)	Q(1000)	Echantillon	Q(10)	Q(100)	Q(1000)
Pougny	1925-1998	1180	1470	1800	1925-2016	1230	1500	1700
Bognes	1904-1998	1450	1920	2375	1853-2015	1510	1920	2230
Seyssel	1958-1993	1430	1940	2450	1841-2016	1670	2090	2390
Châteaufort					1953-2016	2140	2710	3120
Brens	1953-1998	1720	2150	2570	1953-2016	1760	2070	2280
Lagnieu	1891-1998	1810	2400	2970	1891-2016	1880	2300	2590
Lyon	1900-1998	3120	4230	5310	1840-2015	3270	4340	5210
Ternay	1895-1998	4445	5890	7310	1840-2016	4440	5510	6240
Valence	1855-1998	5620	7510	9370	1855-2016	5740	7300	8520
Viviers	1910-1998	6100	8120	10100	1910-2016	6180	7730	8840
Chusclan					1950-2015	7010	9060	10830
Beaucaire	1840-1998	8400	11300	14160	1816-2016	8650	11470	13830

Tableau 5 : Comparaison des quantiles de débit de pointe : étude EGR (2000) – loi Gumbel et présente étude (2018) – loi GEV régionale

5 HYDROGRAMMES DE CRUE

Les hydrogrammes de crues sont estimés par la méthode de l'hydrogramme moyen qui est une méthode basée sur les crues observées aux stations. Chaque hydrogramme de crue est normé par le débit de pointe, et l'ensemble de ces hydrogrammes permet la construction d'un hydrogramme moyen adimensionnel. On transpose ensuite cette forme moyenne en la multipliant par le quantile résultant de l'analyse statistique.

L'utilisation des données observées impose une analyse différenciée entre le Haut-Rhône jusqu'à Lagnieu et le Bas-Rhône à partir de Lyon. Pour les stations du Haut-Rhône les crues annuelles observées peuvent être de deux natures soit, sous influence nivale, courtes et intenses (durée de dépassement de la moitié du débit de pointe D de l'ordre d'une dizaine de jour), soit très longues et moins importantes (D compris entre 20 et 80 jours). Ainsi pour les stations entre Pougny et Lagnieu nous ne considérons que les crues dont la dynamique est rapide. Pour les stations du Bas-Rhône à partir de Lyon (compris), les crues annuelles sont plus homogènes et peuvent être considérées dans leur ensemble pour l'analyse.

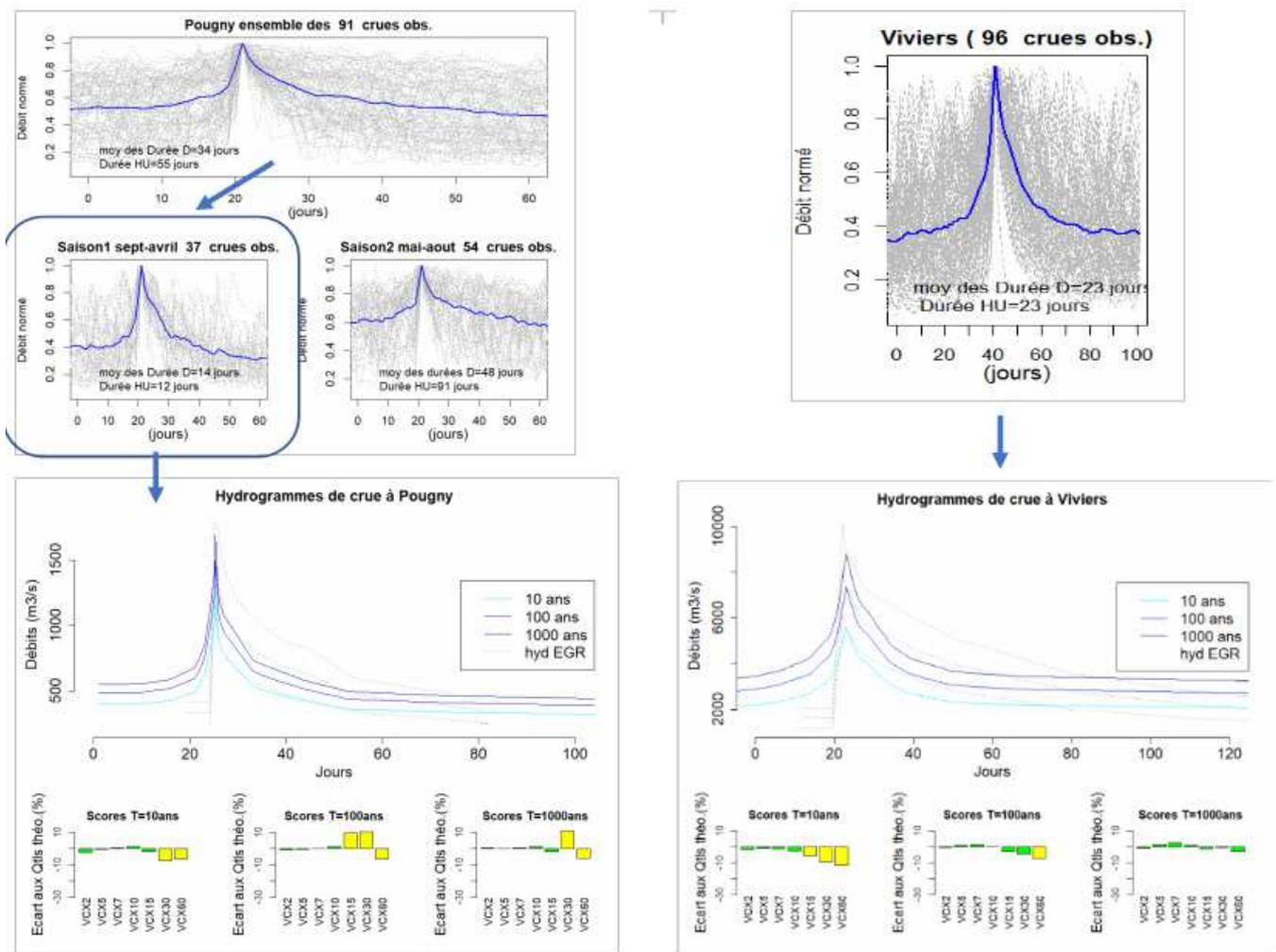


Figure 11 : Détermination des hydrogrammes de crue à Pougny (Haut-Rhône) et à Viviers (Bas-Rhône), pour les occurrences de crues à 10, 100 et 1000 ans.

Les écarts ϵ entre l'hydrogramme de crue et le quantile théorique moyen sont également estimés de 2 à 60 jours : vert si $\epsilon \leq 5\%$; en jaune si $5 < \epsilon \leq 15\%$; en rouge si $\epsilon > 15\%$

6 BIBLIOGRAPHIE

- Gentric J., « Évaluation des conséquences des crues du Rhône, Analyse socio-économique et stratégie de réduction de vulnérabilité en particulier pour les activités économiques, Synthèse de l'étude », DREAL AuRA, Pole Plan Rhône, 2018
- Le Coz J., et al. «Analyse bayésienne des courbes de tarage et de leurs incertitudes : la méthode BaRatin.» *La Houille Blanche* (EDP Sciences), 12 2013: 31-41.
- Lang M., 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.
- Pichard G., et Roucaute E. *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.
- Renard B., Le Coz J., Blanquart B., Bonnifait. L. "Calcul d'incertitudes en hydrologie : applications à la prédétermination et à l'hydrométrie" (2017), 116 p
- Rigaudiere P., et al. «Etude Globale des crues du Rhône.» Tech. rep., SAFEGE Cetus and Université de Nice, 2000.
- Service Spécial du Rhône, Administration des Ponts et Chaussées. «Carte Topographique du Cours du Rhône.» 1876.
- Ullmann, Albin, Frédéric Pons, et Vincent Moron. «Tool kit helps digitize tide gauge records.» *Eos, Transactions American Geophysical Union* (Wiley-Blackwell) 86 (2005): 342.

