



Actualisation de l'hydrologie des crues du Rhône

Rapport général Phase 3 : Analyse méthodologique



Titre : Actualisation de l'Hydrologie des crues du Rhône
Sous-Titre : Rapport Phase 3 : Analyse méthodologique
Objet : Rapport général
Client : Dreal Auvergne-Rhône-Alpes
Date : 06/08/2018
Version : Provisoire
Auteur : Antoine Bard (Hy-dro Consultant)
Michel Lang (Irstea)
Ref : Rhone_RG3

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

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

Table des matières

Organisation des éléments de restitution.....	3
1 Introduction.....	1
2 Approfondissement des séries de données.....	4
2.1 Collecte de donnée réalisée.....	4
2.2 Application en fonction des données.....	5
2.3 Perspectives sur les données anciennes.....	7
2.3.1 Au XIX et le XX ^{ème} siècle.....	7
2.3.2 Antérieure au XIX ^{ème} siècle.....	9
3 Amélioration de la chaîne de propagation des incertitudes.....	11
3.1 Méthodologie mise en place.....	11
3.2 Perspectives.....	12

3.2.1	Validation du modèle d'erreur.....	12
3.2.2	Traitement des détarrages par la méthode BaRatin.....	12
4	Amélioration de l'estimation des caractéristiques de crue.....	13
4.1.1	Scénarios de crue par saison ou par typologie.....	13
4.1.2	Méthode de régionalisation.....	13

1 INTRODUCTION

Historiquement l'hydrologie du Rhône était suivie par le Service Spécial du Rhône des Ponts et Chaussées depuis le XVIII^{ème} siècle. Maurice Pardé, dans le cadre de sa thèse (Pardé, 1925) et de nombreuses publications s'est intéressé au régime des crues et à l'analyse des grandes crues du Rhône. La Compagnie Nationale du Rhône, gestionnaire de la plupart des stations hydrométriques, depuis les premières études des aménagements hydroélectrique entrepris sur le fleuve à partir de 1933, a repris ce suivi hydrométrique et hydrologique.

En 2000, l'étude globale sur le Rhône (EGR) réalisée par SAFEGE [CITATION Rigaudiere2000 \l 1036] a permis d'actualiser les études hydrologiques sur l'ensemble du cours du Rhône. Les résultats sont 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.

Le bureau d'étude SAFEGE a mis à jour en 2014 l'hydrologie EGR sur les stations aval de Viviers et Beaucaire, pour le compte de la DREAL RA/SPR/Mission Rhône). Le travail a consisté à intégrer les données post EGR (2000 à 2013) sur ces deux stations aval 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 exploités (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 (Lang *et al.*, 2014), lancé dans le cadre du programme Risques Naturels de l'Agence Nationale de la Recherche, conduit par IRSTEA avec la participation de Météo-France, l'université de Montpellier, EDF et de membres invités (CNR, Cete Méditerranée, Dren Midi-Pyrénées, bureaux d'étude ARTELIA), ont amené 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 plusieurs éléments :

- 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 a notamment été réalisée 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.

Méthodologie mise en place

L'étude couvre, depuis le lac Léman jusqu'à l'embouchure du Rhône à la Méditerranée, dix stations principales, ainsi que deux stations additionnelles (Châteaufort et Chusclan), cf. Figure 1.

Station	Pk (km)	Surface de bassin (km ²)
Pougny	-186.78	10 398
Bognes	-160.625	10 989
Corbonod (Seyssel)	-151.315	11 355
Châteaufort	-147.8	12 757
Brens	-114.6	14 124
Pont de Lagnieu	-56	15 425
Perrache (Lyon)	-1.25	20 660
Ternay	15.2	50 461
Valence	109.7	66 678
Viviers	166.5	71 098
Chusclan	208.06	74 095
Beaucaire	269.6	95 862

*Tableau 1 : Point Kilométrique (Pk) et surface drainée aux principales stations du Rhône
(le Pk zéro est situé au droit de la confluence Rhône-Saône)*

Pour répondre aux objectifs définis, la méthodologie mise en place s'appuie premièrement sur une importante mise à jour des échantillons par l'exploitation des données anciennes et récentes. Cette collecte de données s'est faite en collaboration avec les différents services opérants sur le Rhône : DREAL, SPC, CNR, et Symadrem, complétée par une recherche conséquente en archives. La critique de ces données a donné lieu à un travail de fond sur la réestimation des relations hauteur-débit (exprimées par les courbes de tarage) pour chaque station hydrométrique et sur l'ensemble des périodes temporelles disponibles. Cette démarche s'appuie sur une valorisation des données brutes en remontant à la mesure des hauteurs d'eau, aux jaugeages effectués ainsi qu'à la connaissance hydraulique des sites. L'étude s'appuie ici sur la méthode BaRatin développée par l'IRSTEA qui permet le calcul des courbes de tarage et incertitudes associées. Cette première phase du projet a permis la réestimation des valeurs de débits avec incertitudes pour les échantillons de crue aux stations étudiées. L'ensemble de ces travaux est présenté dans le rapport de Phase 1 de l'étude.

Deuxièmement, la réestimation des caractéristiques de crue s'est axée, compte tenu de la complexité du bassin versant du Rhône, sur une analyse fréquentielle locale de l'ensemble des stations. Selon la théorie des valeurs extrêmes, deux ajustements statistiques ont été proposés : la loi de Gumbel et la loi GEV. La démarche s'est ici appuyée sur l'ensemble des outils bayésiens, fournis par l'IRSTEA, permettant la propagation des incertitudes à l'analyse fréquentielle. Pour les stations de Bognes et Beaucaire, il a été possible de tester la robustesse des deux lois statistiques proposées à différentes longueurs d'échantillon, et en particulier d'estimer l'impact des données historiques plus incertaines.

Puis pour l'ensemble des stations, une étude de sensibilité et de justesse a été réalisée pour les deux lois proposées. La loi GEV a été retenue, sur l'ensemble des stations étudiées, pour sa plus grande justesse d'estimation des quantiles de crue et une meilleure représentativité des intervalles de confiance fournis.

Enfin, une méthode de conditionnement régional a également été utilisée afin d'exploiter l'information de bassin. Les résultats montrent une meilleure cohérence sur les quantiles estimés, ainsi qu'une réduction des intervalles de confiance associés. L'ensemble de ces développements sont présentés dans le rapport de Phase 2.

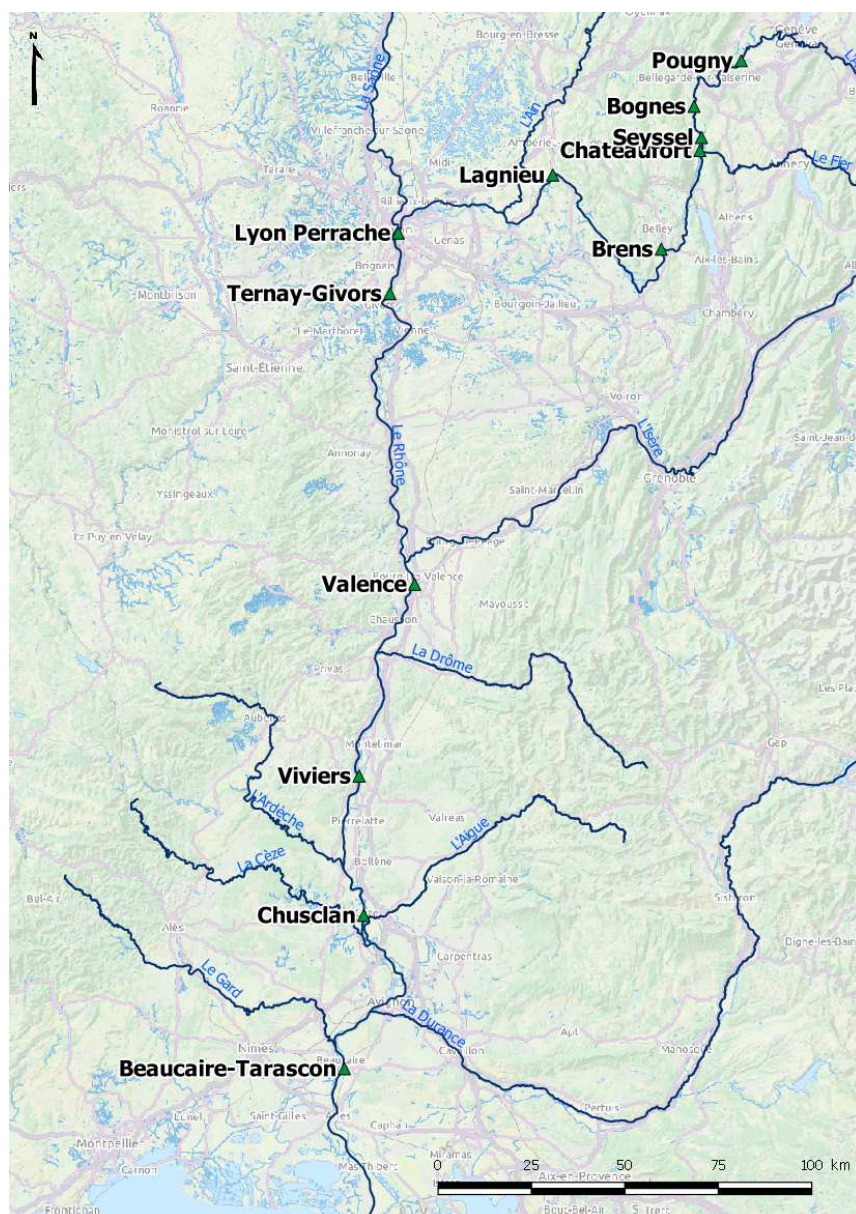


Figure 1 : Carte de localisation des stations

2 APPROFONDISSEMENT DES SÉRIES DE DONNÉES

2.1 Collecte de données réalisée

L'objectif de la collecte de données était double : mettre à jour les échantillons de crue avec les données postérieures à l'EGR (Rigaudière *et al.*, 2000) et intégrer des données anciennes en plus des données récentes. Le travail s'est ainsi principalement focalisé sur les données du début du XX^{ème} siècle et du XIX^{ème} siècle. A noter que les éléments d'analyse issus de l'EGR n'ont pu être récupérés : critique des données et archives collectées à l'époque.

Historiquement le début du XIX^{ème} siècle marque le début des études hydrométriques du fleuve par la mise en place du Service Spécial du Rhône des Ponts et Chaussées. Cette période correspond donc à la création des échelles de mesures et au début des observations régulières sur les hauteurs d'eau. Ces données restent relativement traçables et en partie ou totalement accessibles en archives selon les stations. Les archives départementales, de la DREAL, des SPC, et celles de la CNR ont été interrogées et exploitées au mieux, même si certaines informations ont pu être manquées, faute de temps disponible.

Le XIX^{ème} siècle est également marqué par de grandes crues, notamment celles de 1856 et 1840, dont l'ampleur n'a pas été égalée depuis sur le fleuve. Du point de vue de l'analyse locale, le projet ExtraFlo (Lang *et al.*, 2014) a souligné l'intérêt de la prise en compte des événements extrêmes alors que « *les événements courants ne sont que peu informatifs, au sens statistique, pour la prédétermination des valeurs fortes de pluie et de débit. La genèse physique de ces valeurs extrêmes est en effet bien différente de celle des événements courants* ». L'intégration des grandes crues du XIX^{ème} permettait donc d'apporter une information de première instance dans les échantillons de données.

D'un point de vue comptable, la collecte de données a permis d'intégrer 472 années supplémentaires dans les échantillons de crue aux dix stations communes à l'EGR, se répartissant en 180 années nouvellement collectées sur la période 1998-2016, et 292 années supplémentaires du fait de l'intégration de données anciennes.

Station hydrométrique	Étude EGR 2000	Étude 2017	Ajout (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 2 : Bilan de la collecte de données

D'un point de vue qualitatif et de traçabilité de l'origine de la donnée, l'accent a été mis sur la pérennisation des archives collectées. A défaut d'avoir pu être intégralement exploitées, celles-ci sont recensées et transmises en annexe du projet afin de permettre la poursuite de futurs travaux. Il semble essentiel pour de futures études, de veiller à la pérennisation des archives exploitées, du point de vue de la critique de données, pour permettre de relier l'information à la source d'origine. Mais aussi pour assurer une continuité et une progression dans la connaissance historique.

2.2 Application en fonction des données

Dans le cadre de la réestimation de l'hydrologie des crues du Rhône ; on peut distinguer deux familles de variables hydrologiques d'intérêt :

- Les débits instantanés maximaux (QIX) qui restent la variable hydrologique d'intérêt prépondérante dans le cadre d'un travail sur les crues,
- Les débits journaliers (QJ), qui permettent de travailler sur les débits journaliers maximaux (QJX), sur les débits moyens sur N jours consécutifs (VCXN), ainsi que sur les débits seuils continuellement dépassés sur N jours consécutifs (QCXN).

Historiquement, en fonction des moyens de mesure et de l'intérêt porté aux différentes variables, on retrouve les données sous divers formats :

- Les récits et repères de crue historique qui remontent jusqu'au XIII^{ème} siècle ;
- Les relevés d'observateur, avec un à trois relevés journaliers ainsi que les relevés en crue, généralement mis en place au milieu du XIX^{ème} siècle ;
- Les annuaires de crue qui recensent soit les niveaux maximums et minimums par année civile, soit les niveaux en dessus / dessous d'un seuil arbitraire, qui sont généralement contemporains des relevés précédents ;
- Les limnigrammes, soit issus de la transcription manuelle des relevés d'observation dès le XIX^{ème} siècle, soit tracés sur planche ou rouleau à partir de la mise en place des enregistreurs automatiques dans les années 1950 ;
- Les enregistrements numériques bancarisés depuis 1990.

Selon les époques et le type d'archives, les données obtenues sont soit des relevés continus, soit des données discontinues le plus souvent annuelles. On retrouve également selon les archives soit des hauteurs d'eau, soit directement des valeurs de débits.

L'objectif premier étant la caractérisation des débits avec incertitudes, l'application de la méthode BaRatin a été privilégiée. En plus des données limnimétriques, la méthode requiert les données de jaugeages et la configuration hydrauliques des sites, afin de permettre l'estimation des courbes de tarage et donc le calcul des débits.

Malgré les efforts fournis, la méthode BaRatin n'est pas applicable dans de nombreux cas, faute de données disponibles. Il est alors nécessaire d'utiliser les données de débit originelles. Pour la période la plus récente (milieu du XX^{ème} siècle à nos jours), ces données sont bien caractérisées par les services de la CNR qui gardent trace de leur méthode de calcul. Plus anciennement la critique de ces données devient difficile, on ne retrouve que peu d'archives concernant leur calcul, ni des données qui l'ont permis. On peut supposer qu'elles ont été estimées de manière contemporaine par les services hydrométriques de l'époque : Service Spécial du Rhône des Ponts et Chaussées. On retrouve également le cas de données réestimées a posteriori de leur occurrence. On peut notamment citer

les travaux de Maurice Pardé sur les grandes crues historiques du Rhône dont les travaux ont amené à recalculer parfois plusieurs fois les débits estimés au cours du temps.

L'utilisation des données de débit anciennes se heurte au problème de l'estimation des incertitudes associées. On mesure là tout l'intérêt de la méthode BaRatin qui fournit un formalisme pour l'ensemble des sources d'incertitudes de la chaîne de calcul. Un modèle d'erreur a été proposé. Celui-ci s'applique sur les données de débit originelles en transposant à la station cible les résultats de la méthode BaRatin obtenus à une autre station.

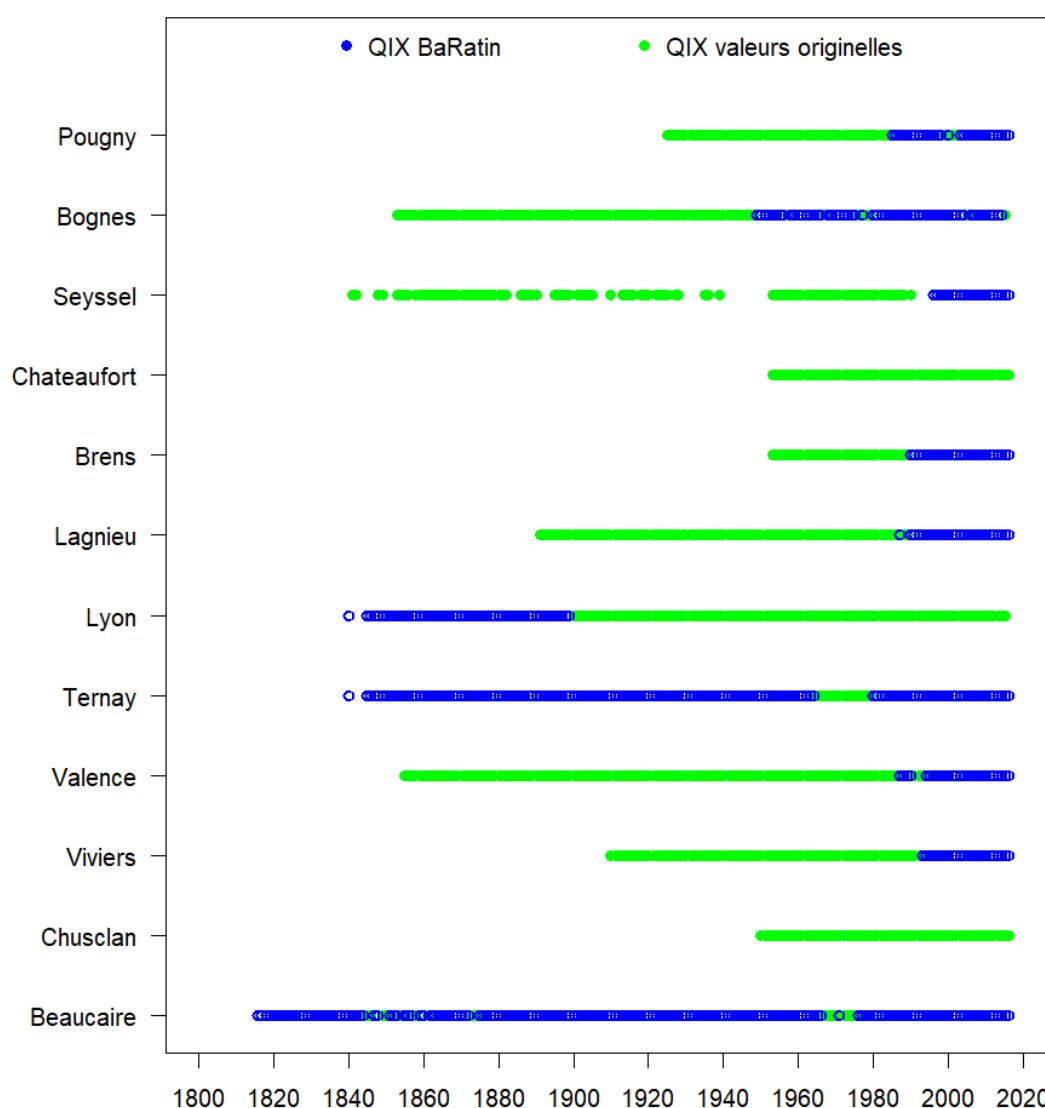


Figure 2 : Origine des données QIX exploitées pour l'analyse fréquentielle

Homogénéité temporelle des données

L'homogénéité des données est une problématique de premier ordre pour l'estimation des débits. Pour un point de mesure donné sur le fleuve, la modification de la relation hauteur-débit est amenée à évoluer inexorablement. Ces détarages impliquent de réviser périodiquement les courbes de tarage. La détection de ces sous-périodes et l'obtention de l'ensemble des données nécessaires à l'application de la méthode BaRatin pour chacune d'entre elles a été une des principales difficultés rencontrées. Ce processus est habituellement fait par les services hydrométriques dans l'estimation

de leurs courbes de tarage. Nous supposons que les données de débits originelles sont dès lors homogènes, sans que nous puissions toutefois le vérifier pour les périodes anciennes.

2.3 Perspectives sur les données anciennes

2.3.1 XIX et le XX^{ème} siècle

Les chroniques exploitées sont déjà conséquentes en termes de débit maximum, cf. Tableau 2. Un approfondissement de ces chroniques est néanmoins possible et pourra se faire selon deux manières : soit par l'intégration de nouvelles périodes temporelles non couvertes par les échantillons actuellement, soit par le traitement complet de la méthode BaRatin, sans transférer le modèle d'erreur actuellement disponible (basé sur les résultats de Beaucaire).

Parmi les nombreuses archives exploitées, le « Tableau de tenue des crues de 1845 à 1935 » est remarquable par l'exhaustivité des relevés contenus et la profondeur des séries disponibles. Hormis pour Beaucaire elle contient l'ensemble des plus vieux relevés de hauteurs connus pour les stations du Rhône. Le Tableau 3 dresse la liste des échelles hydrométriques présentes dans cette archive, les périodes temporelles disponibles et l'utilisation potentielle qui peut en être faite.

Dans le cadre de cette étude ce tableau a été exploité pour compléter les stations de Lyon et Ternay. Mais d'autres stations pourraient faire l'objet d'approfondissement :

- Pour les stations de Pougny et Bognes, il n'y a de ce jour pas d'archives identifiées permettant d'augmenter les échantillons. Ces deux stations n'apparaissent pas dans le « Tableau de tenue des crues de 1845 à 1935 ». D'ailleurs les données pour ces deux stations pour les périodes antérieures à 1935 et 1947 sont généralement issues de la station de Seyssel dont les débits sont transposés aux sites situés plus en amont, notamment dans le cadre de l'étude du site de Gènesiat
- Pour la station de Seyssel, la chronique actuelle remonte jusqu'en 1840, mais de nombreuses lacunes existent. De plus cette station de référence pour le Haut-Rhône ne fait l'objet d'un traitement BaRatin que sur la période 1984-2016. Les hauteurs maximales annuelles pour les périodes 1845-1866 et 1876-1935 sont disponibles dans le « Tableau de tenue des crues de 1845 à 1935 ». Les jaugeages à Corbonnod de 1968 à 1987 ont été récupérés dans les archives CNR. Les limnigrammes sur la période 1956 à 1984 sont disponibles sous format papier dans les mêmes archives. L'approfondissement de cette station nécessiterait donc de retrouver les jaugeages depuis 1845 à 1967 et de compléter les limnigrammes sur la période 1936 à 1955.
- Pour la station de Chateaufort, il paraît difficile de remonter sur des périodes temporelles plus anciennes compte tenu de la pauvreté des archives déjà disponibles pour cette station. Toutefois celle-ci a été opérationnelle de 1950 à 1980, les jaugeages ont été récupérés dans les archives CNR. Cette station pourrait faire l'objet d'un traitement BaRatin sur cette période, moyennant la récupération des données limnimétriques correspondantes.

- Pour la station de Brens, les échelles de Pierre-Châtel (Saint-Blaise), de Balme, et de Cordon pourraient permettre d'étendre la série de données. Néanmoins il n'y a pas d'archives identifiées à ce jour concernant les jaugeages à ces échelles. Le constat est assez similaire à Lagnieu, pour laquelle la station de Sault (Brenaz) pourrait permettre d'étendre la série de donnée, sans que l'on ait identifié les données de jaugeages nécessaires.
- A Lyon, les nombreuses échelles ont été exploitées pour reconstituer les séries anciennes de 1840 à 1935. Un travail complémentaire pourrait être réalisé sur la période plus récente, qui devra tenir compte des changements d'échelles de mesures et des aménagements hydraulique de Pierre Bénite et des dragages du fleuve qui impactent les conditions hydrauliques. Des améliorations de la méthode BaRatin pourraient permettre d'étendre la période couverte par la méthode, cf paragraphe 3.2.
- En aval de la confluence du Rhône et de la Saône, sur le Rhône à Ternay, un contrôle de cohérence pourrait être mené à partir des informations disponibles à Givors, Vienne, Pierre-de-Bœuf, Condrieu, Serrières, St Vallier et Tournon.
- A Valence, la série pourrait être rallongée de 10 ans de 1845 à 1855, à condition de trouver les archives concernant les jaugeages et les courbe de tarage anciennes. Cette station n'a subi que peu de modifications au fil du temps et serait intéressante pour l'application de BaRatin sur une longue période temporelle. La cohérence des données entre d'une part le Rhône à Ternay en plus de l'Isère à Romans et d'autre part le Rhône à Valence pourrait être vérifiée.
- La station de Viviers pourrait quant à elle être prolongée par les séries anciennes disponibles au Theil et à Donzère. Toutefois les données de jaugeages en particulier n'ont pas été identifiées dans les archives.
- Sur le secteur situé entre Viviers et Beaucaire, un travail plus lourd serait nécessaire pour analyser la cohérence des données le long du Rhône (Pont-Saint-Esprit, Chusclan, Roche-maure, Avignon, Aramon et Vallabrègues), en prenant en compte les apports potentiels en crue de l'Ardèche, la Cèze, la Durance et le Gard. Avec la difficulté d'obtenir de longues séries sur les affluents.
- Sur le secteur en aval de Beaucaire, des recoupements seraient également possibles à partir des informations disponibles à Arles, Tour-Saint-Louis, Fourques et Saint-Gilles.

Echelle Hydrométrique	Hauteurs maxi et mini annuelles	Information potentiellement exploitable
Seyssel	1845-1866 / 1876-1935	Modèle d'erreur à Seyssel
Pierre Châtel (St Blaise)	1845-1866 / 1876-1905	Débit à Brens
La Balme	1906-1905	Débit à Brens
Cordon	1845-1885 / 1896-1935	Débit à Brens
Sault	1845-1885 / 1896-1935	Débit à Lagnieu
Chazey d'Ain	1916-1935	Cohérence Lagnieu-Perrache
Thil	1916-1935	Débit à Lyon
Miribel	1916-1925	Débit à Lyon
Pont Morand (Lyon)	1845-1885 / 1896-1935	Débit à Lyon
Pont de la Guillotière	1866-1875 / 1886-1895	Débit à Lyon
Pont Lafayette (Lyon)	1845-1866	Débit à Lyon
Pont de la Mulatière (Lyon)	1845-1875 / 1906-1935	Débit à Lyon
La Feuillée (Lyon)	1866-1905	Débit à Lyon
Givors	1860-1935	Modèle d'erreur à Ternay
Vienne	1845-1935	Modèle d'erreur à Ternay
Pierre du Bœuf	1845-1905	Modèle d'erreur à Ternay
Condrieu	1916-1935	Modèle d'erreur à Ternay
Serrières	1906-1935	Modèle d'erreur à Ternay
St Vallier	1916-1935	Modèle d'erreur à Ternay
Tournon	1845-1935	Modèle d'erreur à Ternay
Romans (Isère)	1916-1935	Cohérence Ternay-Valence
Valence	1845-1935	Modèle d'erreur à Valence
Pouzin (Gabert)	1860-1935	Modèle d'erreur à Viviers
Theil ¹	1866-1875 / 1916-1935	Modèle d'erreur à Viviers
Donzère	1845-1866 / 1876-1905	Modèle d'erreur à Viviers
Bourg St Andéol	1845-1896 / 1916-1935	Modèle d'erreur à Viviers
Pont St Esprit	1845-1935	Débit secteur Viviers-Beaucaire
Rochemaure / Roquemaure	1845-1915	Débit secteur Viviers-Beaucaire
Avignon	1845-1935	Débit secteur Viviers-Beaucaire
Aramon	1845-1875 / 1906-1915	Débit secteur Viviers-Beaucaire
Vallabrègues	1845-1866	Débit secteur Viviers-Beaucaire
Beaucaire	1845-1935	Débit secteur Viviers-Beaucaire
Arles	1845-1935	Débit à Beaucaire
Tour St Louis	1866-1905 / 1926-1935	Débit à Beaucaire
Fourques (Petit Rhône)	1866-1935	Débit à Beaucaire
Saint-Gilles (Petit Rhône)	1845-1866 / 1876-1905 / 1916-1935	Débit à Beaucaire

Tableau 3 : Archives Tableaux de tenue des crues sur le Rhône de 1845 à 1935 et utilisation potentielle

2.3.2 Période antérieure au XIX^{ème} siècle

La présente étude a montré la difficulté d'estimer le débit des crues anciennes, notamment celles du milieu du XIX^{ème} siècle. L'application de la méthode BaRatin a permis de quantifier les incertitudes sur la reconstitution du débit de ces crues anciennes, sous réserve de la disponibilité d'un certain nombre de données hydrométriques.

1 Orthographié le Teil aujourd'hui

Or pour s'intéresser aux événements extrêmes il est tout à fait légitime de vouloir remonter plus loin dans le passé. Un important travail a été mené dans ce sens, notamment par le projet HISTRHONE (Pichard et Roucaute, 2014 ; Pichard et al., 2017), également soutenu par le POI FEDER plan Rhône, dont la base de données contient près de 1500 événements hydro-climatiques sur la période 1300-2000 sur le Bas Rhône dont 1068 crues et inondations.

L'intégration de ces données dans l'optique de mener une analyse fréquentielle sur les stations du Bas-Rhône permettrait de constituer une chronique de longueur inédite dans ce domaine. Dans ce sens les résultats des tests de sensibilité des ajustements statistiques aux longues chroniques ont montré pour la station de Beaucaire que l'ajout de données anciennes contribue à une meilleure définition des ajustements de la loi GEV. Toutefois l'observation inverse était faite pour la station de Bognes, pour laquelle l'ajout de données anciennes entraînait une augmentation des incertitudes résultantes de la même loi, du fait de trop fortes incertitudes sur les débits anciens.

L'utilisation des données antérieures au XIX^{ème} siècle nécessitera de résoudre plusieurs problèmes :

- L'estimation des débits des événements, compte tenu des informations disponibles. Cette estimation ne sera possible que par l'application d'un modèle hydraulique reproduisant les conditions d'écoulement estimées à l'époque, ciblées sur des géométries anciennes ;
- Le calcul des incertitudes associées se devra d'être exhaustif et le plus réaliste possible, car seule la propagation des incertitudes tout au long de la méthode permettra de valider l'ensemble de la démarche ;
- L'analyse fréquentielle devra s'appuyer sur un cadre statistique permettant d'intégrer une information mixte, avec à la fois une série continue de valeurs maximales sur la période récente, et une collection de crues historiques sur une période ancienne.

Dans cette optique, la station de Beaucaire semble être la candidate idéale au déroulement d'une telle démarche, forte de sa série de 200 ans de données (1816-2016) et des données de la base HISTRHONE. Un travail de thèse intitulé « *Réanalyse historique des débits du Rhône à Beaucaire : conséquences pour l'estimation des crues extrêmes et la variabilité climatique du régime des eaux* » est programmé à partir de l'automne 2019. Il sera dirigé par Irstea (direction de thèse M. Lang, co-encadrants J. Le Coz et B. Renard), avec un comité de thèse prévisionnel composé des personnes suivantes : G. Pichard (Univ. Aix-Marseille), H. Piégay (ENS Lyon), R. Naulet (CNR Lyon), P. Billy (DREAL ARA), T. Mallet (Symadrem) ; V. Andréassian (Irstea Antony) et J.P. Vidal (Irstea Lyon).

3 AMÉLIORATION DE LA CHAÎNE DE PROPAGATION DES INCERTITUDES

3.1 Méthodologie mise en place

La chaîne d'estimation et de propagation des incertitudes mise en place dans le projet suit idéalement les étapes suivantes :

1. Application de la méthode BaRatin pour l'estimation des courbes de tarage et des incertitudes associées. Combinaison d'information a priori sur les contrôles hydrauliques de la station avec des données hydrométriques (limnigramme, jaugeage) et leurs incertitudes respectives. Sur une série de hauteur d'eau donnée, cette étape permet le calcul de 500 hydrogrammes probables, compte tenu des différentes sources d'incertitude ;
2. Extraction de la variable d'intérêt à partir des 500 hydrogrammes. Etude possible de plusieurs débits (débit de pointe, débit moyen maximal sur la durée d , etc.) ; échantillonnage possible par année ou par saison ;
3. Estimation bayésienne des paramètres de la distribution pour la variable étudiée à partir des 500 échantillons simulés. Prise en compte des incertitudes sur les données de débit, les paramètres de la distribution et sur le choix de la distribution.

Les intérêts de cette méthode sont multiples. Concernant la première étape, la méthode BaRatin a permis de mieux caractériser le débit d'un grand nombre d'évènements de crues, en simplifiant la prise en compte des éléments incertains. On peut citer deux exemples : pour une grande crue avec rupture de brèche, l'incertitude sur la hauteur maximale est souvent importante car cette hauteur n'est pas réellement atteinte, la méthode permet de prendre en compte cet aspect sans devoir trancher sur une unique valeur et d'offrir un intervalle de confiance sur le débit estimé. Autre exemple, l'estimation des courbes de tarage pour les hautes eaux est parfois délicate du fait du manque de jaugeages dans cette gamme de débit, mais également du fait de l'utilisation de jaugeages plus incertains. La méthode BaRatin permet de pondérer l'ensemble des jaugeages par leurs incertitudes : on peut dès lors intégrer l'information d'une valeur jugée douteuse, sans pénaliser l'estimation de la courbe de tarage.

Concernant la troisième étape, la propagation des incertitudes à l'ajustement de loi statistique a permis d'obtenir les résultats suivants :

- Etude de la sensibilité de deux lois statistiques (loi de Gumbel et loi GEV) et estimation d'un intervalle de confiance prenant en compte l'ensemble des paramètres de la chaîne de traitement ;
- Impact de l'intégration des données anciennes sur les ajustements, en tenant compte de l'incertitude plus importante sur ces données ;
- Meilleure définition des évènements historiques de grande ampleur, en proposant des intervalles de confiance fiables à la fois vis-à-vis des débits estimés, ainsi que sur les périodes de retour qui leur sont associées.

D'un point de vue général, la méthodologie proposée présente deux limitations majeures qui sont : 1/ la dépendance à la fourniture d'un grand nombre de données et 2/ le temps de calcul nécessaire au traitement de l'ensemble de la chaîne, en particulier lors de la segmentation de la première étape sur plusieurs sous-périodes homogènes.

3.2 Perspectives

3.2.1 Validation du modèle d'erreur

Nous avons vu que pour la première étape de la chaîne de traitement, l'application de la méthode BaRatin n'était pas toujours possible, faute de données disponibles. Dans ce cas nous avons mis en place un modèle d'erreur qui est décrit en détail dans le rapport de phase 1.

Dans les grandes lignes le modèle proposé permet de transposer la structure des incertitudes estimées par la méthode BaRatin d'une série source à une série de débit ciblée. Cette transposition peut se faire sur une station étudiée d'une période temporelle à une autre ou bien entre deux stations hydrométriques dont le fonctionnement sera jugé similaire. Toutefois il est notable que les incertitudes sur les débits augmentent pour les périodes anciennes, ainsi l'application du modèle d'erreur doit respecter ce principe. Dans ce cadre, un scénario hydrométrique historique a donc été défini d'après les résultats de l'application de la méthode BaRatin à la station de Beaucaire, pour laquelle la disponibilité des données permet la réestimation des débits et incertitudes sur presque 200 ans en continu.

Une des perspectives pourra être de valider les résultats obtenus à Beaucaire sur d'autres stations. Les stations de Seyssel, Lyon, Ternay et Valence pourraient permettre ces vérifications, sous réserve de collecter les données permettant d'appliquer la méthode BaRatin sur l'intégralité des séries.

3.2.2 Traitement des détarages par la méthode BaRatin

Dans le cadre de ce projet, un soin particulier a été apporté à l'homogénéité du traitement des données dans le temps. La détection des détarages et l'application de la méthode BaRatin sur des sous-périodes homogène a permis de conserver l'intégralité des données. Les développements apportés par la thèse de Mansanarez (2016) et ceux en cours de Darienzo (2017-2020) visent à progresser sur l'estimation des détarages liés à des changements de la morphologie du lit des rivières. Le principe est de définir les paramètres de la courbe de tarage invariants dans le temps (cf. par exemple le contrôle hydraulique en crue réputé stable) et de rendre dynamiques les autres paramètres qui peuvent évoluer avec le temps (cf. par exemple incision-rehausse exhaussement du fond du lit, rétraction du chenal, exhaussement des marges, déconnexion des bras actifs). La procédure d'estimation permettra d'optimiser le découpage de la période globale en sous-périodes homogènes et d'avoir en une seule étape l'ensemble des paramètres pour toutes les sous-périodes.

Pour le moment ces développements ne sont pas opérationnels, mais ils permettront un gain précieux sur l'estimation des courbes de tarages successives et le recyclage des paramètres entre sous périodes.

3.2.3 Traitement des données de station par ultra-sons

L'application de la méthode BaRatin a été limitée à Lyon pour la période récente par le fait que cette station utilise une mesure de vitesse d'écoulement par ultra-sons. Ce procédé est tout à fait intéressant dans le cadre de cette station car il offre la possibilité d'une mesure directe et continue du champ de vitesse, qui est indépendante des influences hydrauliques que peut subir la station. Actuellement la méthode BaRatin n'est pas capable de gérer ce type de données, mais des développements futurs devraient le permettre. A terme, le traitement quasi intégral de cette station de référence à Lyon pourra ainsi être réalisé.

4 AMÉLIORATION DE L'ESTIMATION DES CARACTÉRISTIQUES DE CRUE

4.1.1 [Scénarios de crue par saison ou par typologie](#)

Actuellement les échantillons de crue, notamment concernant les débits maximaux, sont fortement conditionnés par l'exploitation des annuaires de crue. Ces annuaires par leur conception imposent un échantillonnage des crues par année civile.

La numérisation progressive des limnigrammes complet devrait permettre de passer outre cette limite. Des essais ont été réalisés dans le cadre de cette étude sur la station de Bognes. Toutefois l'automatisation de la méthode s'est rapidement heurtée à la diversité de format des archives : données sous forme de tableau, rouleau papier avec tracé à plume... ainsi qu'à la qualité et la fragilité des archives papiers. D'après les archives rencontrées, il est envisageable de créer des séries continues au pas de temps journalier, voire même dans certains cas à pas de temps variable, soit toutes les heures ou deux heures pendant les crues.

L'obtention des séries continues permettra de pouvoir échantillonner les crues soit par année hydrologique, soit par saison, soit par typologie. Cela permettrait :

- De bien respecter l'indépendance des événements de crue échantillonnés ;
- D'affiner l'estimation des caractéristiques de crue en raisonnant par saison ;
- D'envisager des scénarios de crue cohérents avec les affluents en raisonnant par typologie d'évènement.

4.1.2 [Méthode de régionalisation](#)

La loi GEV a été choisie pour l'estimation des quantiles de crue car jugée plus juste vis-à-vis des échantillons. Cette loi possède trois paramètres : les paramètres de position et d'échelle qui sont des paramètres locaux propres à chaque station, le troisième paramètre, dit de forme, qui conditionne l'extrapolation de la loi.

Un conditionnement régional de ce paramètre a été proposé afin d'exploiter l'information régionale et la cohérence entre les différentes stations. La méthode proposée repose sur la distribution empirique de l'ensemble des valeurs des paramètres de forme obtenus aux stations étudiées ; c'est-à-dire la distribution des 500 hydrogrammes x 500 jeux de paramètres x 10 stations². Cette méthode approchée pourra être améliorée par la possibilité de co-ajuster en une seule étape l'ensemble des paramètres (paramètre régional de forme, paramètres locaux à chacune des stations).

² Les stations de Châteaufort et Chusclan étant exclues de cette distribution faute de longue série temporelle

5 BIBLIOGRAPHIE

- Darienzo M. «Real-time Bayesian estimation of dynamic stage-discharge models», Ph.D. dissertation, Université Grenoble Alpes, 2017-2020, in progress.
- Lang M., et al. «Résultats du projet ExtraFlo (ANR 2009-2013) sur l'estimation des pluies et crues extrêmes.» *La Houille Blanche*, 2, 5-13, doi 10.1051/lhb2014010.
- Mansanarez, V. «Non-unique stage-discharge relations: Bayesian analysis of complex rating curves and their uncertainties.» Ph.D. dissertation, Université Grenoble Alpes, 2016.
- Pardé M. «Le régime du Rhône», *Etudes rhodaniennes, Lyon (réédition Géocarrefour 2004), (1925), 3 tomes, 848p.*
- Pichard G., Roucaute E., 2014. Sept siècles d'histoire hydroclimatique du Rhône d'Orange à la mer (1300-2000) : climat, crues, inondations. Méditerranée, revue géographique des pays méditerranéens. Numéro hors-série, Université Aix-Marseille, 192 p.
- Pichard G., Arnaud-Fassetta G., Moron V., Roucaute E., 2017. Hydroclimatology of the Lower Rhône Valley: historical flood reconstruction (AD 1300–2000) based on documentary and instrumental sources, *Hydrological Sciences Journal*, 62:11, 1772-1795, doi: 10.1080/02626667.2017.134931
- Rigaudiere P. et al. «Etude Globale des crues du Rhône.» Tech. rep., SAFEGE Cetis and Université de Nice, 2000.

