



## Actualisation de l'hydrologie des crues du Rhône

### A - Rapport général Phase 2 : Hydrologie des crues du Rhône



*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 : Hydrologie des crues du Rhône  
**Objet :** Rapport général  
**Client :** DREAL Auvergne-Rhône-Alpes  
**Date :** 3 août 2018  
**Version :** Finale  
**Auteur :** Antoine Bard (Hy-dro Consultant)  
Michel Lang (Irstea)  
**Ref :** Rhone\_RG2\_0.180528

---

---

**HY-DRO CONSULTANT**

756 Route du Pey, 383350 Laval dens, 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
- 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 QIX
  - Annexes B IV - Quantiles extrapolés
  - Annexe B V - Hydrogrammes de crue

## Table des matières

---

Introduction.....	1
1 Données d'entrée.....	3
1.1 Incertitude hydrométrique.....	3
1.2 Constitution des échantillons.....	4
2 Analyse fréquentielle.....	7
2.1 Outils et méthodes utilisés.....	7
2.1.1 JBay : estimation des paramètres de lois statistiques par inférence Bayésienne.....	7
2.1.2 Ajustement par le maximum de vraisemblance.....	7
2.1.3 Loi usuelles utilisées.....	7
2.1.4 Propagation des incertitudes aux quantiles théoriques.....	8
2.2 Intérêt de la prise en compte des longues séries pour le calcul des quantiles de crue.....	9
2.2.1 Sous échantillonnage.....	9

2.2.2	Sensibilité de la loi de Gumbel.....	11
2.2.3	Sensibilité de la loi GEV.....	13
2.2.4	Conclusions du test de sensibilité.....	14
2.3	Distribution du débit de pointe (QIX) : ajustements des lois de Gumbel et GEV.....	14
2.3.1	Résultats obtenus.....	14
2.3.2	Comparaisons avec les résultats de l'EGR 2000.....	17
2.4	Distribution du débit de pointe (QIX) : ajustement d'une loi GEV supervisée régionalement	18
2.4.1	Analyse régionale du paramètre de forme de la loi GEV - QIX.....	18
2.4.2	Résultats obtenus avec la loi GEV Régionale - QIX.....	20
2.5	Distribution des débits moyens sur n jour (QJX - VCXN) loi GEV supervisée régionalement	23
2.5.1	Analyse régionale du paramètre de forme de la loi GEV - QJX - VCXn.....	23
2.5.2	Résultats obtenus avec la loi GEV Régionale - QJX - VCXn.....	25
2.6	Cohérence amont aval sur les quantiles de débit de pointe QIX(T).....	28
2.7	Cohérence entre variables QIX - QJX, analyse des coefficients de pointe.....	29
2.8	Synthèse des quantiles de crues pour les stations du Rhône.....	30
3	Réanalyse des crues historiques.....	32
3.1	Crue généralisée du Rhône de mai-juin 1856.....	33
3.2	Crue du 17 au 21 janvier 1910 sur les Préalpes et les Alpes du Nord.....	34
3.3	Février 1928.....	36
3.4	Novembre 1944.....	38
3.5	Crue de Février 1990.....	40
3.6	Crue de décembre 2003.....	42
4	Hydrogrammes de crue.....	43
4.1	Saisonnalité des hydrogrammes de crue.....	43
4.1.1	Haut-Rhône en amont de Lyon (non compris).....	43
4.1.2	Bas-Rhône en aval de Lyon (compris).....	46
4.2	Hydrogrammes de crues par la méthode de l'hydrogramme moyen.....	48
4.2.1	Haut-Rhône en amont de Lyon (non compris).....	48
4.2.2	Bas-Rhône en aval de Lyon (compris).....	51
5	Conclusions.....	55
5.1	Conclusion de l'analyse fréquentielle.....	55
5.2	Conclusions sur les hydrogrammes de crue.....	56
6	Bibliographie.....	57

## INTRODUCTION

---

Historiquement l'hydrologie du Rhône était suivie par le Service Spécial du Rhône des Ponts et Chaussées depuis le XVIII<sup>ème</sup> 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.

### 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 et de deux stations additionnelles (Chateaufort et Chusclan), décrite à la figure et dans le tableau ci-dessous.

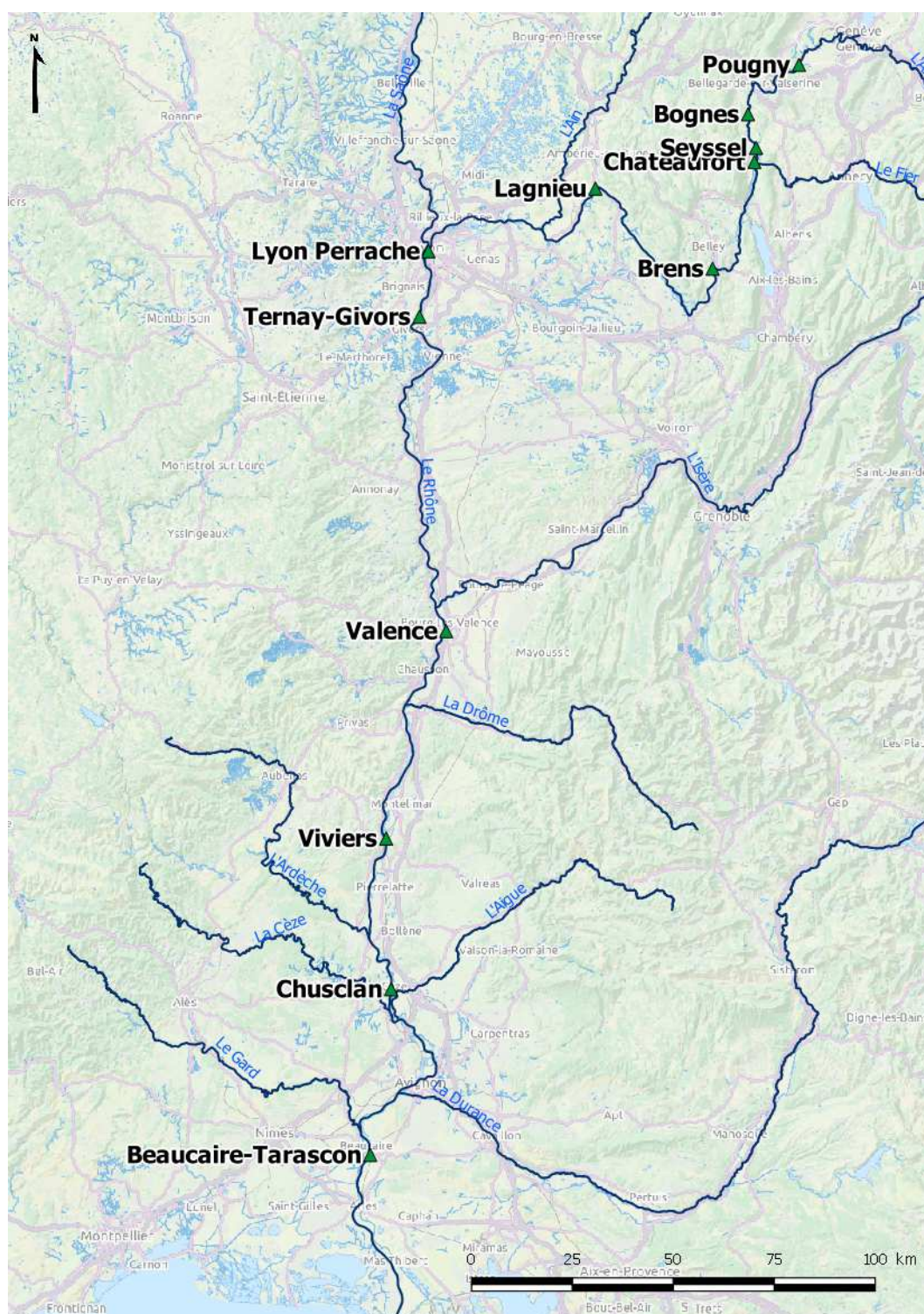


Figure 0-1 : Carte de localisation des stations

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

Tableau 0-1 : Pk et surface drainés aux principales stations du Rhône  
(le PK zéro est situé au droit de la confluence Rhône-Saône)

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 l'ensemble de la chaîne d'incertitude, depuis la mesure des hauteurs jusqu'à l'estimation des débits via les courbes de tarage puis l'extrapolation statistique des quantiles de crues.

Le rapport général de phase 1 présente la collecte des données historiques pour les différentes stations du Rhône et le travail réalisé pour la réestimation des courbes de tarage et la quantification des incertitudes hydrométriques par la méthode BaRatin.

Le deuxième volet rapporte ici la méthode employée pour l'estimation des caractéristiques de crue proprement dite. La première partie détaille l'analyse fréquentielle menée à l'aide du logiciel JBay (Renard in Renard *et al.*, 2017) pour l'estimation des paramètres de lois statistiques par inférence Bayésienne. Nous présentons ensuite les échantillons de crue constitués et les résultats obtenus pour les longues chroniques disponibles pour le Rhône.

## 1 DONNÉES D'ENTRÉE

### 1.1 Incertitude hydrométrique

La première phase de cette étude, décrite en détail dans le Rapport Général de Phase 1, s'est concentrée sur le calcul des incertitudes associées aux données de débit, c'est-à-dire l'incertitude hydrométrique. Pour cela deux méthodes complémentaires ont été utilisées :

- La méthode BaRatin (BAYesian RATING curve analysis). Cette méthode permet d'estimer les courbes de tarage par inférence Bayésienne, en prenant en compte la connaissance et l'incertitude sur le fonctionnement hydraulique d'une station hydrométrique et les données de jaugeages qui y sont utilisés. Dans ce cas, la démarche consiste à réestimer les débits à la station à partir des données brutes limnimétriques et de jaugeages.
- Le modèle d'incertitude. Cette alternative a été mise en place lorsque seules les données de débits ont pu être récupérées. Dans ce cas le modèle d'incertitude permet d'habiller une incertitude autour de la valeur de débit connue. Le modèle reproduit la structure des résultats BaRatin à la station sur une période caractérisée ou une station proche.

Dans les deux cas les résultats de la méthode s'expriment sous la forme d'un faisceau de valeurs, appelés spaghetti, autour d'une valeur centrale. Dans le cas de l'application de BaRatin, la valeur centrale est prise comme la valeur de débit issue de la courbe de tarage la plus probable, appelée *Maxpost*. Cette valeur centrale est exempte d'erreur et ne prend donc pas en compte les incertitudes qui sont traduites par le faisceau de spaghetti.

Un schéma similaire s'applique dans le cas de l'utilisation du modèle d'erreur. La valeur centrale est la valeur de débit collectée. Le modèle permet l'expression de l'incertitude par un faisceau de spaghetti.

Dans les deux cas d'application le nombre de spaghetti est de 500.

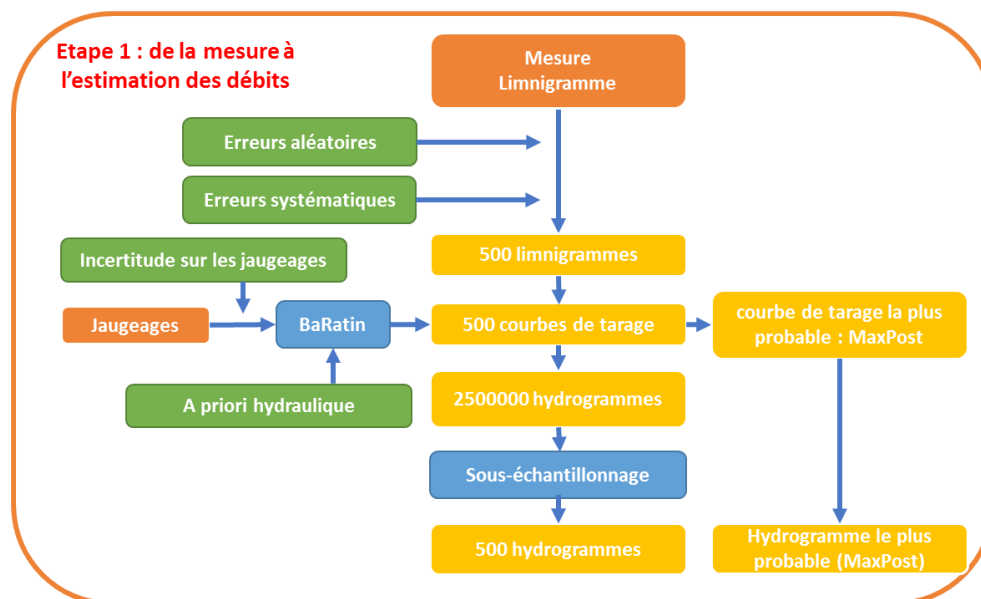


Figure 1-2 : Simulation d'hydrogrammes, compte-tenu des incertitudes hydrométriques

## 1.2 Constitution des échantillons

L'échantillonnage des données pour l'étude de crue se fait classiquement par année hydrologique, de la saison de basses eaux de l'année  $N$  à la saison des basses eaux de l'année  $N+1$ . Ceci afin d'éviter la possible sélection erronée de deux maximums annuels « calendaires », situés de part et d'autre du changement d'année (31 décembre – 1<sup>er</sup> janvier).

La Figure 1-3 présente les régimes mensuels moyens du Rhône au différentes sites étudiés. L'influence nivale est visible sur le Haut-Rhône pour disparaître progressivement d'amont en aval, jusqu'à



un régime relativement plat au niveau de Lyon. En aval on retrouve un régime fluvial très peu variable à l'exception d'une saison de basses eaux apparaissant à la fin de la période estivale.

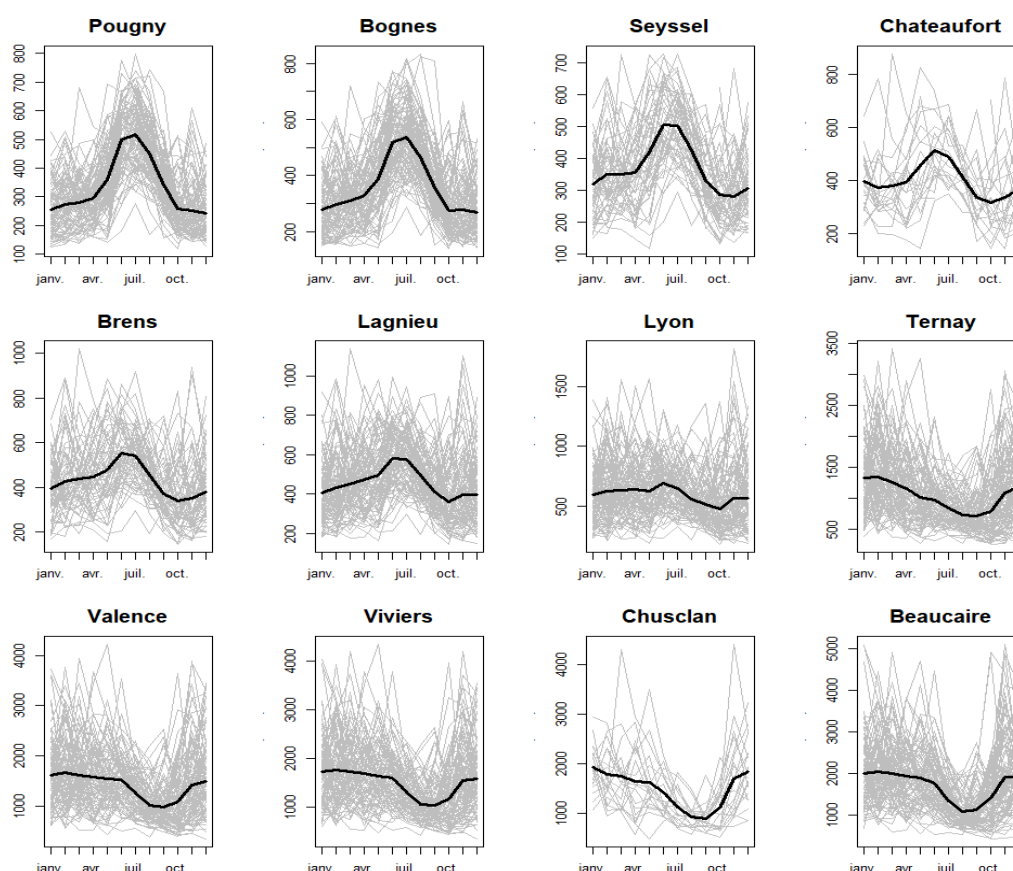


Figure 1-3 : Régime mensuel moyen du Rhône

Pour les stations du Rhône, le découpage hydrologique proposé est le suivant :

Station	Année hydrologique
<b>Pougny et Bognes</b>	Janvier - décembre
<b>Seyssel, Chateaufort, Brens, Lagnieu, Lyon</b>	Octobre - septembre
<b>Ternay et Valence</b>	Septembre - août
<b>Viviers, Chusclan, Beaucaire</b>	Août - Juillet

Tableau 1-2 : Découpage en année hydrologique proposé pour le Rhône

Toutefois l'utilisation d'un tel découpage n'est pas compatible avec l'exploitation des données historiques dont la majeure partie provient des annuaires de crue, qui ne rapportent qu'une seule crue par année civile. Ainsi pour les débits maximums annuels (QIX) nous retenons un échantillonnage par année civile afin d'intégrer ses longues séries historiques dans les échantillons. Pour l'ensemble des autres variables étudiées (débit moyen journalier QJX et débit moyen VCXN sur  $N$  jours), l'échantillonnage est réalisé à partir des chroniques de débit continu pour le découpage en année hydrologique.

Le découpage par année civile pose le problème de la non indépendance des événements de crue échantillonnés. Dans le cas des débits maximums annuels on peut relever un certain nombre d'événements relativement proches temporellement (Tableau 1-3). En l'état de l'exploitation des annuaires hydrologiques il n'est pas possible de faire l'impasse sur ces événements. La numérisation des limnigrammes anciens pourrait permettre de résoudre ce point. En supposant qu'une fenêtre temporelle de 60 jours soit suffisante pour assurer que les événements sont météorologiquement indépendants, le nombre d'événements proches est jugé raisonnable par rapport aux échantillons complets, faute de posséder les séries complètes les séries sont conservées en l'état.

Station	Seuil de proximité temporelle des événements				Taille échantillon	Période couverte (QIX)
	10 jours	30 jours	60 jours	90 jours		
Pougny	0	0	1	4	92	1925-2016
Bognes	1	1	3	9	163	1853-2015
Seyssel	0	1	4	6	123	1841-2016
Châteaufort	0	0	1	5	64	1953-2016
Brens	0	1	4	7	64	1953-2016
Lagnieu	1	2	8	12	126	1891-2016
Lyon	0	2	8	15	172	1840-2015
Ternay	3	6	9	18	173	1840-2016
Valence	5	6	12	16	162	1855-2016
Viviers	2	4	8	13	107	1910-2016
Chusclan	0	0	1	3	66	1950-2015
Beaucaire	1	1	7	17	201	1816-2016

Tableau 1-3 : Détail des échantillons QIX

Les échantillons de débit maximum annuel sont détaillés en Annexe B III, qui présente les valeurs centrales retenues, ainsi que les intervalles de confiance caractérisant les incertitudes à 70% et à 95%. Pour les débits maximums journaliers (QJX) et consécutifs sur N jours (VCXN), les valeurs centrales sont reportées en Annexe B IV en même temps que les résultats des ajustements statistiques retenus.

## 2 ANALYSE FRÉQUENTIELLE

---

### 2.1 Outils et méthodes utilisés

#### 2.1.1 JBay : estimation des paramètres de lois statistiques par inférence Bayésienne

JBay est un logiciel permettant d'estimer les paramètres d'une loi statistique par inférence Bayésienne. Cet utilitaire a été développé par Irstea. On peut distinguer deux mises en œuvre de cette méthode :

- Une estimation non supervisée, sans émettre d'a priori sur les paramètres de la loi, laissant ainsi l'estimation se baser uniquement sur l'échantillon de données ;
- Une estimation supervisée, en formulant une hypothèse a priori sur les paramètres de la loi, combinée ensuite via le théorème de Bayes à l'échantillon de données.

La méthode supervisée est ici utilisée avec une loi de Gumbel ou une loi GEV. La méthode produit  $m$  jeux de paramètres de la loi choisie, ceux-ci représentant l'incertitude associée à l'estimation des paramètres de la loi.

#### 2.1.2 Ajustement par le maximum de vraisemblance

Pour les ajustements de loi statistique aux échantillons, la méthode du maximum de vraisemblance est utilisée. Pour un échantillon d'une variable hydrologique, on juge l'adéquation du modèle probabiliste proposé (par exemple dans le cas de maximaux annuels, la loi de Gumbel ou la loi GEV) sur la probabilité que l'échantillon soit une réalisation de ce modèle. On cherche in fine à maximiser la probabilité qu'on aurait d'observer l'échantillon considéré selon le modèle choisi. Cette méthode permet de s'affranchir de la répartition empirique de l'échantillon d'autant plus que pour un même site plusieurs échantillons sont considérés selon les périodes temporelles, l'ajustement des paramètres de la loi restant assujéti à l'échantillon considéré.

#### 2.1.3 Loi usuelles utilisées

##### 2.1.3.1 Loi de Gumbel

Rappelons ici l'expression de la loi de Gumbel, couramment utilisée pour estimer les maxima annuels. C'est une loi à deux paramètres, dont la fonction de répartition vaut :

$$F(y) = \exp \left( - \exp \left( \frac{-y - \mu}{\lambda} \right) \right)$$

avec : le paramètre de position  $\mu$  ;  
le paramètre d'échelle  $\lambda > 0$

#### 2.1.3.2 Distribution généralisée des valeurs extrêmes (loi GEV)

Rappelons ici l'expression de la loi GEV, également fréquemment utilisée pour estimer les maxima annuels. Elle comporte trois paramètres, l'expression de la fonction de répartition vaut :

$$F(y) = \exp \left( - \left( 1 - \frac{\xi(y - \mu)}{\lambda} \right)^{\frac{1}{\xi}} \right)$$

avec : le paramètre de position  $\mu$  ;  
le paramètre d'échelle  $\lambda > 0$  ;  
le paramètre de forme  $\xi$

Lorsque  $\xi$  tend vers 0, alors la loi GEV tend vers le cas particulier de la loi de Gumbel.

#### 2.1.4 Propagation des incertitudes aux quantiles théoriques

L'objectif est d'ajuster une loi statistique à un échantillon d'une variable hydrologique afin de pouvoir extrapoler les quantiles selon cette loi. Nous avons vu que chaque échantillon se décline en  $m=500$  spaghetti afin de prendre en compte l'ensemble **des incertitudes hydrométriques**.

Pour chaque échantillon disponible, une multitude d'estimations ( $n=500$ ) des paramètres de la loi peut être faite traduisant ainsi **l'incertitude d'échantillonnage**. Ainsi pour une même variable hydrologique,  $m \times n$  jeux de paramètres sont produits rendant compte de l'incertitude hydrométrique combinée à l'incertitude d'échantillonnage. Au final  $m \times n$  quantiles peuvent être estimés selon la loi statistique choisie. Dans la pratique un sous-échantillonnage permet de réduire ce nombre sans perdre la dispersion associée rendant compte de l'incertitude finale associée aux quantiles.

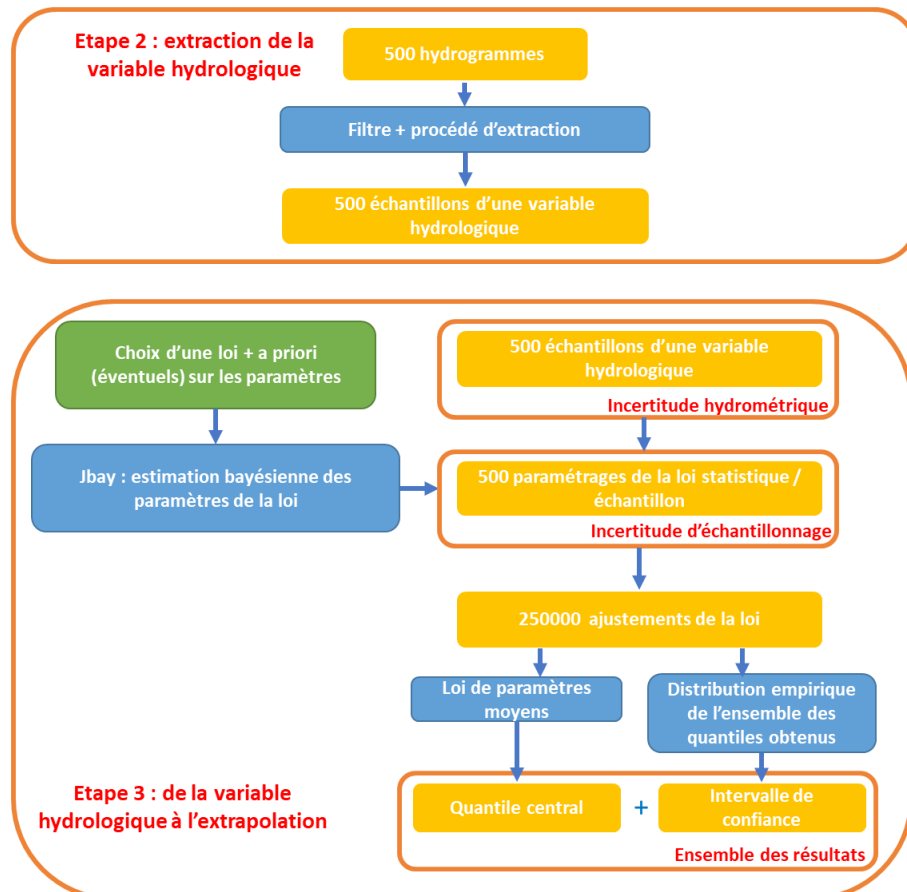


Figure 2-4 : Principe de la propagation de l'incertitude hydrométrique et de l'incertitude d'échantillonnage aux quantiles théoriques

La formalisation des résultats se fait de la manière suivante :

- **La valeur centrale des quantiles est donnée par la loi de paramètre moyen**, obtenue par la moyenne des paramètres des 250000 lois statistiques ajustées. Les paramètres de l'ajustement retenu sont donnés ici, ils permettent le calcul d'un quantile central pour toute période de retour donnée,
- **L'intervalle de confiance est défini par défaut à 95%**, à partir des quantiles à 2.5% et à 97.5% de la distribution empirique des quantiles, à période de retour fixe pour l'ensemble des 250 000 lois statistiques ajustées. Les valeurs des intervalles de confiances sont détaillées en annexe IV, pour une largeur à 95% et à 70%.

L'ensemble des valeurs publiées ici sont arrondies à la centaine près, ce qui correspond à moins de 5% de la valeur centrale des ajustements, toutes périodes de retour confondues et toutes lois statistiques considérées. Les annexes B IV fournissent, quant à elles les valeurs brutes dans la volonté d'afficher en toute transparence les résultats obtenus par la méthodologie décrite ici.



## 2.2 Intérêt de la prise en compte des longues séries pour le calcul des quantiles de crue

La prise en compte des événements historiques dans les échantillons de crue est a priori intéressante pour l'analyse fréquentielle, sous réserve de prendre en compte les incertitudes de reconstitution sur ces événements.

D'un côté le recul historique permet d'intégrer des crues exceptionnelles, dont l'intensité dépasse, en général, largement les records des enregistrements contemporains. L'exploitation de longues chroniques permet donc statistiquement de bien définir les crues de fréquence rare, d'autant plus que les lois statistiques usuelles sont fortement impactées par les queues de distributions constituées des crues les plus fortes.

De l'autre côté, les difficultés d'estimer avec précision les caractéristiques des crues historiques sont nombreuses ; l'évolution de la morphologie du lit du fleuve au cours du temps, la précision des mesures anciennes, les ruptures d'ouvrages pendant les événements sont parmi les principaux facteurs d'incertitudes qui entoure les valeurs historiques de crue.

Il est nécessaire de quantifier l'impact des incertitudes sur les données historiques dans l'estimation des ajustements statistiques. Dans ce but nous avons mené un test de sensibilité sur les deux stations tests de Bognes et Beaucaire. Ce test est réalisé sur les débits maximums annuels à travers les distributions de Gumbel et GEV.

### 2.2.1 Sous échantillonnage

Pour les deux stations tests les échantillons sont découpés en quatre sous-échantillons, en fonction des périodes temporelles homogènes vis-à-vis des incertitudes.

Pour la station de Bognes, le découpage temporel retenu est le suivant : 1970-2014, 1949-2014, 1919-2014, 1853-2014, comme illustré à la Figure 2 -5. L'échantillon test est constitué de 158 valeurs<sup>1</sup>.

- 1970-2014 : méthode BaRatin sur les données numériques récentes. L'incertitude totale est de +/-3.7% en moyenne, grâce à l'utilisation de l'ADCP pour les jaugeages ;
- 1949-1969 : méthode BaRatin sur les données limnimétrique et jaugeages anciens numérisés depuis les archives. Incertitude totale de +/- 5.1% en moyenne ;
- 1919-1938 : modèle d'incertitude sur les données de débit transposé depuis le site historique de Génissiat. Compte tenu des informations collectées, l'incertitude totale a été estimée à +/- 9.1% en moyenne ;
- 1853-1918 : modèle d'incertitude sur les données de débit transposé depuis la station historique de Seyssel / Pyrimont. L'incertitude hydrologique totale sur ces données est arbitrairement majorée d'un coefficient 1.5, pour atteindre en moyenne +/- 11.6%.

<sup>1</sup> La révision de l'échantillon pour l'obtention des résultats finaux à la station de Bognes a permis d'ajouter cinq valeurs supplémentaires à l'échantillon QIX.

## Bognes

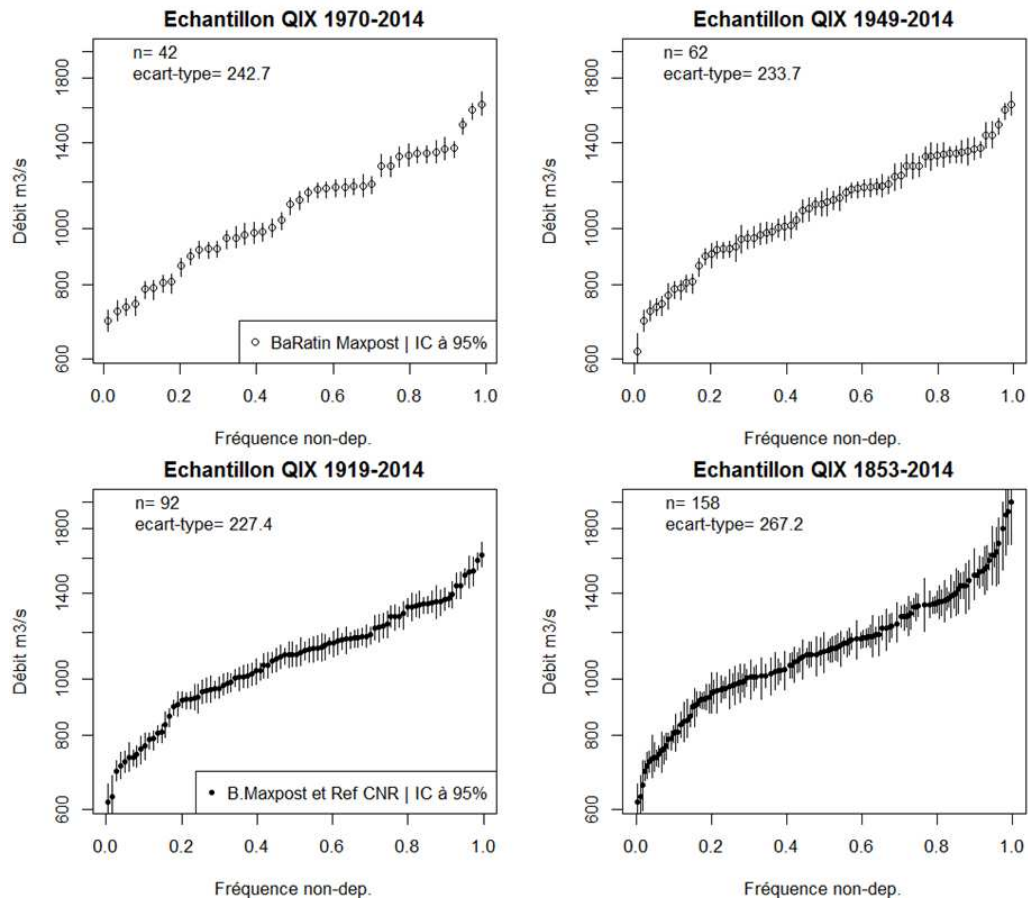


Figure 2-5 : Sous échantillonnage des QIX à Bognes

Pour la station de Beaucaire, le sous-échantillonnage est le suivant : 1971-2016, 1943-2016, 1840-2016, 1816-2016, comme illustré à la Figure 2-6. L'échantillon complet compte 201 valeurs, qui sont toutes estimées par la méthode BaRatin.

- 1971-2016 : méthode BaRatin sur les données numériques récentes de la station de Beaucaire Restitution (Pk 269.6). L'incertitude totale est de +/-6.9% en moyenne ;
- 1943-1969 : méthode BaRatin sur les données de la station historique de Pont de Beaucaire (Pk 267.7). L'incertitude totale moyenne est de +/- 5.2%<sup>2</sup> ;
- 1840-1942 : méthode BaRatin sur les données de la station historique de Pont de Beaucaire (Pk 267.7). L'incertitude totale moyenne est de +/- 17.4% ;
- 1816-1839 : méthode BaRatin sur les données historiques supposées à la station de Pont de Beaucaire (Pk 267.7). L'incertitude totale moyenne est de +/- 20.5%.

<sup>2</sup> Les jaugeages étant plus nombreux par gamme de débit pour la période 1943-1969, l'incertitude totale est légèrement inférieure à la période suivante alors que la précision des jaugeages s'est améliorée.

## Beaucaire

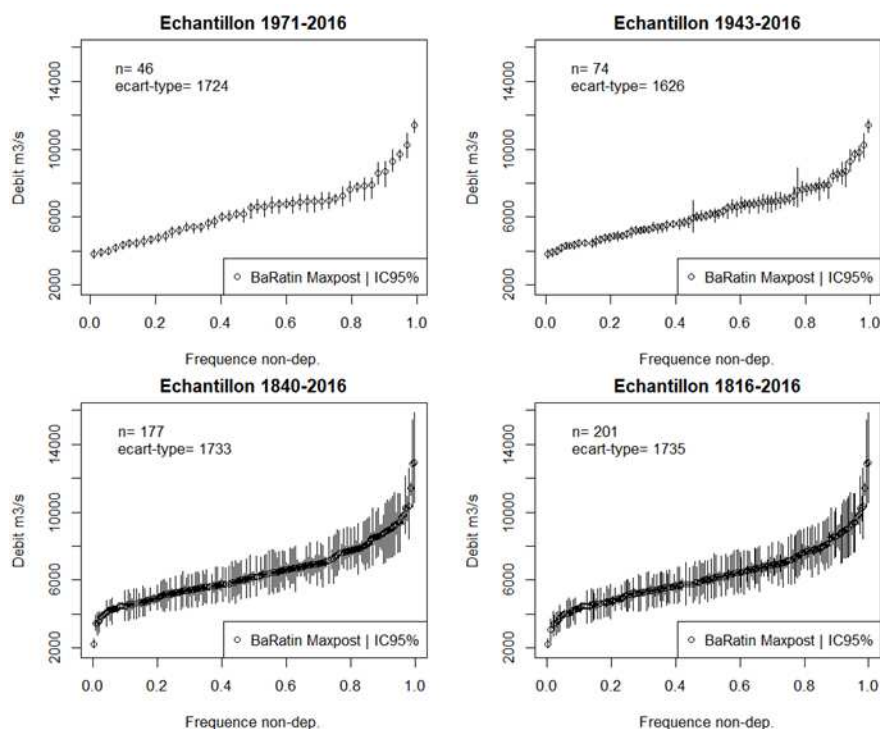


Figure 2-6 : Sous échantillonnage des QIX à Beaucaire

### 2.2.2 Sensibilité de la loi de Gumbel

Pour les deux stations tests, pour chaque échantillon constitué de  $n=500$  spaghetti,  $m=500$  jeux de paramètres de la loi de Gumbel sont ajustés par l'utilitaire JBay. L'enveloppe représentant l'intervalle de confiance à 95% de l'ensemble de ces ajustements est présentée à la Figure 2-7 pour la station de Bognes et à la Figure 2-8 pour la station de Beaucaire.

Dans les deux cas, le rajout de données anciennes plus incertaines dans les échantillons QIX n'entraîne pas une augmentation de l'incertitude finale sur les ajustements de Gumbel. Au contraire, l'enveloppe de l'intervalle de confiance à 95% tend à diminuer pour les deux stations à mesure de l'augmentation de la taille des échantillons. Le resserrement de l'intervalle de confiance est relativement modéré. Pour la station de Beaucaire la diminution de l'intervalle de confiance à 95% est de 8 à 10 points de la décennale à la millénale.

Du point de vue des ajustements en eux-mêmes l'ajout de données supplémentaires a un rôle très limité. Les courbes obtenues sont en effet très peu sensibles à la longueur des échantillons, jusqu'à diverger de ceux-ci. Cet effet est particulièrement visible pour Bognes où les ajustements de Gumbel moyens sont supérieurs aux échantillons dès une période de retour de 10 ans.

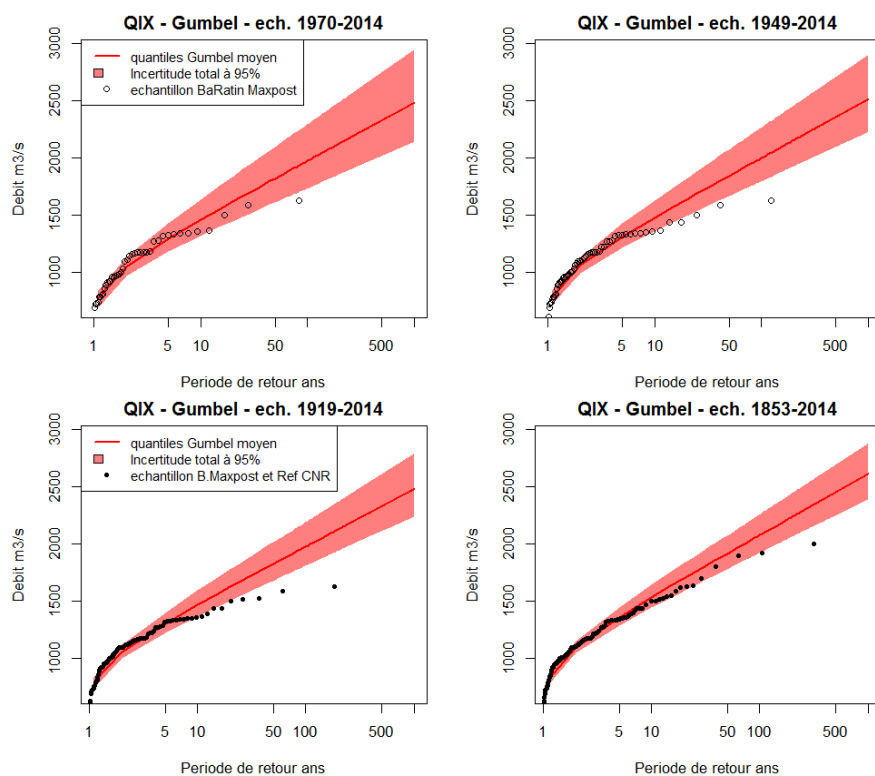


Figure 2-7 : Sensibilité de la loi de Gumbel pour les sous-échantillons QIX à Bognes

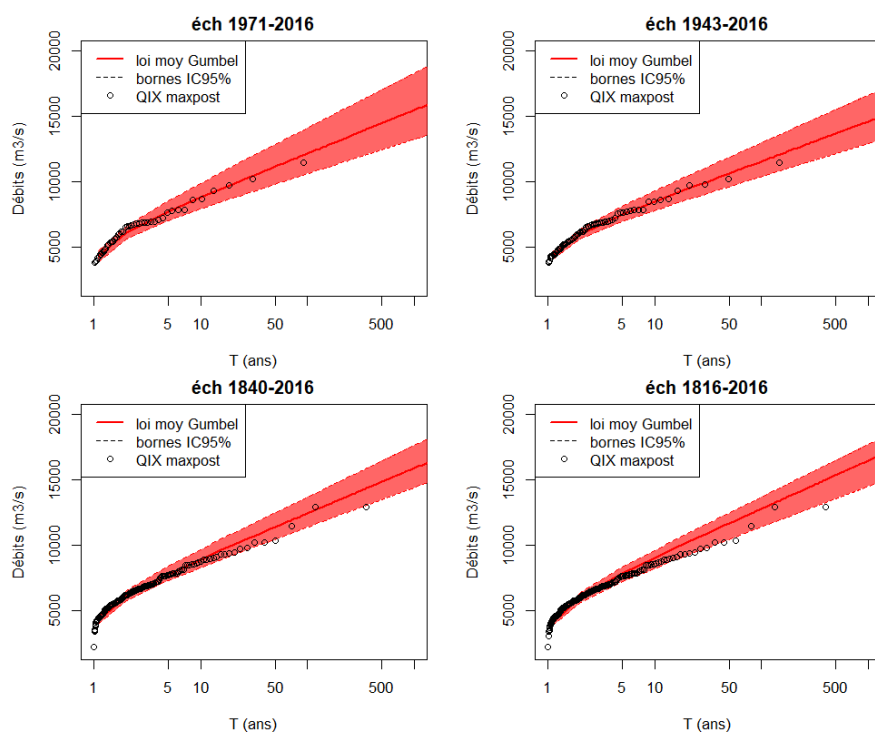


Figure 2-8 : Sensibilité de la loi de Gumbel pour les sous-échantillons QIX à Beaucaire

### 2.2.3 Sensibilité de la loi GEV

Le même procédé est reproduit avec l'utilisation d'une loi GEV, en reprenant les mêmes sous échantillons pour les stations de Bognes et Beaucaire. Les ajustements obtenus sont illustrés à la Figure 2-9 et Figure 2-10.

D'un point de vue général la loi GEV avec un paramètre supplémentaire par rapport à la loi de Gumbel est beaucoup plus sensible aux échantillons. En conséquence les résultats sont ici beaucoup plus contrastés que précédemment. A l'inverse de la loi de Gumbel, les ajustements sont profondément modifiés entre les différents échantillons. L'ajout de nouvelles crues en particulier en queue de distribution a une influence importante sur les ajustements. A Bognes, on observe une diminution progressive des quantiles moyens puis un sursaut pour l'échantillon 1853-2014 avec l'ajout de crues plus fortes. A Beaucaire l'ajustement moyen est relativement constant même s'il connaît des fluctuations.

Pour les deux stations l'ajout de données supplémentaire entraine globalement une réduction importante de l'intervalle de confiance sur les ajustements réalisés. Le gain de ce point de vue est substantiel entre les échantillons comportant moins d'une centaine de valeurs et ceux dépassant ce seuil. A Beaucaire pour une période de retour de 1000 ans l'intervalle de confiance relatif au quantile moyen passe ainsi de 180% à 42%, entre l'échantillon le plus court et le plus long. Pour les échantillons les plus courts, il n'y a pas assez de données pour caler correctement les trois paramètres de la loi GEV. Ceci est particulièrement sensible pour le paramètre de forme  $\xi$ , qui prend à la fois des valeurs positives et négatives, ce qui génère une forte incertitude d'estimation. Cas notable dans le cas de Bognes, l'incertitude totale augmente légèrement entre l'échantillon 1919-2014 et 1853-2014, avec l'ajout de données plus incertaines.

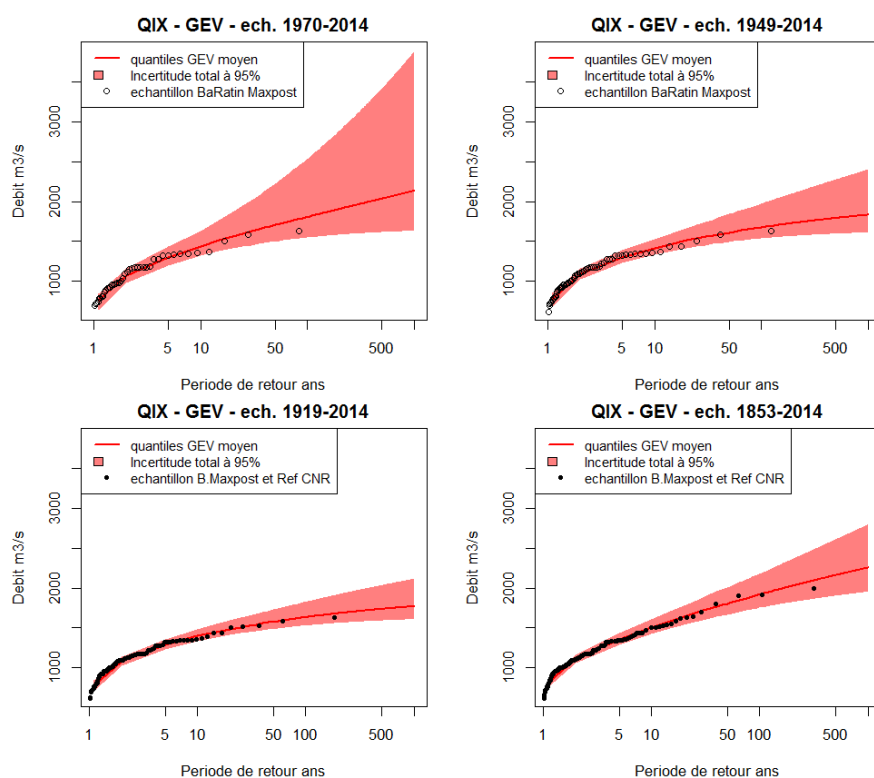


Figure 2-9 : Sensibilité de la loi GEV pour les sous-échantillons QIX à Bognes



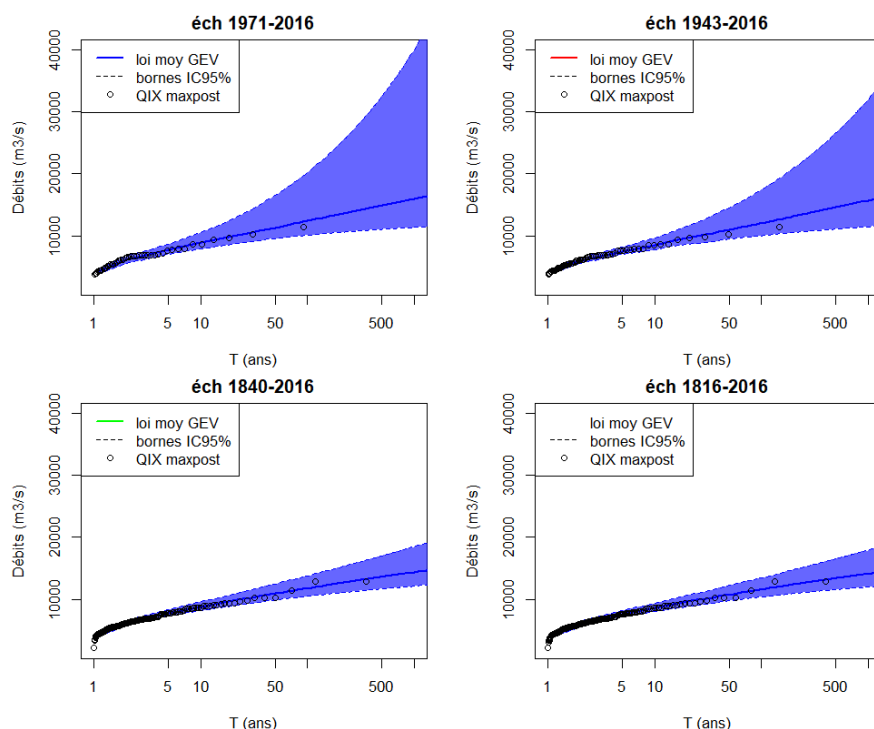


Figure 2-10 : Sensibilité de la loi GEV pour les sous-échantillons QIX à Beaucaire

#### 2.2.4 Conclusions du test de sensibilité

Le test de sensibilité montre que la loi de Gumbel reste peu sensible aux variations de l'échantillon, notamment aux queues de distribution. En raison de seulement deux paramètres à caler l'incertitude d'échantillonnage reste artificiellement faible, et varie peu avec l'augmentation de longueur de l'échantillon, même si elle a tendance à diminuer.

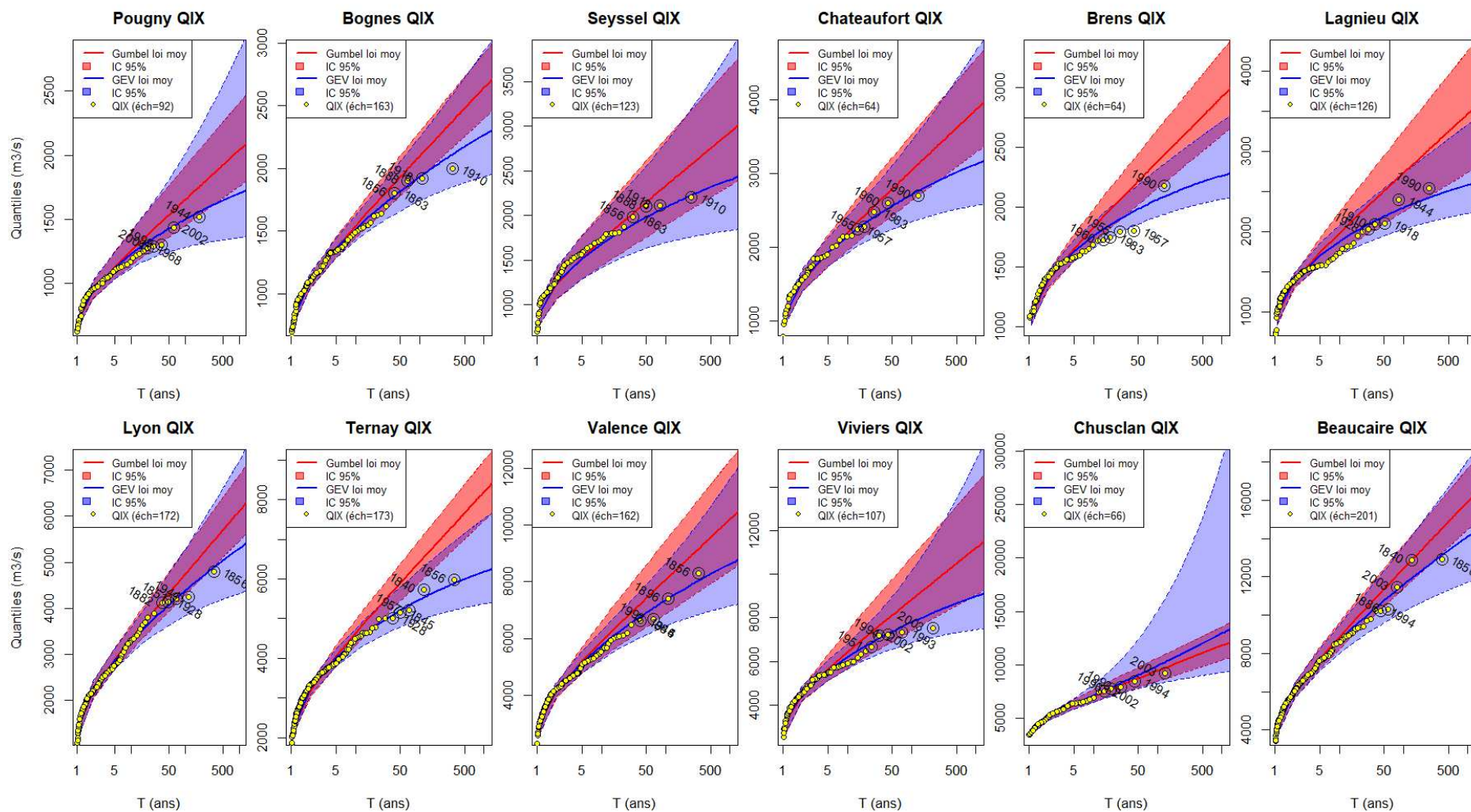
Pour la loi GEV, le test montre que celle-ci est au contraire très sensible aux variations de l'échantillon. L'ajout de données anciennes relativement incertaines permet néanmoins de fortement réduire les incertitudes d'échantillonnage sur cette loi. On note toutefois l'atteinte d'un palier au-delà duquel l'incertitude augmente de nouveau, lorsque les données anciennes sont trop incertaines. Il semble acceptable d'utiliser la loi GEV pour des échantillons d'au moins une centaine de valeurs.

### 2.3 Distribution du débit de pointe (QIX) : ajustements des lois de Gumbel et GEV

#### 2.3.1 Résultats obtenus

Cette partie présente les résultats des ajustements non-supervisés en utilisant les lois de Gumbel et GEV, obtenus sans formuler d'a priori sur les paramètres de ces deux lois. Pour les douze stations étudiées, nous considérons les échantillons QIX sur l'ensemble des données collectées, les effectifs totaux étant rappelés au Tableau 1 -3. L'ensemble des échantillons sont détaillés en Annexe BIII. La présente les ajustements de Gumbel et de GEV non supervisés. Les cinq plus fortes crues de chaque échantillon sont également figurées.

Pour l'ensemble des stations du Rhône, les ajustements de Gumbel sont supérieurs aux ajustements GEV, à l'exception de Chusclan. Globalement, au-delà d'une période de retour de 10 ans, les ajustements de Gumbel sont largement au-dessus de la distribution empirique de l'échantillon.



Du point de vue des incertitudes, les ajustements GEV sont bien plus incertains que ceux de Gumbel. En particulier pour les stations où les échantillons sont les plus petits : Pougny, Châteaufort, Viviers et surtout Chusclan. Pour cette dernière l'incertitude associée aux ajustements GEV est énorme et liée au fait que le paramètre de forme peut prendre des valeurs positives ou et négatives.

QIX - Gumbel non supervisé					
Station	T	Qtls.loi.moy	[IC95%]		L_IC/Qloi.moy
	(ans)	(m <sup>3</sup> /s)	(m <sup>3</sup> /s)		(%)
Pougny	10	1260	1140	1410	22
	100	1650	1450	1910	28
	1000	2040	1760	2410	32
Bognes	10	1540	1440	1660	14
	100	2100	1920	2290	18
	1000	2640	2400	2920	20
Seyssel	10	1720	1430	2040	35
	100	2330	1890	2860	42
	1000	2930	2330	3660	45
Châteaufort	10	2210	1960	2490	24
	100	3040	2630	3530	30
	1000	3870	3290	4560	33
Brens	10	1830	1700	1980	15
	100	2380	2160	2650	21
	1000	2920	2600	3300	24
Lagnieu	10	1980	1750	2240	25
	100	2730	2250	3250	37
	1000	3470	2730	4250	44
Lyon	10	3350	3080	3650	17
	100	4740	4290	5280	21
	1000	6110	5460	6900	24
Ternay	10	4640	4330	4960	14
	100	6430	5920	6990	17
	1000	8200	7470	9000	19
Valence	10	5900	5300	6590	22
	100	8070	6860	9450	32
	1000	10200	8380	12270	38
Viviers	10	6430	5690	7390	27
	100	8840	7400	10790	38
	1000	11210	9050	14150	45
Chusclan	10	7040	6490	7710	17
	100	9460	8490	10650	23
	1000	11830	10430	13560	27
Beaucaire	10	8860	8220	9610	16
	100	12430	11380	13670	18
	1000	15930	14470	17680	20

Tableau 2-4 : Quantiles de débit de pointe QIX : ajustements de Gumbel non supervisés

QIX - GEV non supervisé					
Station	T	Qtls.loi.moy	[IC95%]		L_IC/Qloi.moy
	(ans)	(m³/s)	(m³/s)		(%)
Pouigny	10	1230	1120	1410	23
	100	1500	1280	2010	49
	1000	1700	1360	2810	86
Bognes	10	1520	1420	1630	14
	100	1930	1740	2250	26
	1000	2270	1940	2940	44
Seyssel	10	1680	1420	2000	35
	100	2090	1690	2820	54
	1000	2400	1830	3840	84
Châteaufort	10	2150	1930	2420	23
	100	2720	2350	3440	40
	1000	3130	2570	4670	67
Brens	10	1760	1660	1870	12
	100	2060	1920	2320	19
	1000	2260	2070	2710	29
Lagnieu	10	1880	1700	2080	20
	100	2300	2030	2730	31
	1000	2580	2230	3340	43
Lyon	10	3280	3030	3600	17
	100	4380	3830	5290	33
	1000	5300	4320	7210	55
Ternay	10	4440	4180	4750	13
	100	5480	4970	6230	23
	1000	6180	5370	7530	35
Valence	10	5760	5260	6290	18
	100	7350	6430	8650	30
	1000	8630	7150	11610	52
Viviers	10	6200	5650	6820	19
	100	7800	6840	10150	42
	1000	8980	7460	15230	87
Chusclan	10	7140	6510	8130	23
	100	9930	8210	15000	68
	1000	12950	9290	29110	153
Beaucaire	10	8670	7980	9490	17
	100	11600	10180	13610	30
	1000	14110	11720	18090	45

Tableau 2-5 : Quantiles de débit de pointe QIX : ajustements de GEV non supervisés

### 2.3.2 Comparaisons avec les résultats de l'EGR 2000

La comparaison se fait de manière pertinente à distribution égale. En employant la distribution de Gumbel qui est celle qui a été choisie dans l'EGR, la mise à jour des échantillons de crue aurait entrainer une mise à jour des résultats obtenus alors. Dans ce contexte les quantiles obtenus avec la loi de Gumbel sont en moyenne de 10% supérieurs à ceux obtenus en 2000. Le maximum est pour la station de Seyssel pour laquelle l'augmentation est en moyenne de 18%, soit un gain d'environ 500 m3/s sur le quantile de crue moyen millénale. Autre exemple pour la station de Beaucaire, l'augmentation est d'environ 12% soit près de 1800 m3/s pour le quantile de crue moyen millénale.

Station	Etude EGR (2000)				Etude Hydro-Consultant & Irstea (2018)			
	Echantillon	Q(10)	Q(100)	Q(1000)	Echantillon	Q(10)	Q(100)	Q(1000)
<b>Pougny</b>	1925-1998	1180	1470	1800	1925-2016	1260	1650	2040
<b>Bognes</b>	1904-1998	1450	1920	2375	1853-2015	1540	2100	2640
<b>Seyssel</b>	1958-1993	430	1940	2450	1841-2016	1720	2330	2930
<b>Brens</b>	1953-1998	1720	2150	2570	1953-2016	1830	2380	2920
<b>Lagnieu</b>	1891-1998	1810	2400	2970	1891-2016	1980	2730	3470
<b>Lyon</b>	1900-1998	3120	4230	5310	1840-2015	3350	4740	6110
<b>Ternay</b>	1895-1998	4445	5890	7310	1840-2016	4640	6430	8200
<b>Valence</b>	1855-1998	5620	7510	9370	1855-2016	5900	8070	10200
<b>Viviers</b>	1910-1998	6100	8120	10100	1910-2016	6430	8840	11210
<b>Beaucaire</b>	1840-1998	8400	11300	14160	1816-2016	8860	12430	15930

Tableau 2-6 : Comparaison des quantiles de Gumbel : étude EGR (2000) et présente étude (2018)

## 2.4 Distribution du débit de pointe (QIX) : ajustement d'une loi GEV supervisée régionalement

Le paramètre de forme de la loi GEV joue un rôle prépondérant dans l'ajustement et l'extrapolation de cette loi pour les périodes de retour élevées. Nous étudions ici la distribution des paramètres de forme locaux, avant d'établir une distribution régionale. Cette distribution régionale est ensuite utilisée comme a priori dans JBay, pour l'estimation des nouveaux ajustements GEV supervisés. Cette méthode permet donc d'exploiter l'information régionale pour le conditionnement des lois GEV.

### 2.4.1 Analyse régionale du paramètre de forme de la loi GEV - QIX

La Figure 2 -12 présente les distributions du paramètre de forme de la loi GEV non supervisée pour les débits maximaux annuels aux différentes stations du Rhône. On ne retrouve pas de spécificité marquée par tronçon. Globalement l'ensemble des distributions tend vers les valeurs positives du paramètre, à l'exception de Viviers et Chusclan dont une partie de la distribution déborde sur la plage négative. Pour cette dernière du fait de la très faible taille de l'échantillon, nous écartons cette station de l'analyse régionale.



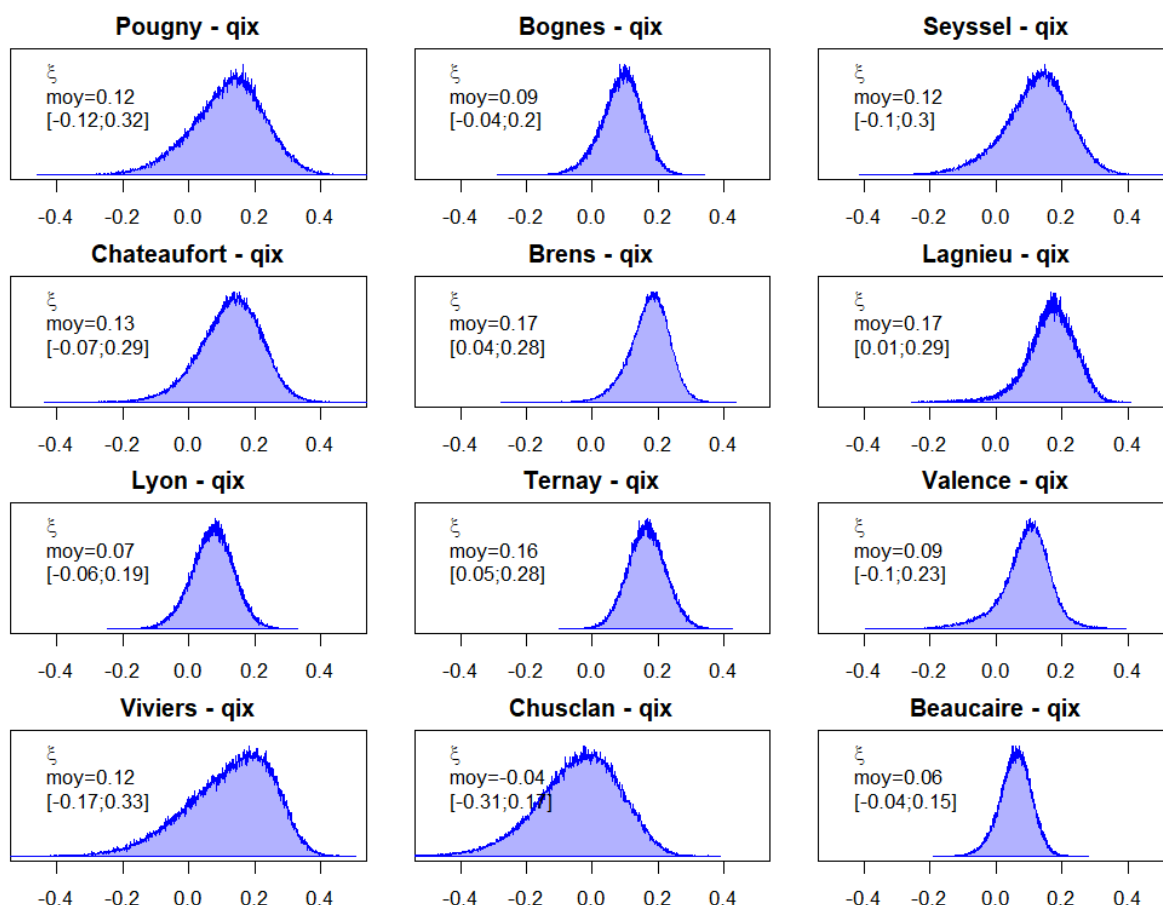


Figure 2-12 : Distributions locales du paramètre de forme de la loi GEV - QIX

La distribution empirique de l'ensemble des valeurs locales (à l'exception de Chusclan) est présentée à la Figure 2-13. La distribution est relativement homogène et est très bien approchée par une loi normale de paramètre moyenne = 0.117 et écart-type = 0.09. Nous retenons donc cette distribution approchée en tant qu'a priori pour le conditionnement régional de la loi GEV. Rappelons qu'il ne s'agit pas là de fixer le paramètre de forme puisque celui-ci est tout de même ajusté à chaque station en fonction des échantillons.

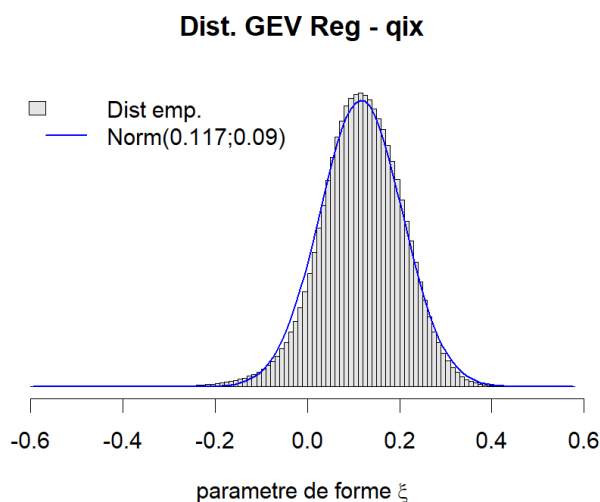


Figure 2-13 : Distribution du paramètre de forme régionale - QIX

### 2.4.2 Résultats obtenus avec la loi GEV Régionale - QIX

La détaille les résultats des ajustements par la loi GEV régionale, tel que définie précédemment. Elle est à comparer avec les ajustements de la loi GEV non supervisée représentée en .

Du point de vue des quantiles extrapolés, les quantiles de loi moyenne sont très similaires à ceux obtenus par les ajustements GEV non supervisés. On note une petite diminution de ceux-ci d'en moyenne 1.6%. Du point de vue des incertitudes, on constate une très nette réduction des intervalles de confiance. En moyenne la réduction vaut 25%. Les réductions les plus importantes concernent en toute logique les stations avec les plus petits échantillons, Pougny, Seyssel et Châteaufort, pour lesquelles les réductions des intervalles de confiance sur ces stations sont de l'ordre de -20 à -40% pour les périodes de retour 10 à 1000 ans. A Viviers et Chusclan les réductions atteignent de -2 à -60% et de -30 à -100%.

La loi GEV régionale permet également de gagner en robustesse par rapport aux variations des échantillons, ce qui est un des principaux reproches à la loi GEV non supervisée.

Paramètres de loi moyenne	Position $\mu$	Echelle $\lambda$	Forme $\xi$
<b>Pougny</b>	891.2	171.3	0.122
<b>Bognes</b>	1024.7	241.7	0.099
<b>Seyssel</b>	1148.1	267.7	0.126
<b>Châteaufort</b>	1422.3	367.3	0.125
<b>Brens</b>	1319.9	230.8	0.162
<b>Lagnieu</b>	1285.8	312.8	0.163
<b>Lyon</b>	2032.9	602.8	0.083
<b>Ternay</b>	2970.7	772.7	0.154
<b>Valence</b>	3870.6	928.1	0.099
<b>Vivier</b>	4183.1	1022.4	0.13
<b>Chusclan</b>	4761.2	1065.7	0.058
<b>Beaucaire</b>	5463.1	1529.7	0.071

Tableau 2-7 : Paramètres moyens de la loi GEV Régionale - QIX

QIX - GEV Régionale					
Station	T	Qtls.loi.moy	[IC95%]		L_IC/Qloi.moy
	(ans)	(m³/s)	(m³/s)		(%)
Pougny	10	1230	1120	1390	22
	100	1500	1290	1860	38
	1000	1700	1380	2370	58
Bognes	10	1510	1420	1620	13
	100	1920	1740	2170	22
	1000	2230	1940	2730	35
Seyssel	10	1670	1410	1990	35
	100	2080	1700	2660	46
	1000	2390	1870	3350	62
Châteaufort	10	2140	1920	2400	22
	100	2710	2360	3230	32
	1000	3120	2610	4060	46
Brens	10	1760	1660	1870	12
	100	2070	1920	2310	19
	1000	2280	2070	2690	27
Lagnieu	10	1880	1700	2080	20
	100	2300	2030	2710	30
	1000	2590	2230	3250	40
Lyon	10	3270	3020	3570	17
	100	4340	3840	5060	28
	1000	5210	4350	6620	44
Ternay	10	4440	4170	4750	13
	100	5510	5010	6200	22
	1000	6250	5460	7450	32
Valence	10	5740	5250	6270	18
	100	7300	6420	8380	27
	1000	8520	7160	10600	40
Viviers	10	6180	5630	6770	18
	100	7730	6850	9090	29
	1000	8870	7530	11720	47
Chusclan	10	7010	6490	7650	17
	100	9060	8080	10680	29
	1000	10820	9100	14480	50
Beaucaire	10	8650	8040	9390	16
	100	11470	10350	13100	24
	1000	13830	11960	16890	36

Tableau 2-8 : Synthèse des résultats pour les ajustements GEV régional - QIX

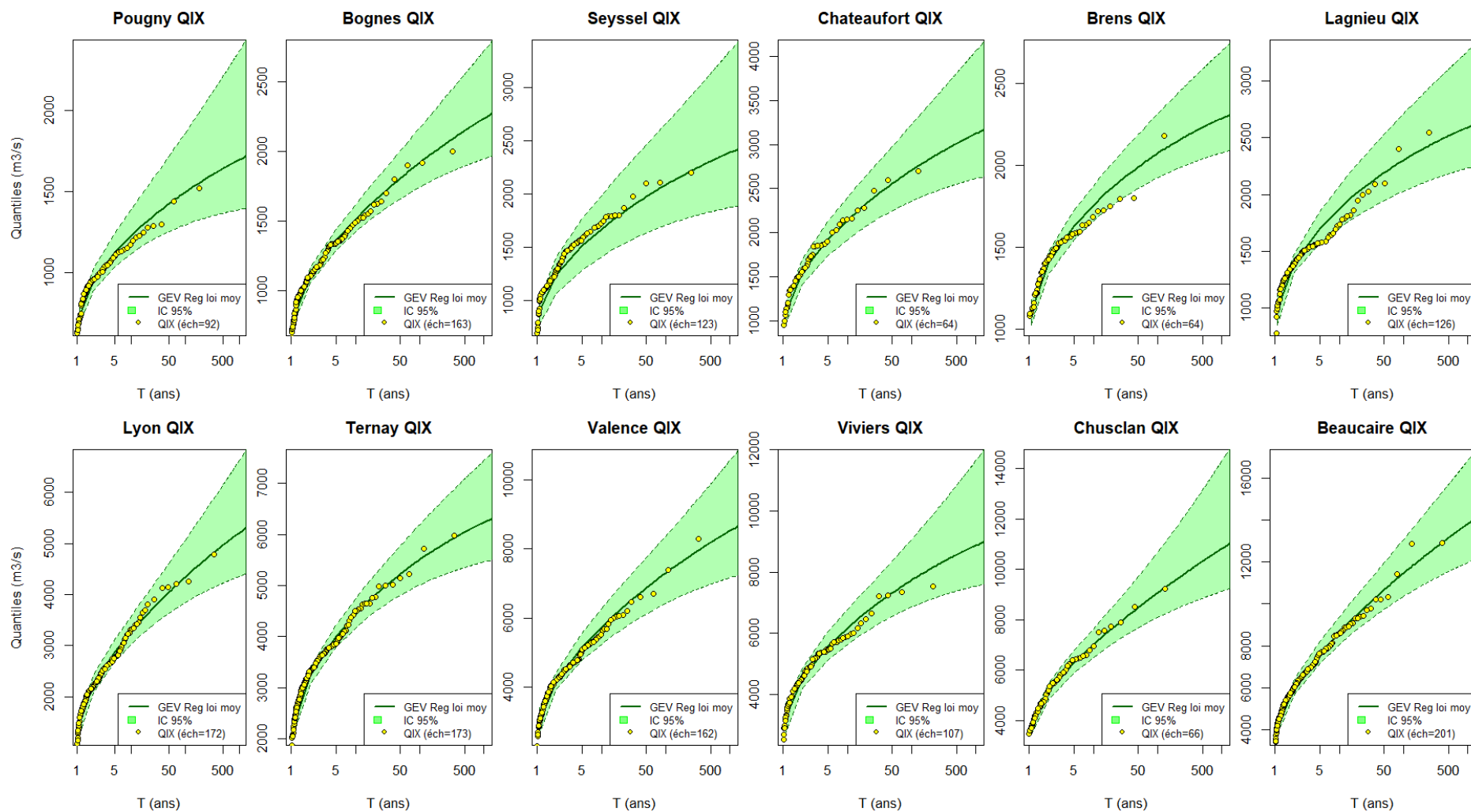


Figure 2-14 : Ajustements GEV Régional pour les QIX sur l'ensemble des stations du Rhône

## 2.5 Distribution des débits moyens sur $N$ jour (QJX - VCXN) loi GEV supervisée régionalement

En complément de la variable hydrologique du débit maximum ou débit de pointe (QIX), les caractéristiques de crues suivantes sont également définies :

- Le débit maximal moyen journalier QJX : moyenne par jour calendaire à partir des débits horaires ou de trois cotes jour (voir ci-dessous) ;
- Les débits maximaux sur  $N$  jours VCXN : moyenne glissante sur les débits moyens journaliers pour différentes durées : 2, 5, 7, 10, 15, 30, 60 pour les stations du Haut-Rhône jusqu'à Lyon, puis la durée de 120 jours est ajoutée pour les stations en aval de Lyon.

Le calcul de ces variables se base obligatoirement sur des séries continues. Le Tableau 2 -9 résume les périodes disponibles pour les données journalières. Les variables dérivées par moyennes mobiles ont souvent des échantillons un peu plus courts, avec plus de valeurs manquantes (cf. Valeurs centrales des échantillons indiqués en Annexe B IV). Pour ces variables, nous utilisons un échantillonnage par année hydrologique (cf. Tableau 1 -2).

Station	Période couverte (QJX)
<b>Pougny</b>	1925-2016
<b>Bognes</b>	1920-2015
<b>Seyssel</b>	1959-2016
<b>Châteaufort</b>	1995-2016
<b>Brens</b>	1957-2016
<b>Lagnieu</b>	1920-2016
<b>Lyon</b>	1920-2015
<b>Ternay</b>	1920-2016
<b>Valence</b>	1920-2015
<b>Viviers</b>	1920-2016
<b>Chusclan</b>	1996-2016
<b>Beaucaire</b>	1888-2016

Tableau 2-9 : Disponibilité des séries continues au pas de temps journalier

### 2.5.1 Analyse régionale du paramètre de forme de la loi GEV - QJX - VCXn

En accord avec les tests réalisés sur les QIX, nous retenons l'ajustement d'une loi GEV régionale. Chaque a priori pour le paramètre de forme étant estimé pour chacune des variables, la distribution empirique de chaque paramètre de forme est calculée sur l'ensemble des stations à l'exception de Châteaufort et Chusclan pour lesquelles les longueurs de chroniques sont trop courtes pour être représentatives. Les distributions sont approchées par des lois normales, les moyennes et écart-type sont déduits de l'ensemble des valeurs des paramètres de forme (500 échantillons x 500 ajustements x 10 stations), en utilisant les mêmes descripteurs. La Figure 2 -15 présente les distributions empiriques et théoriques utilisées en tant qu'a priori. L'utilisation de la loi normale est assez correcte, quoique perfectible.

La Figure 2 -16 présente l'évolution des moyennes et écart-type des lois normales utilisées. On constate que les a priori retenus pour les paramètres de forme sont en moyenne de plus en plus élevés, ce qui conduit à un ajustement GEV qui plafonne de plus en plus. En contrepartie l'écart-type augmente, ce qui pourrait traduire des influences plus diverses pour les débits moyens au-delà de la quinzaine de jours.



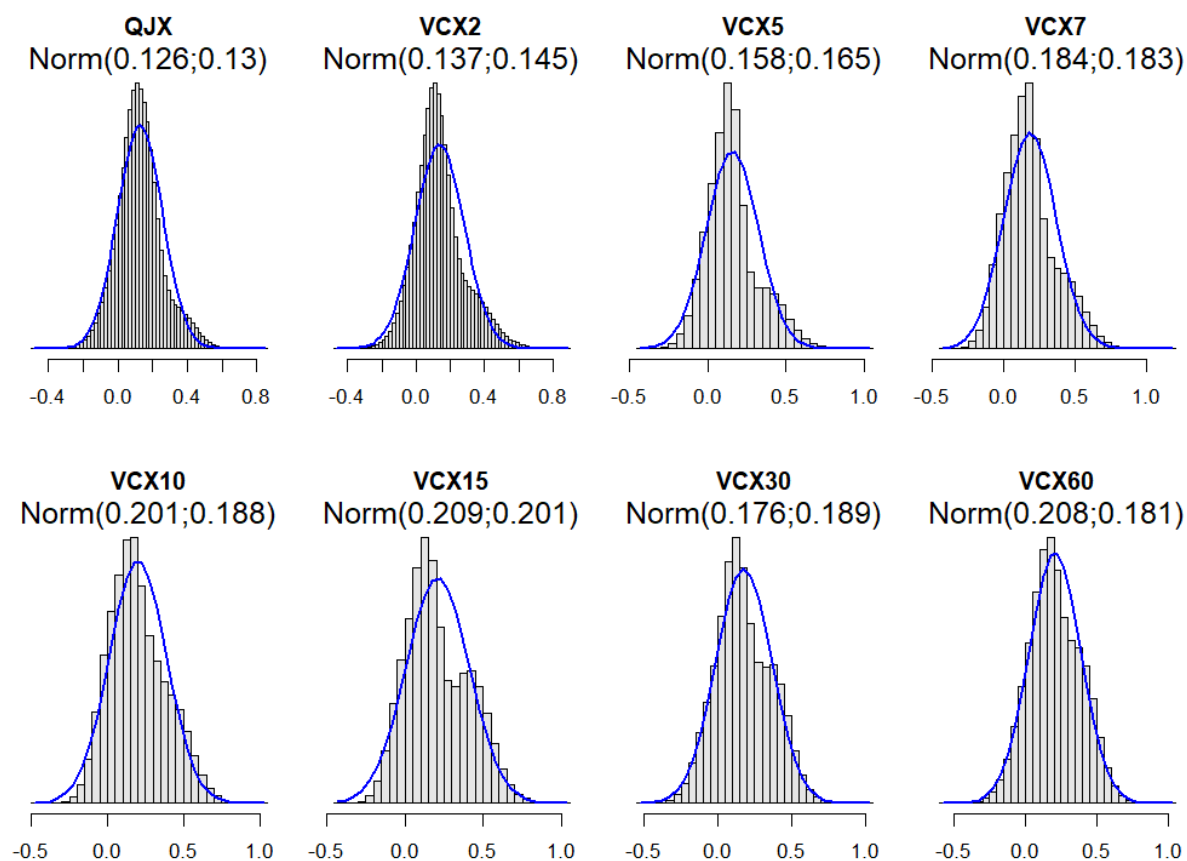


Figure 2-15 : Distribution des paramètres de forme régionaux - QJX - VCXn

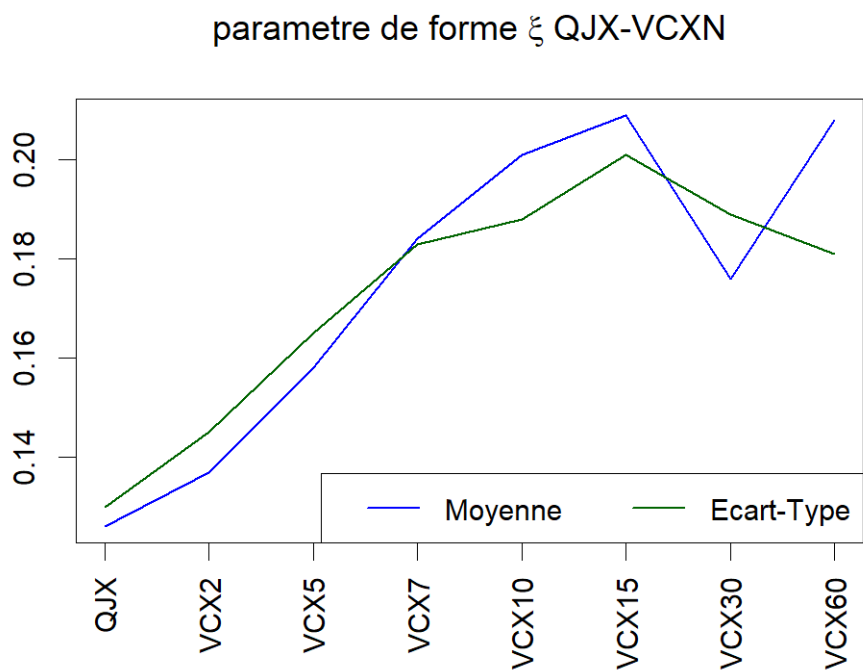


Figure 2-16 : Evolution des distributions approchées pour les paramètres de forme régionaux - QJX - VCXn

## 2.5.2 Résultats obtenus avec la loi GEV Régionale - QJX - VCXn

Les ajustements GEV régionaux obtenus pour les variables moyennes sont présentés à la . Pour chaque station, les ajustements sont cohérents, sauf pour la station de Chusclan où il y a un croisement entre les ajustements entre les VCX10 et VCX15 pour les périodes de retour supérieures à 500 ans. Pour des raisons de cohérence nous écartons l'ajustement VCX15.

Le Tableau 2 -11 présente la synthèse des quantiles obtenus selon la loi de paramètres moyens pour les débits moyens journaliers et les débits moyens consécutif sur  $N$  jours. Les intervalles de confiance sont reportés à l'annexe B IV. On notera l'incertitude relativement importante pour les stations de Châteaufort et Lagnieu sur le Haut-Rhône, et de Valence, Viviers, Chusclan et Beaucaire sur le Bas-Rhône.

Pour les stations de Lagnieu, Viviers et Chusclan, les quantiles estimés pour les débits moyens journaliers étant supérieurs aux valeurs des débits de pointe, nous considérons les deux résultats égaux et nous retenons la valeur associée au débit de pointe, ce qui correspond à coefficient de pointe de 1.

Station	QJX			VCX2			VCX5			VCX7		
	$\mu$	$\lambda$	$\xi$	$\mu$	$\lambda$	$\xi$	$\mu$	$\lambda$	$\xi$	$\mu$	$\lambda$	$\xi$
Pougny	752	136	0.111	722	124	0.123	671	111	0.171	650	113	0.23
Bognes	871	185	0.095	832	157	0.096	758	125	0.133	728	123	0.23
Seyssel	834	155	0.142	795	135	0.211	722	116	0.294	691	119	0.331
Châteaufort	1015	265	0.167	945	227	0.171	831	197	0.201	790	193	0.237
Brens	1139	215	0.268	1066	204	0.239	919	174	0.275	874	170	0.322
Lagnieu	1216	305	0.134	1149	301	0.12	1005	260	0.098	942	236	0.096
Lyon	1848	502	0.123	1740	485	0.118	1492	431	0.139	1387	389	0.138
Ternay	2893	708	0.169	2817	697	0.158	2631	636	0.164	2549	608	0.161
Valence	3568	891	0.118	3497	882	0.122	3271	824	0.131	3172	794	0.148
Viviers	3709	872	0.043	3618	841	0.054	3360	755	0.06	3243	715	0.065
Chusclan	4200	1142	0.024	4054	1011	0.049	3674	726	0.051	3501	624	0.028
Beaucaire	5225	1440	0.057	4935	1378	0.055	4315	1147	0.023	4057	1054	0.007
Station	VCX10			VCX15			VCX30			VCX60		
	$\mu$	$\lambda$	$\xi$	$\mu$	$\lambda$	$\xi$	$\mu$	$\lambda$	$\xi$	$\mu$	$\lambda$	$\xi$
Pougny	628	111	0.298	598	114	0.366	547	118	0.34	502	112	0.326
Bognes	697	122	0.274	660	123	0.292	595	123	0.299	560	121	0.278
Seyssel	653	122	0.364	624	122	0.364	558	116	0.339	513	112	0.334
Châteaufort	727	180	0.235	654	167	0.189	578	163	0.178	518	156	0.227
Brens	820	155	0.345	767	151	0.397	665	132	0.294	589	129	0.335
Lagnieu	881	214	0.118	812	190	0.129	703	158	0.101	622	142	0.201
Lyon	1280	354	0.151	1155	314	0.139	958	254	0.085	819	202	0.11
Ternay	2448	598	0.167	2280	593	0.169	1930	549	0.17	1568	470	0.181
Valence	3039	785	0.153	2851	768	0.156	2438	711	0.154	2034	605	0.144
Viviers	3106	696	0.069	2924	691	0.083	2549	649	0.131	2159	568	0.132
Chusclan	3312	561	-0.013	3095	544	-0.051	2615	535	-0.006	2183	419	0.058
Beaucaire	3828	960	0.003	3519	873	-0.021	3002	723	-0.034	2552	625	0.009

Tableau 2-10 : Paramètres moyen des loi GEV Régionale - QJX - VCXN

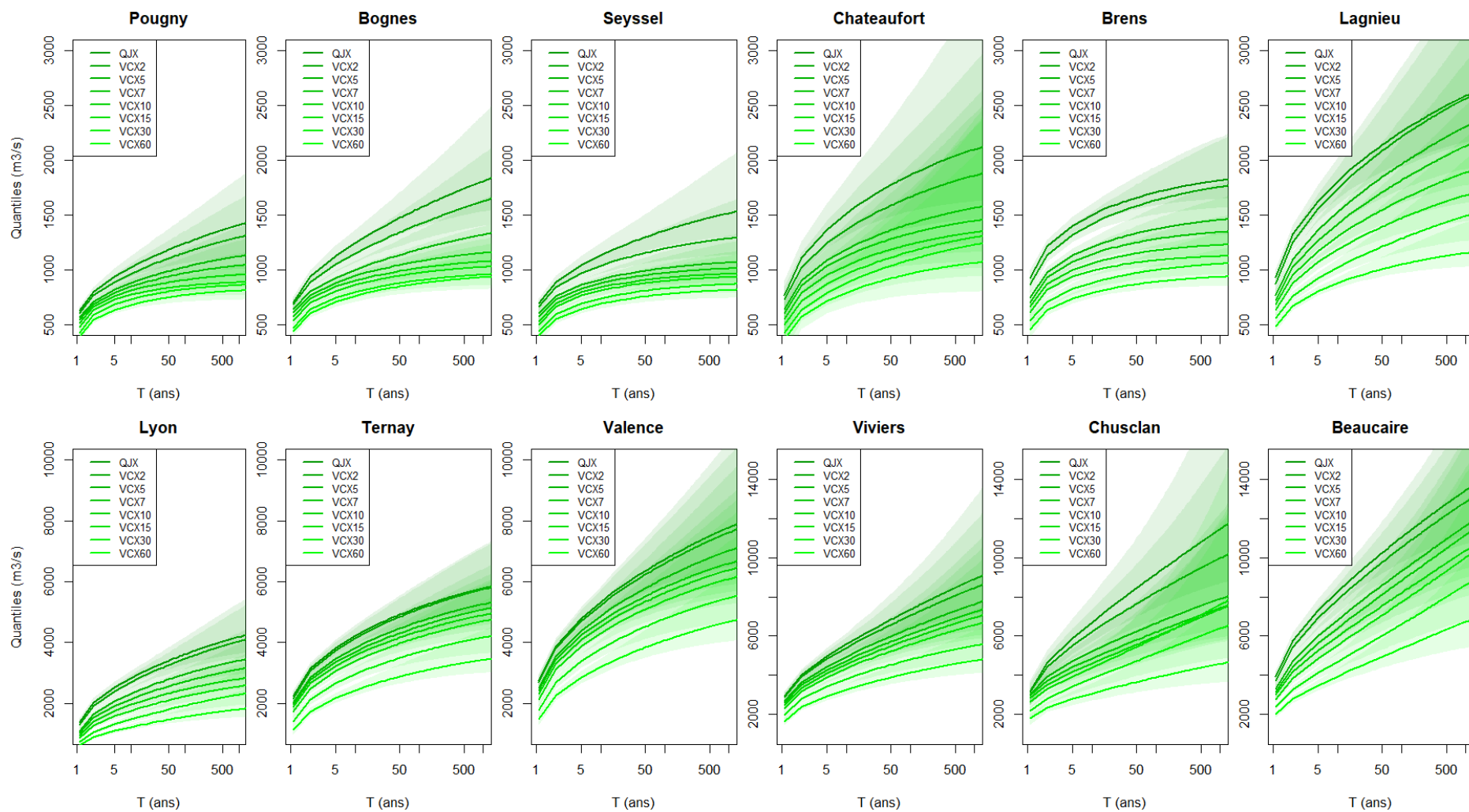


Figure 2-17 : Ajustements GEV Régional pour les QJX et VCN sur l'ensemble des stations du Rhône

QJX - VCXn - GEV Régional - Qtls loi moyenne										
Station	T(ans)	QJX	VCX2	VCX5	VCX7	VCX10	VCX15	VCX30	VCX60	VCX120
Pougny	10	1020	970	880	850	810	770	730	680	
	100	1240	1160	1030	970	910	850	820	770	
	1000	1410	1300	1120	1040	950	890	860	810	
Bognes	10	1250	1150	1000	940	900	860	800	760	
	100	1560	1420	1190	1080	1020	970	900	870	
	1000	1810	1630	1320	1150	1080	1030	960	930	
Seyssel	10	1130	1040	910	880	840	810	740	690	
	100	1360	1190	1020	970	930	900	830	780	
	1000	1520	1290	1070	1010	960	930	870	810	
Châteaufort	10	1510	1370	1190	1130	1040	960	880	790	
	100	1870	1670	1420	1330	1230	1170	1090	960	
	1000	2100	1860	1570	1450	1340	1300	1230	1060	
Brens	10	1500	1420	1210	1150	1060	990	880	790	
	100	1710	1640	1370	1280	1180	1090	1000	890	
	1000	1820	1760	1460	1340	1230	1120	1060	930	
Lagnieu	10	1810	1740	1530	1420	1300	1180	1020	880	
	100	2260	2220	1970	1820	1640	1470	1290	1050	
	1000	2580 (*)	2570	2310	2130	1890	1680	1490	1150	
Lyon	10	2840	2700	2320	2140	1960	1760	1480	1220	1150
	100	3610	3460	2950	2710	2450	2220	1930	1550	1300
	1000	4180	4030	3400	3120	2800	2550	2290	1800	1080
Ternay	10	4220	4140	3830	3700	3570	3390	2960	2440	2010
	100	5160	5100	4690	4520	4370	4180	3680	3040	2440
	1000	5780	5750	5260	5080	4900	4700	4160	3420	2710
Valence	10	5330	5230	4880	4690	4530	4310	3790	3200	2610
	100	6740	6600	6120	5820	5630	5370	4780	4070	3270
	1000	7780	7620	7020	6600	6380	6090	5460	4680	3730
Viviers	10	5580	5400	4950	4740	4560	4340	3810	3270	2760
	100	7350	7040	6390	6080	5850	5570	4790	4120	3400
	1000	8840 (*)	8460	7630	7220	6940	6560	5500	4730	3850
Chusclan	10	7010	6210	5220	4860	4590	4390	3830	3070	2620
	100	9060 (*)	8220	6650	6190	5970	5920	5110	3880	3180
	1000	10830 (*)	9980	7900	7420	7370	NA (**)	6390	4570	3570
Beaucaire	10	8270	7850	6830	6410	5980	5530	4690	3940	3290
	100	11050	10540	9320	8830	8210	7740	6600	5370	4260
	1000	13450	12860	11640	11170	10380	10010	8620	6730	5100

Tableau 2- 11 : Synthèse des résultats pour les ajustements GEV régional - QJX – VCXn

(\*) valeur du quantile QJX

(\*\*) croisement quantiles VCX15 et VCX10

## 2.6 Cohérence amont aval sur les quantiles de débit de pointe QIX(T)

La Figure 2-18 présente l'évolution des quantiles moyens d'amont en aval par surface de bassin versant drainée (cf. Tableau 0-1). Sur le Haut-Rhône, l'augmentation de l'intensité des quantiles de crue est assez forte jusqu'à la station de Châteaufort à la confluence avec l'Arve. On observe ensuite une importante diminution au niveau de Brens. La progression des crues reprend ensuite à partir de Brens de façon continue jusqu'à Beaucaire.

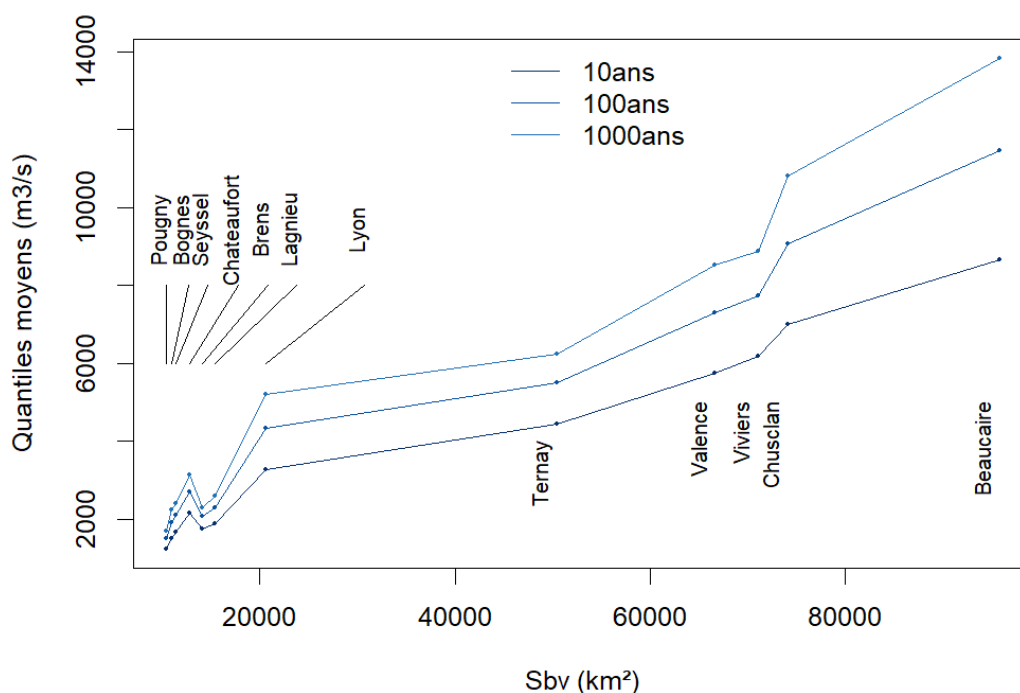


Figure 2-18 : Propagation des quantiles moyens pour les débits de pointe

La réduction des quantiles de crue entre Châteaufort et Brens s'explique par la présence de deux zones d'expansion des crues relativement importantes qui sont la Plaine de Chautagne - Lac du Bourget et la zone des Marais de Lavours. Ces deux zones ont été étudiées notamment dans le volet 3 de l'EGR : les capacités d'écroulement des crues sont détaillées au Tableau 2-12, ces deux zones font parties des plus efficaces sur le Haut-Rhône.

Zone d'expansion des crues	Capacité de stockage (Mm3)	Ecrêtement net (m³/s)
<b>Chautagne - Lac du Bourget</b>	74.4	570
<b>Lavours, plaine de Yenne</b>	13.3	150

Tableau 2-12 : Capacité d'écroulement des zones d'expansion des crues entre les stations de Châteaufort et Brens

Du point de vue des quantiles moyens la réduction des débits varie de 300 à 800 m³/s sur les débits de pointe et de 0 à 200 m³/s sur les débits moyens journaliers pour les périodes de retour 10 à 1000 ans. Ces valeurs sont tout à fait compatibles avec les capacités données pour ces deux zones. La plus forte crue observée pour ces deux stations est la crue de Février 1990, dont le débit de pointe est estimé à respectivement 2700 m³/s à Châteaufort et 2180 m³/s à Brens. Soit un écrêtement d'un peu plus de 600 m³/s pour cette crue d'ordre centennal.

Les ajustements statistiques sont construits sur deux échantillons dont la plus forte valeur observée est la crue centennale. L'écroulement est donc bien pris en compte dans l'extrapolation des quantiles de crues par l'analyse fréquentielle. Ceci étant, il n'est pas prouvé que l'écroulement des crues entre

les deux stations n'atteindra pas un palier pour des occurrences de crue plus importantes. Il existe donc ici un risque que les quantiles de crues soit sous-estimés à Brens et en aval du fait de la non prise en compte du plafonnement potentiel des zones d'expansion des crues.

## 2.7 Cohérence entre variables QIX - QJX, analyse des coefficients de pointe

Le calcul du coefficient de pointe, rapport entre le débit maximum instantané et le débit moyen journalier, peut être abordé de trois façons :

- ratio des valeurs classées de même rang des échantillons des variables QIX et QJX ;
- ratio des quantiles QIX(T) et QJX(T) pour différentes périodes de retour T ;
- ratio événementiel du débit de pointe QIX et du débit moyen QJX pour une collection d'hydrogrammes à pas de temps fin (horaire).

Les deux premiers modes de calcul sont sensibles au fait que les périodes temporelles des deux variables ne sont pas forcément les mêmes. (cf. Tableau 1 -3 et Tableau 2 -9). Le troisième mode de calcul porte sur une période plus courte, liée à la disponibilité des hydrogrammes à pas de temps fin. Les résultats sont présentés à la Figure 2 -19 en fonction des débits maximums associés.

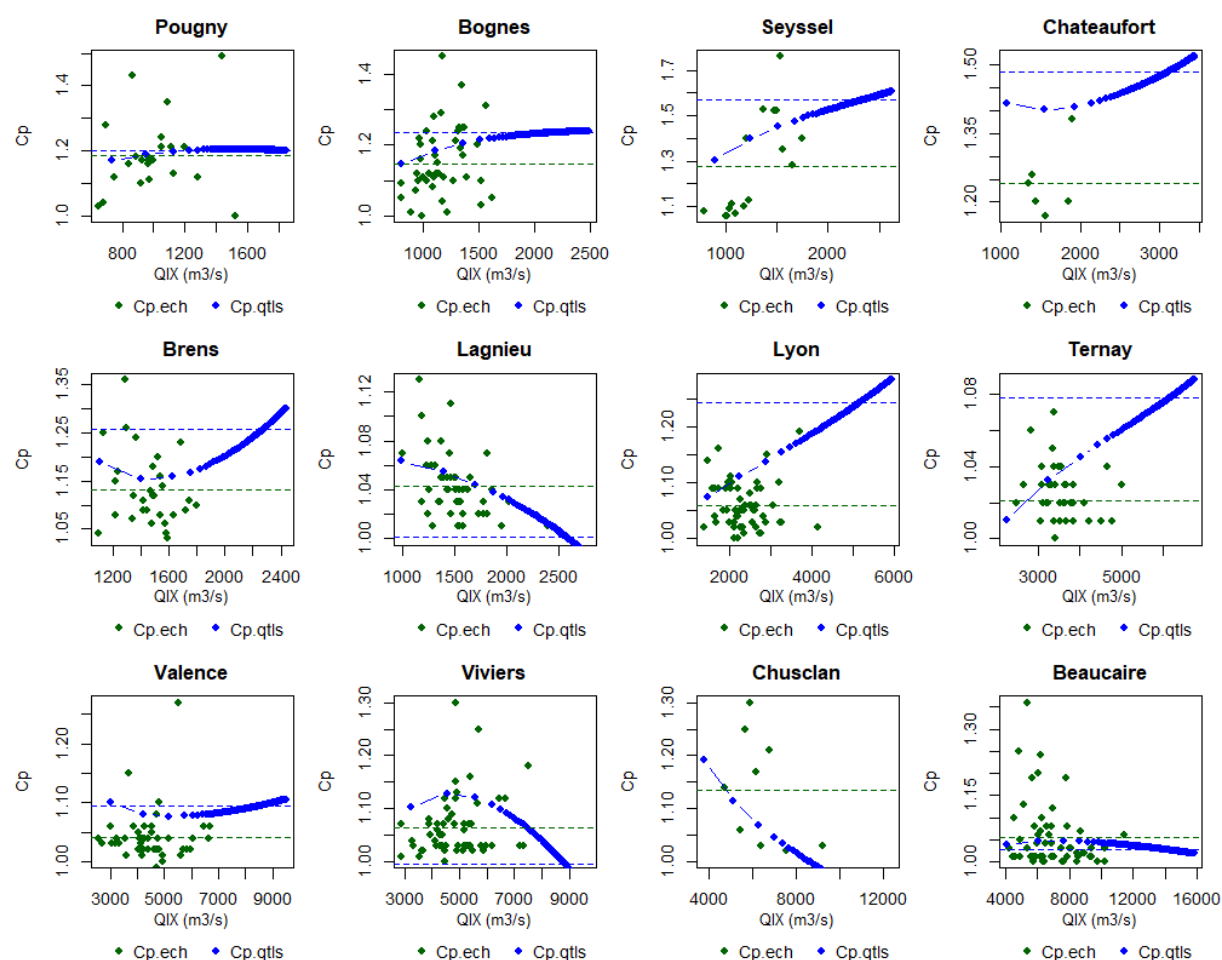


Figure 2-19 : Coefficients de pointe calculés sur les échantillons de crue QIX et QJX (vert) et issus des ajustements statistiques (bleu), les traits pointillés indiquent les moyennes de chaque méthode

Pour les stations de Pougny, Bognes, Seyssel et Brens, les coefficients observés sont particulièrement importants et le coefficient moyen compris entre 1.13 et 1.28. A partir de Lagnieu et jusque Beaucaire les coefficients de pointe sont beaucoup plus faibles, proches de l'unité, avec des moyennes s'établissant entre 1.02 et 1.06. Pour les stations de Chateaufort et Chusclan le faible

nombre d'observations à ces deux stations donne peu de résultats mais ils restent en cohérence avec leurs stations voisines respectives.

Nous comparons aux coefficients de pointe observés ceux issus des quantiles de loi moyenne. Pour le Haut-Rhône, pour les stations de Pougny, Bognes, Seyssel et Brens, ils respectent bien les observations. Pour Châteaufort, ils sont relativement élevés mais restent du bon ordre de grandeur. A Lagnieu ils tendent vers l'unité ce qui est partiellement confirmé par les valeurs observées très proches de 1. Par contre à Lyon, ils sont relativement élevés par rapport aux observations.

Sur le Bas-Rhône, à Ternay l'augmentation avec les forts débits est très marquée mais les coefficients issus des quantiles de loi moyenne restent du bon ordre de grandeur par rapport aux observations. Pour Valence et Beaucaire les résultats respectent bien les observations. Enfin à Viviers et Chusclan ils tendent vers l'unité. Dans le premier cas cela correspond partiellement aux observations qui donnent un  $C_p$  moyen relativement faible à 1.06. Pour Chusclan le manque de données pénalise à la fois l'approche basée sur les observations et également les ajustements statistiques.

## 2.8 Synthèse des quantiles de crues pour les stations du Rhône

Nous retenons la loi GEV régionale qui par rapport à un ajustement de Gumbel permet d'être plus juste vis-à-vis des échantillons constitués dans cette étude. Le conditionnement régional permet de plus d'assurer une relative cohérence des résultats entre les 12 stations étudiées. La prise en compte de cette information supplémentaire dans l'ajustement des lois statistiques permet de réduire l'incertitude globale obtenue sur les quantiles de crue, mais également de rendre les ajustements plus robustes vis-à-vis des variations sur les échantillons.

En comparaison des résultats obtenus dans l'EGR de 2000, l'utilisation de la GEV conditionnée régionalement et l'actualisation des échantillons de crues conduit à un certain nombre de révisions vis-à-vis des quantiles de crue estimés. Toutefois l'augmentation importante de la population des échantillons, par l'ajout de données anciennes et données récentes, ne conduit pas à des modifications drastiques des quantiles de crue. Rappelons que l'utilisation de la loi de Gumbel aurait conduit à une augmentation de l'ordre de 10% sur les quantiles de crue. Avec l'utilisation de la loi GEV Régionale l'évolution des quantiles par rapport à ceux de l'EGR est plus contrastée ; les quantiles pour la crue décennale augmentent de 4% en moyenne, alors que ceux pour la centennale restent très similaires avec une diminution de 1% en moyenne. Cette diminution est encore plus accentuée pour la crue millénaire avec -8% en moyenne. Pour cette période de retour les diminutions les plus importantes, sont de -12 à -16% pour les stations de Brens, Lagnieu, Ternay et Viviers.



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)
<b>Pougny</b>	1925-1998	1180	1470	1800	1925-2016	1230	1500	1700
<b>Bognes</b>	1904-1998	1450	1920	2375	1853-2015	1510	1920	2230
<b>Seyssel</b>	1958-1993	1430	1940	2450	1841-2016	1670	2090	2390
<b>Châteaufort</b>					1953-2016	2140	2710	3120
<b>Brens</b>	1953-1998	1720	2150	2570	1953-2016	1760	2070	2280
<b>Lagnieu</b>	1891-1998	1810	2400	2970	1891-2016	1880	2300	2590
<b>Lyon</b>	1900-1998	3120	4230	5310	1840-2015	3270	4340	5210
<b>Ternay</b>	1895-1998	4445	5890	7310	1840-2016	4440	5510	6240
<b>Valence</b>	1855-1998	5620	7510	9370	1855-2016	5740	7300	8520
<b>Viviers</b>	1910-1998	6100	8120	10100	1910-2016	6180	7730	8840
<b>Chusclan</b>					1950-2015	7010	9060	10830
<b>Beaucaire</b>	1840-1998	8400	11300	14160	1816-2016	8650	11470	13830

*Tableau 2-13 : Comparaison des quantiles de débit de pointe : étude EGR (2000) – loi Gumbel et présente étude (2018) – loi GEV régionale*

### 3 RÉANALYSE DES CRUES HISTORIQUES

Le type de loi statistique qui est retenu pour l'analyse fréquentielle des crues a un impact sur l'estimation des périodes de retour qui y sont associées. Ainsi, le choix de retenir dans cette étude une loi statistique de type GEV entraîne donc nécessairement une révision de la classe d'aléa des événements de crue historique, en complément de l'actualisation des échantillons de crue utilisés.

Nous présentons ici les éléments de cette révision en prenant en compte la fourchette d'incertitude encadrant les débits de pointe sur les échantillons de crue mais également l'incertitude associée aux lois statistiques ajustées.

Deux critères d'analyse sont retenus :

- Distribution des débits de pointe selon les spaghetti totaux estimés par BaRatin (ensemble des valeurs possibles du débit de pointe) ;
- Pour une crue historique de référence, la distribution de la période de retour ou probabilité de non dépassement, selon l'ensemble des lois statistiques GEV régionale ajustées par JBay.

Dans ce deuxième cas, l'ensemble des possibilités est calculé comme l'ensemble des probabilités de non dépassement d'un spaghetti via les 500 ajustements statistiques issus de l'échantillon dont le spaghetti est issu. Pour une crue en particulier, cette opération est répétée pour les 500 spaghetti issus de BaRatin et traduisant l'incertitude sur le débit.

La probabilité de non dépassement est calculée suivant la formulation classique de la loi GEV, avec les ajustements retenus via le conditionnement régional :

$$F(y) = \exp \left( - \left( 1 - \frac{\xi(y - \mu)}{\lambda} \right)^{\frac{1}{\xi}} \right)$$

Nous dénombrons ensuite les fréquences de non dépassement sur les seuils des classes d'aléa suivantes :

Ordre de grandeur	Classes de période de retour (ans)	Classe de fréquence
Décennale	[3 ; 30]	[0.667;0.967]
Centennale	[30 ; 300]	[0.967;0.997]
Millénale	[300 ; 3000]	[0.997;0.9997]

Tableau 3-14 : Classes d'aléa pour la classification des crues historiques

Six crues historiques de référence sont ici passées en revue :

- Mai 1856 ;
- Janvier 1910 ;
- Février 1928 ;
- Novembre 1944 ;
- Février 1990 ;
- Décembre 2003.

### 3.1 Crue généralisée du Rhône de mai-juin 1856

C'est une des crues les plus importantes du XIX<sup>ème</sup> siècle, qui touche à la fois le bassin du Rhône, de la Garonne, de la Loire et de la Seine. D'après Pardé, c'est la plus simple et la plus brutale des crues générales sur le Rhône. A Beaucaire c'est la plus forte crue enregistrée (d'après la reconstitution du débit de pointe).

Génèse hydro-climatique (Lang et Cœur, 2014) : « *après un mois d'avril 1856 où les cumuls pluviométriques ont été largement supérieurs à la moyenne, le mois de mai est particulièrement pluvieux avec un cumul de 150 mm sur l'ensemble du bassin, et de plus de 250 mm sur le Haut Rhône, l'Ain et l'Isère.* »

Les hauteurs maximales collectées en archives et les estimations des débits de pointe par la méthode BaRatin sont reportées au tableau suivant, ainsi que l'ordre de grandeur attribué à la crue en tenant compte de l'ensemble des incertitudes associés à la réestimation du débit.

Station	Hauteur à l'échelle (m)	Débit Central (m <sup>3</sup> /s)	IC95%	Classe d'aléa
<b>Bognes</b>	Inconnue	1800	[1550 ; 2060]	Centennale
<b>Seyssel</b>	Inconnue	1980	[1310 ; 2420]	Supérieur à la décennale
<b>Lyon Pont Morand</b>	6.25	4790	[3530 ; 5980]	Supérieur à la centennale
<b>Ternay écluse de la Mulatière</b>	10.2	5980	[4200 ; 7750]	Centennale
<b>Valence</b>	Inconnue	8300	[6840 ; 9940]	Millénale
<b>Beaucaire</b>	8.77	12930	[10560 ; 15880]	Inférieur à la Millénale

Tableau 3-15 : Ordre de grandeur de la crue de mai 1856

L'ensemble des réestimations effectuées permettent d'actualiser les classes d'aléas pour la crue de mai 1856. Celle-ci serait de l'ordre centennale sur le Haut-Rhône jusqu'à la confluence avec la Saône. Puis gagnerait en intensité sur le bas Rhône pour être de l'ordre de la millénale à Valence et entre la centennale et la millénale à Beaucaire.

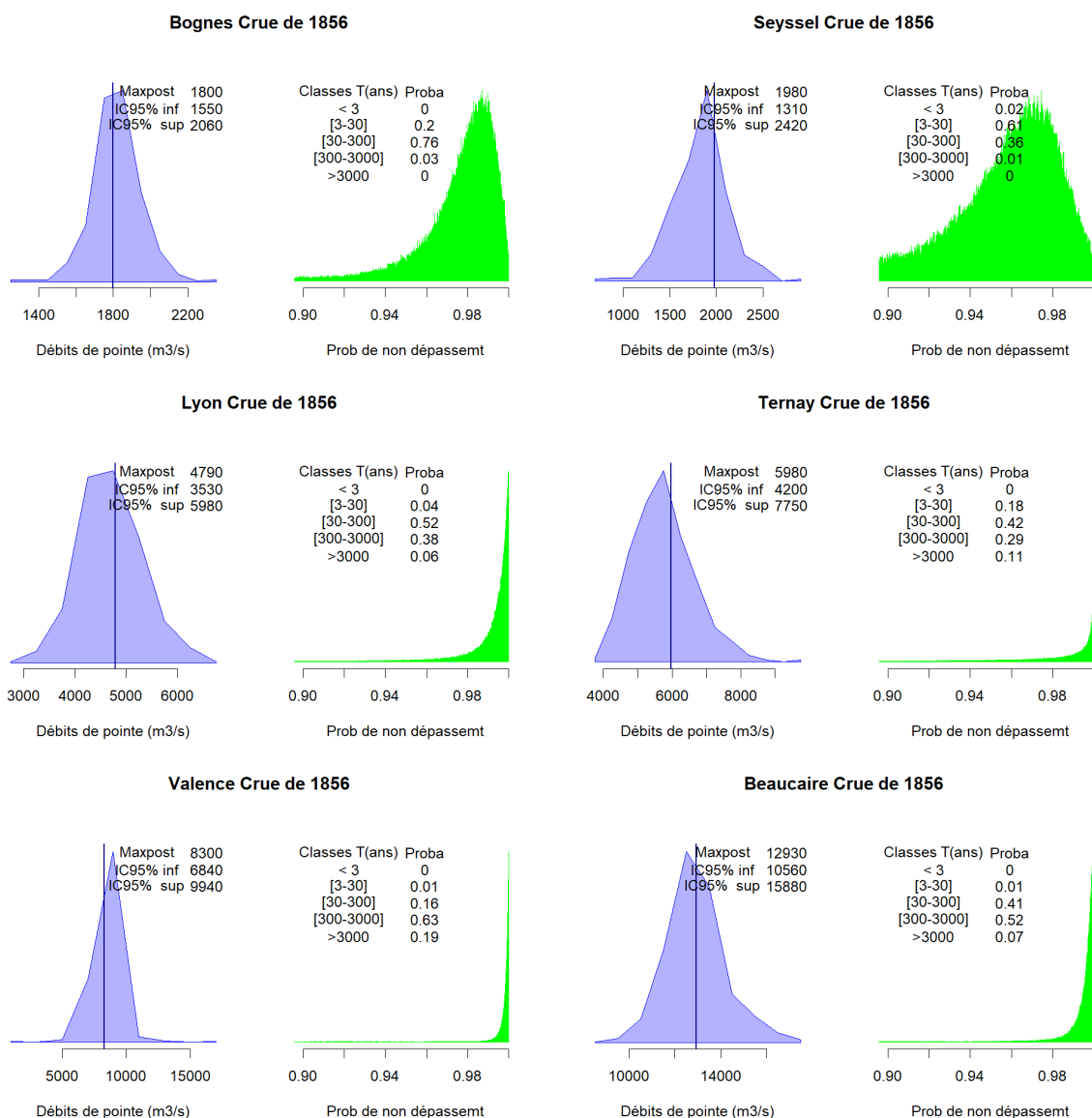


Figure 3- 20 : Distribution us débit de pointe et de la probabilité de non dépassement pour la crue de mai 1856

### 3.2 Crue du 17 au 21 janvier 1910 sur les Préalpes et les Alpes du Nord

D'après Lang et Cœur (2014) et l'EGR (Rigaudière *et al.*, 2000), c'est une crue pluvio-nivale d'origine océanique qui a principalement touché les reliefs des Alpes et des Préalpes où se sont combinés fortes précipitation et fonte du manteau neigeux.

Les pluies dans un flux d'ouest sont intenses à partir du 16 janvier, elles s'accompagnent d'un vent très chaud du sud-ouest qui entraîne une brusque remontée des températures. La zone la plus touchée s'étend du Jura aux Préalpes du sud Dauphiné, en passant par l'Ain et les Alpes. Le bassin du Doubs reçoit entre 150 et 200 mm en quatre jours.

Au niveau des affluents le Doubs, la Saône, l'Ain et l'Isère réagissent fortement. Sur le Rhône l'évènement concerne le haut et moyen Rhône. En aval de la confluence avec la Saône l'évènement est inférieur au maximum annuel.

Station	Hauteur à l'échelle (m)	Débit Central (m³/s)	IC95%	Classe d'aléa
Bognes	Inconnue	2000	[1710 ; 2280]	Centennale
Seyssel	Inconnue	2200	[1440 ; 2690]	Centennale
Lagnieu	Inconnue	2090	[1730 ; 2530]	Inférieur à la Centennale
Lyon Pont-Morand	5.58	3550	[3090 ; 3950]	Décennale
Ternay	9.22	4550	[3790 ; 4950]	Décennale

Tableau 3-16 : Ordre de grandeur de la crue de janvier 1910

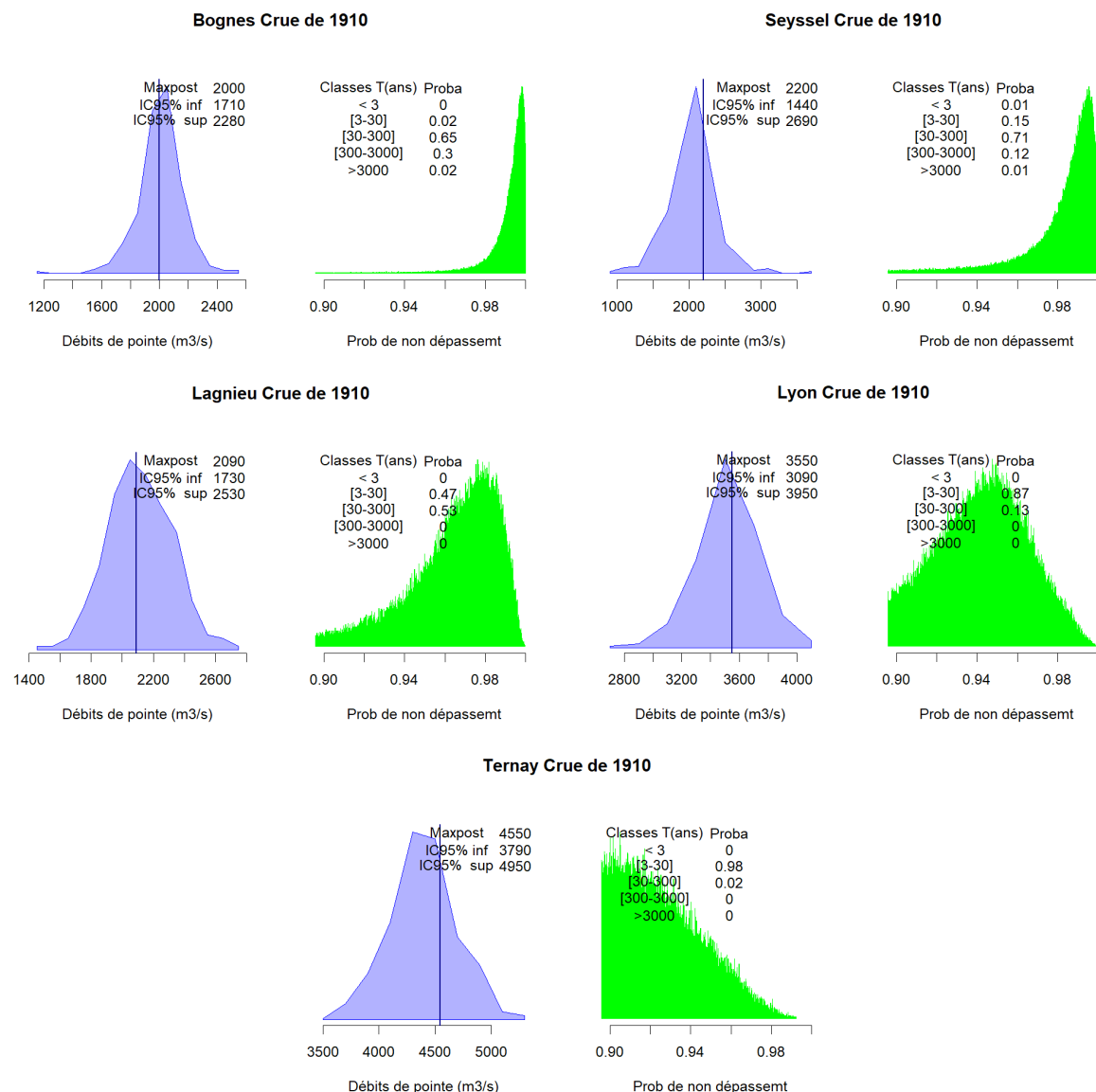


Figure 3-21 : Distribution du débit de pointe et de la probabilité de non dépassement pour la crue de janvier 1910

### 3.3 Février 1928

Crue d'origine océanique, marquée sur le Rhône à partir de la confluence avec l'Ain dont la crue est remarquable, également soutenue par des crues moyennes de la Saône et de l'Isère (Rigaudière *et al.*, 2000).

Génèse hydroclimatique (d'après Pardé, 1928) : « *épisode perturbé de flux d'ouest à partir du 11 février. Les pluies sont soutenues du 13 au 15 février avec deux épisodes plus intenses. Les cumuls sur 3 jours sont entre 150 et 220 mm sur le bassin de l'Ain, entre 130 et 215 mm sur le Guiers, entre 40 et 100 sur la Bourbre et le Lyonnais, et de 100 à 180 mm sur le Graisivaudan et le Vercors* ».

En amont de Lagnieu la crue est très faible, largement inférieure à la décennale, de l'ordre décennale à Lagnieu, elle gagne en intensité sur Lyon et Ternay où elle est de l'ordre centennale, puis perd en intensité à Valence et Viviers où elle reste décennale.

Station	Hauteur à l'échelle (m)	Débit Central (m <sup>3</sup> /s)	IC95%	Classe d'aléa
<b>Bognes</b>	Inconnue	1220	[1120 ; 1330]	Annuelle
<b>Seyssel</b>	Inconnue	1260	[860 ; 1460]	Annuelle
<b>Lagnieu</b>	Inconnue	2020	[1680 ; 2490]	Décennale
<b>Lyon Pont-Morand</b>	6.1	4150	[3680 ; 4500]	Centennale
<b>Ternay</b>	9.74	5010	[4650 ; 5520]	Centennale
<b>Valence</b>	Inconnue	6480	[5570 ; 7620]	Inférieure à la Centennale
<b>Viviers</b>	Inconnue	5980	[4980 ; 7260]	Décennale

Tableau 3-17 : Ordre de grandeur de la crue de février 1928

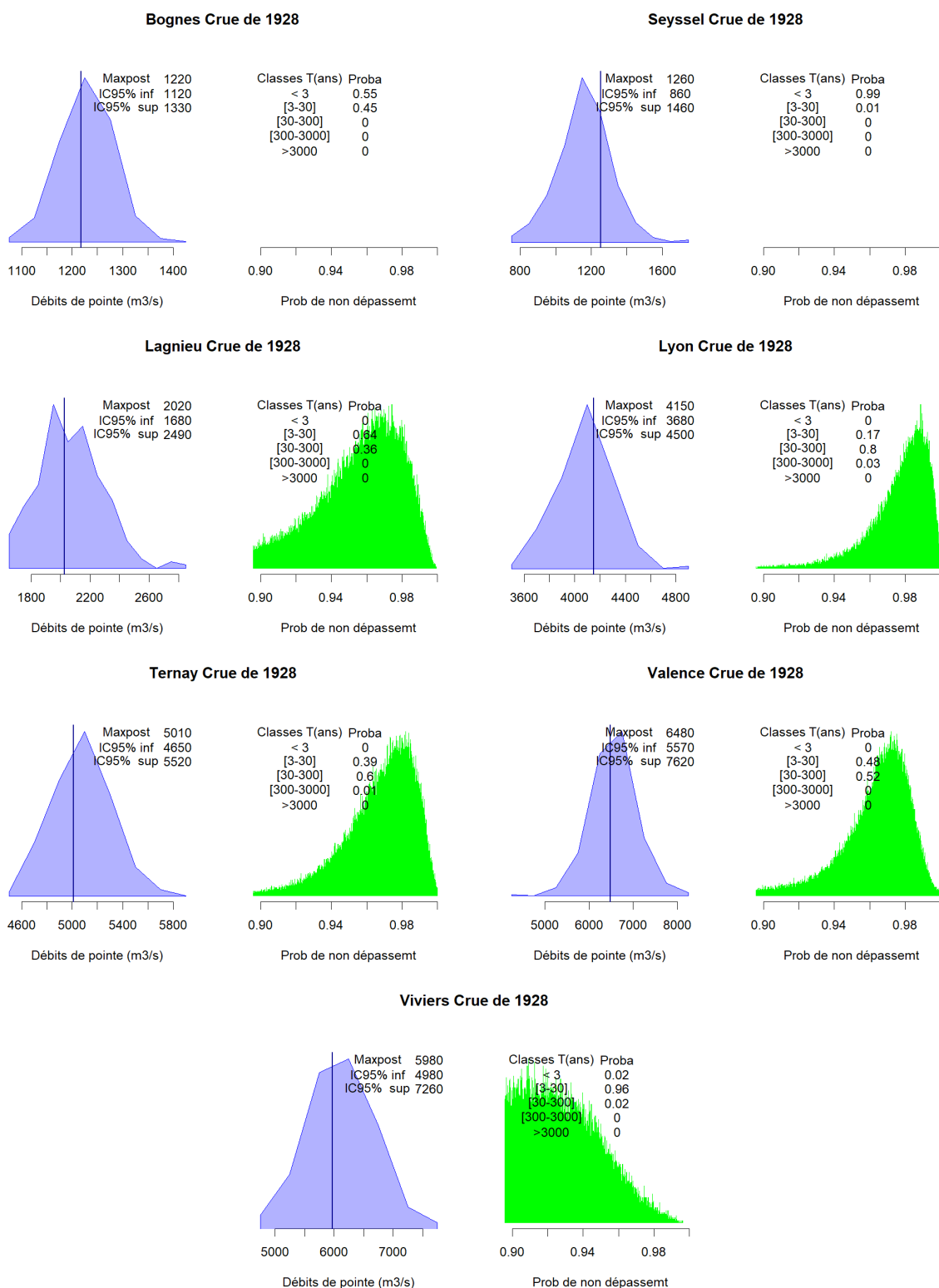


Figure 3-22 : Distribution du débit de pointe et de la probabilité de non dépassement pour la crue de février 1928



### 3.4 Novembre 1944

Crue d'origine océanique, anomalie notable dans la période de sécheresse de 1941-1946. L'automne est très pluvieux et les sols sont saturés par plusieurs épisodes successifs, dont le dernier s'additionne à la fonte nivale sur les reliefs. Le Rhône Suisse est également concerné

Génèse hydroclimatique d'après Pardé (1948) : « un premier épisode de 6 au 8 concerne le Haut-Rhône et les affluents du Jura à l'Isère avec des cumuls entre 110 et 160 mm sur ces bassins. Une nouvelle perturbation du 13 au 15 apporte des cumuls de l'ordre de 40 à 60 mm stockés sous forme nivale jusqu'à basse altitude. Une nouvelle perturbation s'amorce à partir du 20 novembre dans une ambiance plus chaude, entraînant la fonte du manteau neigeux, accompagné de précipitations jusqu'au 25. Les cumuls sont compris entre 80 et 130 mm en 3 jours sur du Jura, l'Ain au sud Dauphiné ».

Les chroniques historiques donnent un débit similaire à Pougny et Bognes, l'étude EGR indique une décrue à Bognes, ce qui induit une classification de la crue centennale à Pougny et décennale à Bognes, un peu brutale. Une vérification historique de cette crue permettrait de lever cette ambiguïté. A Lagnieu, Lyon et Valence la crue est de l'ordre centennale, soutenue par les crues de l'Arve, du Fier, de la Valserine et de l'Isère. A Ternay l'intensité est moins importante du fait de la crue modérée et non concomitante de la Saône.

Station	Hauteur à l'échelle (m)	Débit Central (m <sup>3</sup> /s)	IC95%	Classe d'aléa
<b>Pougny</b>	Inconnue	1520	[960 ; 2520]	Centennale
<b>Bognes</b>	Inconnue	1520	[1380 ; 1700]	Décennale
<b>Lagnieu</b>	Inconnue	2400	[1670 ; 3080]	Centennale
<b>Lyon Pont-Morand</b>	Inconnue	4250	[3750 ; 4620]	Centennale
<b>Ternay</b>	9.56	4780	[4450 ; 5250]	Décennale
<b>Valence</b>	Inconnue	6620	[5760 ; 7680]	Centennale

Tableau 3-18 : Ordre de grandeur de la crue de novembre 1944

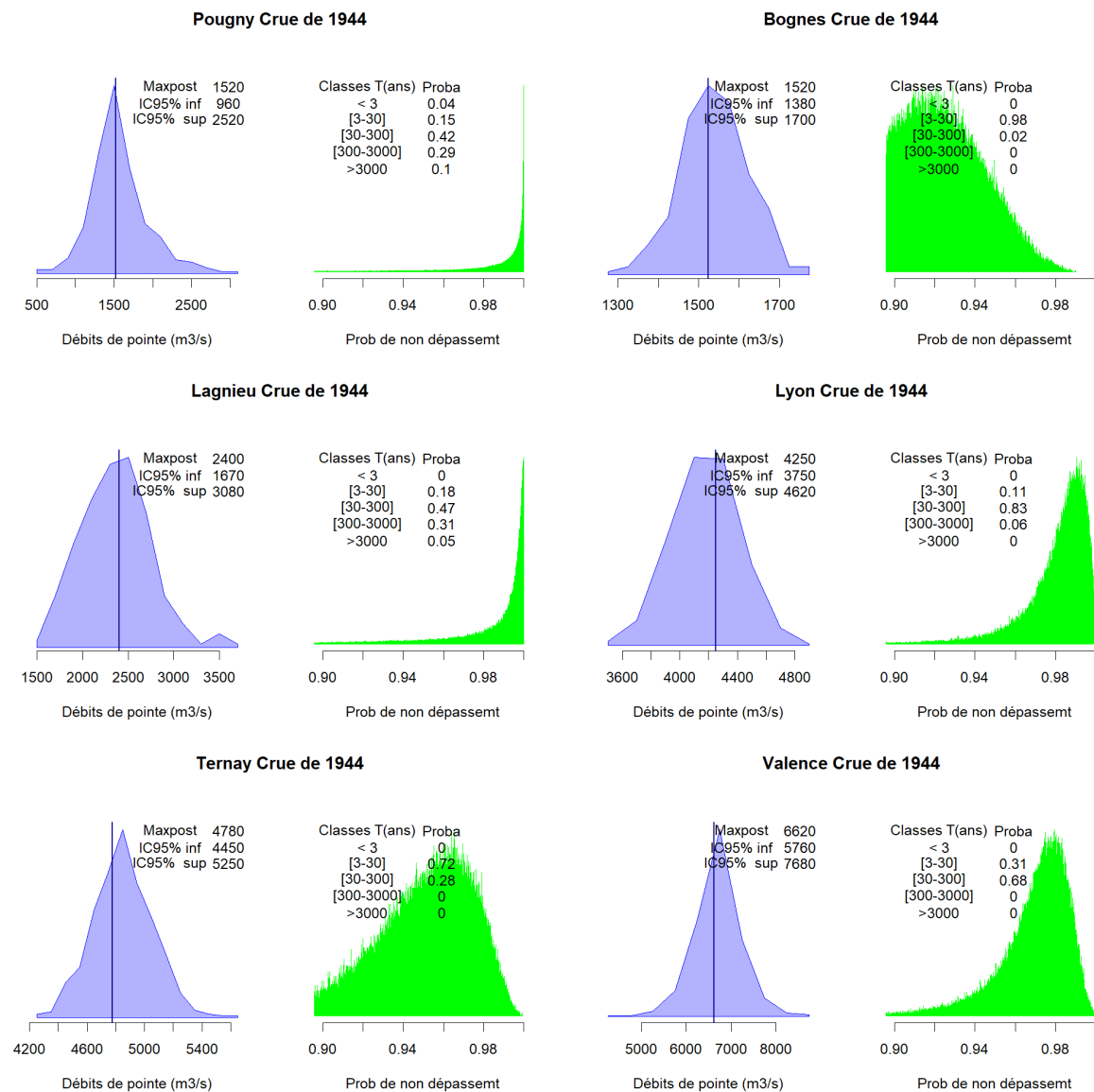


Figure 3-23 : Distribution du débit de pointe et de la probabilité de non dépassement pour la crue de novembre 1944

### 3.5 Crue de Février 1990

D'après Lang et Cœur (2014) et l'EGR (Rigaudière *et al.*, 2000), crue d'origine océanique ; un très fort épisode de pluie les 13 et 14 février s'accompagne d'une remontée brutale des températures, entraînant une importante fonte nivale sur les reliefs. Les cumuls pluviométriques sont exceptionnels sur les bassins de l'Arve, l'Ain, le Fier et l'Isère où ils dépassent 130 mm sur 2 jours. Les pluies sont plus modérées sur la Saône avec un cumul de 80 mm et négligeables plus au sud.

La crue est relativement modérée sur le Haut-Rhône de l'ordre décennale, à l'exception du tronçon de Brens où elle est très importante, elle décroît ensuite pour rester de l'ordre décennale de Lyon à Valence, puis moins importante à l'aval.

Station	Débit Central (m <sup>3</sup> /s)	IC95%	Classe d'aléa
<b>Pougny</b>	1130	[1030 ; 1410]	Décennale
<b>Bognes</b>	1620	[1550 ; 1700]	Décennale
<b>Seyssel</b>	1790	[1600 ; 1920]	Décennale
<b>Brens</b>	2180	[2100 ; 2250]	Centennale
<b>Lyon Pont-Morand</b>	3230	[3080 ; 3350]	Décennale
<b>Ternay</b>	4420	[4190 ; 4530]	Décennale
<b>Valence</b>	5140	[4930 ; 5420]	Décennale

*Tableau 3-19 : Ordre de grandeur de la crue de février 1990*

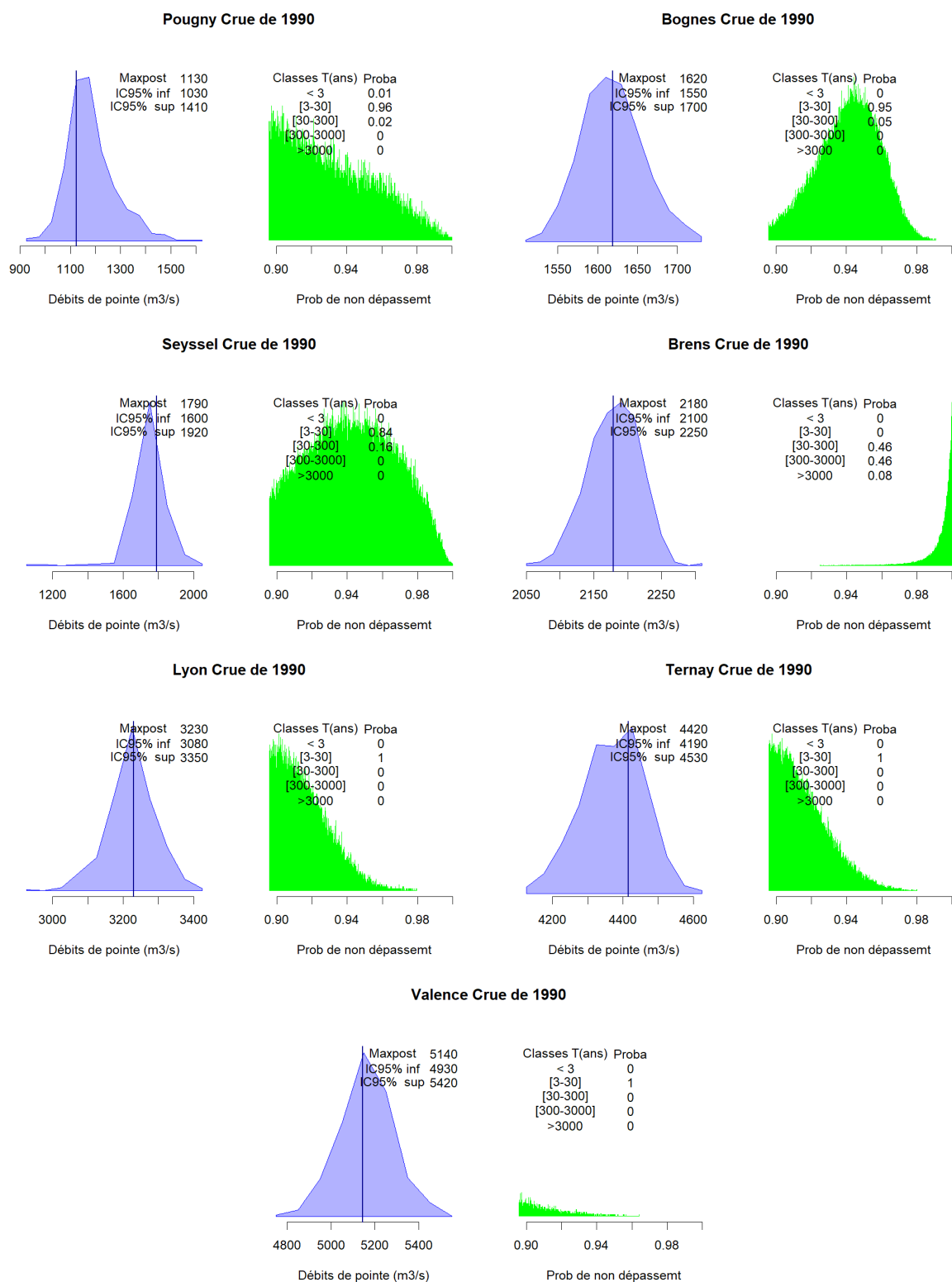


Figure 3-24 : Distribution du débit de pointe et de la probabilité de non dépassement pour la crue de février 1990

### 3.6 Crue de décembre 2003

D'après Lang et Cœur (2014) et l'EGR (Rigaudière *et al.*, 2000), crue d'origine méditerranéenne : dans un contexte automnal humide, notamment sur le mois de novembre précédant la crue, un épisode méditerranéen de grande ampleur touche le bas Rhône du 30 novembre au 3 décembre.

Le 30 novembre l'épisode touche principalement les reliefs des Cévennes avec de 50 à 75 mm et jusque 100 mm en Ardèche. Le 1<sup>er</sup> décembre les pluies se généralisent et s'intensifient ; sur 10 départements concernés le cumul est de 100 mm en moyenne et de plus de 200 mm sur l'Ardèche et localement 150 mm au nord d'Avignon. Le 2 décembre, de nouvelles pluies moins intenses apportent entre 40 et 75 mm, et encore 100 à 150 mm sur l'Ardèche et la Drome. Le 3 décembre, il pleut encore quelques dizaines de mm sur le bassin du Bas-Rhône, alors que l'épisode se décale sur l'Hérault.

Inexistante en amont de la confluence avec l'Isère, la crue prend réellement de l'ampleur à partir de Valence. Très largement gonflée par les affluents rive droite, issus des Cévennes, la crue prend des proportions pour atteindre un ordre de grandeur centennal sur le Bas-Rhône de Viviers à Beaucaire.

Station	Débit Central (m <sup>3</sup> /s)	IC95%	Classe d'aléa
<b>Viviers</b>	7520	[7100 ; 8340]	Centennale
<b>Chusclan</b>	9240	[8600 ; 9670]	Centennale
<b>Beaucaire</b>	11500 (11440 d'après BaRatin)	[10990 ; 11750]	Centennale

Tableau 3-20 : Ordre de grandeur de la crue de décembre 2003

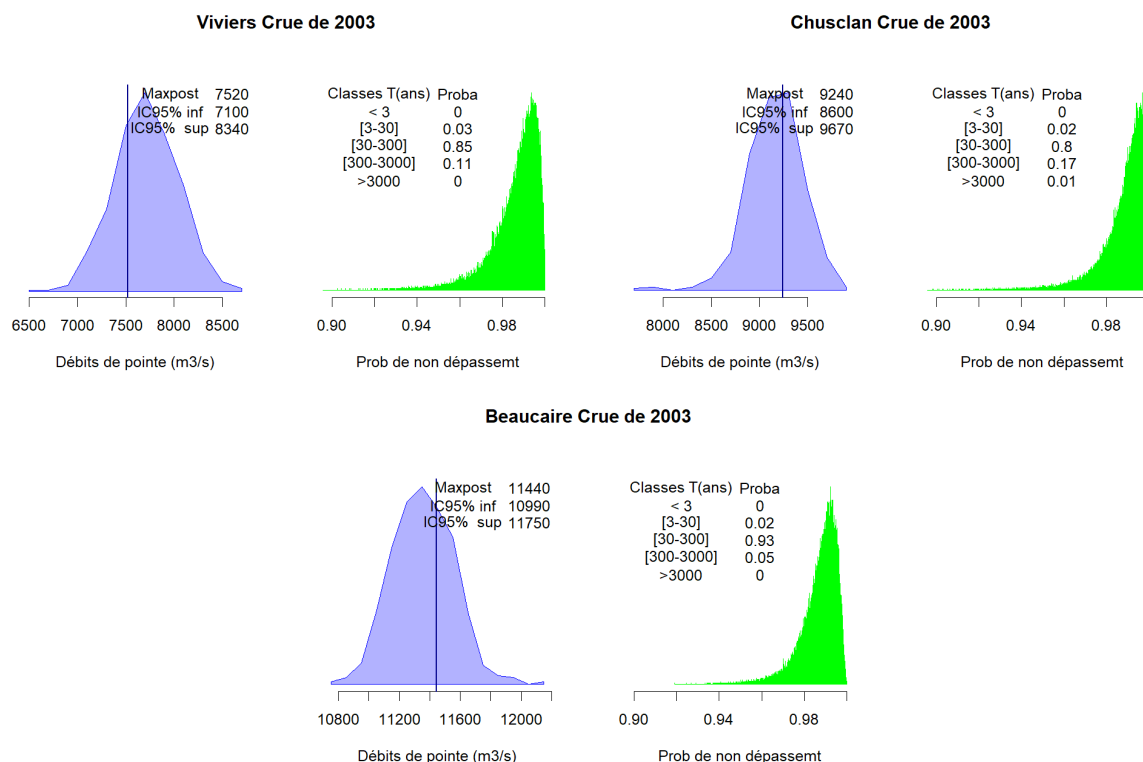


Figure 3-25 : Distribution du débit de pointe et de la probabilité de non dépassement pour la crue de décembre 2003

## 4 HYDROGRAMMES DE CRUE

L'approche est ici celle de l'hydrogramme moyen (noté HU), cette méthode se base sur les hydrogrammes de crues observées aux stations hydrométriques et une analyse de ceux-ci, afin d'en extraire un hydrogramme moyen adimensionnel car borné par le débit de pointe. Cet hydrogramme est ensuite transposé aux occurrences de crue voulues en multipliant la forme moyenne normée par le quantile de crue ciblé. Nous utilisons ici les quantiles QIX et QJX.

Le Rhône est soumis à de nombreuses influences climatiques qui engendrent une multiplicité de configurations de crue en fonction des tronçons. Nous rappelons ci les quatre influences principales (extrait Rigaudière *et al.*, 2000) :

- L'influence océanique, qui concerne essentiellement le nord du bassin jusqu'à l'Isère ;
- L'influence méditerranéenne, qui concerne le bassin au sud de Valence, mais dont le caractère extensif se fait sentir jusqu'en plaine de Saône ou sur le Jura ;
- L'influence cévenole, qui génère des pluies très caractéristiques sur les affluents en rive droite à l'aval de Lyon ;
- Les climats de montagne sur les bassins des Alpes et de moyennes montagnes sur ceux des Préalpes, du Jura et des bords du Massif Central.

Cette diversité d'influence se traduit dans les hydrogrammes de crue, auxquelles il faut rajouter l'influence des aménagements de hydro-électriques du fleuve. Les hydrogrammes de crues correspondent à la crue annuelle par année hydrologique sur les données journalières disponibles de manière continue.

### 4.1 Saisonnalité des hydrogrammes de crue

Les hydrogrammes issus des chroniques de débit journalier, sont analysés selon trois critères :

- Le débit de pointe QIX ( $\text{m}^3/\text{s}$ ) ;
- La durée caractéristique de dépassement de la moitié du débit de pointe (jours) ;
- Le mois d'occurrence.

Les figures Figure 4 -26 et Figure 4 -28, présentes les codistributions des trois critères d'analyse pour les stations en amont de Lyon et en aval de Lyon.

#### 4.1.1 Haut-Rhône en amont de Lyon (non compris)

Pour les stations en amont de Lyon, nous avons vu que le régime hydrologique était marqué par la fonte nivale (cf. Figure 1 -3). La distribution des débits maximum en fonction des durées caractéristiques (Figure 4 -26) montre que pour ces six stations, les durées du pic de crue sont plus longues de mai à août, ce qui correspond au mois où la fonte nivale est prépondérante et engendre un débit de base conséquent. Ceci est particulièrement marqué pour Pougny, Bognes et Seyssel, et dans une moindre mesure à Brens et Lagnieu. A Châteaufort, le faible nombre de crues ne permet pas de conclure.

La distribution des débits maximum en fonction de la durée caractéristique montre qu'une majorité des crues ont des durées caractéristiques comprises entre 0 et 20 jours. D'autre part on retrouve les crues dont les débits de pointe sont les plus forts pour les durées caractéristiques les plus faibles.

Partant de ce constat, nous scindons l'échantillon en deux sous-échantillons : saison 1 de septembre à avril et saison 2 de mai à août pour la période de fonte. La Figure 4 -27 présente les hydrogrammes moyens obtenus pour les six stations à l'amont de Lyon, pour l'ensemble des crues échantillonnées et

par sous-saison. Il est intéressant de noter que la moyenne des durées caractéristiques n'est pas égale à la durée de l'hydrogramme adimensionnel moyen.

On observe une très nette différence en particulier au niveau des hydrogrammes moyens entre la saison de fonte et hors de la saison de fonte nivale. De plus les durées caractéristiques des hydrogrammes pour la saison hors fonte sont plus cohérentes avec les valeurs annoncées par l'EGR qui sont de 10 jours pour toutes les stations du Haut-Rhône.

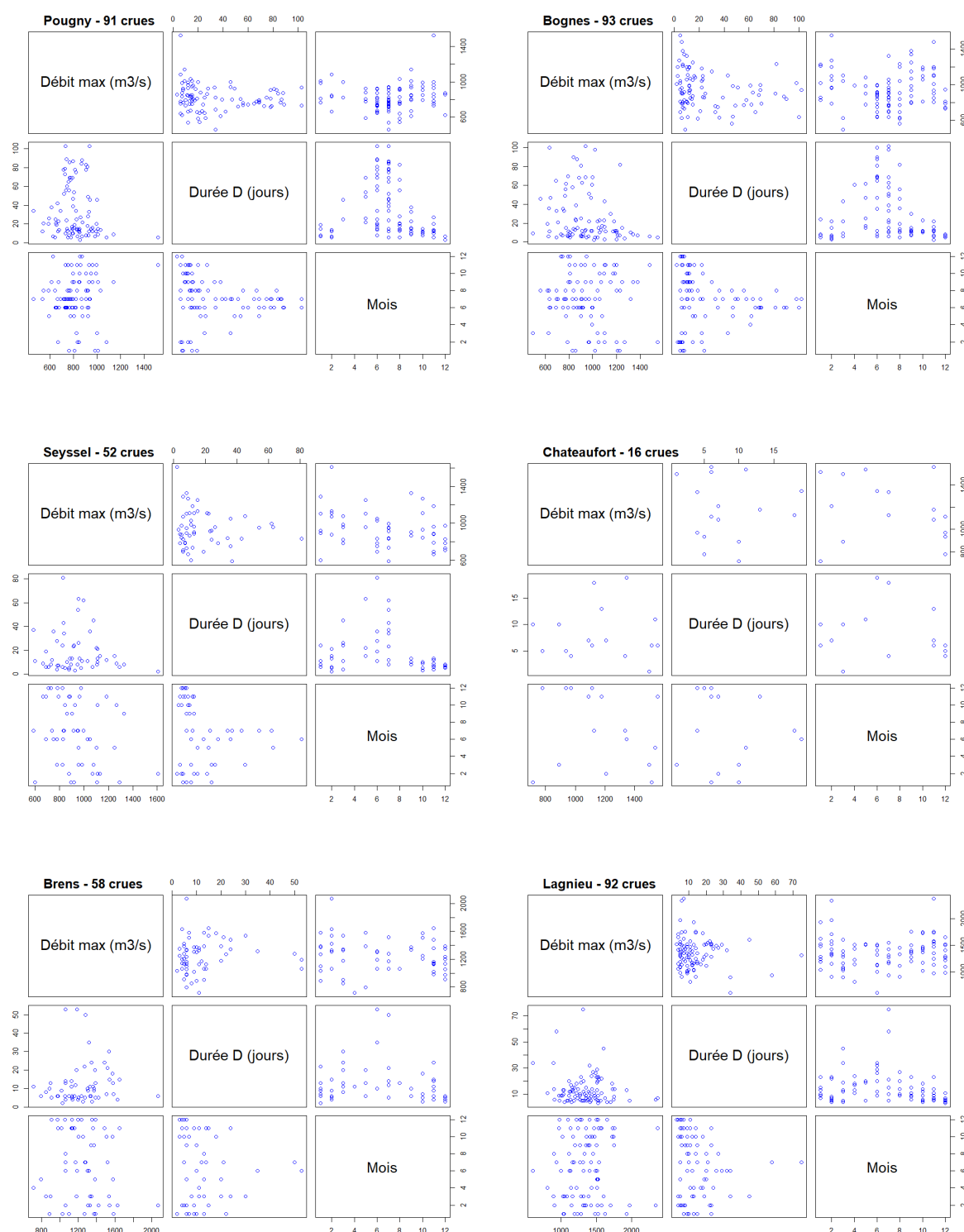


Figure 4-26 : Distribution des caractéristiques des hydrogrammes de crue, observés en amont de Lyon



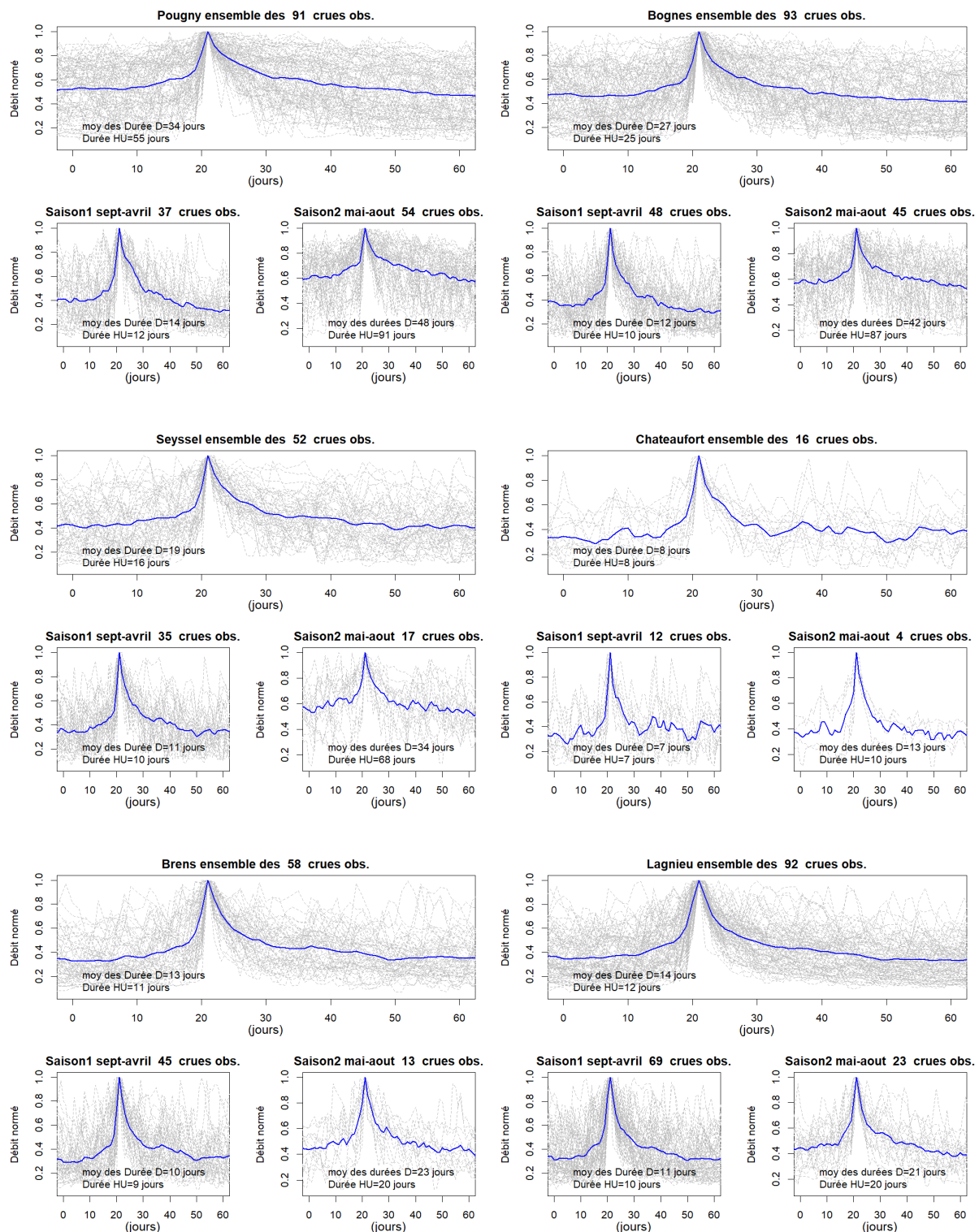


Figure 4-27 : Hydrogrammes unitaires, global et par sous-saisons pour les stations en amont de Lyon

#### 4.1.2 Bas-Rhône en aval de Lyon (compris)

Pour les stations à partir de Lyon, l'analyse est plus simple car décorrélée de l'influence nivale. A Lyon, les crues ont très majoritairement une courte durée caractéristique, comprise entre 1 et 15 jours. La période estivale est peu propice aux crues.

A partir de Ternay, le régime des crues change drastiquement sous l'influence des apports de la Saône, et de son régime de crue particulièrement lent. On retrouve donc aux stations de Ternay et Valence des durées caractéristiques comprises entre 1 et 40 jours, puis un peu moins à Viviers avec des valeurs comprises entre 1 et 20 jours. En dehors de la période estivale toujours peu propice aux crues, les débits maximums sont distribués de façon assez homogène sur le reste de l'année. On n'observe pas de relation particulière entre durée caractéristique et débit maximum.

A Chusclan le peu de données (20 crues échantillonnées) rend difficile l'analyse. Il ne se dégage pas de saisonnalité particulière d'après les observations.

A Beaucaire, la diminution des durées caractéristiques de crue amorcée à Viviers est bien marquée ; avec une majorité de crues de durée comprise entre 0 et 20 jours. Bien que des crues de durée caractéristique plus longue soient également observées, les crues de durée inférieure à 20 jours concentrent majoritairement les plus forts débits maximums. La période estivale est encore une fois la moins propice à l'apparition des crues, quand les mois de novembre, décembre janvier concentrent les plus forts débits pour cet échantillon.

Pour les stations du Bas Rhône en aval de Lyon y compris, la période estivale est la plus pauvre en crue. Ceci induit peu de différence entre un échantillonnage sur l'ensemble de l'année et par sous-saison. Nous ne retenons ainsi pas de saisonnalité pour la construction des hydrogrammes moyens (Figure 4 -29).

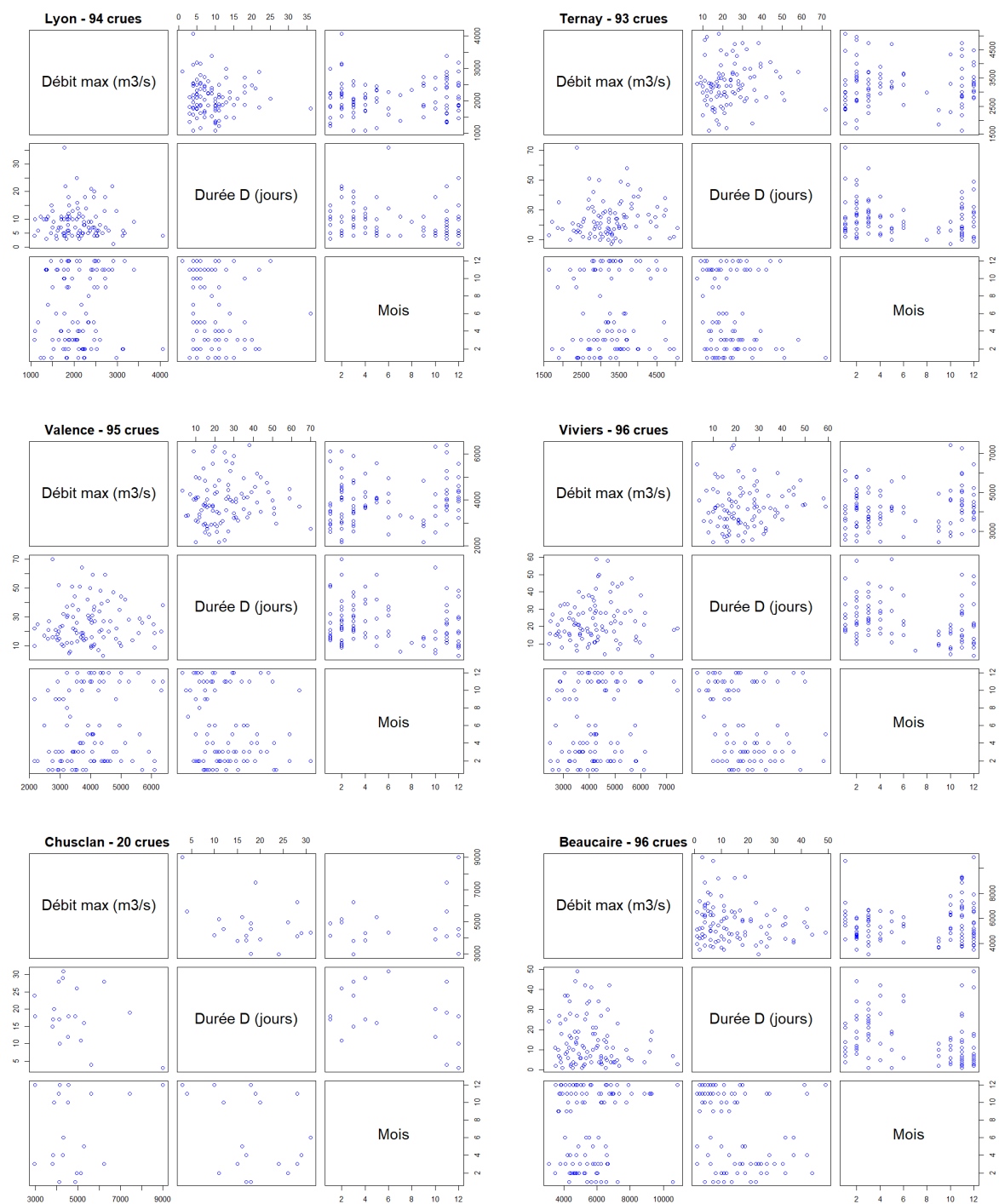


Figure 4-28 : Distribution des caractéristiques des hydrogrammes de crue observés en aval de Lyon

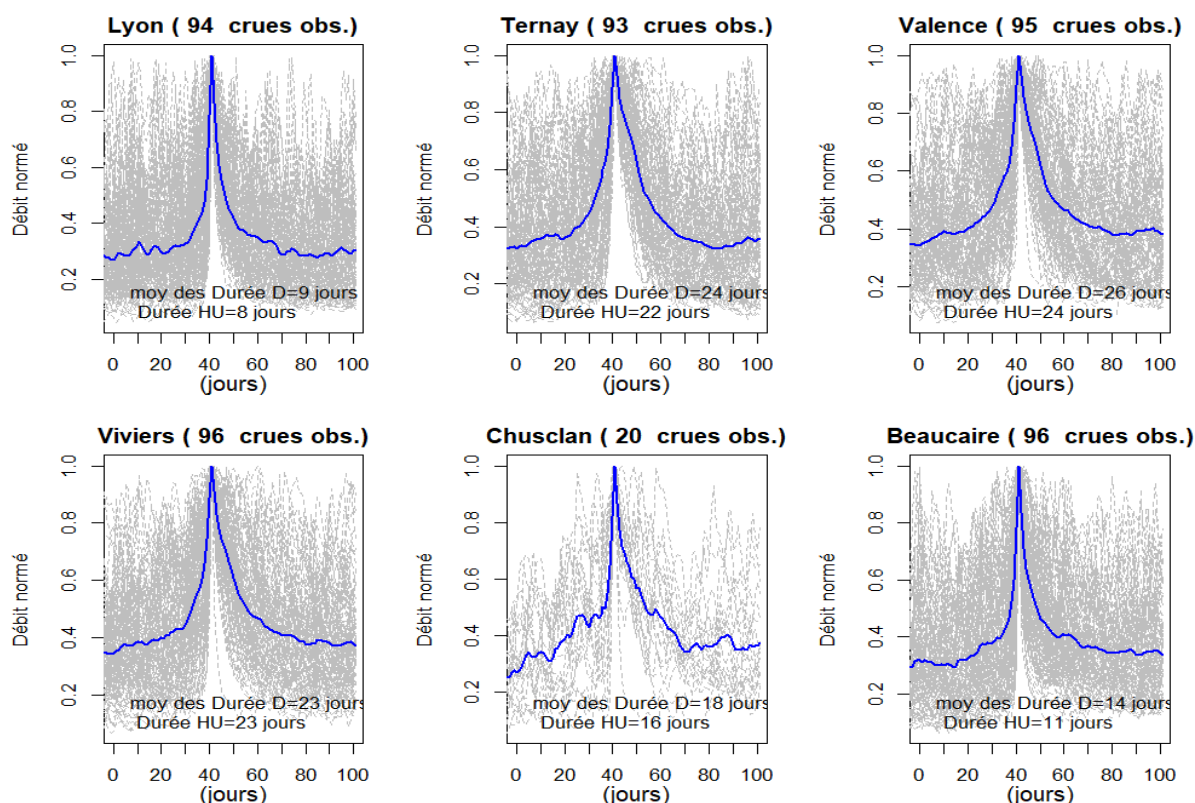


Figure 4-29 : Hydrogrammes unitaires, global et par sous-saisons pour les stations en aval de Lyon (compris)

## 4.2 Hydrogrammes de crues par la méthode de l'hydrogramme moyen

La méthode de l'hydrogramme moyen consiste à dénormer l'hydrogramme adimensionnel par la pointe de crue, nous utilisons pour cela les quantiles journaliers QJX déterminés aux stations pour l'ensemble des hydrogrammes au pas de temps journalier. Nous ajoutons également la pointe infra journalière liée au débit de pointe (QIX), à l'exception des stations pour lesquelles le coefficient de pointe tend vers 1 pour les fortes périodes de retour : Lagnieu, Viviers et Chusclan.

### 4.2.1 Haut-Rhône en amont de Lyon (non compris)

Pour les stations en amont de Lyon les hydrogrammes sont construits à partir des crues dont l'occurrence n'est pas liée à la fonte nivale (Figure 4 -30, Figure 4 -31 Figure 4 -32).

On retrouve des dynamiques de crue assez similaires aux résultats obtenus par l'EGR, avec tout de même quelques différences liées à la méthode de l'hydrogramme moyen. Les montées de crue sont dans tous les cas, plus progressives. Les pics de crue sont comparables bien qu'ils soient souvent inférieurs et plus étroits à ceux obtenus par l'étude EGR. La différence la plus importante se situe au niveau des décrues qui sont plus beaucoup rapides par la méthode de l'hydrogramme moyen, mais ensuite un retour plus long au débit de base.

Les hydrogrammes obtenus sont comparés aux quantiles théoriques sur les débits moyens maximum sur 2 à 60 jours. Ceci permet de contrôler l'homogénéité des formes obtenus vis-à-vis de l'analyse fréquentielle. Les graphiques de score présentent les écarts entre débits moyens issus de l'hydrogramme et les quantiles théoriques. Les scores sur les moyennes de 2 à 10 jours (VCX2 à

VCX10) sont globalement très bons avec des écarts qui restent inférieurs à 10%. Pour les moyennes plus longues (VCX15 à VCX60) les résultats sont moins bons avec des déficits entre -10 et -30%, indiquant que les hydrogrammes manquent de volumes sur ces durées par rapport aux quantiles théoriques. Ce résultat est parfaitement cohérent avec le fait d'avoir considéré des crues hors de la saison de fonte nivale alors que les quantiles de durée moyennes supérieurs à 15 jours sont probablement issus des épisodes de fonte avec un fort volume, mais un maximum restreint.

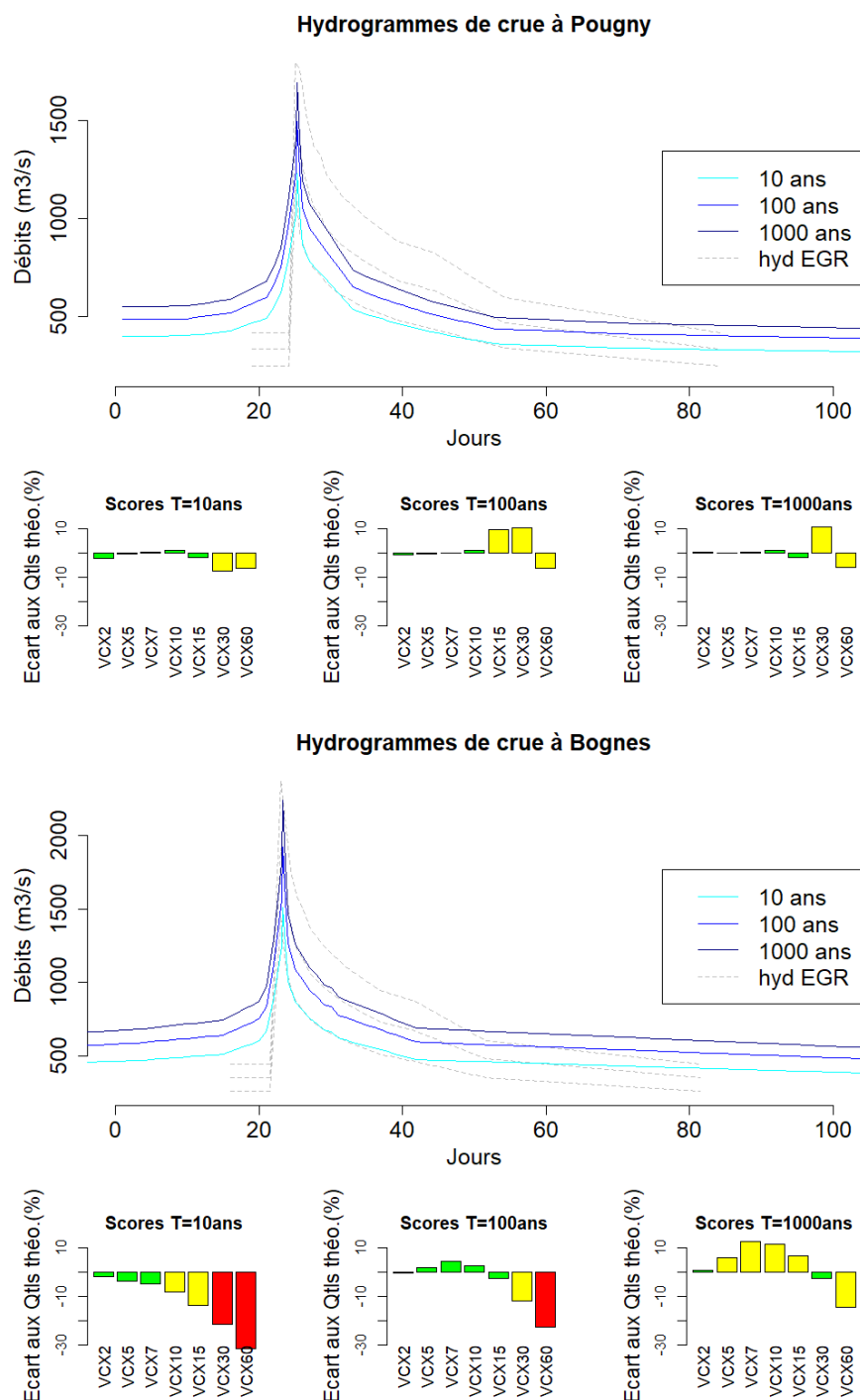


Figure 4-30 : Hydrogrammes de crue à Pougny et Bognes. Le code couleur sur l'écart relatif  $\epsilon$  entre le débit VCXd de l'hydrogramme de période de retour T et le quantile VCXd(T) est le suivant : en vert si  $\epsilon \leq 5\%$  ; en jaune si  $5 < \epsilon \leq 15\%$  ; en rouge si  $\epsilon > 15\%$

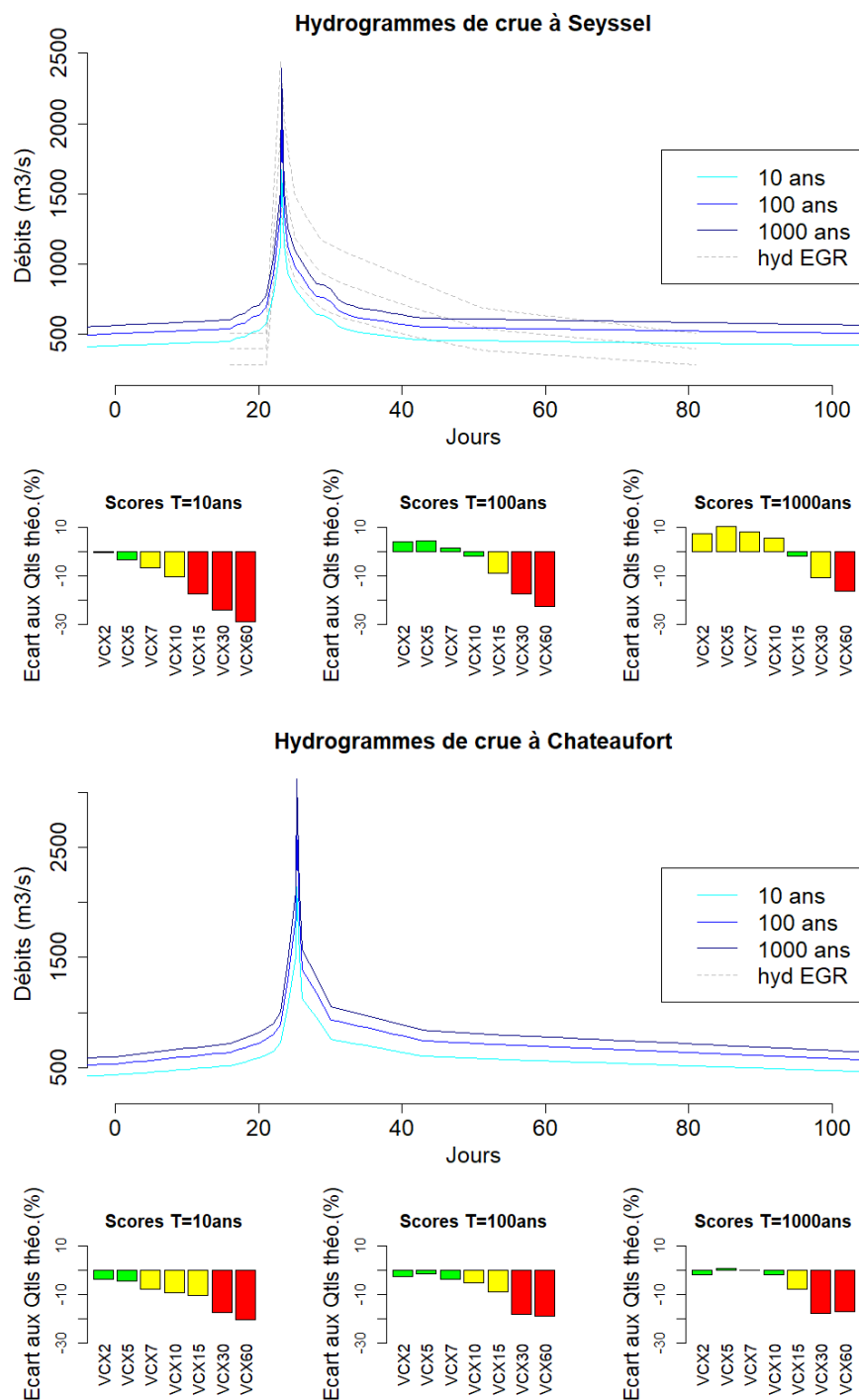


Figure 4-31 : Hydrogrammes de crue à Seyssel et Châteaufort Le code couleur sur l'écart relatif  $\epsilon$  entre le débit  $VCXd$  de l'hydrogramme de période de retour  $T$  et le quantile  $VCXd(T)$  est le suivant : en vert si  $\epsilon \leq 5\%$  ; en jaune si  $5 < \epsilon \leq 15\%$  ; en rouge si  $\epsilon > 15\%$

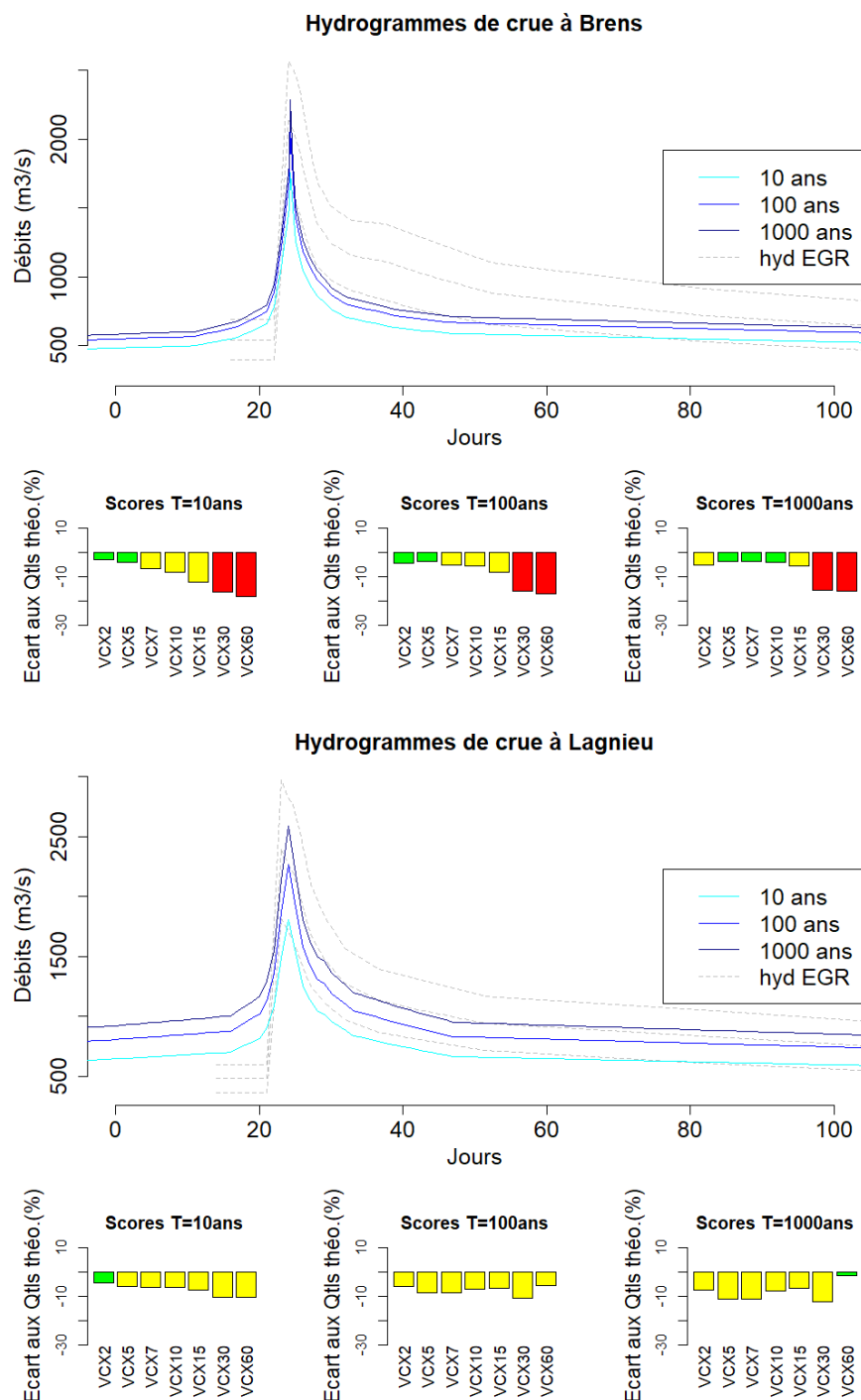


Figure 4-32 : Hydrogrammes de crue à Brens et Lagnieu Le code couleur sur l'écart relatif  $\epsilon$  entre le débit  $VCXd$  de l'hydrogramme de période de retour  $T$  et le quantile  $VCXd(T)$  est le suivant :  
en vert si  $\epsilon \leq 5\%$  ; en jaune si  $5 < \epsilon \leq 15$  ; en rouge si  $\epsilon > 15\%$

#### 4.2.2 Bas-Rhône en aval de Lyon (compris)

Pour les stations en aval de Lyon (compris), les hydrogrammes moyens sont construits sur la base de l'ensemble des crues annuelles observées. Le constat est similaire à celui des stations du Haut-Rhône. Les dynamiques de crues ne sont pas trop éloignées des résultats de l'EGR, avec néanmoins des



montées beaucoup plus progressives étalées sur une vingtaine de jours, les pics de crue sont plus étroits avec des décrues beaucoup plus rapides.

Les scores vis-à-vis des quantiles théoriques sont relativement bons avec des écarts dépassant rarement les 15, 20%, et situant plutôt entre 5% et 10%.

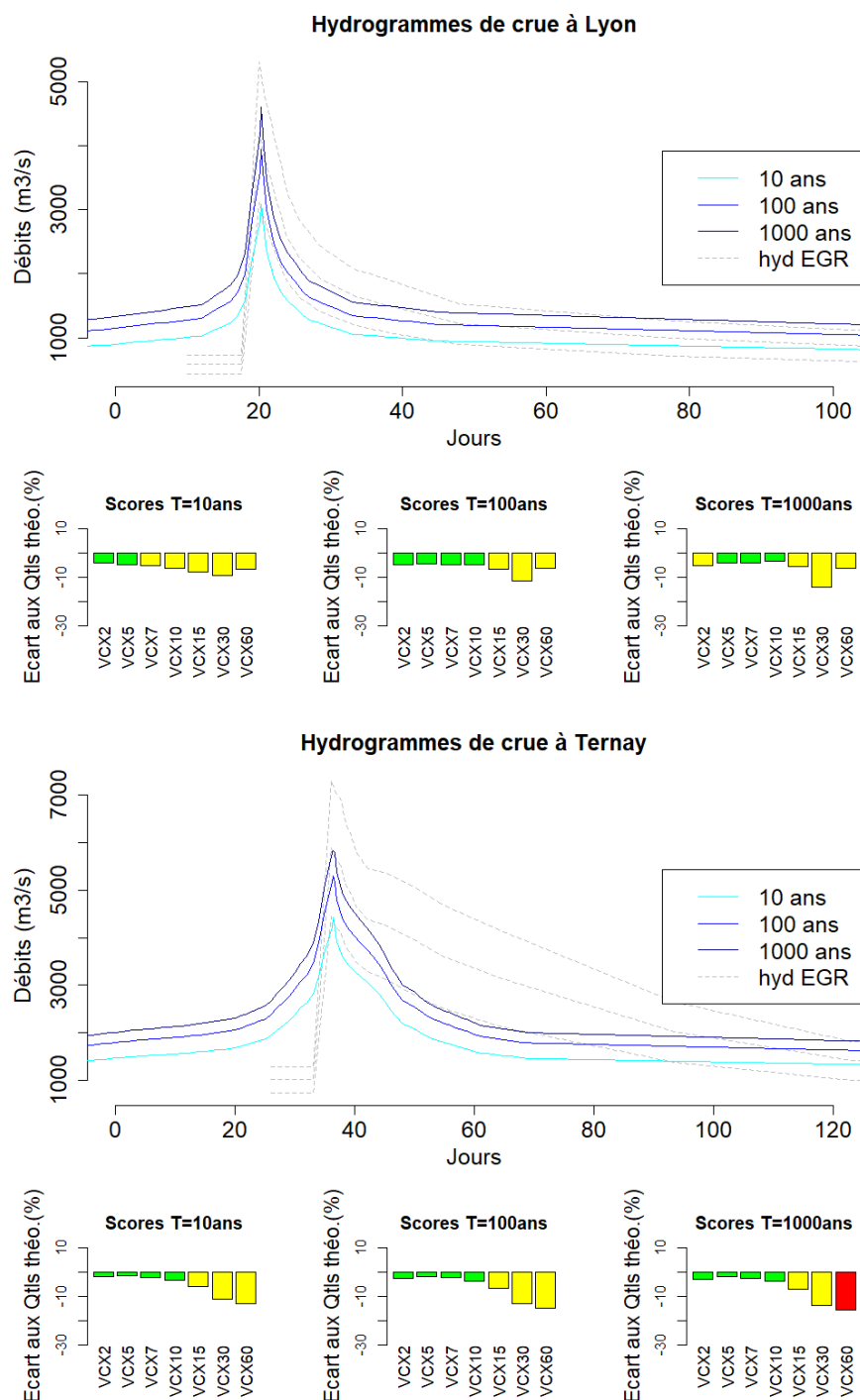


Figure 4-33 : Hydrogrammes de crue à Lyon et Ternay Le code couleur sur l'écart relatif  $\epsilon$  entre le débit  $VCXd$  de l'hydrogramme de période de retour  $T$  et le quantile  $VCXd(T)$  est le suivant :  
en vert si  $\epsilon \leq 5\%$  ; en jaune si  $5 < \epsilon \leq 15$  ; en rouge si  $\epsilon > 15\%$

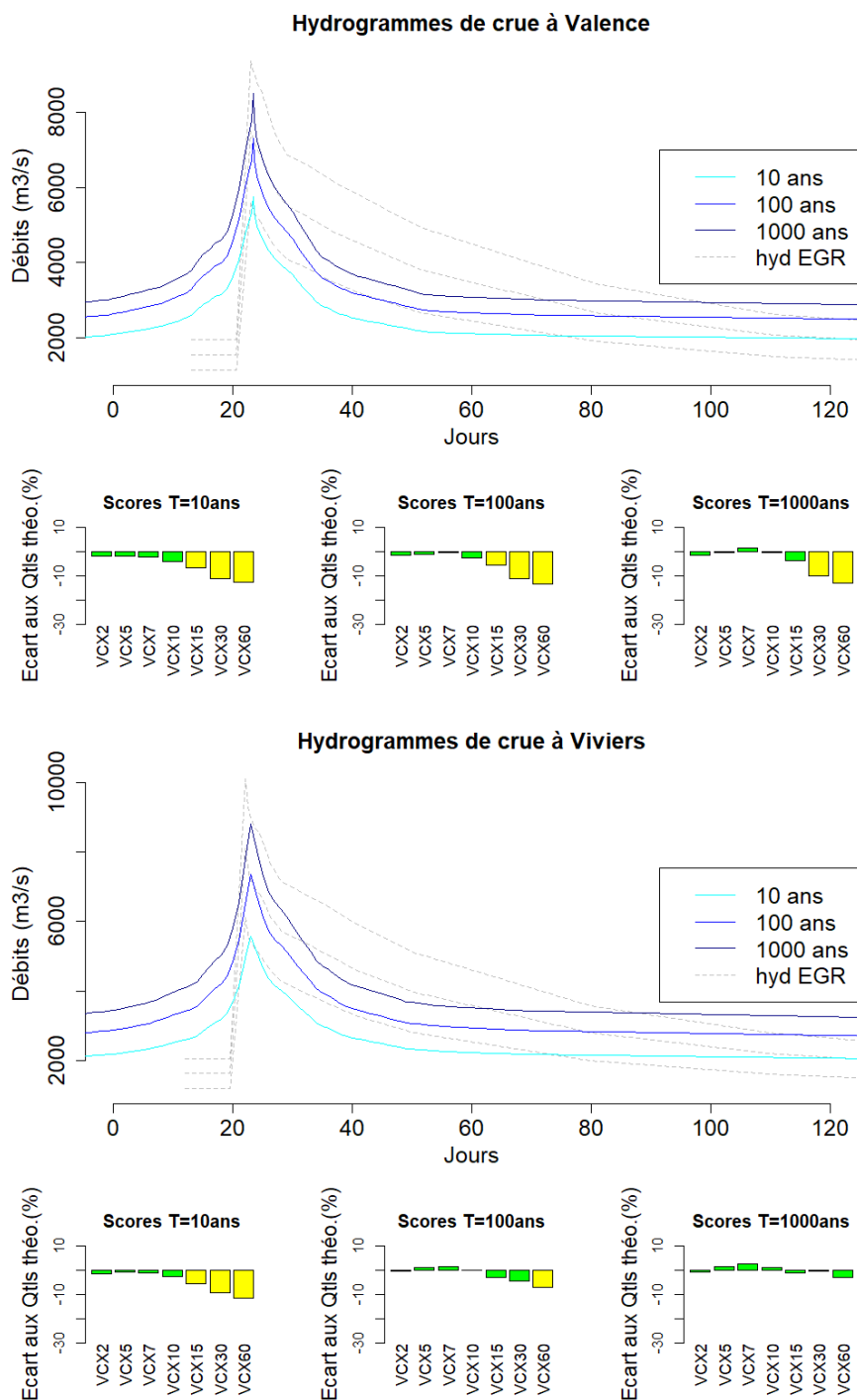


Figure 4-34 : Hydrogrammes de crue à Valence et Viviers Le code couleur sur l'écart relatif  $\epsilon$  entre le débit  $VCXd$  de l'hydrogramme de période de retour  $T$  et le quantile  $VCXd(T)$  est le suivant :  
en vert si  $\epsilon \leq 5\%$  ; en jaune si  $5 < \epsilon \leq 15$  ; en rouge si  $\epsilon > 15\%$

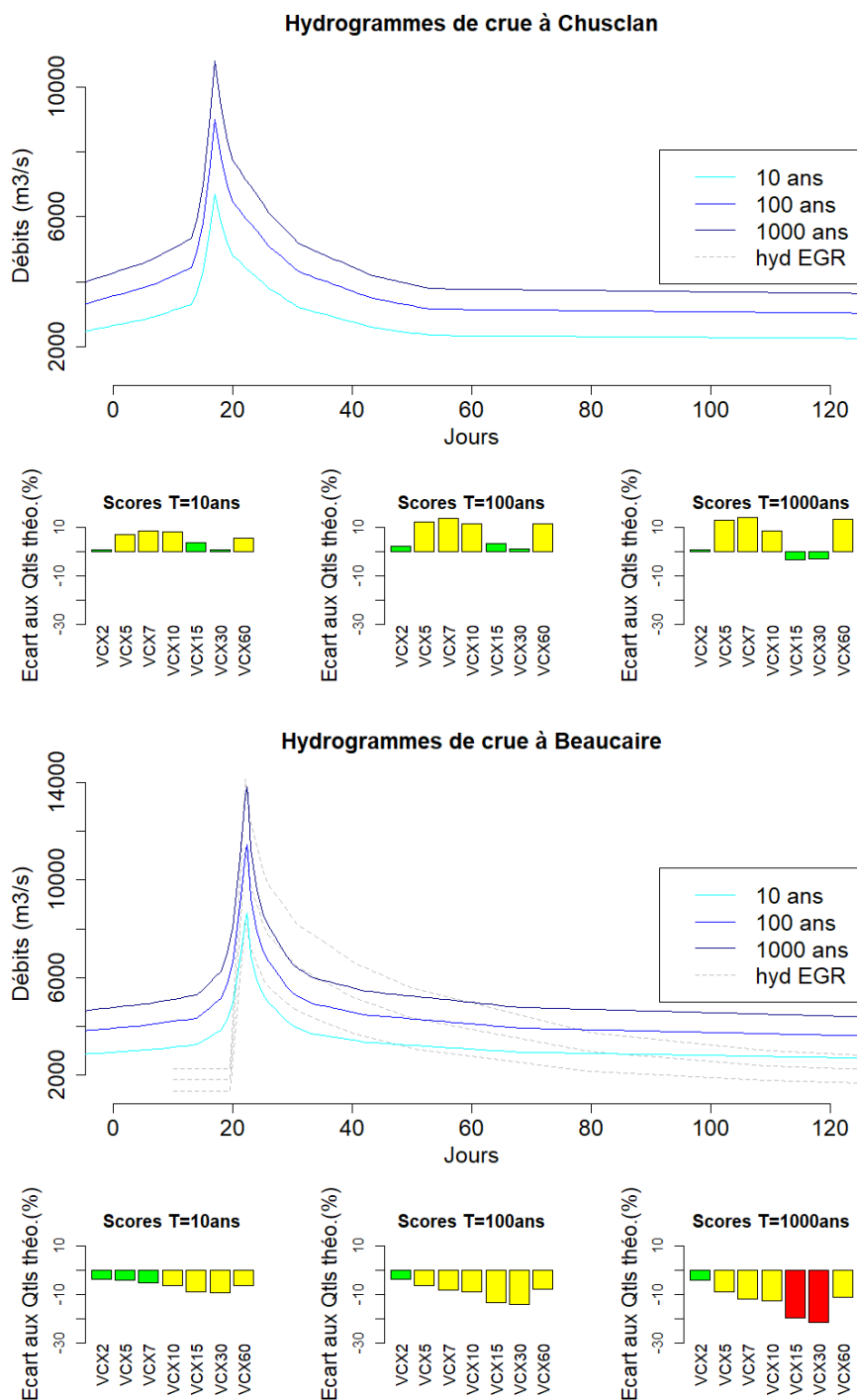


Figure 4-35 : Hydrogrammes de crue à Chusclan et Beaucaire Le code couleur sur l'écart relatif  $\epsilon$  entre le débit  $VCXd$  de l'hydrogramme de période de retour  $T$  et le quantile  $VCXd(T)$  est le suivant :  
en vert si  $\epsilon \leq 5\%$  ; en jaune si  $5 < \epsilon \leq 15$  ; en rouge si  $\epsilon > 15\%$

## 5 CONCLUSIONS

---

L'utilisation de longues chroniques a été privilégiée dans cette étude fréquentielle sur la distribution des crues du Rhône. La connaissance et la prise en compte des crues historiques permet de donner un recul temporel bien plus large et de conforter les extrapolations statistiques qui conduisent au calcul des quantiles de crue pour les fréquences rares.

Le travail préliminaire réalisé (cf Rapport Phase 1) a ainsi permis d'inclure 472 années de données supplémentaires à la précédente étude, ainsi que d'inclure deux stations supplémentaires : Châteaufort et Chusclan. Il est à noter que les stations du Rhône disposent de chroniques de longueur exceptionnelle, la série la plus longue étant celle de Beaucaire cumulant 200 ans de données (période 1816-2016).

Nous avons montré que la prise en compte des incertitudes en particulier sur les données historiques, permet de quantifier la plus-value d'information apportée. Le calcul de ces incertitudes a été possible par la réestimation des courbes de tarage par la méthode BaRatin qui permet d'estimer les incertitudes sur les valeurs de débits (cf. Rapport Phase 1). La propagation de ces incertitudes dans l'analyse fréquentielle a été réalisée à l'aide de l'outil JBay qui permet en plus d'estimer les incertitudes liées à l'estimation des paramètres de loi statistiques (cf. paragraphe 2.1.1).

### 5.1 Conclusion de l'analyse fréquentielle

Suivant la méthodologie mise en place, nous avons vu que les résultats étaient fortement impactés par le choix de la loi statistique. Pour les variables caractérisant une valeur maximale annuelle, la loi de Gumbel à deux paramètres et la loi Généralisée des Valeurs Extrêmes (GEV) à trois paramètres ont été testées (cf. paragraphe 2.1.3).

La loi de Gumbel historiquement utilisée pour le calcul des quantiles de crue sur le Rhône a montré une forte tendance à sous-estimer les fréquences empiriques des échantillons observés, c'est-à-dire à surestimer les quantiles extrapolés. Nous avons également montré qu'avec seulement deux paramètres, la loi de Gumbel était peu sensible aux variations des échantillons y compris à l'ajout d'événements historiques de forte ampleur. L'hypothèse de ne considérer que deux paramètres, entraîne également une sous-estimation importante des incertitudes liés à l'extrapolation.

A l'inverse la loi GEV a montré une meilleure adéquation avec l'ensemble des échantillons considérés, entraînant des extrapolations plus justes. Les incertitudes estimées sont également plus correctes car non fortement conditionnées par l'hypothèse réductrice d'un paramètre de forme égal à zéro (cf. loi de Gumbel). En contrepartie deux contraintes apparaissent à l'utilisation de la loi GEV :

- L'ajustement d'un paramètre de forme demande une longueur d'échantillon conséquente, sous peine de voir l'incertitude fortement augmenter. Selon les stations, 100 à 150 ans de chronique étaient nécessaires pour obtenir des ajustements dont l'incertitude était acceptable (cf. paragraphes 2.2.3 et 2.3.1),
- La modification d'un échantillon, par l'ajout de données supplémentaires par exemple, peut entraîner une révision assez conséquente des quantiles extrapolés.

Afin de palier à ces contraintes nous avons proposé une méthode de conditionnement régional du paramètre de forme de loi GEV (cf. paragraphes 2.4.1 et 2.5.1), qui permet d'augmenter le nombre d'informations utilisées. Les résultats ont montré une diminution importante de l'incertitude sur les quantiles extrapolés pour les stations avec de petits échantillons, une amélioration de la robustesse des ajustements, ainsi qu'une cohérence des quantiles entre stations.

La méthodologie mise en place ici pour l'extrapolation des quantiles de crue, rejoint ainsi deux des conclusions du projet ExtraFlo : privilégier en premier lieu la justesse et en deuxième lieu la robustesse des loi statistiques, et utiliser les méthodes de conditionnement régional pour augmenter les sources d'information.

Nous avons également montré que le fait d'utiliser une valeur centrale comme unique résultat d'une analyse fréquentielle était incomplet et soumis à discussion. Nous encourageons donc à considérer les résultats de cette étude par le prisme des intervalles de confiances proposés.

Par rapport aux résultats de l'EGR, les quantiles extrapolés sont diminués pour les périodes de retour supérieure à 100 ans. Alors que pour la période de retour 10 ans les quantiles augmentent de 4% en moyenne, ils diminuent de 1 à 8% pour les périodes de retour de 100 et 1000 ans. Rappelons qu'avec les mêmes échantillons, l'utilisation de la loi de Gumbel aurait conduit à une augmentation de l'ordre de 10% sur tous les quantiles de crue.

## 5.2 Conclusions sur les hydrogrammes de crue

Les hydrogrammes de crue ont été calculés par la méthode de l'hydrogramme moyen qui s'appuie d'abord sur la forme des crues observées avant d'être transposée en utilisant les quantiles de pointe de crue estimés par l'analyse fréquentielle (cf. paragraphe 4). Les résultats obtenus présentent des dynamiques de crue différentes de celles obtenus par l'EGR qui utilisait la méthode des hydrogrammes synthétiques mono-fréquences (HSMF).

Bien que non construits à partir de l'ensemble des quantiles estimés, les hydrogrammes proposés ici reste très cohérents avec ceux-ci. Toutefois nous devons souligner que la comparaison entre hydrogramme moyens et quantiles théoriques a ses limites puisque les hydrogrammes moyens obtenus représentent une compilation de crues réellement observées, alors que les quantiles sont estimés à partir d'échantillons indépendants entre eux qui ne représentent pas nécessairement les mêmes événements. Cela traduit le fait que les crues qui ont les plus fortes pointes ne sont pas forcément les mêmes que celles qui vont avoir les débits de base les plus élevés.

On retrouve là une différence fondamentale avec la méthode des hydrogrammes synthétiques mono-fréquences (HSMF), basée uniquement sur l'analyse fréquentielle des débits. Pour certaines stations, l'hydrogramme HSMF de période de retour  $T$ , construit par concaténation des débits seuils sur des durées croissantes (1, 2, 5, 7, 10, 15, 30 et 60 jours) résulte d'une association d'événements qui n'ont pas lieu à la même saison. Par exemple, sur le Rhône amont à Pougny (cf. Figure 4 -26), les hydrogrammes de crue les plus forts en pointe ont lieu de septembre à avril et sont relatifs à une crue pluviale, alors que les plus forts en volume ont lieu de mai à août lors de crues nivales.

## 6 BIBLIOGRAPHIE

---

- Anselmo, V., et al. «Conférence de consensus. Débit maximal de la crue du Rhône de décembre 2003 à Beaucaire.» 2005.
- Lang, M., et. Cœur D.. *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*, 2, 2014, 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.
- Neppel L. et al. «Flood frequency analysis using historical data: accounting for random and systematic errors.» *Hydrological Sciences Journal* (Taylor & Francis) 55 (2010): 192-208.
- Pardé M. «Le régime du Rhône», *Etudes rhodaniennes, Lyon (réédition Géocarrefour 2004), (1925), 3 tomes, 848p.*
- Pardé M. «Deux récents rapports annuels de la Compagnie Nationale du Rhône.» *Revue de géographie de Lyon* (PERSEE Program) 33 (1958): 351-360.
- Pardé M. «Les crues du Rhône de novembre 1944 à février 1945.» *Les Etudes rhodaniennes* (PERSEE Program) 23 (1948): 69-76.
- Pardé M. «Les crues du Rhône en décembre 1925 et février 1928.» *Les Etudes rhodaniennes* (PERSEE Program) 4 (1928): 3-46.
- Pardé M. «Les études hydrométriques et les rapports annuels de la Compagnie Nationale du Rhône.» *Revue de géographie de Lyon* (PERSEE Program) 31 (1956): 143-155.
- 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 Cetis and Université de Nice, 200*

