



**HAL**  
open science

## Impacts des incertitudes hydrométriques dans l'estimation des débits caractéristiques

I. Horner, Benjamin Renard, Jérôme Le Coz, M. Lang

### ► To cite this version:

I. Horner, Benjamin Renard, Jérôme Le Coz, M. Lang. Impacts des incertitudes hydrométriques dans l'estimation des débits caractéristiques. [Rapport de recherche] irstea. 2016, pp.80. hal-02605322

**HAL Id: hal-02605322**

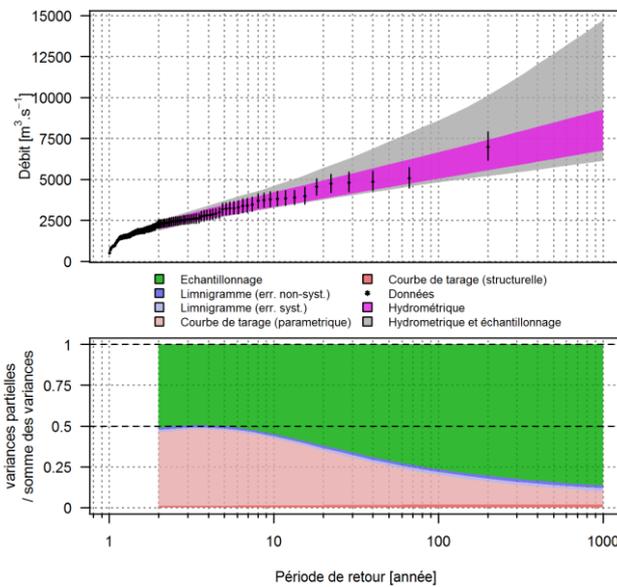
**<https://hal.inrae.fr/hal-02605322>**

Submitted on 16 May 2020

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

# IMPACTS DES INCERTITUDES HYDROMETRIQUES DANS L'ESTIMATION DE DEBITS CARACTERISTIQUES



**Ivan Horner**  
**Benjamin Renard**  
**Jérôme Le Coz**  
**Michel Lang**

Irstea Lyon-Villeurbanne  
 UR Hydrologie - Hydraulique



**SCHAPI**





**TABLE DES MATIERES**

|   |    |
|---|----|
| 1 Introduction.....   | 5  |
| 2 Outils et méthodes utilisés.....  | 7  |
| 2.1 BaRatin (BAYesian RATINg curve analysis) .....  | 7  |
| 2.1.1. Estimation des incertitudes associées aux courbes de tarage .....                        | 7  |
| 2.1.2. Propagation des incertitudes aux hydrogrammes .....                                      | 8  |
| 2.2. JBay : estimation des paramètres de lois statistiques par inférence Bayésienne.....        | 9  |
| 3 Des données de débits incertaines aux débits caractéristiques incertains.....                 | 10 |
| 3.1. Principe général.....  | 10 |
| 3.2. Etape 1 : les hydrogrammes incertains .....  | 11 |
| 3.3. Etape 2 : extraction d'une variable hydrologique .....                                     | 12 |
| 3.4. Etape 3 : estimation des paramètres d'une loi statistique.....                             | 13 |
| 3.4.1. Principe général.....  | 13 |
| 3.4.2. Étude de l'importance relative des incertitudes d'échantillonnage et hydrométriques .... | 14 |
| 4 Applications de la méthodologie à 4 stations hydrométriques .....                             | 16 |
| 4.1. Lake Wanaka à Roys Bay (Nouvelle-Zélande).....   | 16 |
| 4.1.1. Estimation des incertitudes sur les hydrogrammes .....                                   | 16 |
| 4.1.2. Estimation des incertitudes sur les débits caractéristiques .....                        | 19 |
| 4.2. L'Yzéron à Craponne.....   | 25 |
| 4.2.1. Estimation des incertitudes sur les hydrogrammes .....                                   | 25 |
| 4.2.2. Estimation des incertitudes sur les débits caractéristiques .....                        | 29 |
| 4.3. Le Real Collobrier à Valescure .....   | 35 |
| 4.3.1. Estimation des incertitudes sur les hydrogrammes .....                                   | 35 |
| 4.3.2. Estimation des incertitudes sur les débits caractéristiques .....                        | 37 |
| 5 Etude de cas synthétiques fictifs .....   | 43 |
| 5.1. Introduction.....  | 43 |
| 5.2. Méthodes utilisées pour la création des cas fictifs .....                                  | 43 |
| 5.2.1. Simulation de l'hydrologie : création d'une hydrologie fictive .....                     | 44 |
| 5.2.2. Création d'une station hydrométrique fictive.....  | 46 |
| 5.3. Plan d'expérience .....  | 47 |
| 5.4. Impact de l'hydrologie.....  | 48 |
| 5.4.1. Introduction.....  | 48 |
| 5.4.2. Création des cas fictifs.....  | 48 |
| 5.4.3. Calculs des hydrogrammes et extraction des variables hydrologiques .....                 | 52 |

|   |    |
|---|----|
| 5.4.4. Calculs des débits caractéristiques.....                                 | 56 |
| 5.4.5. Conclusion .....   | 61 |
| 5.5. Impact de la sensibilité des contrôles .....                               | 63 |
| 5.5.1. Introduction.....  | 63 |
| 5.5.2. Créations de la stations hydrométriques fictives.....                    | 63 |
| 5.5.3. Calculs des hydrogrammes et extraction des variables hydrologiques ..... | 64 |
| 5.5.4. Calculs des débits caractéristiques.....                                 | 66 |
| 5.5.5. Conclusion .....   | 73 |
| 5.6. Impact du choix de la loi statistique.....                                 | 73 |
| 5.6.1. Introduction.....  | 73 |
| 5.6.2. Calculs des débits caractéristiques.....                                 | 74 |
| 5.6.3. Conclusion .....   | 76 |
| 6 Conclusion générale et perspectives.....                                      | 77 |
| 7 Bibliographie.....  | 79 |

## 1 INTRODUCTION

L'étude hydrologique d'un bassin versant peut avoir différents objectifs : étude des ressources en eau, des inondations, etc. Peu importe l'objectif, une étude hydrologique repose sur des données hydrométriques (pluie, débit, niveau de nappe, etc...) et/ou des résultats de simulations hydrologiques eux-mêmes dépendants de données hydrométriques.

Une étude hydrologique se base sur l'étude de variables hydrologiques extraites de données hydrométriques acquises sur le territoire d'étude. Une variable hydrologique est choisie selon la problématique que l'on cherche à étudier. Dans le cadre de ce rapport, les variables hydrologiques auxquelles on s'intéresse sont issues exclusivement des hydrogrammes (ou séries temporelles de débit): débit instantané maximal annuel, débit minimum moyen sur 10 jours consécutifs ( $VCN_{10}$ ) et moyenne annuelle.

L'étude d'une variable hydrologique consiste le plus souvent en une analyse fréquentielle visant à calculer la probabilité de non-dépassement de telle valeur de débit pour une variable hydrologique donnée et inversement de calculer le quantile, i.e. le débit correspondant à une probabilité donnée. Le quantile est ce que l'on définit comme débit caractéristique dans ce rapport. Dans la suite du rapport, on parlera de période de retour  $T$  plutôt que de probabilité au non-dépassement  $p$ . Selon qu'on s'intéresse aux extrêmes maximaux ou extrêmes minimaux, la relation entre  $T$  et  $p$  est :

$$\begin{array}{l} \text{extrêmes minimaux} \\ T = \frac{1}{p} \end{array}$$

$$\begin{array}{l} \text{extrêmes maximaux} \\ T = \frac{1}{1-p} \end{array}$$

On a classiquement recours à des lois statistiques permettant d'approcher la « vraie » distribution de la variable hydrologique. L'échantillon limité de données permet alors d'estimer les paramètres de la loi statistique. Cette dernière permet d'estimer les débits correspondants à de grandes périodes de retour.

L'estimation des paramètres d'une loi statistique s'appuie sur un nombre limité de données rendant inévitablement l'estimation incertaine. Il s'agit de l'incertitude d'échantillonnage. De plus, les données servant à l'estimation, typiquement les hydrogrammes, sont elles-mêmes incertaines car leur acquisition repose sur des mesures incertaines, des hypothèses, des simplifications, etc. On parle là d'incertitudes hydrométriques. Les incertitudes hydrométriques se propagent à toute utilisation que l'on fait des données hydrométriques. C'est notamment le cas pour l'estimation des paramètres d'une loi statistique. Un débit caractéristique estimé est donc affecté par deux types d'incertitude : les incertitudes d'échantillonnage et les incertitudes hydrométriques.

La présente étude s'intéresse à ces deux sources d'incertitudes associées à l'estimation de débits caractéristiques. Dans quelle mesure les incertitudes hydrométriques impactent-elles l'estimation des débits caractéristiques? Les incertitudes d'échantillonnage parfois prises en compte dans les études hydrologiques sont souvent considérées seules, les incertitudes hydrométriques étant implicitement supposées négligeables. Cette étude a pour objectif d'évaluer la validité d'une telle hypothèse. De plus, elle vise à développer une méthodologie adaptée pour la propagation des incertitudes hydrométriques aux débits caractéristiques.

L'étude a été financée par le Service Central Hydrométéorologique et d'Appui à la Prévention des Inondations (SCHAPI) et a été menée par l'unité Hydrologie-Hydraulique d'Irstea Lyon-Villeurbanne. L'étude s'est déroulée sur 10 mois (de janvier 2016 à octobre 2016). Les données utilisées sont issues de la banque Hydro, de la base de données BDOH<sup>1</sup>, et dans le cas de la station néo-zélandaise du lac Wanaka, elles ont été transmises par des collègues du Otago Regional Council. Des outils déjà existant ont également été mis à profit:

- la méthode BaRatin pour l'estimation des incertitudes associées aux courbes de tarage et la propagation des incertitudes aux hydrogrammes
- JBay, méthode développée à Irstea pour l'estimation des paramètres de lois statistiques et de leurs incertitudes.

L'étude se limite aux cas des stations hydrométriques simples: pas de détarage, pas d'hystérésis, pas d'influence aval variable, ...

La méthodologie, développée dans le cadre de cette étude, a été appliquée dans deux contextes différents :

- sur des stations hydrométriques réelles pour lesquelles on dispose de séries temporelles suffisamment longues (> 30 ans) pour l'estimation de débits caractéristiques afin d'illustrer la mise en œuvre de la méthode et de présenter des résultats typiques.
- sur des stations hydrométriques fictives (et des bassins versant fictifs) permettant de maîtriser les facteurs susceptibles d'influencer l'importance relative des incertitudes d'échantillonnage et hydrométriques. Les parts des différentes sources d'incertitudes ont été étudiées selon les durées des hydrogrammes, la variable hydrologique, l'hydrologie du bassin versant, la sensibilité des contrôles hydrauliques et le choix de la loi statistique.

Le rapport se décompose en trois parties principales:

- présentation des outils utilisés et description détaillée de la méthodologie déployée pour la propagation des incertitudes hydrométriques aux débits caractéristiques ;
- application sur des cas réels ;
- études synthétiques sur des cas fictifs.

Avant une conclusion et quelques perspectives, le rapport comprend une partie synthétisant les principaux résultats de l'étude donnant lieu à une courte discussion.

---

<sup>1</sup> <https://bdoh.irstea.fr/>

## 2 OUTILS ET METHODES UTILISES

Dans cette partie les outils déjà existant utilisés dans l'étude sont présentés. Une courte description de chacun d'entre eux est faite avec des références vers des documents détaillés.

### 2.1 BARATIN (BAYESIAN RATING CURVE ANALYSIS)

Pour une présentation détaillée de la méthode BaRatin, l'article de Le Coz et al. (2014) fait référence. Pour une présentation tant pratique que théorique, la documentation de la nouvelle interface graphique BaRatinAGE 2.0 (lien : [https://forge.irstea.fr/projects/baratinage\\_v2/files](https://forge.irstea.fr/projects/baratinage_v2/files)) est également très complète. Ici, les grands principes de la méthode sont rappelés.

#### 2.1.1. ESTIMATION DES INCERTITUDES ASSOCIEES AUX COURBES DE TARAGE

La méthode BaRatin permet d'estimer une courbe de tarage et l'incertitude qui y est associée. La méthode repose sur deux sources d'information :

- L'analyse hydraulique de la station hydrométrique : le site de la station hydrométrique doit être étudié afin de déterminer quels sont les contrôles hydrauliques (caractéristiques physiques du site contrôlant la relation entre la hauteur d'eau et le débit) en jeu pour toutes les gammes de hauteur d'eau (des débits d'étiage aux débits de crue). Cette analyse permet d'établir une relation entre la hauteur d'eau et le débit *a priori* sous forme d'une équation en plusieurs morceaux (pour les différentes gammes de hauteurs identifiées). Il s'agit d'une combinaison de lois puissances :  $Q(h) = a(h - b)^c$  où  $Q$  et  $h$  sont respectivement le débit et la hauteur d'eau. La détermination des *a priori* pour les paramètres  $a$ ,  $c$  et  $k$  (hauteur d'activation des contrôles) pour chaque contrôle se base sur des équations hydrauliques simplifiées (Manning-Strickler simplifiée pour un contrôle par le chenal, équation de seuil (horizontal ou triangulaire), orifice, ...). Les paramètres  $b$  sont calculés par continuité de la courbe de tarage. Une équation d'une courbe de tarage *a priori* est ainsi établie comprenant plusieurs paramètres. Chaque paramètre est donné à BaRatin sous forme d'une valeur et d'une incertitude associée, qui représente la connaissance *a priori* que l'on a sur ce paramètre.
- Les jaugeages : les mesures ponctuelles de débit et de hauteur viennent compléter l'analyse hydraulique. Chaque jaugeage est entaché d'incertitude qu'il est nécessaire d'estimer en amont de l'application de BaRatin. Des méthodes permettant l'estimation des incertitudes de jaugeage existent selon la technique de mesure utilisée : par exemple, pour les jaugeages par exploration du champ de vitesse la méthode ISO748 (ISO, 2013) ou encore la méthode Q+ (Le Coz et al., 2012) peuvent être utilisées. Il est également possible d'utiliser des valeurs typiques selon la méthode utilisée. Le guide de l'ONEMA (Le Coz et al., 2011) fait l'inventaire des techniques de jaugeages et des méthodes d'estimation d'incertitude ainsi que des valeurs typiques d'incertitudes.

BaRatin, par inférence bayésienne, calcule une distribution *a posteriori* de chaque paramètre de la courbe de tarage à partir des distributions données *a priori* et des jaugeages incertains. Ainsi, BaRatin produit  $n$  jeux de paramètres correspondant à  $n$  courbes de tarage possibles rendant ainsi compte de l'incertitude associée à la courbe de tarage. Une courbe de tarage plus probable est également donnée : la *MaxPost*.

Baratin permet de distinguer deux types d'incertitude associée à la courbe de tarage :

- les incertitudes paramétriques, représentées par les  $n$  jeux de paramètres de la courbe de tarage ;
- les incertitudes structurelles, représentées par l'ajout d'une erreur  $\varepsilon_s^{RC}$  au débit estimé par une courbe de tarage  $j$  ( $j \in \llbracket 1, n \rrbracket$ ),  $\widehat{Q}_j$ , qui suit une loi Normale centrée en 0 et dont l'écart-type est une loi affine du débit  $\widehat{Q}_j$  :  $\varepsilon_s^{RC} = N(0, \gamma_1 + \gamma_2 \widehat{Q}_j)$ . Les deux paramètres  $\gamma_1$  et  $\gamma_2$  sont également estimés dans l'inférence bayésienne. L'incertitude structurelle rend compte de la dispersion des jaugeages qui ne peut être expliquée ni par les incertitudes des jaugeages, ni par l'équation de la courbe de tarage.

### 2.1.2. PROPAGATION DES INCERTITUDES AUX HYDROGRAMMES

Des récents développements autour de la méthode BaRatin permettent la propagation des incertitudes aux hydrogrammes. Cette nouvelle fonctionnalité est incluse dans BaRatinAGE 2.0. La documentation (lien: [https://forge.irstea.fr/projects/baratinage\\_v2/files](https://forge.irstea.fr/projects/baratinage_v2/files)) offre une description détaillée de la méthode autant sur les aspects théoriques que pratiques. Deux rapports d'études sont également consultables pour une description détaillée de la méthode et des exemples d'applications concrets (Horner et al, 2015a, 2015b). De plus, un article scientifique a été soumis à ce sujet (Horner et al., soumis).

La propagation des incertitudes aux hydrogrammes permet de considérer les incertitudes provenant des mesures en continu des hauteurs d'eau (du limnigramme) en plus des incertitudes provenant de la courbe de tarage, estimée par la méthode BaRatin (section 2.1.1). La méthode distingue deux grandes familles d'erreurs affectant les limnigrammes:

- les erreurs non-systématiques: les mesures faites par le limnigraphe sont affectées par des erreurs complètement dé-corrélées dans le temps. Ces erreurs proviennent de l'appareil de mesure (bruit de mesure) quelle que soit la technologie utilisée (capteur de pression, radar, ...) et des vaguelettes à la surface de l'eau dues aux vents, aux conditions hydrauliques, etc...
- les erreurs systématiques: celles-ci proviennent des erreurs de calage du capteur par rapport à la référence (l'échelle limnimétrique extérieure). Le calage n'est jamais parfait (erreurs de lecture de l'échelle, précision de l'échelle, précision du capteur, ...) et des dérives du calage sont souvent observées (vieillesse de composante du capteur, ...). Ces erreurs ont un caractère systématique. Elles perdurent au cours du temps entre deux recalages du capteur. Nous faisons l'hypothèse que ces erreurs sont constantes sur ces périodes et affectent donc les mesures de hauteurs d'une même erreur inconnue entre deux recalages du capteur.

Ces deux types d'erreurs sont quantifiables de différentes façons:

- expertise, connaissances du site et des valeurs typiques du bruit de mesure (informations fournies par le constructeur) et de l'amplitude typique des vaguelettes, écart entre échelle limnimétrique et capteur typiquement observés lors des visites terrain.
- données disponibles: mesures répétées d'une même hauteur d'eau réelle (pour les erreurs non-systématiques), dates des visites terrain et écart observés avant recalage du capteur par rapport à l'échelle de référence (pour les erreurs systématiques)

Des écart-types doivent être estimés pour rendre compte de ces deux types d'erreurs :  $\sigma_{NS}^h$  pour les erreurs non-systématiques et  $\sigma_S^h$  pour les erreurs systématiques. De plus, les dates des recalages du capteur ou à défaut une périodicité moyenne des recalages est nécessaire afin de ré-échantillonner les erreurs systématiques à certaines dates.

BaRatin fournit  $n$  courbes de tarage possibles. Pour chacune d'entre elles, un limnigramme est calculé à partir du limnigramme mesuré auquel est ajouté :

- une série temporelle d'erreurs non-systématique générée à partir d'une loi Normale centrée sur 0 et dont l'écart-type  $\sigma_{NS}^h$  est estimé comme mentionné ci-dessus.
- une série temporelle d'erreurs systématiques: pour chaque période séparant un recalage (ou pour des périodes arbitrairement choisies selon la périodicité moyenne des recalages) une valeur est tirée dans une loi Normale centrée sur 0 et dont l'écart-type  $\sigma_S^h$  est estimé comme mentionné ci-dessus.

BaRatin calcule  $n$  hydrogrammes à partir des  $n$  limnigrammes ainsi calculés et des  $n$  courbes de tarage préalablement estimées par BaRatin. Ces  $n$  hydrogrammes rendent compte de l'incertitude hydrométrique provenant à la fois de la courbe de tarage (incertitudes paramétrique et structurelle) et du limnigramme (incertitudes provenant des erreurs systématiques et non-systématiques).

## 2.2. JBay : ESTIMATION DES PARAMETRES DE LOIS STATISTIQUES PAR INFERENCE BAYESIENNE

JBay est un logiciel permettant d'estimer les paramètres d'une loi statistique par inférence Bayésienne. La documentation associée à JBay détaille les aspects théoriques et pratiques de cette méthode (<https://forge.irstea.fr/projects/thebay/files>). Dans le cadre de la présente étude, seul l'exécutable utilisé par l'interface graphique JBay a été utilisé afin de pouvoir automatiser les estimations via des scripts R (<https://cran.r-project.org/>).

JBay repose sur l'inférence Bayésienne. Les paramètres de la loi statistique choisie sont estimés à la fois à partir des données (la variable extraite de l'hydrogramme) et d'*a priori* sur les valeurs des paramètres. Dans le cadre de cette étude, les *a priori* utilisés ont toujours été non-informatifs. A partir d'un jeu de données, l'estimateur produit  $m$  jeux de paramètres de la loi choisie, ceux-ci représentant l'incertitude associée à l'estimation des paramètres de la loi.

Un jeu de paramètres plus probable est également donné par JBay : la *MaxPost*.

### 3 DES DONNEES DE DEBITS INCERTAINES AUX DEBITS CARACTERISTIQUES INCERTAINS

#### 3.1. PRINCIPE GENERAL

Le principe général (Figure 1) de la méthode permettant d'estimer les incertitudes associées aux débits caractéristiques peut se résumer en deux ensembles distincts :

- L'estimation des incertitudes affectant les données hydrométriques
- L'estimation des incertitudes associées à l'estimation des lois statistiques et donc des débits caractéristiques

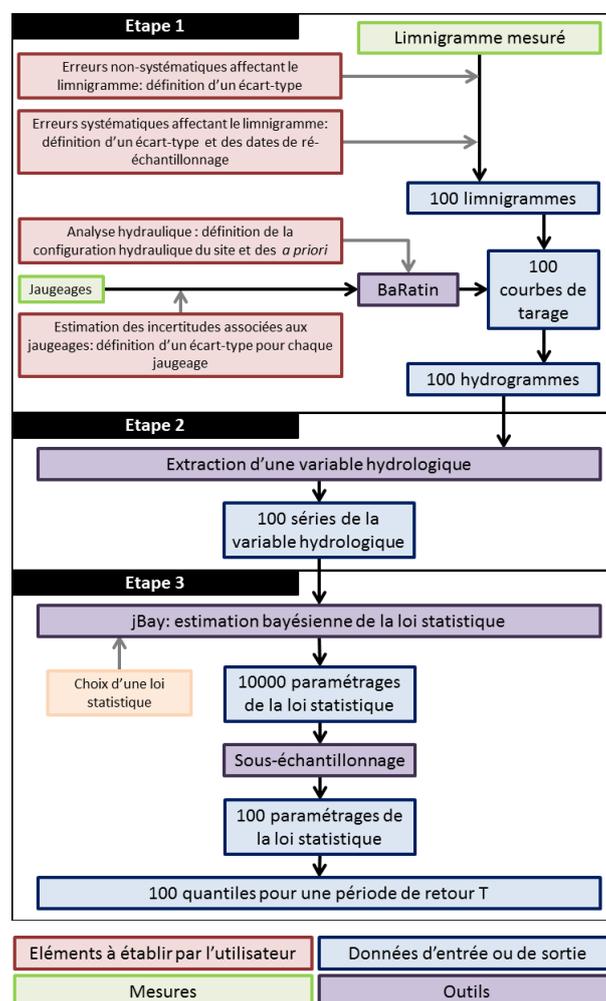


Figure 1: Principe général de la propagation des incertitudes aux débits caractéristiques.

Les données hydrométriques utilisées pour l'estimation des paramètres d'une loi statistique sont en effet affectées d'incertitudes. Celles-ci proviennent d'une part du limnigramme mesuré et d'autre part de la courbe de tarage (section 3.2). Elles se propagent lors de l'extraction des variables hydrologiques de l'hydrogramme incertain (section 3.3). Les incertitudes sont prises en compte sous la forme d'une ensemble de  $n$  réalisations possibles (voir la section 2.1) ; dans le cadre de ce rapport 100 réalisations sont utilisées.

L'estimation de la loi statistique (section 3.4), choisie pour être cohérente avec la variable hydrologique que l'on étudie, se fait par inférence Bayésienne sans connaissance *a priori* sur les valeurs des paramètres de la loi (voir la section 2.2). L'estimation se fait sur chaque réalisation ( $n = 100$ ) de la série temporelle de la variable hydrologique. Chacune de ces estimations produit  $m$  jeux de paramètres possibles pour la loi statistique ; dans le cadre de ce rapport  $m = 100$ . Le résultat consiste donc en 100 ensembles de 100 jeux de paramètres de la loi statistique qui rendent compte de l'incertitude totale : les incertitudes hydrométriques combinées aux incertitudes d'échantillonnage. Un sous-échantillonnage sélectionne au hasard 100 réalisations parmi les 10000 ( $n \times m$ ), pour éviter que le temps de calcul soit trop grand.

### 3.2. ETAPE 1 : LES HYDROGRAMMES INCERTAINS

L'application de la méthode BaRatin et la propagation des incertitudes aux hydrogrammes conduit à l'obtention de  $n = 100$  hydrogrammes.

Il est possible de prendre en compte seulement certaines sources d'incertitudes voire d'en isoler une seule. On peut alors avoir plusieurs expériences de propagation d'incertitude. Afin de pouvoir étudier les importances relatives des différentes sources d'incertitudes, les expériences de propagation d'incertitude suivantes ont systématiquement été faites:

- uniquement les incertitudes provenant des paramètres de la courbe de tarage : incertitude paramétrique.
- uniquement les incertitudes provenant de l'erreur structurelle de la courbe de tarage : incertitude structurelle.
- uniquement les incertitudes provenant des erreurs non-systématis affectant le limnigramme: incertitudes limnimétriques (erreurs non-systématis)
- uniquement les incertitudes provenant des erreurs systématiques affectant le limnigramme: incertitudes limnimétriques (erreurs systématiques)
- toutes les sources d'incertitudes combinées: incertitudes hydrométriques totales
- seuls le limnigramme mesuré et la courbe de tarage *MaxPost* (la plus probable) estimée par BaRatin sont utilisés : aucune incertitude

Au total, 6 expériences de propagation sont donc réalisées. Celles-ci sont représentées dans la Figure 2 où la procédure d'échantillonnage est explicitement représentée sur deux réalisations (parmi les  $n$  réalisations).

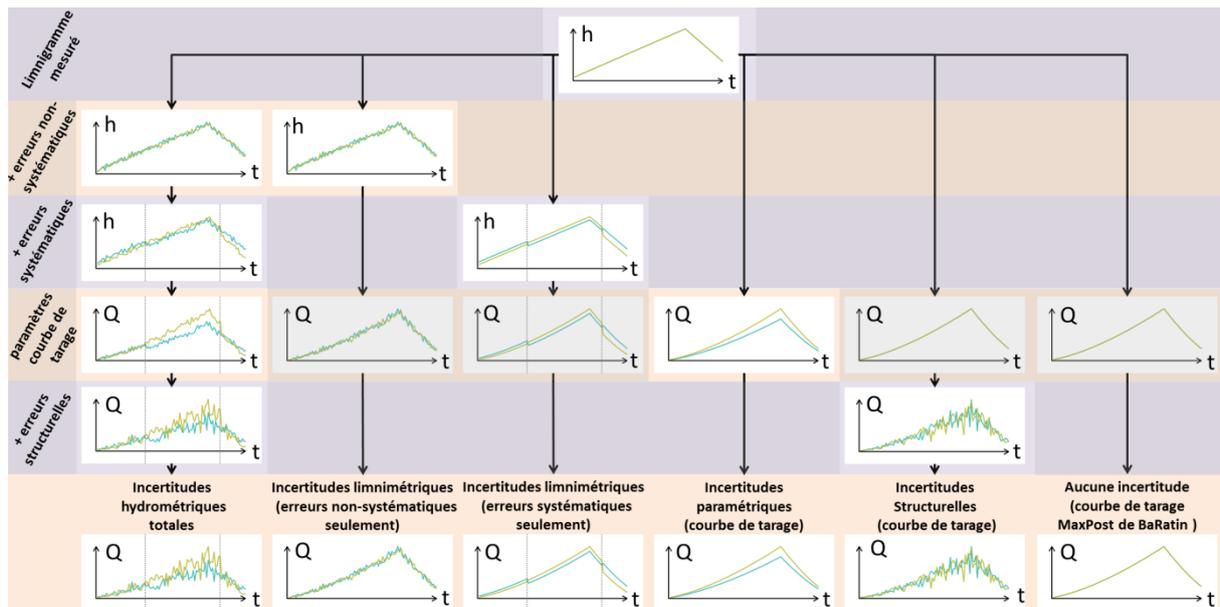


Figure 2: 6 expérience de propagation des incertitudes depuis le limnigramme jusqu'à l'hydrogramme. La figure présente le processus d'échantillonnage en détail pour deux réalisations.

### 3.3. ETAPE 2 : EXTRACTION D'UNE VARIABLE HYDROLOGIQUE

L'estimation d'un débit caractéristique pour un bassin versant donné passe nécessairement par l'extraction d'une variable hydrologique que l'on souhaite étudier. Par exemple, pour l'estimation d'une crue centennale, la variable hydrologique que l'on peut étudier est le maximum annuel. Dans cette étude, les efforts ont été concentrés sur 3 variables hydrologiques fréquemment utilisées:

- les maximums annuels: débit instantané maximal sur une année hydrologique (du 01 septembre X au 31 août X+1). Cette variable permet d'étudier les crues.
- les moyennes annuelles: débit moyen d'une année hydrologique (du 01 septembre X au 31 août X+1). Il s'agit d'une variable hydrologique incontournable pour l'étude des ressources en eau d'un bassin versant, de ses années particulièrement humides ou sèches, etc...
- les  $VCN_{10}$ : valeur minimale d'une moyenne glissante de 10 jours sur une année hydrologique (du 01 janvier X au 31 décembre X). Cette variable permet d'étudier les étiages.

Les 3 variables hydrologiques choisies permettent de couvrir des problématiques classiques d'hydrologie, des gammes de débits variés (extrêmes maximums, débits moyens et extrêmes minimum) et des degrés d'agrégation temporelle contrastés (débits instantanés, moyennés sur 1 an et moyennés sur 10 jours).

Quelle que soit la variable hydrologique étudiée, son extraction des séries de débits incertaines se fait de la façon suivante: elle est extraite de chacun des  $n$  hydrogrammes résultant de l'étape 1. Ainsi, si 100 hydrogrammes sont générés à l'étape 1, 100 extractions de la variable sont faites. Ainsi, il en résulte 100 séries temporelles de la variable hydrologique qui rendent compte des incertitudes hydrométriques. Le principe de cette étape est illustré par la Figure 3.

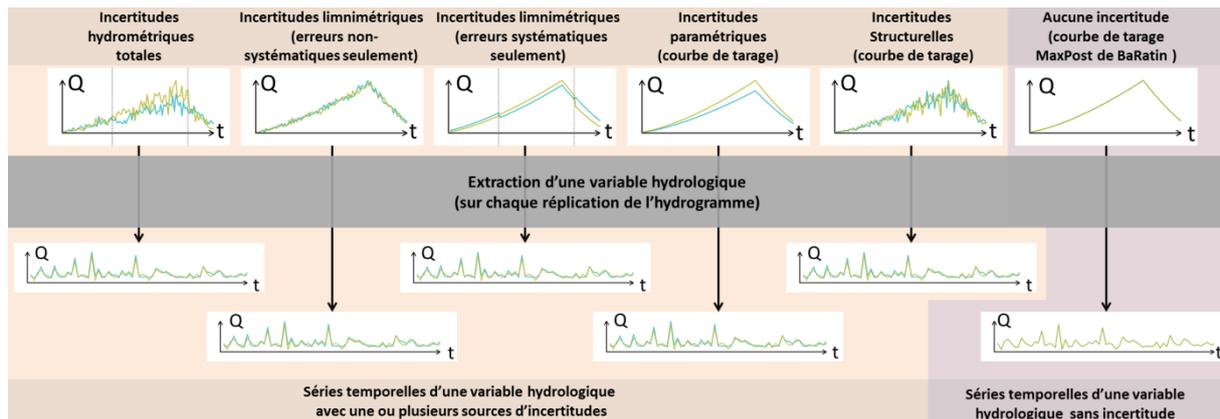


Figure 3: Illustration du principe de l'extraction d'une variable hydrologique depuis les hydrogrammes incertains. La figure présente l'extraction pour deux réalisations à partir des résultats des 6 expériences de propagation de l'étape 1.

### 3.4. ETAPE 3 : ESTIMATION DES PARAMETRES D'UNE LOI STATISTIQUE

#### 3.4.1. PRINCIPE GENERAL

Plusieurs lois peuvent être utilisées suivant la variable hydrologique. Dans cette étude, nous avons retenu les lois suivantes:

- pour les maximums annuels: loi de Gumbel et loi GEV (Generalized Extreme Value distribution ou loi d'extremum généralisée) ;
- pour les moyennes annuelles: loi LogNormale ;
- pour les  $VCN_{10}$ : loi GEV adaptée aux valeurs minimale (GEV\_min).

Ces lois ont plusieurs paramètres (2 dans les cas des lois de Gumbel et LogNormale et 3 dans le cas de la loi GEV) dont les valeurs peuvent être estimées à partir des données, c'est-à-dire des séries temporelles des variables hydrologiques extraites.

Afin de prendre en compte l'incertitude hydrométrique et l'incertitude d'échantillonnage, la procédure décrite dans ce paragraphe a été suivie ; celle-ci est illustrée par la Figure 4. Pour une variable hydrologique donnée nous disposons de  $x$  années et de  $n$  réalisations (celles-ci rendant compte de l'incertitude hydrométrique). Pour chacune de ces réalisations, une estimation des paramètres de la loi choisie est faite, résultant en  $m$  jeux de paramètres possibles (ceux-ci rendant compte de l'incertitude d'échantillonnage). Ainsi,  $m \times n$  jeux de paramètres sont produits rendant compte de l'incertitude d'échantillonnage combinée à l'incertitude hydrométrique. Un sous échantillonnage de ces  $m \times n$  jeux de paramètre est ensuite fait afin de limiter la quantité de données à manipuler. Dans cette étude 100 réalisations ont été faite pour l'incertitude hydrométrique et également 100 pour l'incertitude d'échantillonnage. Les 10000 jeux de paramètres ont ensuite été sous échantillonnés pour ne retenir que 100 jeux de paramètres parmi les 10000.

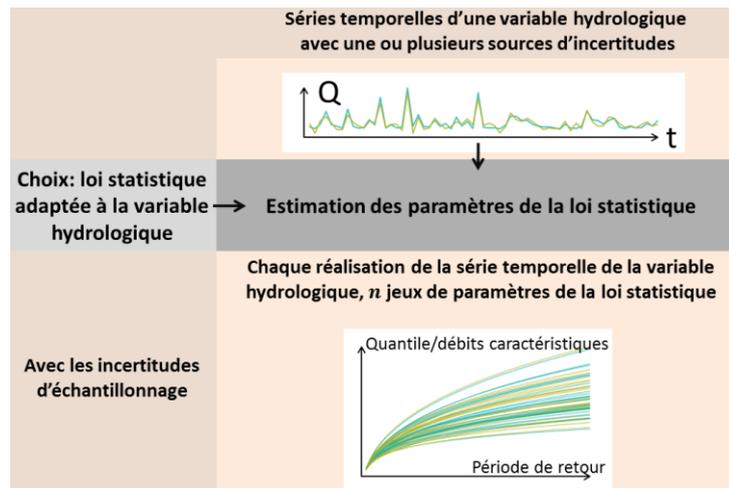


Figure 4: Illustration du principe de la propagation des incertitudes hydrométriques aux estimations de débits caractéristiques. La figure présente le processus d'échantillonnage pour deux réalisations rendant compte de l'incertitude hydrométrique associée à la série temporelle de la variable hydrologique.

### 3.4.2. ÉTUDE DE L'IMPORTANCE RELATIVE DES INCERTITUDES D'ÉCHANTILLONNAGE ET HYDROMÉTRIQUES

Dans la section 3.4.1 l'estimation des paramètres de la loi statistique est décrite pour obtenir une estimation rendant compte à la fois de l'incertitude d'échantillonnage et de l'incertitude hydrométrique. Dans le cadre de l'étude, il est intéressant de pouvoir isoler l'une ou l'autre afin de pouvoir étudier les importances relatives de ces deux sources d'incertitudes. L'approche suivante a été retenue (voir la Figure 5):

- pour isoler l'incertitude hydrométrique: au lieu de retenir les  $m$  réalisations issues de l'estimation des paramètres de la loi statistique, seulement la réalisation *MaxPost* est retenue; ainsi 100 jeux de paramètres sont produits rendant uniquement compte de l'incertitude hydrométrique. Notez que l'incertitude hydrométrique peut correspondre à l'incertitude totale ou à une incertitude partielle, en fonction de l'expérience de propagation (voir la section 3.2).
- pour isoler l'incertitude d'échantillonnage: parmi les  $n$  réalisations rendant compte de l'incertitude hydrométrique, seulement la réalisation *MaxPost* de BaRatin est retenue pour estimer les paramètres de la loi statistique; ainsi, seulement 100 jeux de paramètres sont produits par JBay, ceux-ci rendant compte uniquement de l'incertitude d'échantillonnage.

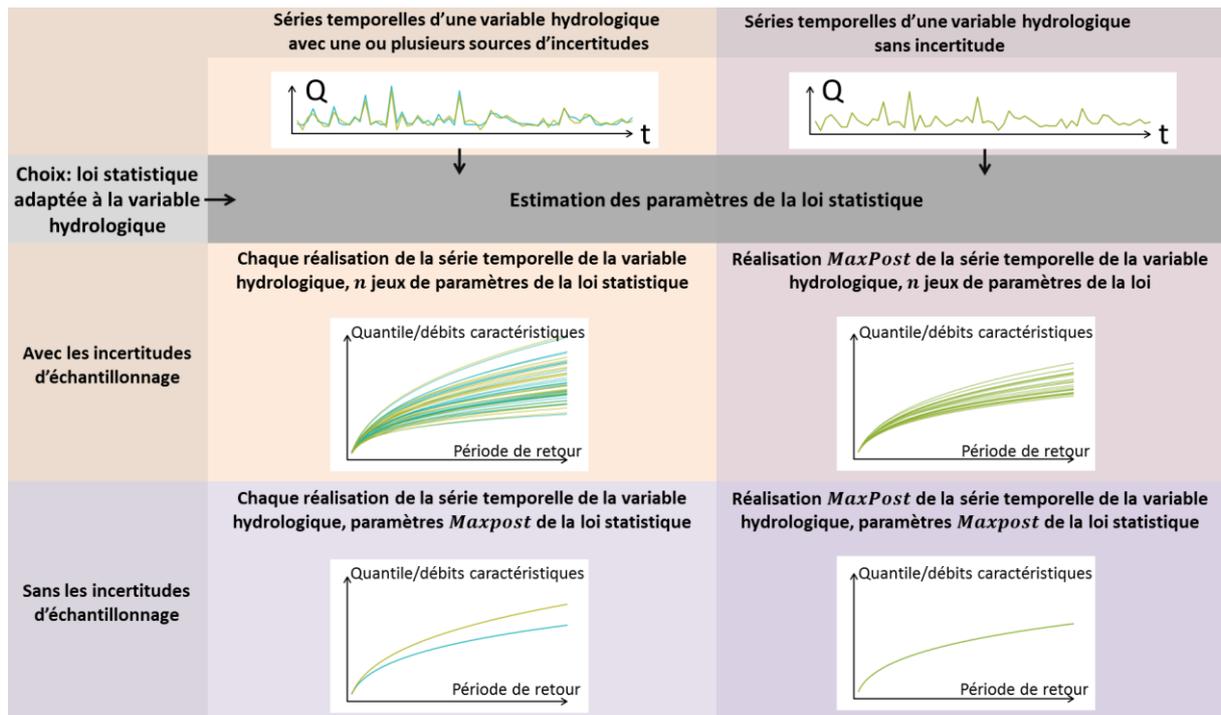


Figure 5: Illustration du principe de propagation des incertitudes aux débits caractéristiques permettant d'isoler les incertitudes hydrométriques et/ou d'isoler les incertitudes d'échantillonnage.

## 4 APPLICATIONS DE LA METHODOLOGIE A 4 STATIONS HYDROMETRIQUES

### 4.1. LAKE WANAKA A ROYS BAY (NOUVELLE-ZELANDE)

La station hydrométrique à l'exutoire du lac Wanaka en Nouvelle-Zélande est choisie comme premier exemple d'application pour sa simplicité et la longueur du limnigramme qui en fait une station modèle. En effet, aucun détarage n'a eu lieu depuis sa mise en service en février 1933. Ainsi une chronique longue d'environ 82 ans peut être utilisée avec une seule courbe de tarage. En revanche l'hydrologie est assez particulière du fait de l'effet tampon du lac : les étiages sont très limités et les crues très lentes.

#### 4.1.1. ESTIMATION DES INCERTITUDES SUR LES HYDROGRAMMES

##### 4.1.1.1. ANALYSE BARATIN DE LA STATION HYDROMETRIQUE

###### ANALYSE HYDRAULIQUE

L'analyse hydraulique du site conduit à considérer un unique contrôle de type chenal. En effet, le niveau d'eau ne descend jamais suffisamment pour la mise en jeu de radier naturel en tant que contrôle et aucun débordement du chenal n'a lieu.

Dans le formalisme BaRatin, l'analyse hydraulique conduit à la matrice de Bonnifait (ou matrice des contrôles) suivante :

|                                   |                        |
|-----------------------------------|------------------------|
|                                   | Contrôle par le chenal |
| 1 <sup>ère</sup> gamme de hauteur | Actif                  |

Les caractéristiques physiques du chenal ont été définies *a priori* de la façon suivante :

- Largeur : 90m+/-5
- Pente : 8e-4+/-3.3e-5
- Niveau moyen du chenal : -2m+/-2
- Coefficient de Strickler : 25m<sup>1/3</sup>.s<sup>-1</sup>+/-5

Les paramètres *a priori* pour BaRatin découlant de ces *a priori* physiques sont les suivants :

|                           | $k_i$    | $a_i$          | $c_i$         |
|---------------------------|----------|----------------|---------------|
| Contrôle chenal : $i = 1$ | -2 +/- 2 | 63.64 +/- 13.3 | 1.67 +/- 0.05 |

###### LES JAUGEAGES

Tous les jaugeages disponibles et valides de la station ont été conservés pour l'étude soit 321 jaugeages au total faits entre le 16 janvier 1968 et le 21 juillet 2015. Une incertitude forfaitaire de +/- 7% a été attribuée à tous les jaugeages.

###### LES RESULTATS DE BARATIN

BaRatin produit 100 jeux de paramètres correspondant à 100 courbes de tarage. Les distributions *a priori* et *a posteriori* de ces paramètres sont représentées en Figure 6.

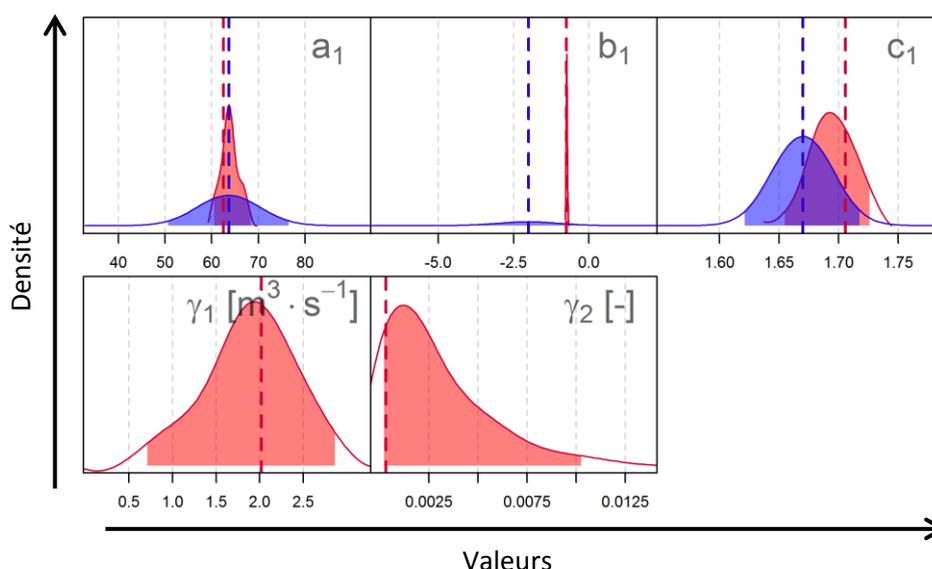


Figure 6: Lake Wanaka - paramètres de la courbe de tarage BaRatin *a priori* (bleu) et *a posteriori* (rouge). Les traits verticaux symbolise la valeur centrale *a priori* (bleu) et la valeur *a posteriori* MaxPost (rouge).

Les paramètres *a priori* et *a posteriori* ne montrent aucune incompatibilité. Les incertitudes associées aux paramètres  $a_1$  et  $b_1 (= k_1)$  sont beaucoup plus faibles *a posteriori*. Les paramètres  $\gamma_1$  et  $\gamma_2$  permettent de définir l'écart-type de l'erreur structurelle. Le terme  $\gamma_1$  représente l'incertitude absolue en m<sup>3</sup>.s<sup>-1</sup>; on constate qu'il est très faible au vue des gammes de débits de cette station, supérieures à 50 m<sup>3</sup>.s<sup>-1</sup>. Le terme  $\gamma_2$  représente l'incertitude relative; il est également très faible, de l'ordre de 0.1% à 1% du débit.

Ces 100 jeux de paramètres permettent de tracer la courbe de tarage *a posteriori* ainsi que les enveloppes d'incertitude à 95% par simple calcul des quantiles 2.5% et 97.5% pour chaque hauteur d'eau (Figure 7).

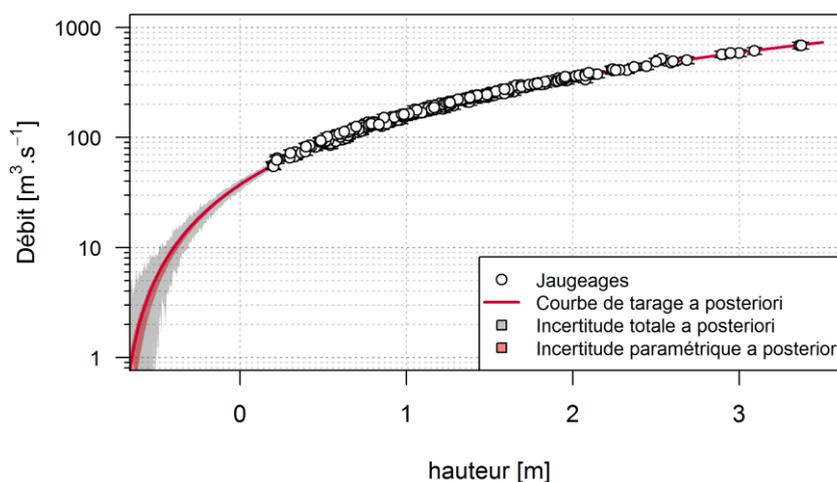


Figure 7: Lake Wanaka - Courbes de tarage BaRatin *a posteriori* et les jaugeages.

#### 4.1.1.1. PROPAGATION DES INCERTITUDES AUX HYDROGRAMMES

##### LES ERREURS AFFECTANT LE LIMNIGRAMME

Les mesures des hauteurs d'eau sont faites sur le lac dans un puit de stabilisation. Aucune donnée précise sur les erreurs systématiques ou non-systématiques affectant le limnigramme n'étant

disponibles, nous avons fait les choix suivants, qui paraissent raisonnables au vu des pratiques des services hydrométriques en charge du suivi de la station :

- Erreurs non-systématiques : +/- 1cm
- Erreurs systématiques : +/- 2cm avec une re-calibration du capteur avec l'échelle de référence faite en moyenne tous les deux mois (60 jours).

La Figure 8 présente le limnigramme mesuré et un zoom sur les années récentes. Cela permet notamment d'avoir un aperçu de la dynamique de l'hydrologie du site.

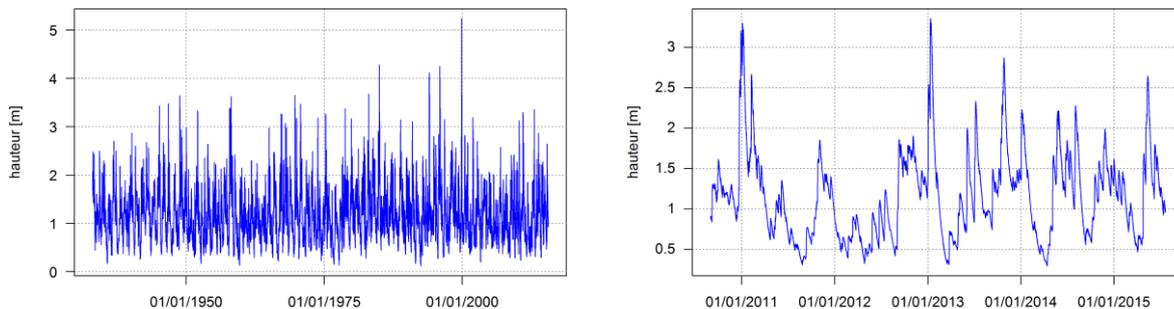


Figure 8: Lake Wanaka - Limnigramme complet (gauche) et sur les années 2011-2015 (droite).

### CALCUL DES HYDROGRAMMES

100 limnigrammes sont générés en ajoutant les erreurs systématiques et non-systématiques au limnigramme mesuré. Ceux-ci servent ensuite pour la propagation des incertitudes via les 100 courbes de tarage produites par BaRatin. On obtient ainsi 100 hydrogrammes qui rendent compte à la fois des incertitudes paramétriques et structurelles de la courbe de tarage et des incertitudes associées au limnigramme.

La Figure 9 présente une des réalisations de l'hydrogramme.

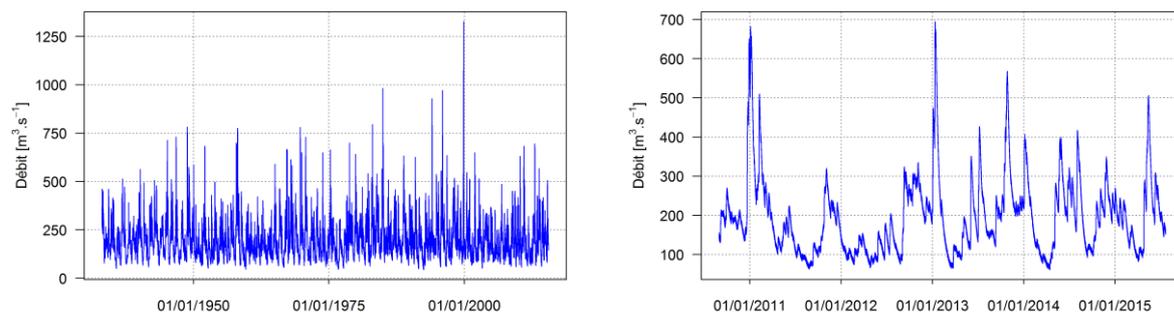


Figure 9: Lake Wanaka - Hydrogramme complet (gauche) et sur les années 2011-2015 (droite).

La Figure 10 présente l'ensemble des pas de temps journalier après agrégation du résultat brut de BaRatin qui lui est à pas de temps variable. Il s'agit d'une courbe de débits classés permettant de visualiser l'ensemble des débits de la chronique et les incertitudes associées pour les différentes gammes de débits.

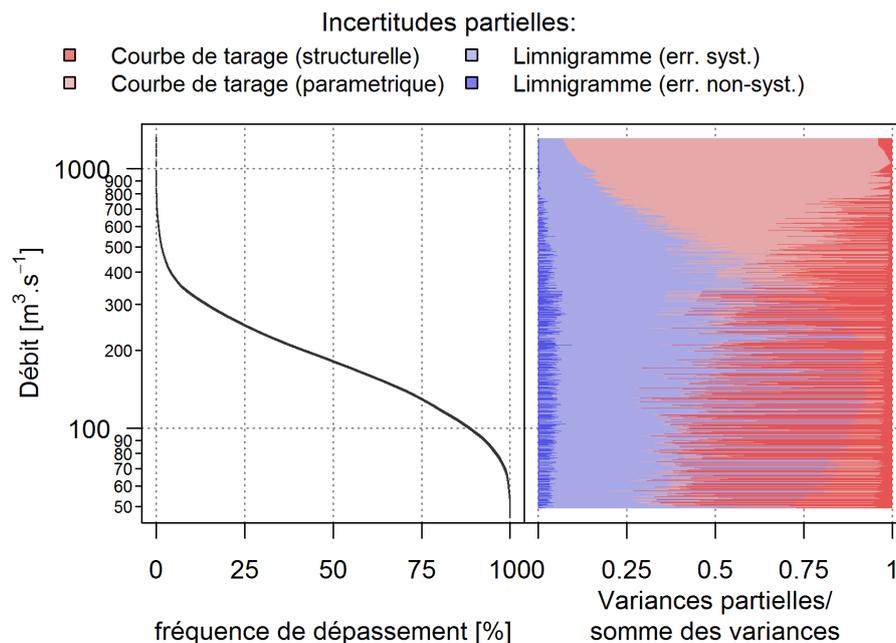


Figure 10: Lake Wanaka - Courbe des débits classés et incertitude associée (gauche) et part relative des différentes incertitudes (droite).

La partie droite de la Figure 10 permet une visualisation simple des parts relatives des différentes sources d'incertitudes. Pour les 4 types d'incertitudes représentées (correspondant à 4 expériences de propagation, voir la section 3.2) la variance partielle est divisée par la somme des 4 variances partielles.

La Figure 10 permet de voir que les débits les plus fréquents se situent entre  $100\text{m}^3.\text{s}^{-1}$  et  $300\text{m}^3.\text{s}^{-1}$ , avec des débits maximums et minimums qui sont respectivement de plus de  $1000\text{m}^3.\text{s}^{-1}$  et inférieur à  $50\text{m}^3.\text{s}^{-1}$ . Les incertitudes provenant de la courbe de tarage sont dominantes pour toutes les gammes de débit : l'incertitude structurelle est largement dominante pour les bas débits et l'incertitude paramétrique devient dominante pour les forts débits. On constate également des contributions importantes des erreurs affectant le limnigramme (en particulier les erreurs systématiques) dont les contributions diminuent pour les débits les plus forts. Rappelons néanmoins que les valeurs absolues des incertitudes sont faibles.

#### 4.1.2. ESTIMATION DES INCERTITUDES SUR LES DEBITS CARACTERISTIQUES

##### 4.1.2.1. EXTRACTION DE LA VARIABLE HYDROLOGIQUE

Les variables hydrologiques sont ensuite extraites depuis l'hydrogramme avec une extraction pour chacun des 100 hydrogrammes :

- A partir de l'hydrogramme à pas de temps variable pour les maximums instantanés
- A partir de l'hydrogramme agrégé à pas de temps horaire pour les moyennes annuelles et les  $\text{VCN}_{10}$ .

Les résultats sont présentés dans la Figure 11 sous forme de courbes de débits classés.

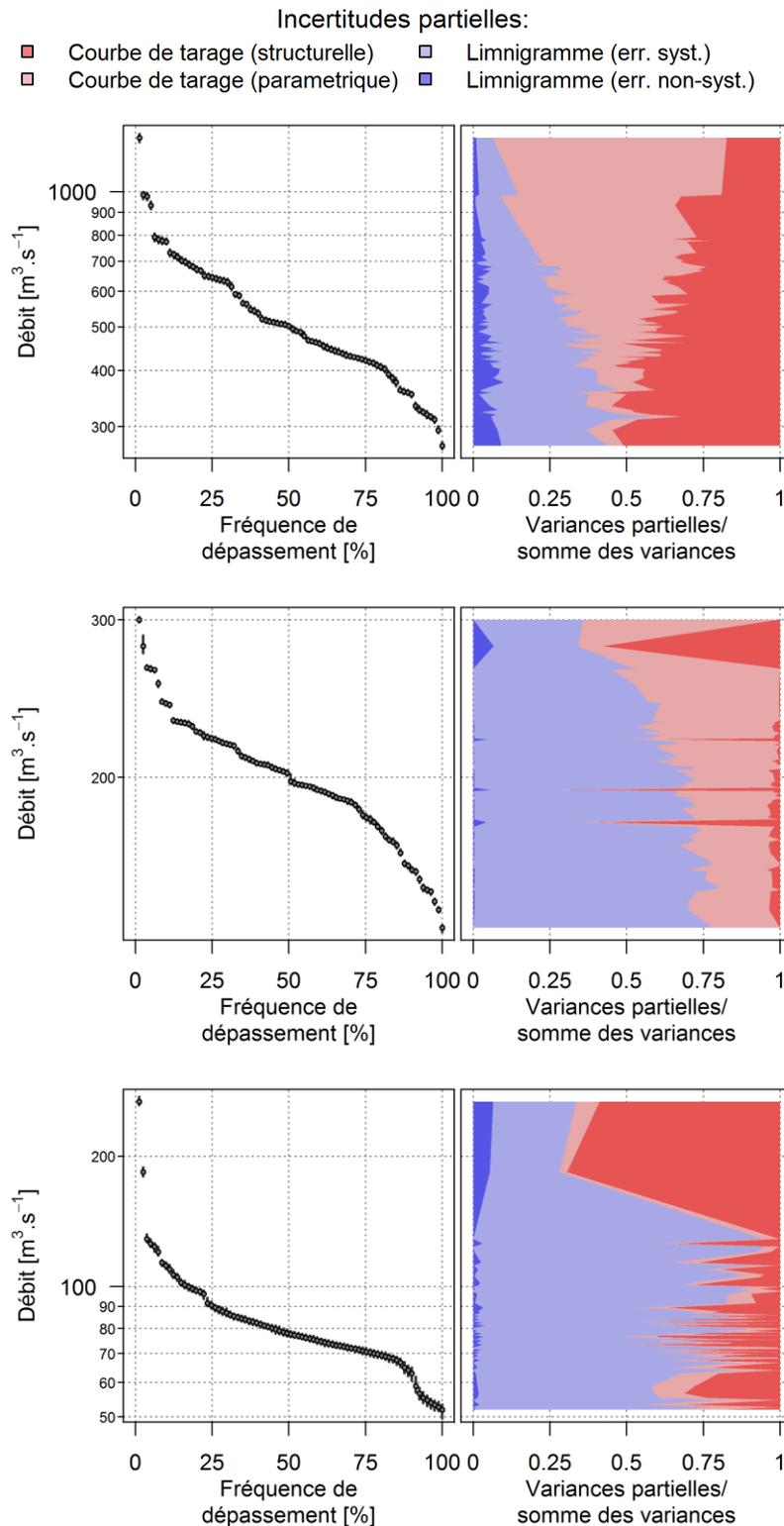


Figure 11: Lake Wanaka - Courbes des débits classés (mediane) et incertitude associée (intervalle de l'incertitude totale à 95%) (gauche) et parts relatives des différentes sources d'incertitudes (droite) des variables hydrologiques extraites de l'hydrogramme: Maximums instantanés (haut), moyennes annuelles (milieu) et VCN<sub>10</sub> (bas).

La Figure 11 permet de voir que les incertitudes provenant des erreurs limnimétriques sont dominantes pour les VCN<sub>10</sub> et les moyennes annuelles. Celles-ci sont aussi importantes pour les maximums annuels mais les incertitudes provenant de la courbe de tarage, en particulier les

incertitudes paramétriques, sont dominantes. De plus, la partie gauche de la Figure 11 montre que les incertitudes hydrométriques totales associées aux différentes variables sont faibles.

#### 4.1.2.2. ESTIMATION DES PARAMETRES DE LA LOI STATISTIQUE

##### LES MAXIMUMS ANNUELS – LOI GEV

La loi GEV est choisie pour approcher la vraie distribution des maximums annuels. Trois paramètres, sans *a priori*, sont calés à partir des 80 valeurs extraites de l'hydrogramme (correspondant à 80 années hydrologiques). L'estimation est réalisée pour différentes expériences de propagation afin de calculer l'incertitude totale (incertitude hydrométrique et incertitude d'échantillonnage), uniquement les incertitudes d'échantillonnage, et chaque source d'incertitude individuellement (voir la section 3.4.2 pour les détails). Ainsi il est possible de tracer les débits caractéristiques en fonction de la période de retour avec les contributions de chaque source d'incertitude (Figure 12).

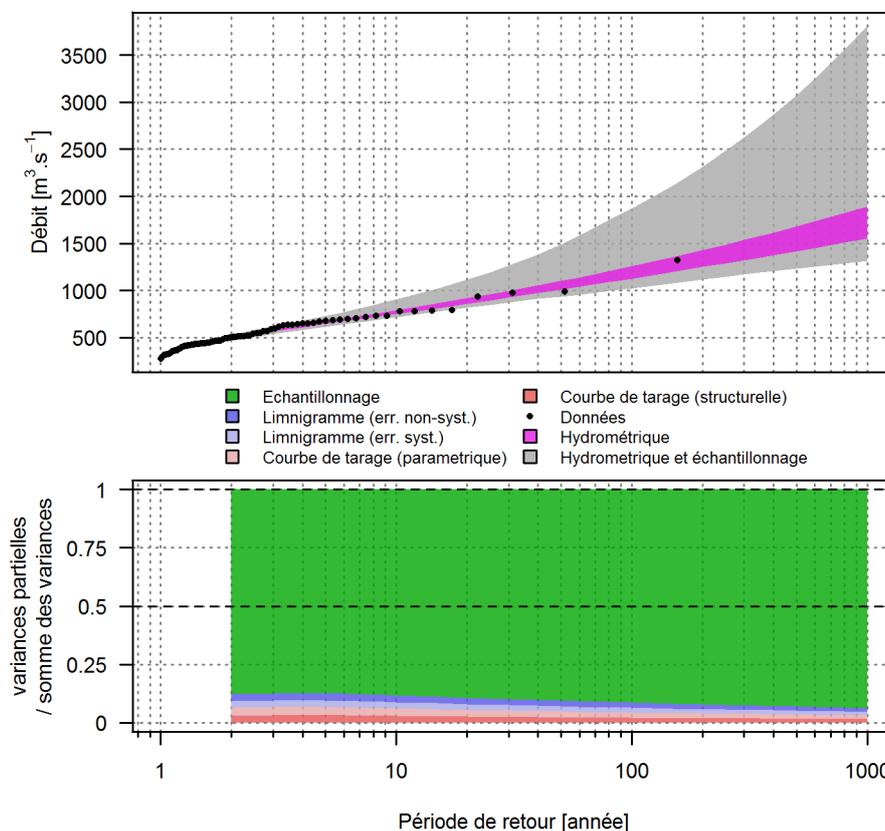


Figure 12: Lake Wanaka - Débits caractéristiques et incertitudes associées selon la période de retour pour les maximums instantanés (loi GEV).

La Figure 12 permet d'observer une large domination des incertitudes d'échantillonnage bien que le nombre d'années soit assez important. Cela est dû aux incertitudes hydrométriques très faibles pour cette station (beaucoup de jaugeages, jaugeages peu dispersés, limnigramme affecté par peu d'erreurs). Les incertitudes hydrométriques restent tout de même non-négligeables et proviennent de façon équilibrée des différentes sources d'incertitudes : la courbe de tarage (incertitudes structurelle et paramétrique) et le limnigramme (erreurs systématiques et erreurs non-systématiques). Notez que les points représentant les données sont associés à des barres

d'incertitudes ; celles-ci ne sont pas visibles ici du fait des incertitudes hydrométriques très faibles pour les maximums annuels (voir la Figure 11).

### LES MOYENNES ANNUELLES – LOI LOG NORMALE

Une loi Log Normale est choisie pour les moyennes annuelles. Deux paramètres, sans *a priori*, sont calés à partir des 80 valeurs extraites de l'hydrogramme (correspondant aux 80 années hydrologiques). Pour les moyennes annuelles il est possible de s'intéresser aux périodes de retour des moyennes les plus fortes ou moyennes humides (Figure 13) et aux périodes de retour des moyennes les plus faibles ou moyennes sèches (Figure 14).

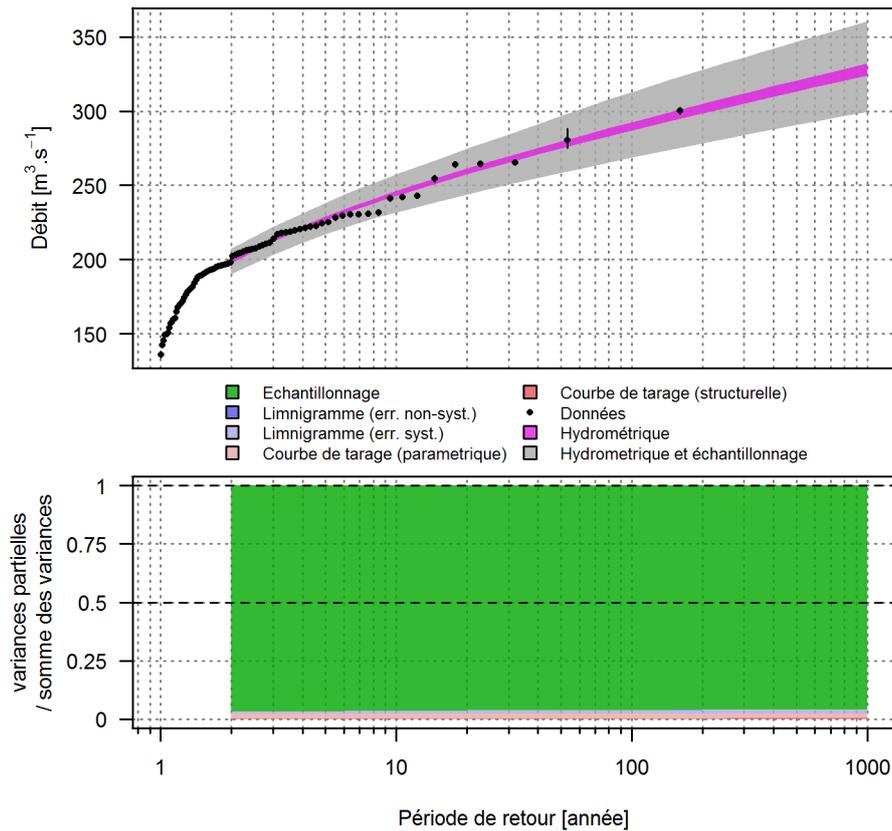


Figure 13: Lake Wanaka - Débits caractéristiques et incertitudes associées selon la période de retour pour les moyennes humides (loi LogNormale).

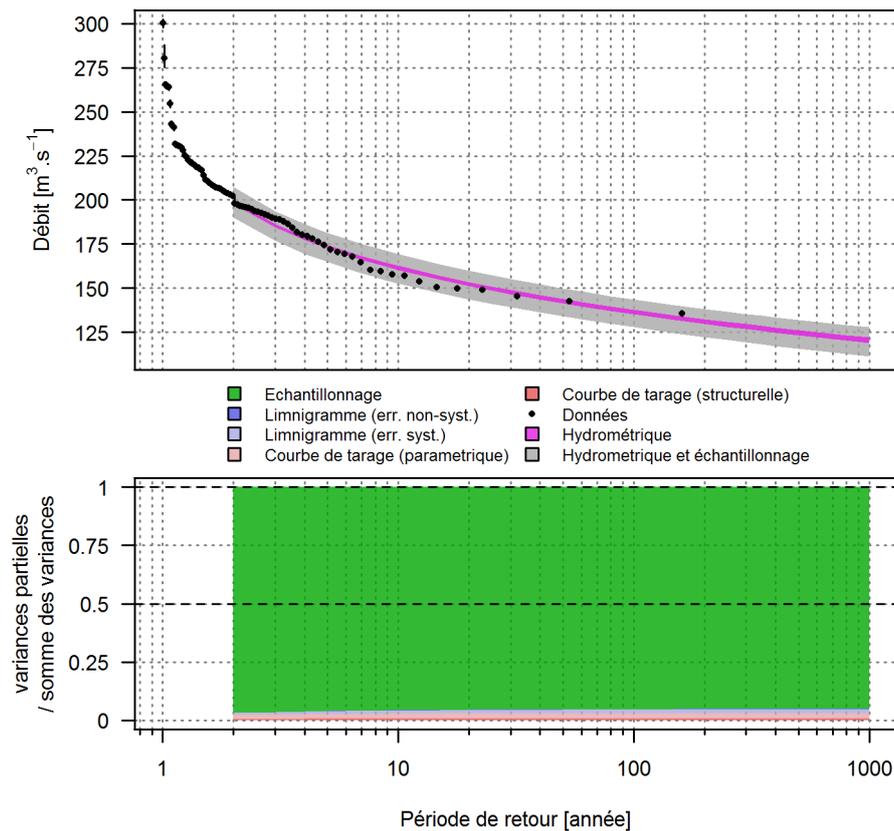


Figure 14: Lake Wanaka - Débits caractéristiques et incertitudes associées selon la période de retour pour les moyennes sèches (loi LogNormale).

On constate, dans les deux cas (Figure 13 et Figure 14), une très large domination des incertitudes d'échantillonnage. En effet, malgré la longue chronique (80 ans) qui permet de diminuer les incertitudes d'échantillonnage, les incertitudes hydrométriques très faibles (en particulier après l'agrégation temporelle sur une année qui tend à effacer toutes les erreurs à caractère non-systématique) font que les incertitudes d'échantillonnage restent largement dominantes.

### LES VCN10 – LOI GEV\_MIN

Une loi GEV\_min est choisie pour l'étude des débits caractéristiques d'étiage. Les débits en fonction de la période de retour sont présentés sur la Figure 15.

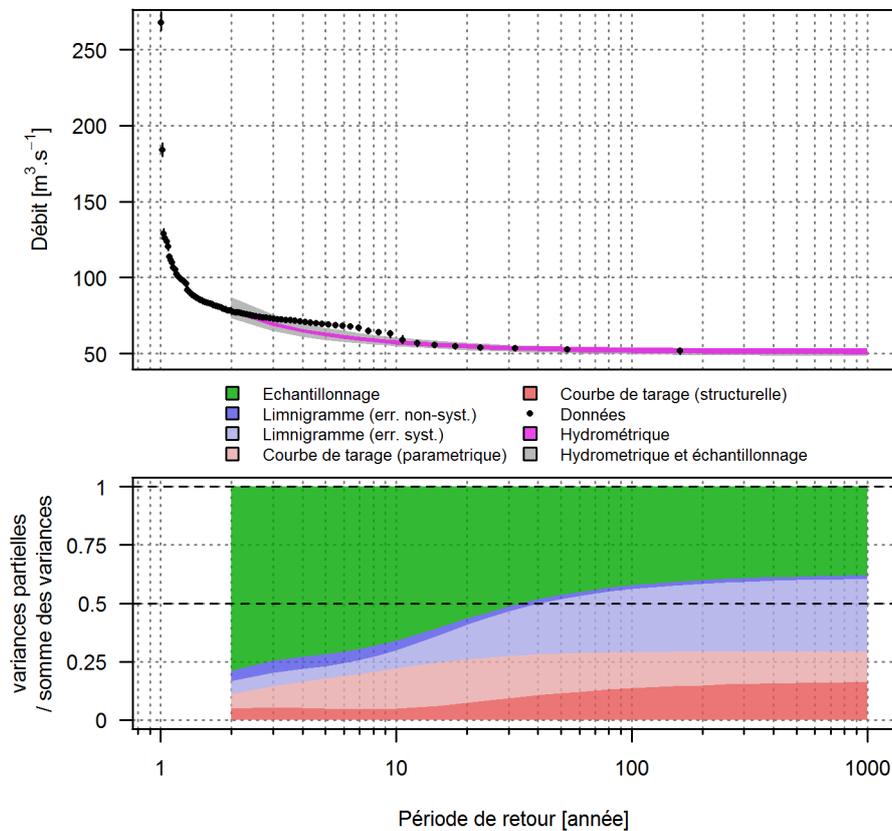


Figure 15 : Lake Wanaka - Débits caractéristiques et incertitudes associées selon la période de retour pour les VCN<sub>10</sub> (loi GEV\_min).

La Figure 15 montre une adéquation acceptable mais perfectible entre les données et la loi GEV\_min. On note que l'incertitude d'échantillonnage, dominante pour les périodes de retour faibles (inférieures à 30 ans), n'est plus dominante pour les périodes de retour plus fortes. L'incertitude hydrométrique, dominante pour les périodes de retour supérieures à 30 ans, provient de façon équilibrée de la courbe de tarage (avec une contribution équivalente entre incertitude paramétrique et incertitude structurelle) et du limnigramme (presque exclusivement des erreurs systématiques).

## 4.2. L'YZERON A CRAPONNE

La station de Craponne a déjà fait le sujet d'une étude BaRatin approfondie lors d'un stage de fin d'étude (Horner, 2014). Mise en service en 1969, plus de 45 ans de données sont disponibles pour cette station ce qui en fait un cas intéressant pour l'étude de statistiques hydrologiques. De plus, les contrôles hydrauliques de la station sont restés stables depuis la mise en service de la station hormis la suppression d'une souche sur le seuil en 1998. Deux périodes distinctes sont donc à bien différencier pour l'application de BaRatin.

### 4.2.1. ESTIMATION DES INCERTITUDES SUR LES HYDROGRAMMES

#### 4.2.1.1. ANALYSE BARATIN DE LA STATION HYDROMETRIQUE

##### ANALYSE HYDRAULIQUE

Deux périodes sont distinguées pour la mise en œuvre de BaRatin : avant et après le déracinement d'une souche située sur le seuil en béton. Ce changement de contrôle a eu lieu le 16 juillet 1998. Pour une description détaillée du site, le lecteur est invité à lire la section III.1.3 d'Horner (2014). La photo (Figure 16) permet de voir la configuration actuelle des contrôles hydrauliques de la station.



Figure 16: Yzéron - Photo des contrôles hydrauliques de la station hydrométrique de Craponne prise en 2014.

##### ■ AVANT LA SUPPRESSION DE LA SOUCHE

L'analyse hydraulique est détaillée dans le tableau ci-dessous :

|   |  |
|---|--|
| <b>1<sup>ère</sup> gamme de hauteur</b> | Ecoulement uniquement assuré par le seuil en béton dont la forme s'approche plus d'un triangle que d'un rectangle  |
| <b>2<sup>ème</sup> gamme de hauteur</b> | Ecoulement assuré par l'intégralité du seuil et éventuellement par la rive gauche. Pour les hauteurs les plus élevées de cette gamme de hauteurs un contrôle par le rétrécissement imposé par le pont (situé tout de suite à l'aval du seuil en béton) peut également être approché par un seuil horizontal d'une largeur équivalente au seuil en béton (observation d'une section critique sur une vidéo faite en crue). En rive droite, la souche fait obstacle à l'écoulement. Un seuil horizontal équivalent est choisi pour représenter l'ensemble de ces contrôles hydrauliques. |
| <b>3<sup>ème</sup> gamme de hauteur</b> | Au contrôle précédent s'ajoute le débordement au-dessus de la souche qui peut également être approché par un seuil horizontal équivalent.  |
| <b>4<sup>ème</sup> gamme de hauteur</b> | Pour les hauteurs les plus importantes, le pont entre en charge. Il a été choisi de rendre en compte de ce contrôle en l'approchant par un orifice dénoyé. D'importantes incertitudes autour de ce contrôle sont considérées étant donnée la complexité des écoulements pour ces hauteurs d'eau.   |

Cette analyse hydraulique conduit à la matrice des contrôles suivante :

|                                   | Seuil en béton | Seuil, rive gauche, pont | souche       | Orifice du pont |
|-----------------------------------|----------------|--------------------------|--------------|-----------------|
| 1 <sup>ère</sup> gamme de hauteur | <b>Actif</b>   | Inactif                  | Inactif      | Inactif         |
| 2 <sup>ème</sup> gamme de hauteur | Inactif        | <b>Actif</b>             | Inactif      | Inactif         |
| 3 <sup>ème</sup> gamme de hauteur | Inactif        | <b>Actif</b>             | <b>Actif</b> | Inactif         |
| 4 <sup>ème</sup> gamme de hauteur | Inactif        | Inactif                  | Inactif      | <b>Actif</b>    |

A partir des mesures topographiques faites sur le site en 2014, les paramètres *a priori* sont définis :

|                               | $k_i$         | $a_i$        | $c_i$       |
|-------------------------------|---------------|--------------|-------------|
| Seuil triangulaire : $i = 1$  | 0.365 +/-0.05 | 12.1 +/-3.8  | 2.5 +/-0.05 |
| Seuil rectangulaire : $i = 2$ | 0.7 +/-0.15   | 12 +/-6.5    | 1.5 +/-0.05 |
| Seuil rectangulaire : $i = 3$ | 1.2 +/-0.45   | 2.1 +/-1     | 1.5 +/-0.05 |
| Orifice : $i = 4$             | 1.85 +/-0.2   | 28.8 +/-15.1 | 0.5 +/-0.05 |

▪ **APRES LA SUPPRESSION DE LA SOUCHE**

Un « trou » se trouve à l'emplacement de la souche. On garde donc exactement les mêmes *a priori* aux différences suivantes près :

- Le contrôle par la souche est enlevé.
- La largeur du seuil équivalent pour le contrôle 2 (seuil, rive gauche et pont) est prise plus grande pour prendre en compte de l'augmentation de la largeur déversante causée par la suppression de la souche.

La matrice des contrôles correspondants est :

|                                   | Seuil en béton | Seuil, rive gauche, pont | Orifice du pont |
|-----------------------------------|----------------|--------------------------|-----------------|
| 1 <sup>ère</sup> gamme de hauteur | <b>Actif</b>   | Inactif                  | Inactif         |
| 2 <sup>ème</sup> gamme de hauteur | Inactif        | <b>Actif</b>             | Inactif         |
| 3 <sup>ème</sup> gamme de hauteur | Inactif        | Inactif                  | <b>Actif</b>    |

A partir des mesures topographiques, les paramètres *a priori* sont définis :

|                               | $k_i$         | $a_i$        | $c_i$       |
|-------------------------------|---------------|--------------|-------------|
| Seuil triangulaire : $i = 1$  | 0.365 +/-0.05 | 12.1 +/-3.8  | 2.5 +/-0.05 |
| Seuil rectangulaire : $i = 2$ | 0.7 +/-0.15   | 14 +/-6.2    | 1.5 +/-0.05 |
| Orifice : $i = 3$             | 1.85 +/-0.2   | 28.8 +/-15.1 | 0.5 +/-0.05 |

### LES JAUGEAGES

Tous les jaugeages disponibles et valides de la station ont été conservés pour l'étude soit 156 jaugeages au total, réalisés entre octobre 1969 et décembre 2013. Les incertitudes suivantes ont été attribuées aux jaugeages :

- +/- 15% (83 jaugeages) :
  - o les jaugeages faits avant la suppression de la souche ;
  - o les jaugeages par exploration du champ des vitesses non documentés ;
  - o les jaugeages au saumon par intégration ;
- +/- 10% (67 jaugeages) : les jaugeages par exploration du champ des vitesses documentés ;
- +/- 5% (6 jaugeages) : les jaugeages ADCP / les jaugeages réalisés par capacités (au saut).

### LES RESULTATS DE BARATIN

Les 100 jeux de paramètres estimés par BaRatin permettent de tracer la courbe de tarage *a posteriori* ainsi que les enveloppes d'incertitude à 95% (Figure 17).

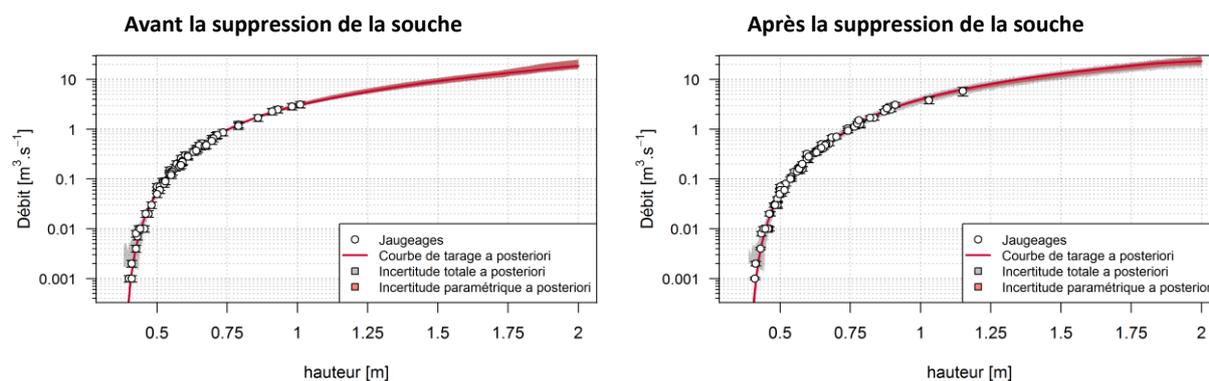


Figure 17: Zeron - Courbes de tarages BaRatin *a posteriori* et jaugeages ; avant la suppression de la souche (gauche) et après la suppression de la souche (droite).

Les courbes de tarage estimées sont en accord avec les jaugeages. Les incertitudes totales fortes à bas débit sont essentiellement dues aux erreurs structurelles. A haut débit, les incertitudes paramétriques sont très importantes. Les incertitudes paraissent sensiblement plus élevées pour la période suivant la suppression de la souche.

#### 4.2.1.2. PROPAGATION DES INCERTITUDES AUX HYDROGRAMMES

##### LES ERREURS AFFECTANT LE LIMNIGRAMME

Des incertitudes de +/- 0.5cm pour les erreurs non-systématiques et les erreurs systématiques paraissent raisonnables pour cette station bien qu'aucune information tant sur le battillage, le bruit de mesure que sur les dérives et re-calibrations du capteur ne soit disponible. Il est tout de même assez probable que ces valeurs soient sous-estimées pour les crues où un battillage beaucoup plus important est probable et où le calage du capteur est sans doute beaucoup moins fiable. Malgré tout, nous conservons cette estimation en première approximation. Pour ce qui est de la périodicité moyenne du recalage du capteur, une période de 30 jours paraît raisonnable.

La Figure 18 montre l'intégralité du limnigramme mesuré et un zoom sur l'année hydrologique 1997/1998, année de la suppression de la souche. Cela permet notamment d'avoir un aperçu de la dynamique de l'hydrologie du site.

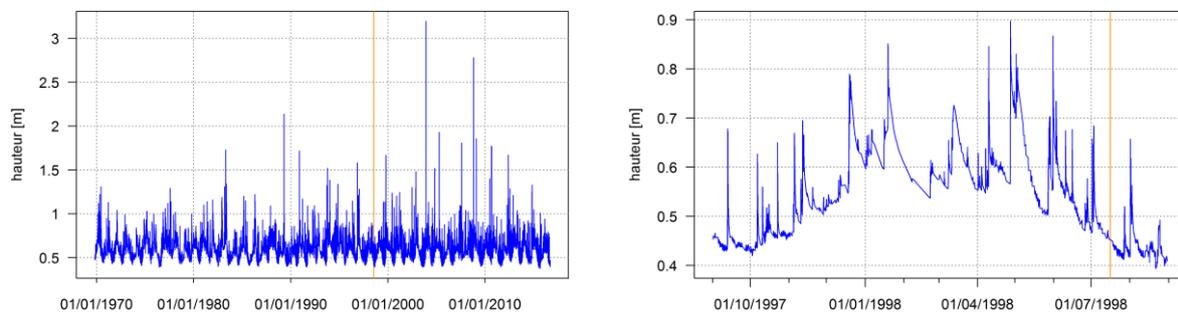


Figure 18: Yzeron - Limnigramme complet (gauche) et sur l'année hydrologique 1997-1998 (droite). Le trait vertical orange indique la date de suppression de la souche.

##### CALCUL DES HYDROGRAMMES

La propagation a été faite séparément sur les deux périodes (avant/après la suppression de la souche) utilisant les deux courbes de tarage correspondantes. Les deux hydrogrammes obtenus ont ensuite été remis bout à bout.

Une des réalisations de l'hydrogramme résultant de la propagation des incertitudes par BaRatin est présentée par la Figure 19.

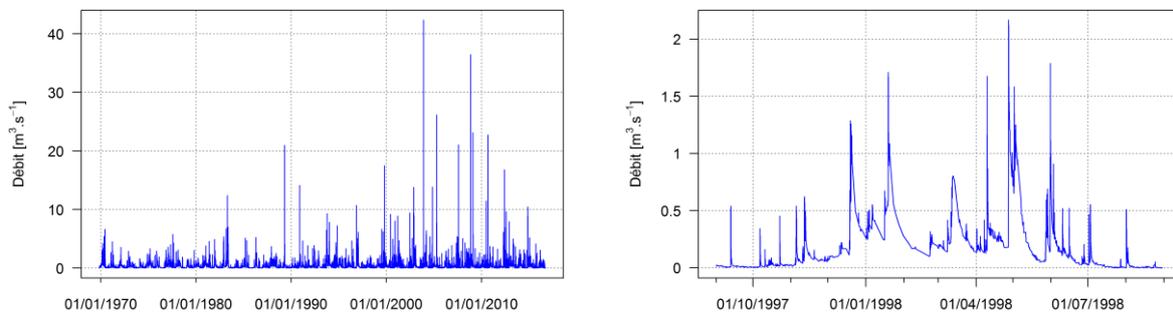


Figure 19: Yzeron - Hydrogramme complet (gauche) et sur l'année hydrologique 1997-1998 (droite).

La Figure 20 présente l'ensemble des pas de temps horaire après agrégation du résultat brut de BaRatin.

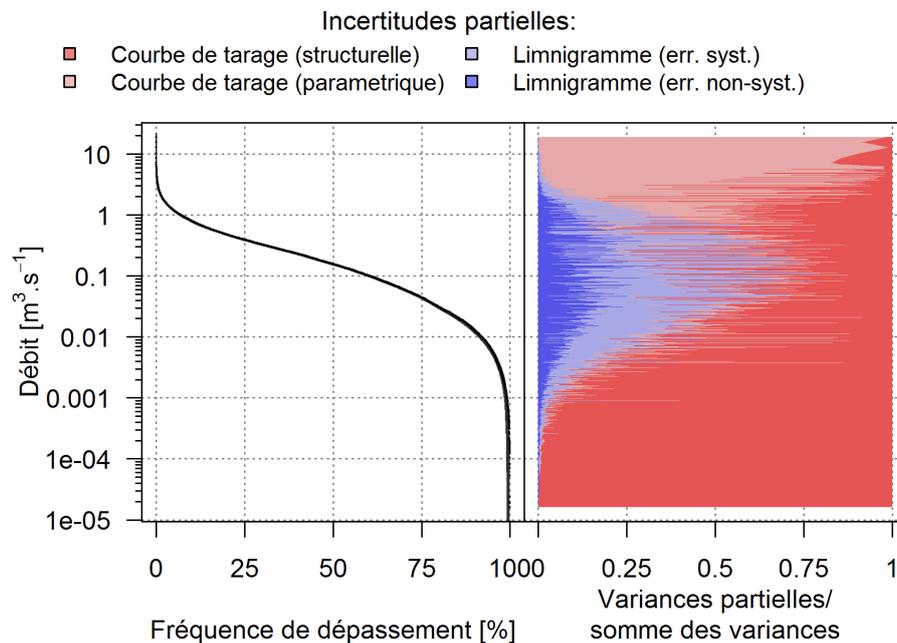


Figure 20: Yzéron - Courbe des débits classés et incertitudes associées.

La Figure 20 permet de voir une forte domination des incertitudes structurelles pour les bas débits et une forte domination des incertitudes paramétriques pour les hauts débits. Les incertitudes limnimétriques sont importantes voire dominantes pour les débits intermédiaires, les plus fréquents, entre  $0.01\text{m}^3.\text{s}^{-1}$  et  $1\text{m}^3.\text{s}^{-1}$ .

#### 4.2.2. ESTIMATION DES INCERTITUDES SUR LES DÉBITS CARACTÉRISTIQUES

##### 4.2.2.1. EXTRACTION DE LA VARIABLE HYDROLOGIQUE

Les variables hydrologiques sont ensuite extraites depuis l'hydrogramme avec une extraction pour chacun des 100 hydrogrammes. Les résultats sont présentés dans la Figure 21 sous forme de courbes de débits classés.

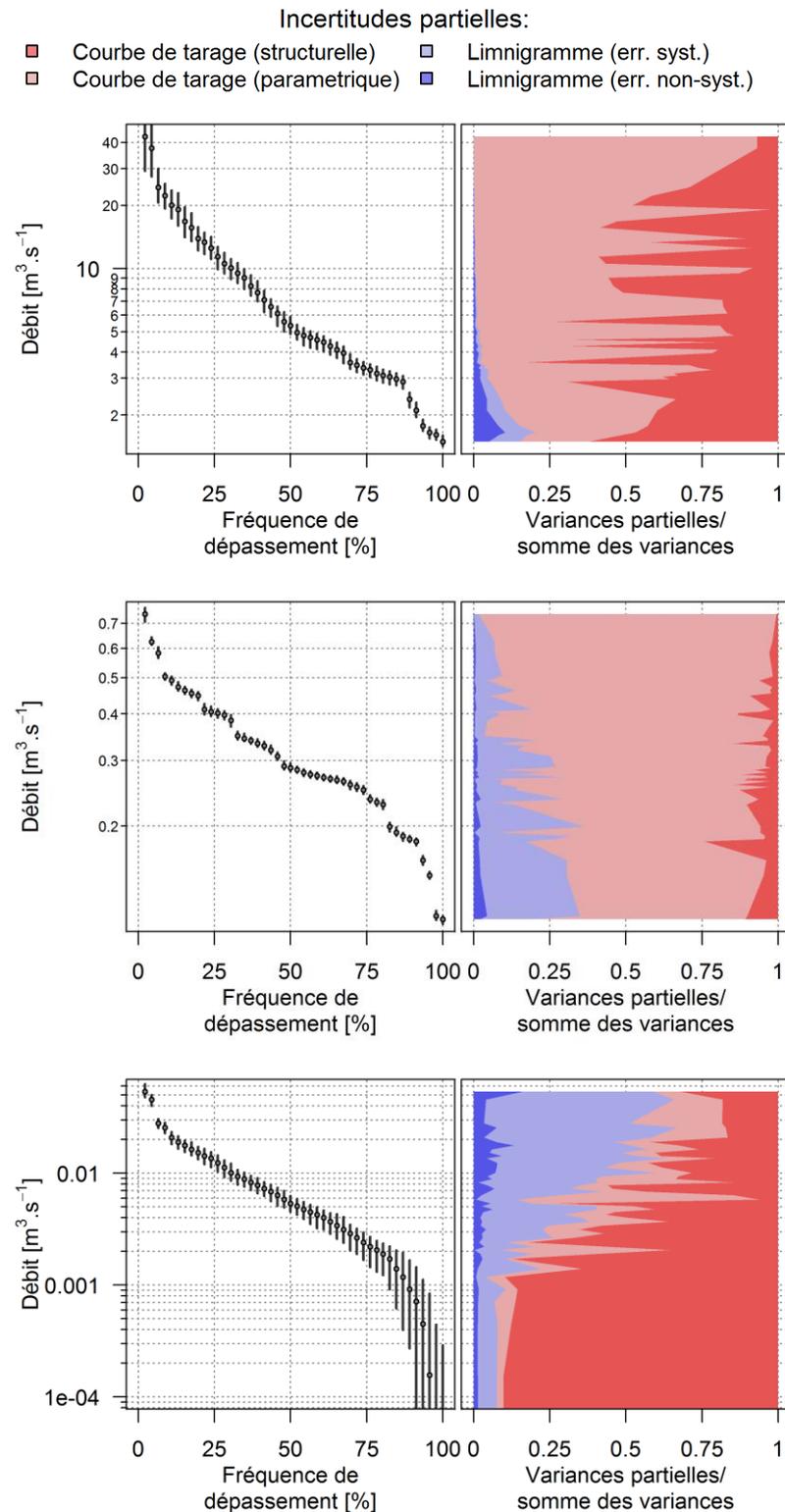


Figure 21: Yzeron - Courbes des débits classés et incertitudes associées des variables hydrologiques extraites de l'hydrogramme: Maximums instantanés (haut), moyennes annuelles (milieu) et  $VCN_{10}$  (bas).

La Figure 21 permet de voir que les incertitudes provenant de la courbe de tarage sont dominantes pour les maximums annuels et les moyennes annuelles (en particulier les incertitudes paramétriques dans le cas des moyennes annuelles). Les incertitudes associées aux moyennes annuelles sont également dues aux incertitudes limnimétriques (provenant essentiellement des erreurs systématiques), surtout pour les moyennes les plus faibles. Pour les  $VCN_{10}$ , les fortes valeurs ont des

incertitudes provenant surtout du limnigramme (erreurs systématiques) tandis que les valeurs faibles ont des incertitudes provenant essentiellement des incertitudes structurelles de la courbe de tarage.

#### 4.2.2.2. ESTIMATION DES PARAMETRES DE LA LOI STATISTIQUE

##### LES MAXIMUMS ANNUELS – LOI GEV

Pour les maximums annuels, une loi GEV est retenue pour approcher la vraie distribution de la variable. Les résultats sont présentés par la Figure 22 :

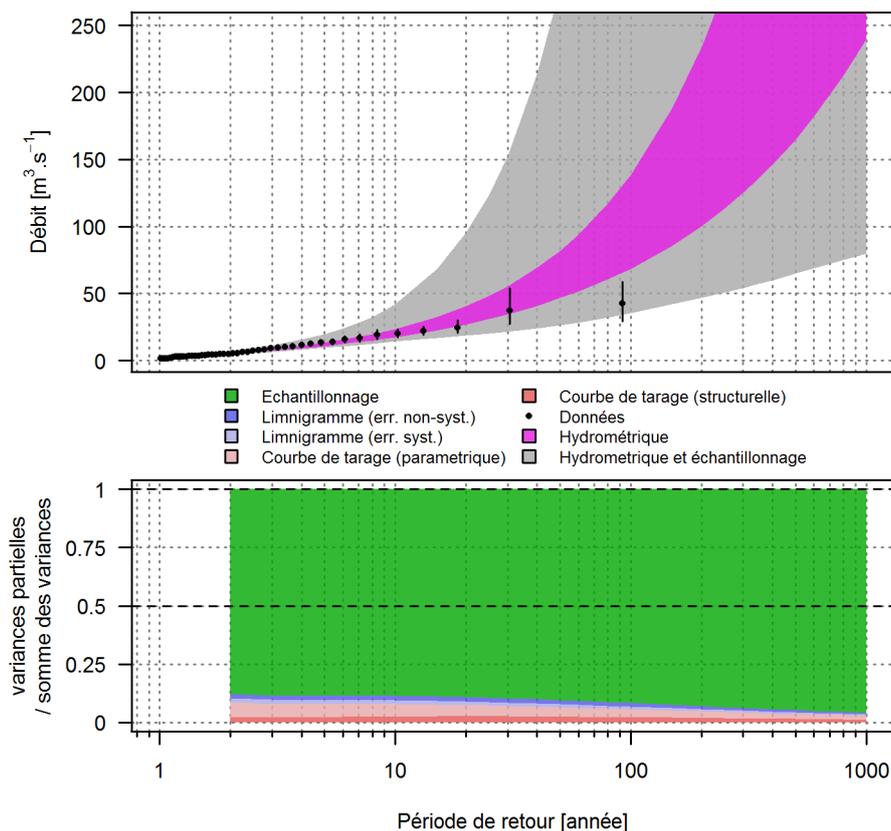


Figure 22 : Zeron - Débits caractéristiques et incertitudes associées selon la période de retour pour les maximums instantanés (loi GEV).

La Figure 22 montre des incertitudes qui deviennent très fortes pour les périodes de retour supérieures à 10 ans et qui augmentent encore plus considérablement pour les périodes de retour supérieures à 100 ans. On constate une large domination des incertitudes d'échantillonnage quelle que soit la période de retour.

##### LES MOYENNES ANNUELLES – LOI LOG NORMALE

Les résultats sont montrés pour les moyennes humides (Figure 23) et les moyennes sèches (Figure 24).

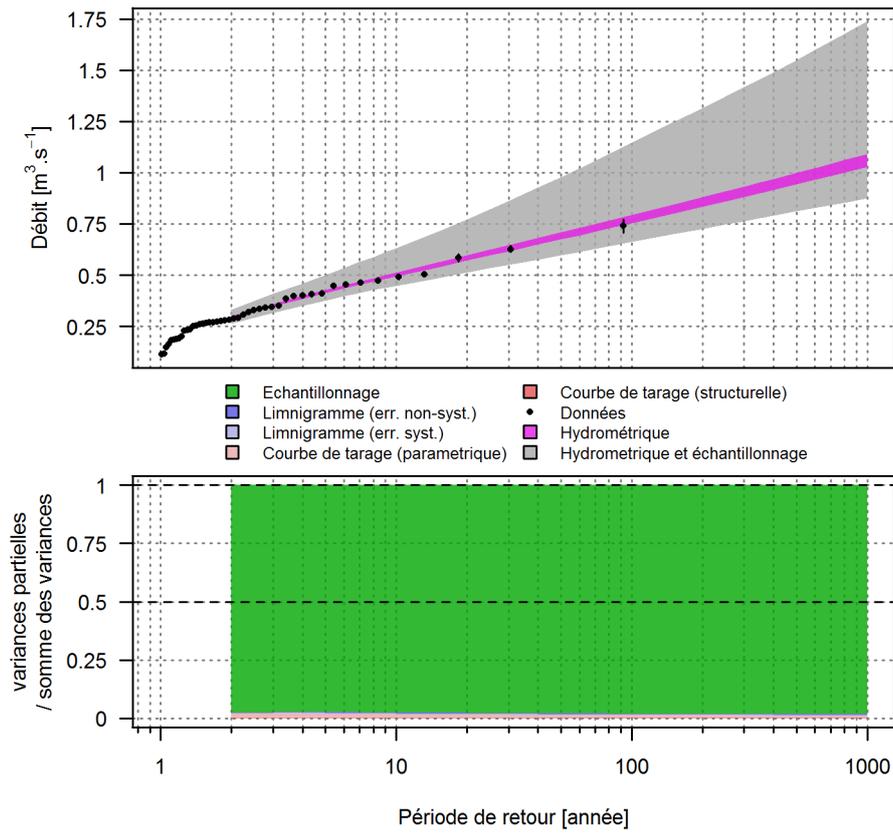


Figure 23: Yzéron - Débits caractéristiques et incertitudes associées selon la période de retour pour les moyennes annuelles humides (loi LogNormale).

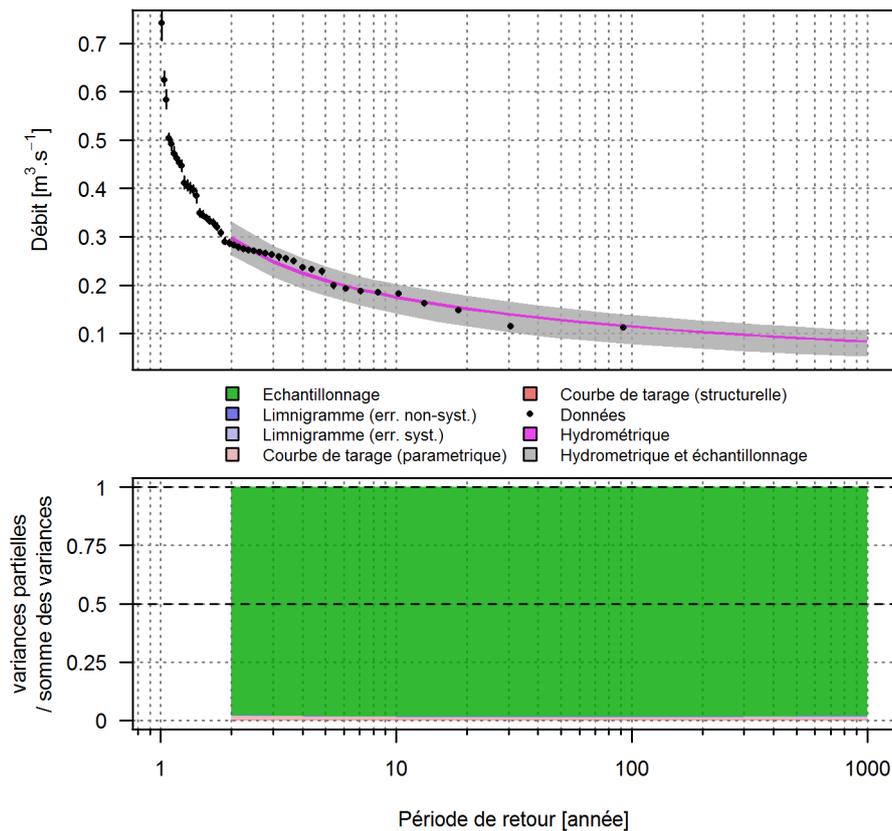


Figure 24: Yzéron - Débits caractéristiques et incertitudes associées selon la période de retour pour les moyennes annuelles sèches (loi LogNormale).

On constate un bon accord entre les données et la loi estimée. L'incertitude d'échantillonnage est presque exclusivement la seule source d'incertitude ; les incertitudes hydrométriques semblent complètement négligeables.

### LES VCN10 – LOI GEV\_MIN

Une loi GEV\_min est choisie pour l'étude des débits caractéristiques d'étiage. Les débits en fonction de la période de retour sont présentés sur la Figure 25.

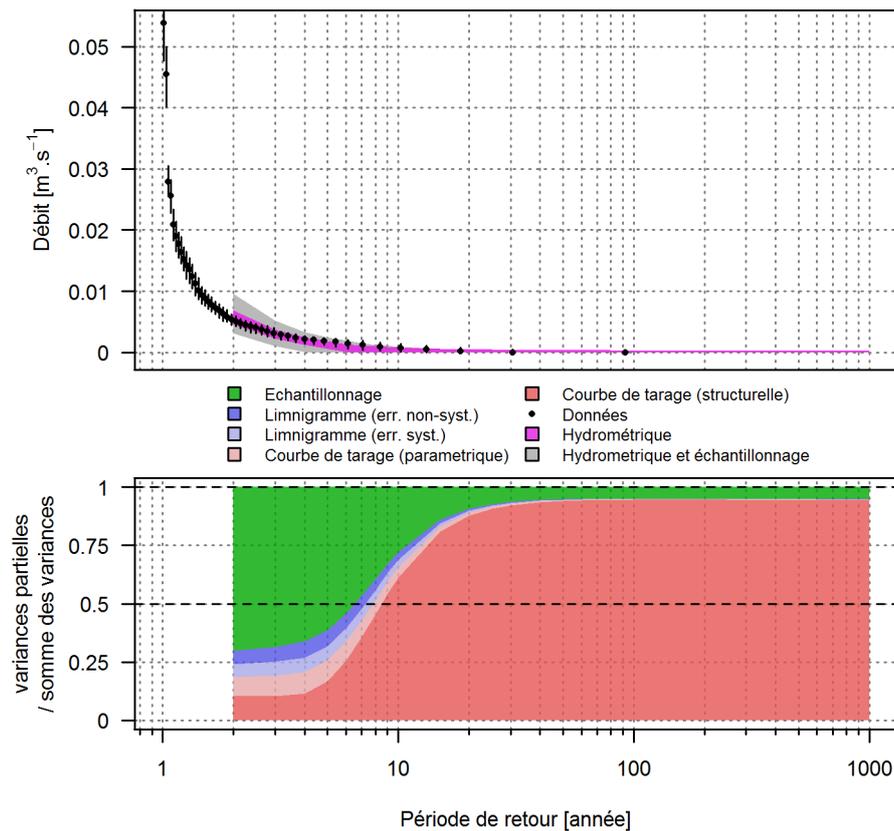


Figure 25: Zeron - Débits caractéristiques et incertitudes associées selon la période de retour pour les  $\text{VCN}_{10}$  (loi  $\text{GEV}_{\min}$ ).

La Figure 25 montre que l'adéquation entre les données et l'estimation de distribution  $\text{GEV}_{\min}$  est correcte. L'incertitude d'échantillonnage, dominante pour les périodes de retour très faibles (inférieures à 6 ans), n'est plus dominante pour les périodes de retour plus élevées. L'incertitude hydrométrique est même largement dominante pour les périodes de retour supérieures à 20 ans avec pour seule source, l'incertitude structurelle de la courbe de tarage. Il faut cependant noter que les incertitudes deviennent très faibles pour les périodes de retour supérieures à 10 ans. Ceci est dû au fait que pour les fortes périodes de retour, le quantile tend vers zéro.

### 4.3. LE REAL COLLOBRIER A VALESCURE

La station du Réal Collobrier à Valescure fait partie des stations du bassin versant expérimental du Réal Collobrier situé dans le département du Var.

#### 4.3.1. ESTIMATION DES INCERTITUDES SUR LES HYDROGRAMMES

##### 4.3.1.1. ANALYSE BARATIN DE LA STATION HYDROMETRIQUE

###### ANALYSE HYDRAULIQUE

Un déversoir, à l'aval de la station, contrôle entièrement la relation entre la hauteur et le débit. Pour les plus faibles hauteurs (<2m), un déversoir triangulaire (angle d'environ 90°) contrôle seul la relation, puis, à partir d'une hauteur d'eau de 2m, un déversoir à crête horizontale (largeur de 2.5m) s'ajoute. Enfin, pour les hauteurs d'eau les plus élevés (>2.72m), un second déversoir à crête horizontale (largeur de 5.8m) s'ajoute. La matrice des contrôles est donc :

|                                   | triangle | Premier rectangle | Second rectangle |
|-----------------------------------|----------|-------------------|------------------|
| 1 <sup>ère</sup> gamme de hauteur | Actif    | Inactif           | Inactif          |
| 2 <sup>ème</sup> gamme de hauteur | Actif    | Actif             | Inactif          |
| 3 <sup>ème</sup> gamme de hauteur | Actif    | Actif             | Actif            |

A partir des mesures topographiques faites sur le site, les paramètres *a priori* sont définis :

|                               | $k_i$   | $a_i$  | $c_i$   |
|-------------------------------|---------|--------|---------|
| Seuil triangulaire : $i = 1$  | 0       | 1.4    | 2.5     |
|                               | +/-0.05 | +/-0.2 | +/-0.05 |
| Seuil rectangulaire : $i = 2$ | 2       | 4      | 1.5     |
|                               | +/-0.05 | +/-0.5 | +/-0.05 |
| Seuil rectangulaire : $i = 3$ | 2.72    | 10.3   | 1.5     |
|                               | +/-0.05 | +/-2.6 | +/-0.05 |

###### LES JAUGEAGES

La plupart des jaugeages ont été faits au moulinet à l'exception de quelques uns fait soit par capacité (au seau) soit par dilution. Certains jaugeages ont été écartés de l'analyse étant donnée leurs valeurs absolument non physiques. 82 jaugeages ont été retenus : les 76 jaugeages fait par exploration du champ des vitesses ont été affectés d'une incertitude de +/- 10% tandis que les autres jaugeages (dilution ou capacité) ont été affectés d'une incertitude de +/- 5%.

###### LES RESULTATS DE BARATIN

La courbe de tarage estimée par BaRatin ainsi que les jaugeages utilisés sont présentés par la Figure 26.

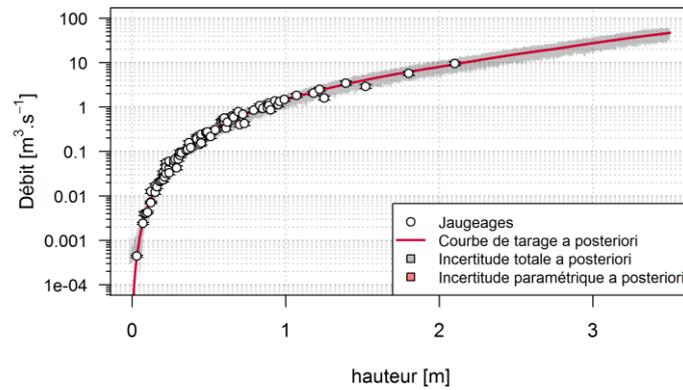


Figure 26: Real Collobrier - Courbes de tarage BaRatin a posteriori et les jaugeages.

La courbe de tarage estimée par BaRatin est bien en accord avec les jaugeages. On constate que les incertitudes totales sont importantes quel que soit le débit. Les incertitudes paramétriques étant faibles, la majeure partie des incertitudes provient des incertitudes structurelles. Cela est une conséquence de l'importante dispersion des jaugeages non expliquée par les incertitudes associées aux jaugeages. En l'absence d'informations supplémentaires sur ces jaugeages permettant de réévaluer leurs incertitudes, la présente analyse BaRatin est conservée pour la suite de cette étude de cas.

#### 4.3.1.2. PROPAGATION DES INCERTITUDES AUX HYDROGRAMMES

##### LES ERREURS AFFECTANT LE LIMNIGRAMME

La station a été mise en place en 1967 et nous disposons des données jusqu'en 2008 ce qui offre un limnigramme long de 42 années avec peu de lacunes (Figure 27).

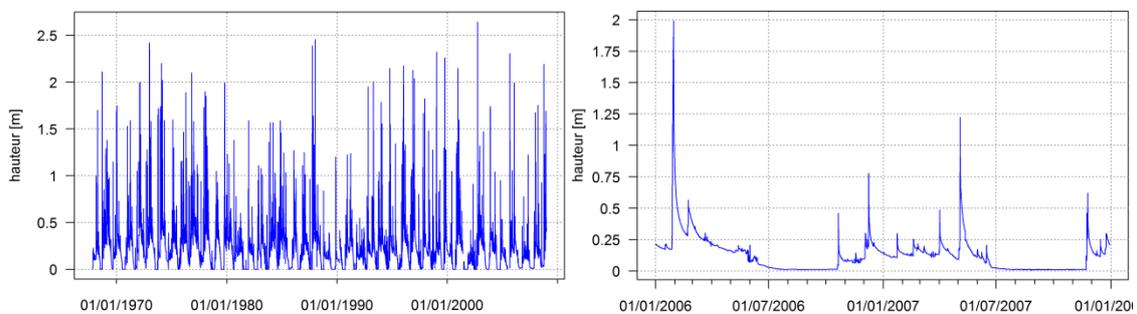


Figure 27: Real Collobrier - Limnigramme complet (gauche) et zoom sur les années 2006-2007 (droite).

D'après les informations fournies par les gestionnaires de la station les incertitudes associées au limnigramme ont été définies de la façon suivante :

- Erreurs non-systématiques : celles-ci sont très faibles en raison de peu de batillage à l'amont des déversoirs et de la présence d'un puits de stabilisation ; l'écart-type a été fixé à 0.001m ;
- Erreurs systématiques : le calage du capteur par rapport à l'échelle extérieure est vérifié périodiquement tous les 12 mois mais les écarts typiques observés sont faibles, de l'ordre de 1 à 2cm ; cela nous conduit à définir un écart-type de 0.01m et un ré-échantillonnage de l'erreur en moyenne tous les 365 jours.

### CALCUL DES HYDROGRAMMES

L'hydrogramme résultant de la propagation des incertitudes est présenté la Figure 28.

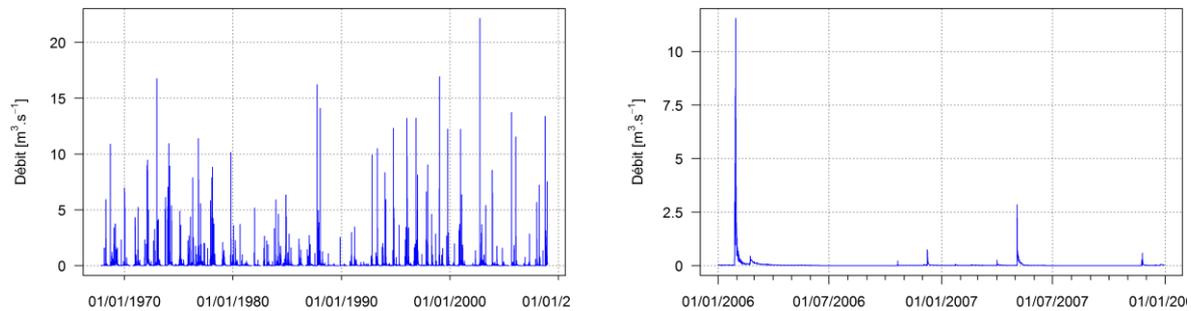


Figure 28: Real Collobrier - Hydrogramme complet (gauche) et zoom sur les années 2006-2007 (droite).

Les résultats, une fois l'hydrogramme agrégé à pas de temps journalier, sont également présentés par le Figure 29.

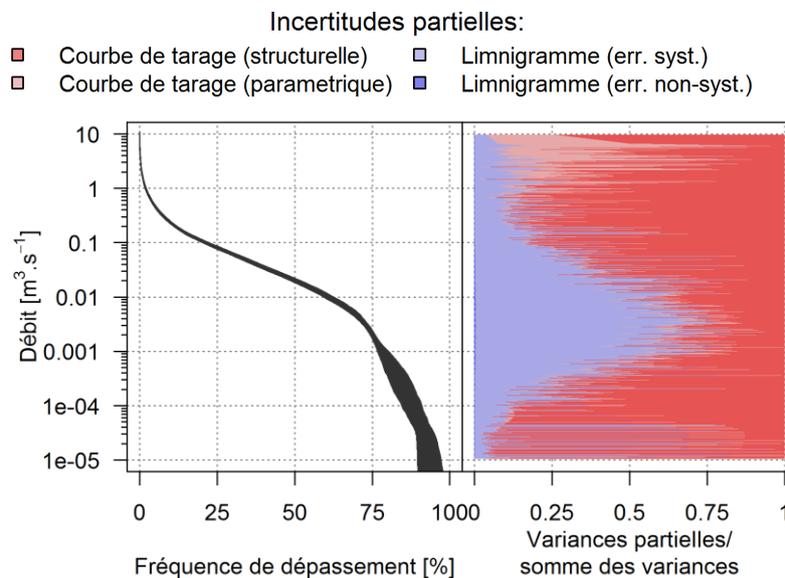


Figure 29: Real Collobrier - Courbe des débits classés et incertitudes associées.

Au pas de temps journalier, les incertitudes hydrométriques sont largement dominées par les incertitudes structurelles de la courbe de tarage et les incertitudes limnimétriques provenant des erreurs systématiques. On constate également que les incertitudes hydrométriques totales sont assez importantes pour les faibles débits. On note tout de même une contribution non-négligeable des incertitudes paramétriques pour les débits les plus forts.

#### 4.3.2. ESTIMATION DES INCERTITUDES SUR LES DEBITS CARACTERISTIQUES

##### 4.3.2.1. EXTRACTION DE LA VARIABLE HYDROLOGIQUE

Les variables hydrologiques sont extraites sont présentés par la Figure 30.

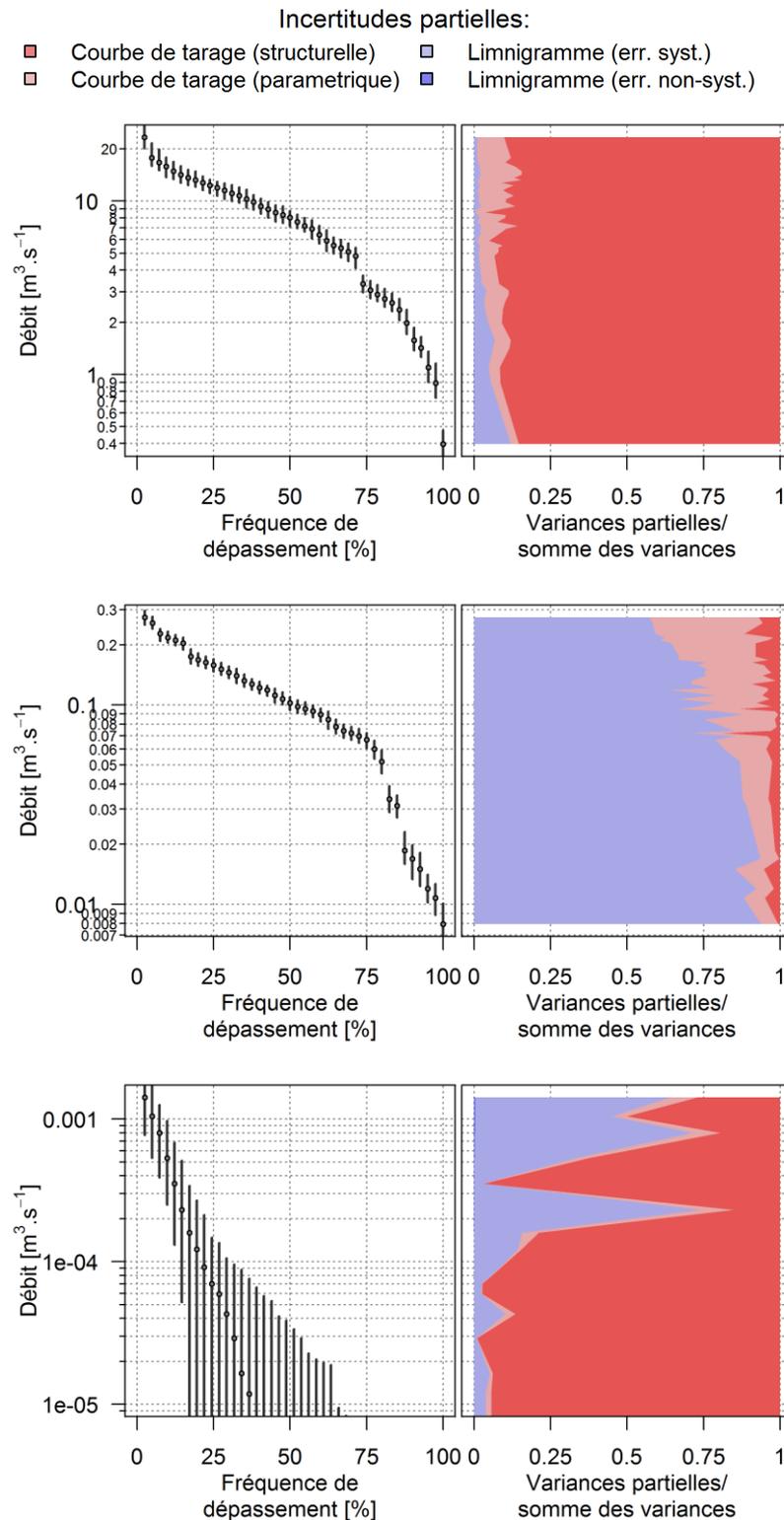


Figure 30: Real Collobrier - Courbes des débits classés et incertitudes associées des variables hydrologiques extraites de l'hydrogramme: Maximums instantanés (haut), moyennes annuelles (milieu) et VCN10 (bas).

On constate qu'en dehors des moyennes annuelles, les incertitudes structurelles de la courbe de tarage sont dominantes, en particulier pour les maximums. On note tout de même que les incertitudes limnimétriques dues aux erreurs systématiques sont importantes pour les VCN<sub>10</sub>. Pour les moyennes annuelles, on constate que l'agrégation temporelle sur une année a presque totalement supprimé la contribution des incertitudes structurelles ; ce sont alors les incertitudes

limnimétriques dues aux erreurs systématiques (et, dans une moindre mesure, les incertitudes paramétriques de la courbe de tarage) qui sont dominantes.

Dans le cas des VCN10, pour les fréquences de dépassement supérieures à 60%, certaines données ne sont plus visibles car les débits deviennent très faibles voire nuls (impossible à afficher avec une échelle logarithmique).

#### 4.3.2.2. ESTIMATION DES PARAMETRES DE LA LOI STATISTIQUE

##### LES MAXIMUMS ANNUELS – LOI GEV

Les débits caractéristiques des maximums instantanés annuels selon la période de retour sont présentés par la Figure 31.

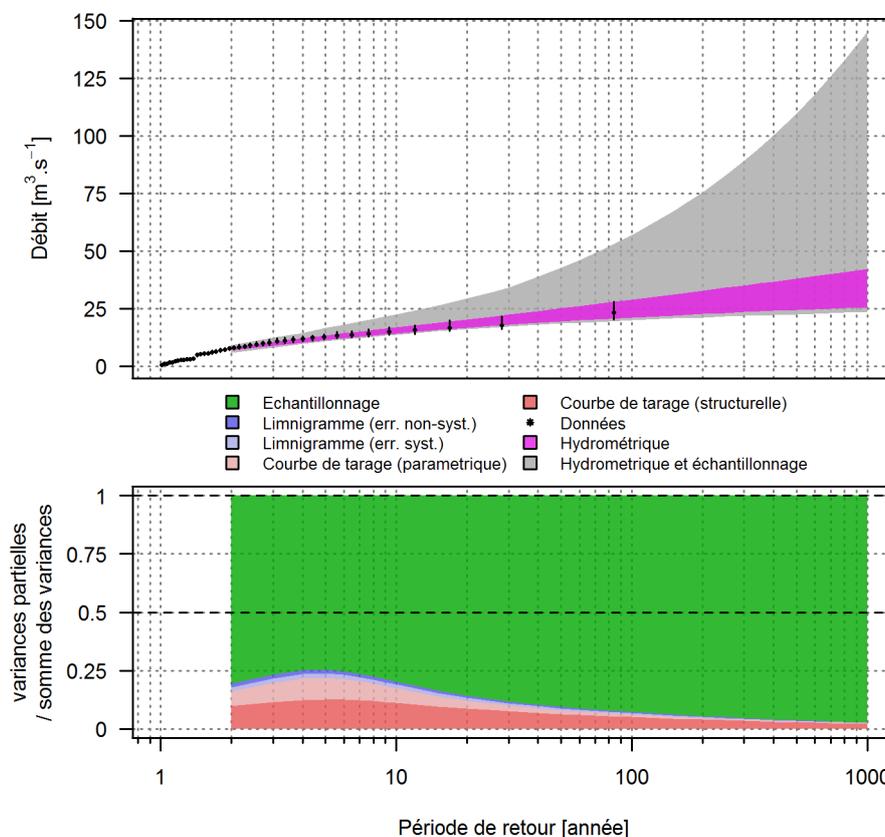


Figure 31: Real Collobrier - Débits caractéristiques et incertitudes associées selon la période de retour pour les maximums instantanés (loi GEV).

On observe que les incertitudes d'échantillonnage sont dominantes quelle que soit la période de retour. Les incertitudes hydrométriques sont tout de même non négligeables, en particulier pour les périodes de retour inférieures à 30 ans, et sont essentiellement dues aux incertitudes associées à la courbe de tarage.

##### LES MOYENNES ANNUELLES – LOI LOG NORMALE

Les débits caractéristiques pour les moyennes annuelles humides (Figure 32) et sèches (Figure 33) selon la période de retour sont calculés.

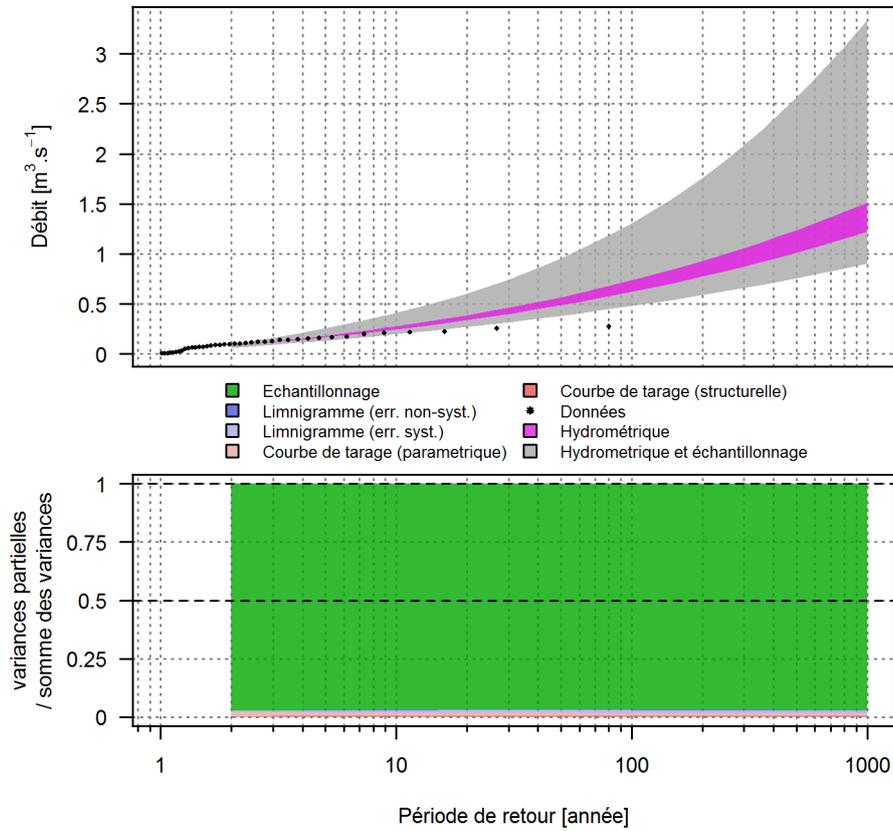


Figure 32: Real Collobrier - Débits caractéristiques et incertitudes associées selon la période de retour pour les moyennes humides (loi LogNormale).

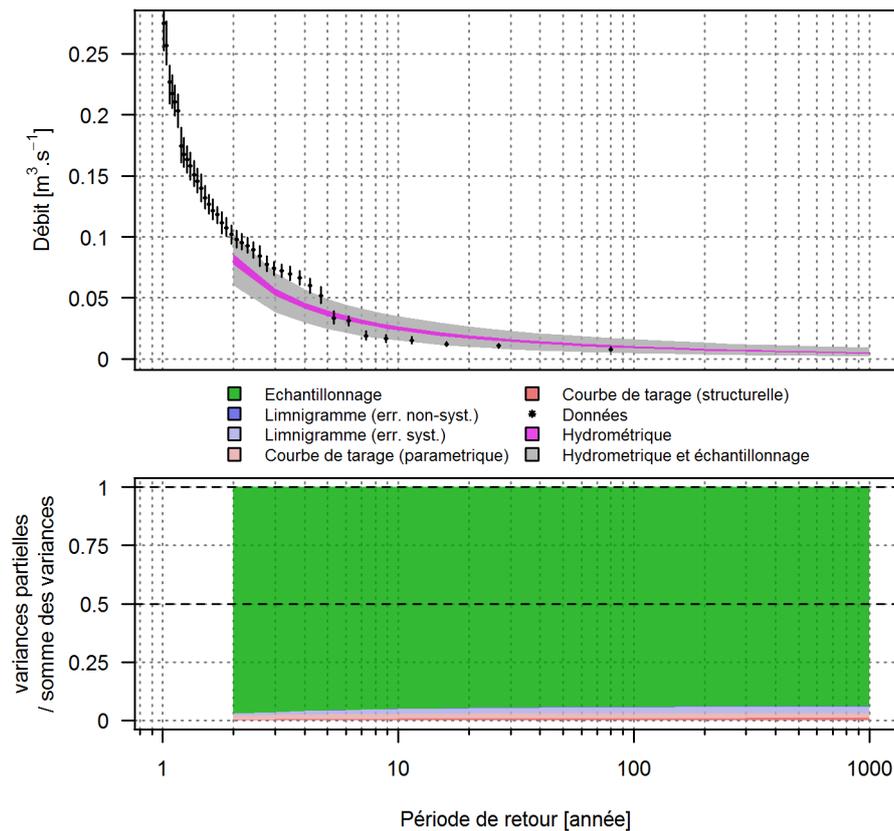


Figure 33: Real Collobrier - Débits caractéristiques et incertitudes associées selon la période de retour pour les moyennes sèches (loi LogNormale).

Que ce soit pour les moyennes humides ou sèches, les incertitudes d'échantillonnage sont largement prédominantes. Les incertitudes hydrométriques semblent complètement négligeables. En dehors de ce résultat concernant les incertitudes, on observe une adéquation assez mauvaise entre les données et la loi LogNormale, en particulier pour les moyennes humides.

### LES VCN10 – LOI GEV\_MIN

Les débits caractéristiques concernant les  $\text{VCN}_{10}$  sont présentés Figure 34 selon la période de retour.

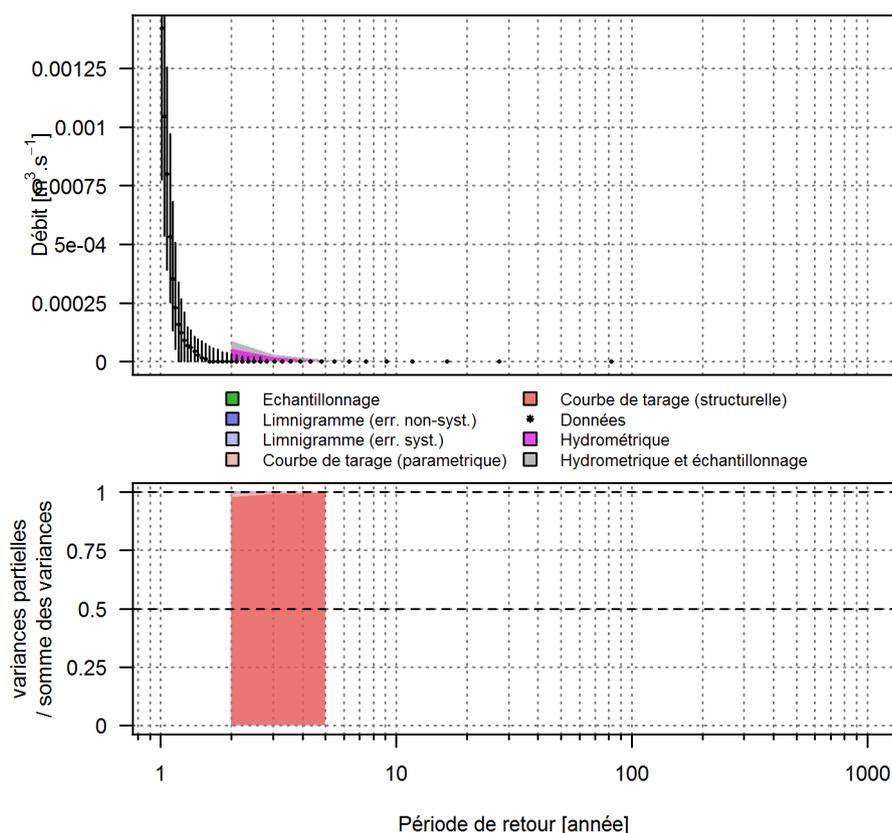


Figure 34: Real Collobrier - Débits caractéristiques et incertitudes associées selon la période de retour pour les  $VCN_{10}$  (loi  $GEV_{min}$ ).

Comparé aux autres stations étudiées, le Real Collobrier présente la particularité d'avoir de nombreux  $VCN_{10}$  nuls. Or la loi  $GEV_{min}$  ne comporte aucune contrainte en ce qui concerne les valeurs nulles ou négatives. Le traitement que nous avons adopté consiste simplement à tronquer toute valeur négative à zéro. En conséquence, au-delà d'une certaine période de retour, le quantile est nul sans aucune incertitude. Ce traitement pourrait certainement être amélioré (en traitant les valeurs nulles à part et en estimant la probabilité d'une valeur nulle), mais cela conduirait toujours à des quantiles nuls et sans incertitude au-delà d'une certaine période de retour. Ce comportement est cependant légitime à nos yeux : si l'on observe un débit nul environ une année sur deux (comme c'est le cas ici), affirmer que le quantile décennal ou centennal est nul semble parfaitement raisonnable.

La Figure 34 montre donc une large domination des incertitudes structurelles de la courbe de tarage pour les faibles périodes de retour, puis des débits nuls et sans incertitude pour les périodes de retour supérieures.

## 5 ETUDE DE CAS SYNTHETIQUES FICTIFS

### 5.1. INTRODUCTION

L'étude de cas réels permet de quantifier dans quelques situations particulières l'impact des incertitudes hydrométriques sur les débits caractéristiques. Comme illustré dans la partie 4 du rapport, certains aspects des résultats sont contrastés entre les différentes stations hydrométriques (impact des incertitudes hydrométriques sur les  $VCN_{10}$  par exemple) alors que d'autres aspects sont au contraire récurrents (large domination des incertitudes d'échantillonnage pour les moyennes annuelles par exemple). L'objectif de cette partie est donc de mieux comprendre les raisons expliquant l'impact, plus ou moins fort, des incertitudes hydrométriques par rapport aux incertitudes d'échantillonnage.

Cette partie s'appuie sur des stations hydrométriques et des bassins versant fictifs. Ce qui justifie ce choix est la possibilité de contrôler certains facteurs susceptibles d'influencer l'impact des différentes sources d'incertitudes, qu'il serait impossible de contrôler ou qui ne pourraient pas être contrôlés avec autant de liberté sur des cas réels. C'est le cas en particulier de la longueur de la série de données : l'avantage d'une approche utilisant des cas fictifs est de permettre l'étude de séries temporelles particulièrement longues qui dépassent largement les cas réels pour lesquels les temps écoulés depuis les mises en service des stations sont rarement supérieurs à 70-80 ans.

Après une description de la méthodologie pour la création de cas fictifs, une présentation des différentes expériences sera réalisée introduisant en même temps les différentes sections qui constituent cette partie.

### 5.2. METHODES UTILISEES POUR LA CREATION DES CAS FICTIFS

La méthode proposée pour la création d'un cas d'étude fictif se décompose en deux parties :

- simulation de l'hydrologie du bassin versant : pluie, évapotranspiration, réponse hydrologique du bassin versant fictif. Ceci conduit à un hydrogramme théorique ;
- création d'une station hydrométrique : configuration hydraulique du site, jeu de jaugeages.

L'ensemble de la chaîne de traitement permettant l'obtention de l'hydrogramme fictif incertain est résumé par la Figure 35.

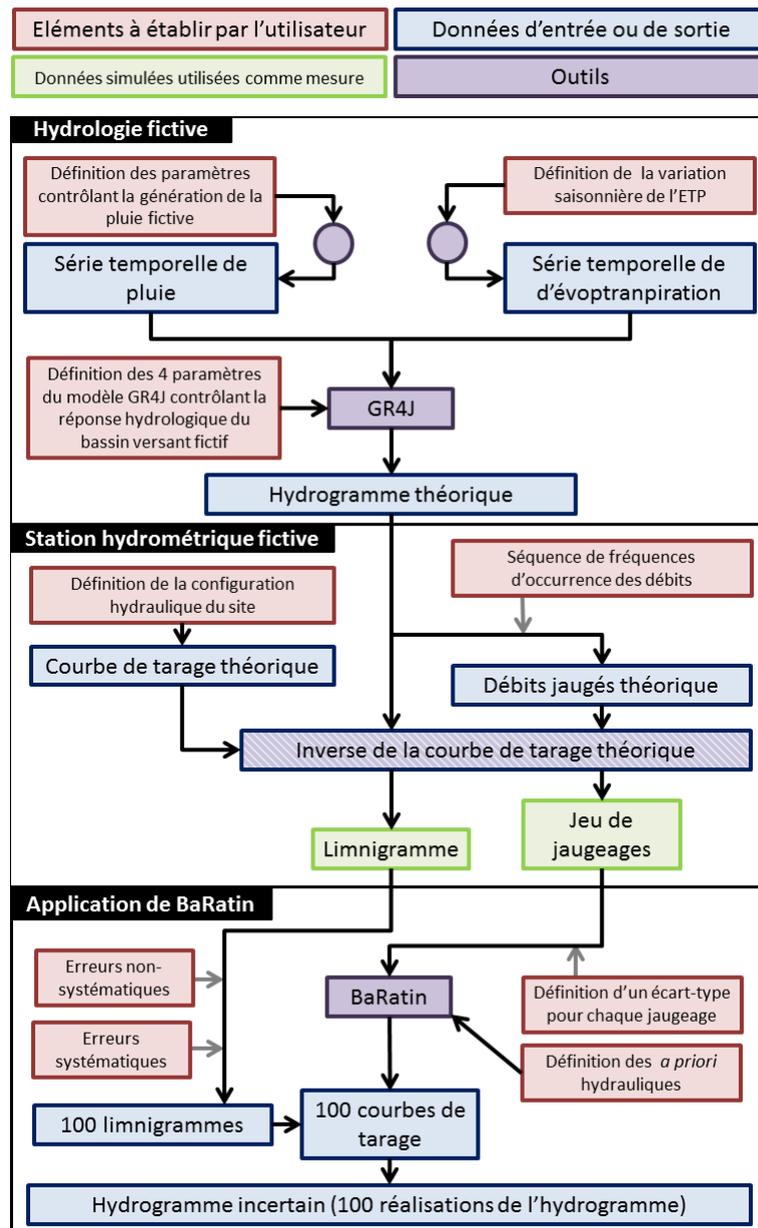


Figure 35: principe général de la création de l'hydrogramme incertain fictif

### 5.2.1. SIMULATION DE L'HYDROLOGIE : CREATION D'UNE HYDROLOGIE FICTIVE

Pour la simulation hydrologique du bassin versant, le modèle hydrologique GR4J (Perrin et al. 2003) a été utilisé. Celui-ci utilise une chronique de pluie et une chronique d'évapotranspiration potentielle (ETP) en donnée d'entrée ainsi que la détermination des 4 paramètres du modèle. La simulation est faite à pas de temps journalier, mais nous interprétons l'hydrogramme théorique ainsi simulé comme un hydrogramme à pas de temps instantané (chaque point journalier étant donc relié par interpolation linéaire).

#### 5.2.1.1. LA PLUIE

Le simulateur de pluie, inspiré de la méthode SHYPRE (Arnaud et Lavabre, 1999) permet la création d'une chronique (d'une durée  $t$  à pas de temps journalier).

Les informations suivantes sont utilisées :

- date du premier jour et date du dernier jour : cela permet de définir la période que l'on souhaite simuler ;
- une probabilité  $p_{pluie}$  qu'il pleuve un jour donné ;
- un nombre moyen de jours consécutifs de pluie  $n_{jours}$  ;
- une moyenne  $m_{pluie}$  de la quantité de pluie, et un coefficient de variation  $CV_{pluie}$  rendant compte de la variabilité des pluies (ce dernier paramètre joue un rôle important pour la simulation d'évènements extrêmes).

L'évènement « il pleut » suit une loi de Bernoulli de probabilité  $p_{pluie}$ . Le nombre de jours consécutifs de pluie suit une distribution de Poisson de moyenne  $n_{jours}$ . La quantité de pluie pour un jour donnée, s'il pleut, est déterminée par une distribution Gamma dont les paramètres de forme et d'échelle sont déterminés à partir de la pluie moyenne  $m_{pluie}$  et du coefficient de variation  $CV_{pluie}$ .

De plus, pour améliorer le réalisme des simulations, une saisonnalité est introduite. Pour cela, la valeur de chacun des paramètres ci-dessus peut être modulée en fonction de la date dans l'année. Pour cela nous utilisons un vecteur de 12 valeurs  $s_{1,2,\dots,12}$  comprises entre -1 et 1 qui représentent les modulations mensuelles du paramètre. Ces valeurs sont multipliées par un « facteur de saisonnalité » qui gouverne la force du signal saisonnier. Par exemple, si ce facteur vaut 0.2, cela signifie que le paramètre peut s'éloigner à  $\pm 20\%$  de sa valeur de base selon la date dans l'année. Un résultat typique que l'on peut obtenir est proposé par la Figure 36.

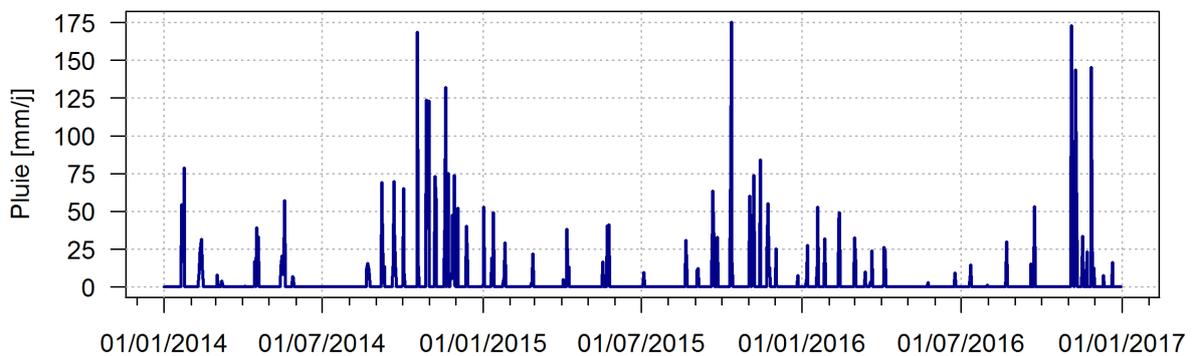


Figure 36: Exemple sur trois années d'une série temporelle de pluie simulée

### 5.2.1.2. L'ÉVAPOTRANSPIRATION POTENTIELLE (ETP)

Pour la simulation de l'évapotranspiration, une version légèrement simplifiée de la méthode de Thornthwaite a été utilisée. Celle-ci permet de façon simple et robuste de déterminer l'évapotranspiration mensuelle à partir de la température moyenne et de la latitude. L'équation utilisée pour un mois  $i$  est :

$$ETP_i = 16 \times F_{\lambda_i} \left( \frac{10 \times T_i}{I} \right)^{0.016 \times I + 0.5}$$

Avec :

- $T_i$  la température moyenne du mois  $i$
- $I$  l'indice thermique :  $I = \sum_{i=1}^{12} \left( \frac{T_i}{5} \right)^{1.514}$

- $F_{\lambda_i}$  le facteur de correction lié à la latitude, tiré d'un abaque pour une latitude de 42°Nord ; pour les 12 mois de l'année : 0.82, 0.83, 1.03, 1.12, 1.26, 1.27, 1.28, 1.19, 1.04, 0.95, 0.82, 0.79.

La chronique d'évaporation journalière est ensuite calculée par interpolation à partir de la chronique d'évapotranspiration mensuelle. La chronique de température utilisée est la même pour chaque année et elle est inspirée de valeurs de températures mensuelles moyennes de plusieurs villes françaises. Un exemple de résultat est présenté par la Figure 37.

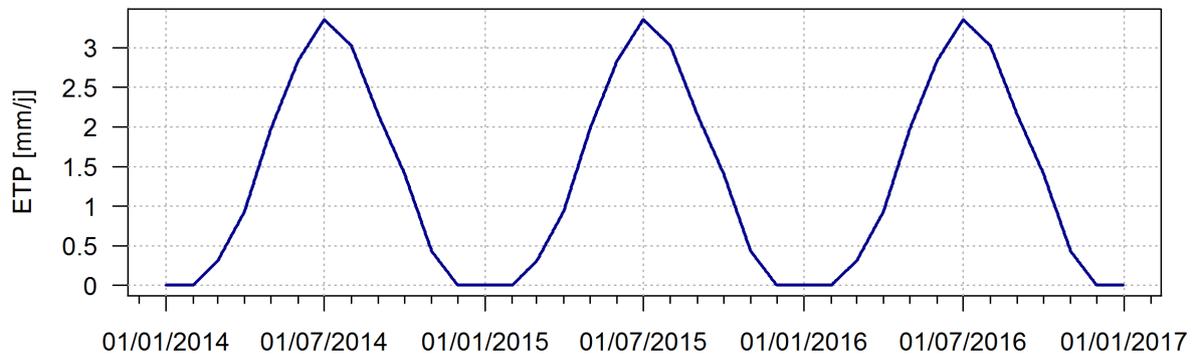


Figure 37: Exemple sur trois années d'une série temporelle d'évapotranspiration potentielle simulée.

### 5.2.1.3. L'HYDROGRAMME

A partir de la chronique de pluie journalière (en mm/j) et de la chronique d'évapotranspiration journalière (en mm/j), le modèle GR4J simule l'hydrogramme (en mm/j). GR4J requiert 4 paramètres :

- taille du réservoir de production (en mm) ;
- quantité d'échanges souterrains (en mm), positif (apport d'eau) ou négatif (export d'eau) ;
- taille du réservoir de routage (en mm) ;
- temps de routage (en jour).

L'hydrogramme, en millimètre par jour, est converti en mètres cubes par seconde en utilisant la surface  $S$  du bassin versant fictif. Un exemple de résultat est proposé par la Figure 38.

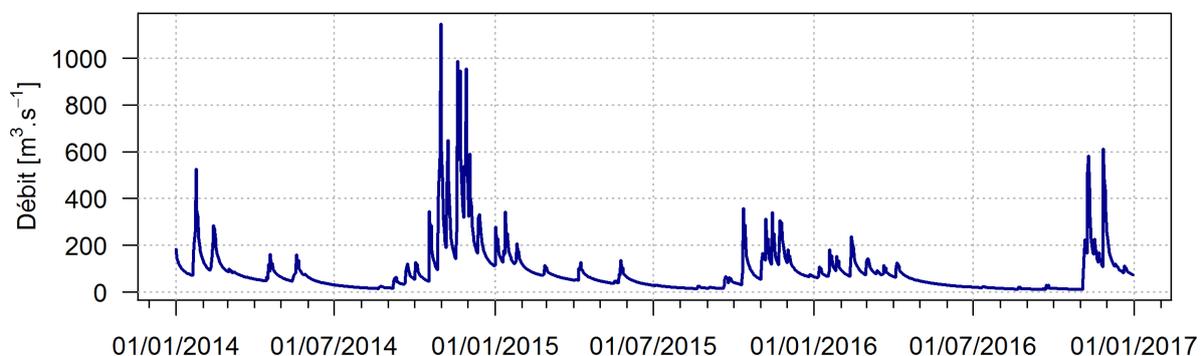


Figure 38: Exemple sur trois années d'une série temporelle de débit simulée.

### 5.2.2. CREATION D'UNE STATION HYDROMETRIQUE FICTIVE

Pour la création de la station hydrométrique fictive deux informations sont nécessaires pour la mise en œuvre de BaRatin : la configuration hydraulique et le jeu de jaugeages. Pour la propagation des incertitudes aux hydrogrammes, un limnigramme fictif doit également être créé.

### 5.2.2.1. LA CONFIGURATION HYDRAULIQUE

Les contrôles hydrauliques en jeux sont imaginés (leurs dimensions et leurs agencements). L'équation théorique de la courbe de tarage est déterminée en utilisant des équations hydrauliques simplifiées (voir les détails dans le tableau ci-dessous).

| Type de contrôle   | Dimensionnement   | Equation hydraulique                                |
|--|---|---|
| Déversoir à crête horizontale                              | Largeur : $L$<br>Coefficient de débit : $C_r = 0.4$<br>Hauteur de la crête du déversoir : $b_r$   | $Q(h) = C_r \cdot L \cdot \sqrt{2g}(h - b_r)^{3/2}$ |
| Chenal rectangulaire et homogène de type Manning-Strickler | Largeur : $L$<br>Coefficient de Strickler : $K$<br>Pente d'énergie : $J$<br>Hauteur moyenne du fond du chenal : $b_c$<br>(déterminé par continuité) | $Q(h) = K \cdot L \cdot \sqrt{J}(h - b_c)^{5/3}$    |

### 5.2.2.2. LES JAUGEAGES

Les jaugeages sont créés à partir de l'hydrogramme fictif et des probabilités d'occurrence des débits afin qu'ils représentent bien ce qu'il serait possible d'avoir comme jaugeages pour cette station.

Pour un jaugeage  $i$ , une probabilité de non-dépassement  $p_i$  (par exemple  $p = 0.98$  correspondrait à un jaugeage à très haut débit, réalisé en crue) est choisie et un débit théorique  $Q_i$  du jaugeage est déterminé par :

$$Q_i = F^{-1}(p_i)$$

où  $F$  est la fonction de répartition de l'hydrogramme fictif et  $F^{-1}$  la fonction inverse de  $F$ .

La hauteur du jaugeage  $h_i$  est calculée par l'inverse de l'équation de la courbe de tarage théorique.

Afin d'inclure une dispersion des jaugeages autour de la courbe de tarage théorique, une erreur  $e_i$  tirée dans une loi Normale centrée sur 0 et d'écart  $\sigma_i$  est utilisée. Le jaugeage  $i$  correspond finalement au couple de valeurs suivant :

$$(h_i, Q_i \times (1 + e_i))$$

### 5.2.2.3. LE LIMNIGRAMME

Le limnigramme est simplement calculé à partir de l'hydrogramme fictif (section 5.2.1) et de l'inverse de la courbe de tarage théorique (section 5.2.2).

## 5.3. PLAN D'EXPERIENCE

Les facteurs susceptibles d'influencer l'estimation des débits caractéristiques et les incertitudes associées sont divers. Ceux-ci incluent les caractéristiques hydro-climatiques du bassin versant, les caractéristiques physiques et la gestion de la station hydrométrique, les choix concernant la variable hydrologique extraite et la loi statistique estimée.

Notre étude s'est limitée aux trois facteurs suivants :

- l'hydrologie du bassin versant : il s'agit d'un facteur qui est susceptible d'influencer les incertitudes d'échantillonnage ainsi que les impacts des incertitudes hydrométriques ;
- le type de contrôle hydraulique et en particulier la sensibilité du contrôle : cet aspect se concentre d'avantage sur l'impact des incertitudes limnimétriques dont les impacts sur les hydrogrammes sont directement liés à la sensibilité des contrôles hydrauliques ;
- le type de loi statistique choisie pour déterminer les débits caractéristiques : une comparaison sur les maximums annuels entre une loi de Gumbel et une loi GEV est faite afin de mettre en évidence l'importance du choix de la loi.

L'effet de la longueur de la série temporelle a systématiquement été étudié pour chacun des cas en considérant 5 longueurs de la série temporelle : 10 ans, 30 ans, 70 ans, 100 ans et 500 ans.

La suite de ce chapitre est donc divisée en 3 parties :

- Impact de l'hydrologie
- Impact de la sensibilité des contrôles hydrauliques
- Impact de la loi statistique choisie

## **5.4. IMPACT DE L'HYDROLOGIE**

### **5.4.1. INTRODUCTION**

Le terme hydrologie fait référence à la réponse hydrologique d'un bassin versant, c'est-à-dire, aux caractéristiques des débits pouvant être observés à l'exutoire. Ces caractéristiques sont le résultat du climat (pluie, température, ...) et des caractéristiques physiques du bassin versant (géologie, pédologie, occupation des sols, topographie).

Afin d'étudier la question posée « quels sont les impacts de l'hydrologie sur l'estimation de statistiques hydrologiques ? », deux hydrologies différentes sont considérées :

- Un cas présentant une hydrologie rapide : fortes crues, rapides, et des périodes d'étiage longues et prononcées.
- Un cas où l'hydrologie est plutôt lente ou molle : montées et descentes de crue très lentes et un débit de base important.

Partant d'une modélisation simple via le modèle GR4J, deux hydrogrammes théoriques distincts, de 500 ans, sont donc calculés suivant la méthodologie décrite en 5.2.1. Ceux-ci reposent sur les mêmes chroniques de pluies et d'évapotranspiration ; seul le paramétrage de GR4J est modifié entre les deux cas. Les deux hydrogrammes sont ensuite transformés en deux limnigrammes par l'inverse de la même courbe de tarage.

### **5.4.2. CREATION DES CAS FICTIFS**

#### **5.4.2.1. UTILISATION DE GR4J POUR SIMULER UN HYDROGRAMME FICTIF**

##### **SIMULATION DE LA PLUIE ET DE L'ETP**

Le simulateur de pluie (section 5.2.1.1) a été utilisé pour simuler une série temporelle de pluie longue de 500 ans avec le paramétrage présenté dans le tableau ci-dessous.

|                                | $p_{pluie}$ | $n_{jours}$ | $m_{pluie}$ | $CV_{pluie}$ |
|--------------------------------|-------------|-------------|-------------|--------------|
| <b>Valeurs</b>                 | 0.1         | 2.0         | 28          | 0.9          |
| <b>Facteur de saisonnalité</b> | 0.7         | 0.5         | 0.9         | -            |

La saisonnalité utilisée pour le simulateur de pluie, est fournie sous forme d'un vecteur de 12 valeurs, inspiré par des valeurs de précipitation mensuelles réelles de plusieurs villes françaises. De même, dans le cas de la simulation de l'ETP (section 5.2.1.2), un vecteur de 12 valeurs mensuelles de température moyenne est défini, celui-ci également inspiré de valeur réelle de températures. Les valeurs utilisées pour la saisonnalité (sous forme de précipitations moyennes mensuelles) et pour les températures moyennes mensuelles sont reportés dans la Figure 39.

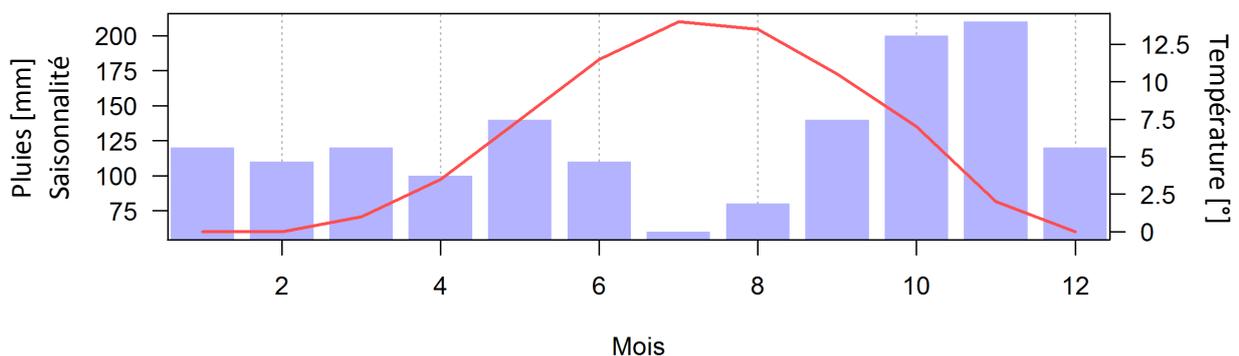


Figure 39: Valeurs utilisées pour déterminer la saisonnalité dans le simulateur de pluie (axe de gauche) et valeurs de température utilisées pour le calcul de l'ETP (axe de droite).

Remarques : toutes les valeurs de température inférieures à 0 ont été ramenées à 0 ce qui implique une évapotranspiration nulle.

#### SIMULATION DES HYDROGRAMMES THEORIQUES FICTIFS

Pour les deux hydrologies considérées ici, les mêmes chroniques de pluie et d'ETP sont utilisées. Seul le paramétrage du modèle GR4J diffère dans la création des deux hydrologies :

|  | Hydrologie « lente » | Hydrologie « rapide » |
|--|----------------------|-----------------------|
| <b>Taille du réservoir (mm)</b>            | 1500                 | 150                   |
| <b>Quantité d'échange (mm)</b>             | 0                    | 0                     |
| <b>Taille du réservoir de routage (mm)</b> | 250                  | 10                    |
| <b>Temps de routage (j)</b>                | 10                   | 1                     |

Pour les deux cas, la surface du bassin versant est définie à 2380 km<sup>2</sup>. Les simulations des différentes chroniques est faire entre le 1<sup>er</sup> janvier 1999 et le 31 décembre 2500. Ainsi plus de 500 ans de données sont simulés pour les deux hydrologies que l'on souhaite comparer. Les résultats sont illustrés par la Figure 40.

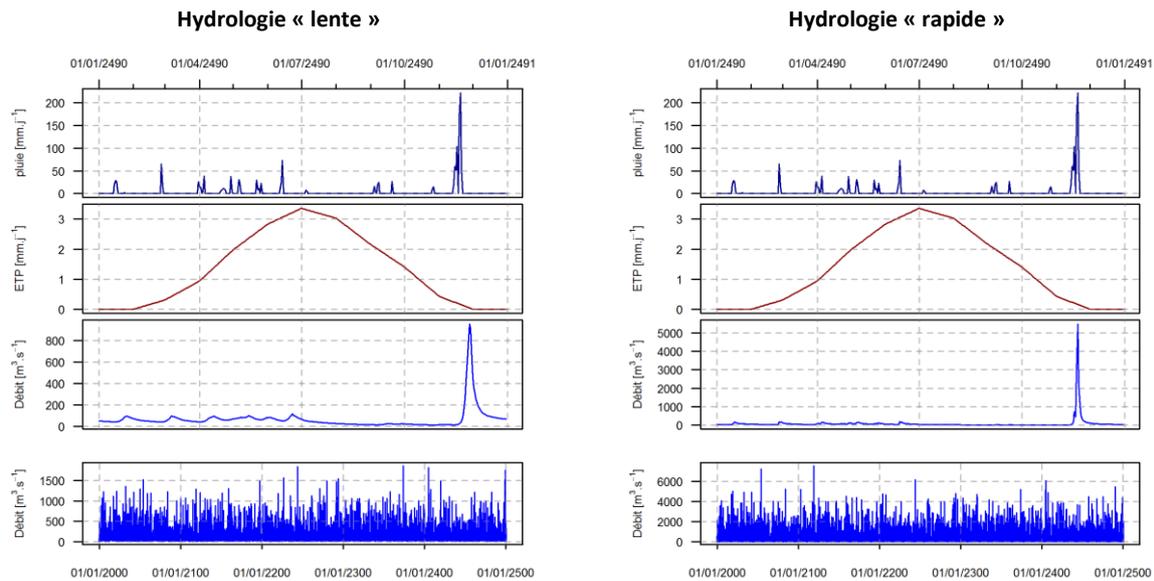


Figure 40: Présentation des deux hydrologies simulées. De haut en bas, la pluie, l'évapotranspiration et le débit sont présentés pour une année. Tout en bas, l'ensemble de l'hydrogramme fictif, pour les deux cas, est présenté.

La Figure 40 montre que ce sont les mêmes précipitations et les mêmes ETP qui ont été utilisées pour les deux hydrologies. Les différences s'observent au niveau de l'hydrogramme : pour l'hydrologie « lente » le pic de crue (les 3<sup>e</sup> graphiques en partant du haut) est beaucoup plus bas et la décrue beaucoup plus lente que dans le cas de l'hydrologie « rapide ». Les hydrogrammes complets (graphiques du bas) montrent des débits ne dépassant pas  $2000 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$  dans le cas de l'hydrologie « lente » alors que les débits peuvent dépasser  $7000 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$  dans le cas de l'hydrologie « rapide ».

#### 5.4.2.2. JEUX DE JAUGEAGES ET LIMNIGRAMMES

L'ensemble de la procédure détaillé en 5.2.2 est appliqué ici. La courbe de tarage théorique est construite à partir de la configuration hydraulique suivante :

- pour les hauteurs d'eau allant de 2m à 3m : contrôle par un déversoir à crête horizontale d'une largeur de 100m ;
- Pour les hauteurs d'eau supérieures à 3m : le déversoir est ennoyé et un contrôle par un chenal rectangulaire de 100m de largeur, une pente de 0.5%, un coefficient de rugosité de  $30 \text{ m}^{1/3} \cdot \text{s}^{-1}$  le remplace.

La Figure 41 présente un schéma de la section de contrôle vue depuis l'aval.

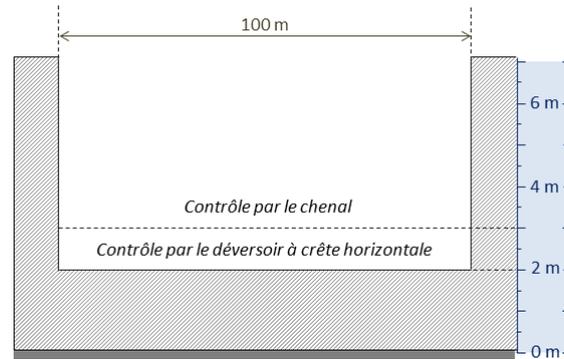


Figure 41: Vue aval des contrôles hydrauliques en jeu de la station fictive.

L'équation correspondante est :

$$Q(h) = \begin{cases} 0, & h < 2 \\ 0.4 \times 100 \times \sqrt{2g} \times (h - 2)^{3/2}, & 2 \leq h < 3 \\ 100 \times 30 \times \sqrt{0.005} \times (h - b_2)^{5/3}, & h \geq 3 \end{cases}$$

avec, par continuité,  $b_2 = 3 - \left( (0.4 \times 100 \times \sqrt{2g} \times (3 - 2)^{3/2}) / (100 \times 30 \times \sqrt{0.005}) \right)^{3/5} = 2.10 \text{ m}$

et  $g = 9.81 \text{ m.s}^{-2}$ , l'accélération de la pesanteur

Suivant la méthodologie décrite dans la section 5.2.2.2, deux jeux de 100 jaugeages sont créés à partir des deux hydrogrammes et d'une séquence de 100 probabilités allant 0.025 à 0.975. Une dispersion de +/- 10% est introduite.

La courbe de tarage théorique, les jeux de jaugeages et les deux courbes de débits classés sont présentés par la Figure 42:

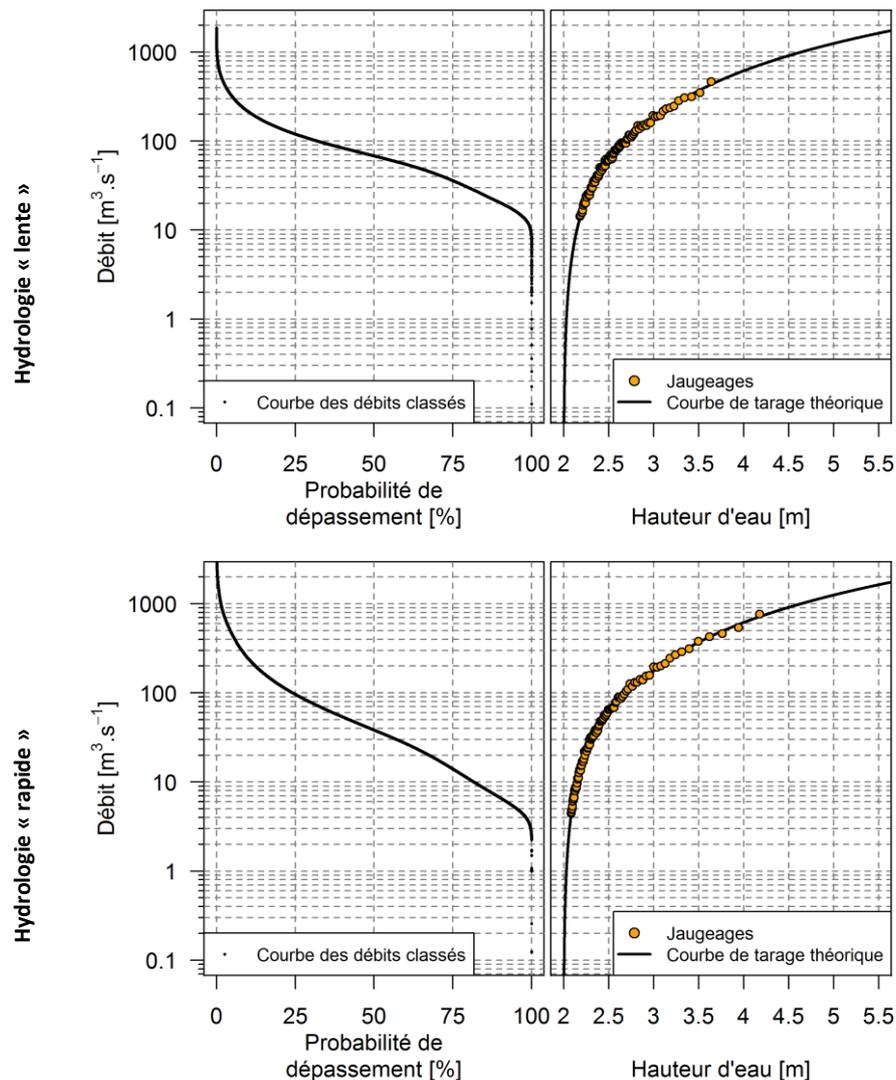


Figure 42: Courbe des débits classés (gauche) et courbe de tarage et jeu de jaugeages (droite) pour les deux hydrologies étudiées: hydrologie « lente » (haut) et « rapide » (bas).

Les limnigrammes sont calculés à partir des hydrogrammes fictifs et de l'inverse de la courbe de tarage théorique.

### 5.4.3. CALCULS DES HYDROGRAMMES ET EXTRACTION DES VARIABLES HYDROLOGIQUES

#### 5.4.3.1. ESTIMATION DE LA COURBE DE TARAGE ET DES INCERTITUDES ASSOCIEES

La méthode BaRatin requiert des *a priori* sur les contrôles hydrauliques en jeu. Ceux-ci sont déterminés de la même façon que pour la création de la courbe de tarage théorique à la différence près que chaque terme est associé à une incertitude :

- Pour le déversoir rectangulaire : largeur de 50m $\pm$ 20, coefficient de débit de 0.4 $\pm$ 0.2, hauteur de la crête du seuil de 2m $\pm$ 0.2, exposant de 1.5 $\pm$ 0.05
- Pour le chenal : largeur de 100m $\pm$ 50m, coefficient de Strickler de 30m<sup>1/3</sup>.s<sup>-1</sup> $\pm$ 10, pente de 0.5% $\pm$ 0.25, exposant de 1.67 $\pm$ 0.05

La matrice des contrôles est :

|                                   | Déversoir | Chenal  |
|-----------------------------------|-----------|---------|
| 1 <sup>ère</sup> gamme de hauteur | Actif     | Inactif |
| 2 <sup>ème</sup> gamme de hauteur | Inactif   | Actif   |

Les paramètres *a priori* sont donc :

|                               | $k_i$         | $a_i$        | $c_i$        |
|-------------------------------|---------------|--------------|--------------|
| Seuil triangulaire : $i = 1$  | 2.00 +/-0.100 | 88.6 +/-28.4 | 1.5 +/-0.05  |
| Seuil rectangulaire : $i = 2$ | 3.00 +/-0.250 | 212 +/-69.0  | 1.67 +/-0.05 |

Entre les deux hydrologies, seul le jeu de jaugeages diffère. Chaque jaugeage généré est associé d'une incertitude de +/-10%.

Les résultats de BaRatin sont présentées par dans la Figure 43.

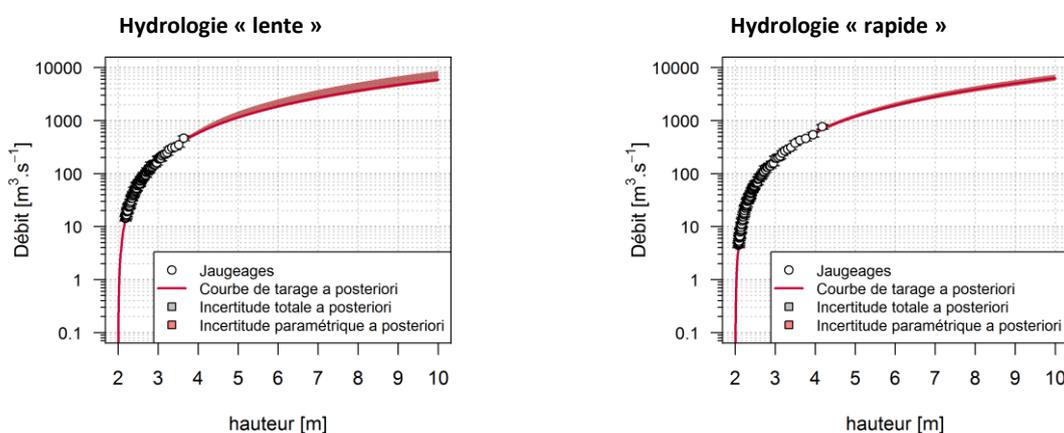


Figure 43: Courbe de tarage et incertitudes estimées par BaRatin pour les deux hydrologies étudiées : « lente » à gauche et « rapide » à droite.

Les incertitudes associées aux courbes de tarage sont similaires dans les deux cas avec tout de même des incertitudes plus faibles associées aux paramètres pour le cas de l'hydrologie « rapide » du fait d'une plus grande couverture des débits (concernés par les courbes de tarage) des jaugeages.

#### 5.4.3.2. PROPAGATION DES INCERTITUDES AUX HYDROGRAMMES

Aux deux limnigrammes générés (section 5.4.2.2) sont ajoutés des erreurs :

- les erreurs non-systématiques suivant une loi normale centrée sur 0 et d'écart-type 0.015m ;
- les erreurs systématiques suivant une loi normale centrée sur 0 et d'écart-type 0.015m.

Pour les deux limnigrammes, exactement les mêmes erreurs sont utilisées. Celles-ci permettent de générer deux jeux de 100 limnigrammes rendant compte de l'incertitude associée.

Les résultats de la propagation des incertitudes par BaRatin sont présentés par la Figure 44.

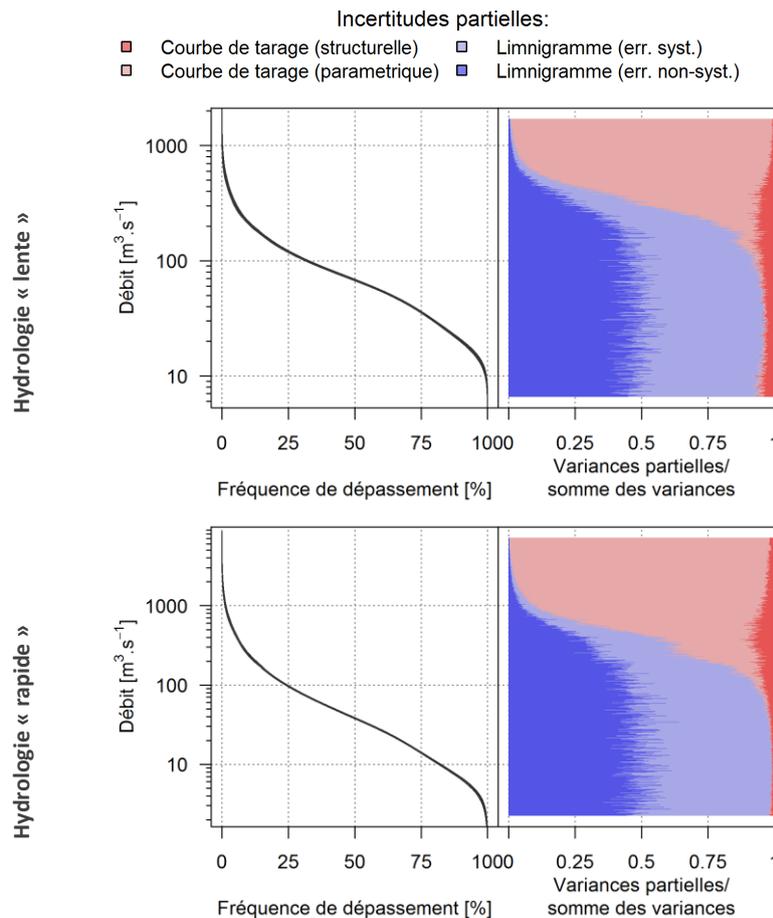


Figure 44: Courbes des débits classés et incertitude totale associée (gauche) et parts des différentes incertitudes hydrométriques (droite).

On remarque que très peu de différences sont observables entre les deux hydrologies. Les incertitudes limnimétriques sont largement dominantes pour la grande majorité des débits. Seuls pour les débits les plus élevés, les incertitudes paramétriques sont largement dominantes. Les incertitudes structurelles sont, quant à elles, très faibles.

#### 5.4.3.3. EXTRACTION DES VARIABLES HYDROLOGIQUES

Les maximums annuels, les moyennes annuelles et les  $VCN_{10}$  sont extraits des hydrogrammes résultants des deux propagations. Les résultats sont présentés par la Figure 45. On constate que les différences entre les deux hydrologies sont assez faibles. Les incertitudes limnimétriques semblent tout de même avoir une importance plus forte pour l'hydrologie « lente ».

Les incertitudes associées aux  $VCN_{10}$  sont presque exclusivement dues aux incertitudes limnimétriques (celles provenant des erreurs systématiques). Pour les moyennes annuelles, ce sont les incertitudes paramétriques et les incertitudes limnimétriques dues aux erreurs systématiques qui dominent ; ce sont les deux sources d'incertitudes provenant d'erreurs systématiques, résultat de l'agrégation temporelle sur 365 jours qui lisse les erreurs non-systématiques. Pour les maximums annuels, on observe les incertitudes hydrométriques totales les plus fortes. Celles-ci proviennent surtout des incertitudes paramétriques bien que les incertitudes limnimétriques soient également importantes, en particulier pour les débits les plus faibles.

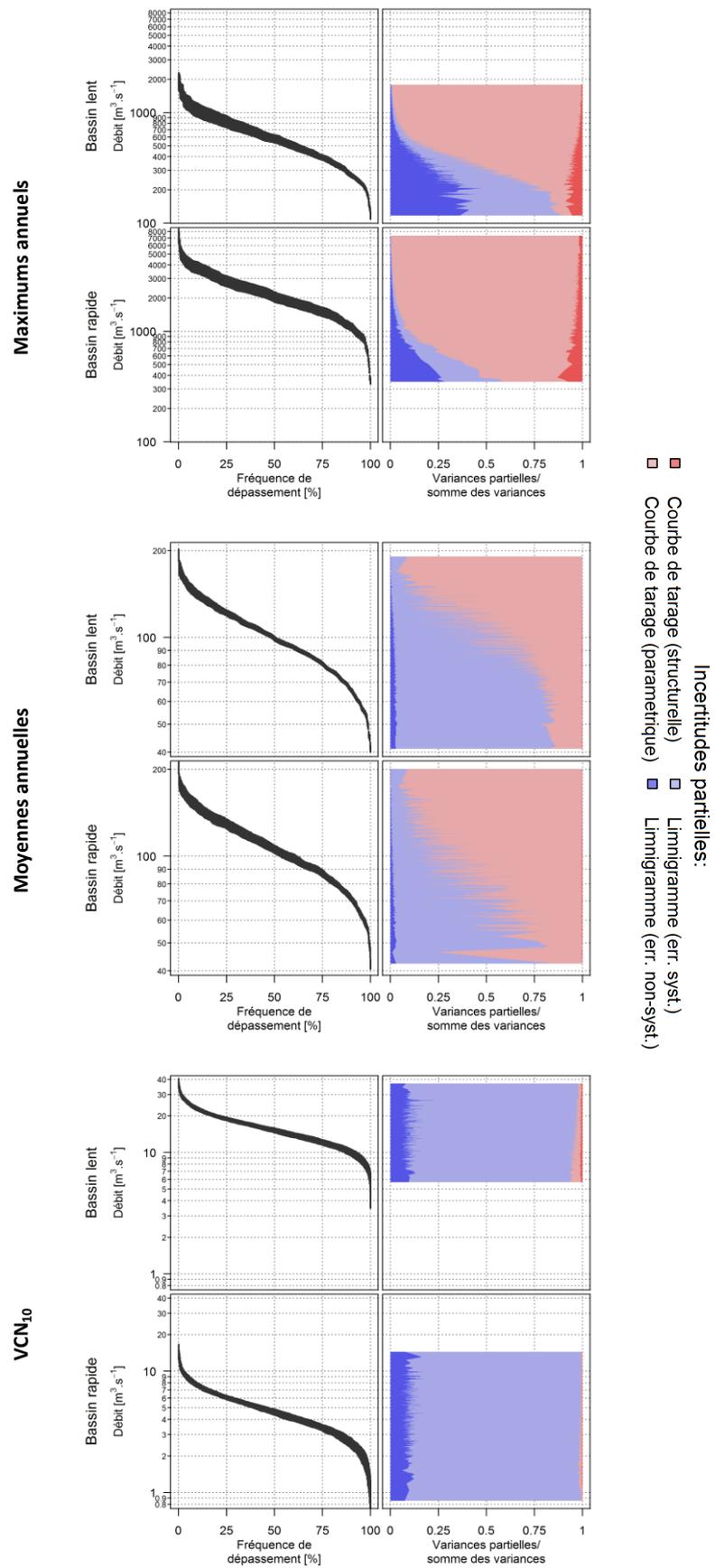


Figure 45: Courbe de débits classés et incertitudes pour les trois variables hydrologiques étudiées: maximums instantanés (en haut), moyennes annuelles (milieu) et VCN10 (en bas).

#### 5.4.4. CALCULS DES DEBITS CARACTERISTIQUES

Pour chacune des variables hydrologiques extraites, une loi statistique est estimée par inférence Bayésienne sans information *a priori*. La procédure décrite dans la section 2.2 est utilisée.

##### 5.4.4.1. LES MAXIMUMS ANNUELS

Les résultats sont présentés dans la Figure 46 où les débits et leurs incertitudes pour différentes périodes de retour sont présentés. Ces résultats sont pour 100 ans de données.

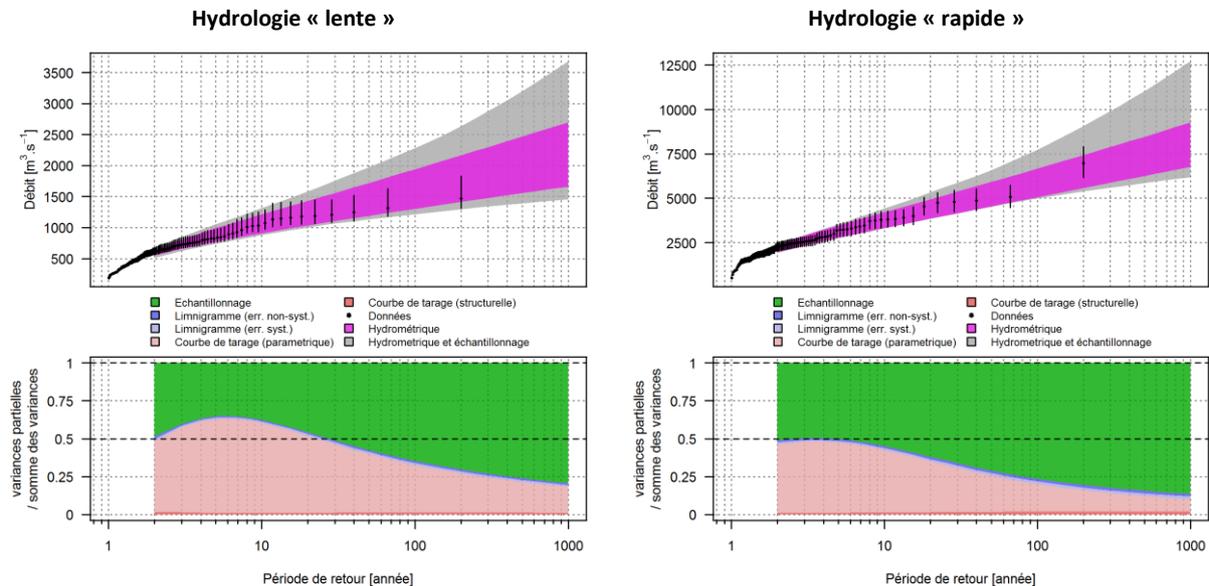


Figure 46: Débits caractéristiques et incertitudes associées selon la période de retour pour les maximums annuels (loi GEV). Comparaison de l'hydrologie « lente » (gauche) et « rapide » (droite).

La Figure 46 montre assez peu de différences entre les deux hydrologies. Cependant, on remarque que les incertitudes paramétriques, sensiblement plus importantes dans le cas de l'hydrologie « lente », sont beaucoup plus élevées que dans les cas réels. Cela est le résultat conjoint d'incertitudes hydrométriques globalement plus fortes et du nombre d'années supérieur ici par rapport au nombre d'années dont on disposait dans les cas réels. Ceci contribue à diminuer les incertitudes d'échantillonnage, et donc à augmenter l'importance relative des incertitudes hydrométriques.

La Figure 47 présente les incertitudes (demi-longueurs des intervalles d'incertitudes à 95%, exprimées en % de la médiane) selon la période de retour.

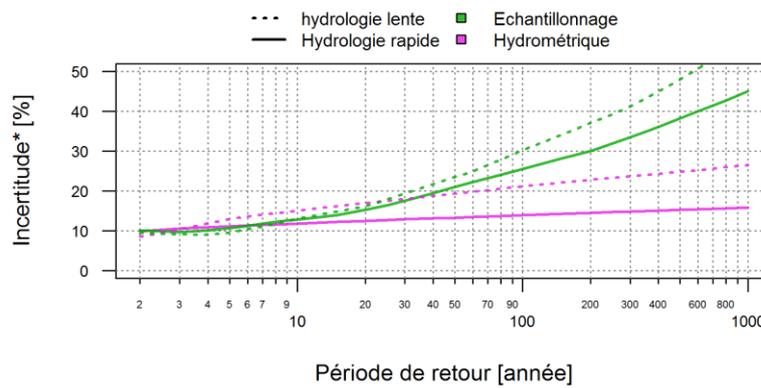


Figure 47: Incertitudes (\* demi-longueur de l'intervalle d'incertitude à 95% normalisé par la médiane) hydrométriques et d'échantillonnage selon la période de retour pour les maximums annuels ; comparaison des deux hydrologies.

La Figure 47 permet de voir que :

- Les incertitudes d'échantillonnage augmentent avec la période de retour et que les incertitudes hydrométriques augmentent également mais beaucoup moins vite ;
- les incertitudes d'échantillonnage sont plus faibles dans le cas de l'hydrologie « rapide » ; la même observation peut être faite pour les incertitudes hydrométriques. Rappelons tout de même que les incertitudes sont indiquées relativement à la médiane : les incertitudes sont plus faibles pour l'hydrologie « rapide » du fait des débits médians (par lesquels les demi-longueurs des intervalles d'incertitude à 95% sont divisées) beaucoup plus grands dans ce cas.

Le nombre d'années disponibles pour l'estimation des débits caractéristiques est également intéressant à étudier dans les deux cas. Les débits et les incertitudes associées sont présentés selon le nombre d'années dans la Figure 48 pour une période de retour de 100 ans.

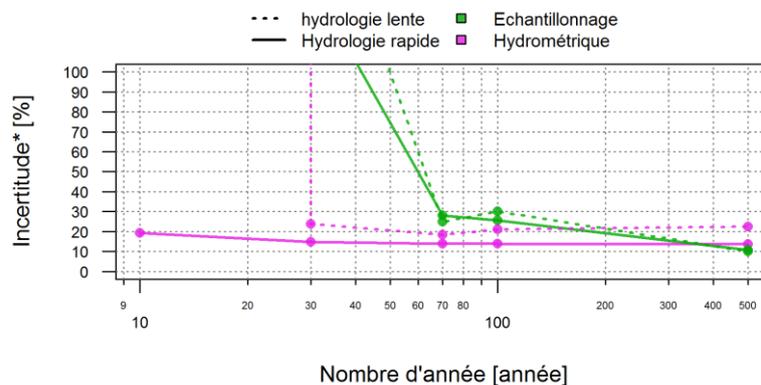


Figure 48: Incertitudes (\* demi-longueur de l'intervalle d'incertitude à 95% normalisé par la médiane) hydrométriques et d'échantillonnage selon le nombre d'années disponibles pour l'estimation des paramètres de la loi GEV ; comparaison des deux hydrologies.

On constate très peu de différences entre les deux hydrologies ; les incertitudes hydrométriques sont globalement plus élevées dans le cas de l'hydrologie « lente » du fait qu'elles soient présentées relativement à la médiane. La Figure 48 montre également une nette diminution des incertitudes d'échantillonnage quand le nombre d'années augmente alors qu'aucun effet n'est visible sur les incertitudes hydrométriques. Cette observation pourrait expliquer pourquoi les incertitudes d'échantillonnage semblaient toujours dominer dans les cas réels : le nombre d'années typiquement

disponibles se situe entre 30 et 60 ans, alors que la Figure 48 suggère que les deux sources d'incertitude ne s'équilibrent qu'à partir d'une centaine d'années.

### 5.4.4.2. LES MOYENNES ANNUELLES

Les résultats de l'estimation de la loi LogNormale pour les moyennes annuelles sont présentés dans la Figure 49 pour le cas où 100 ans de données sont considérés. La Figure 49 montre les résultats pour les extrêmes secs et humides.

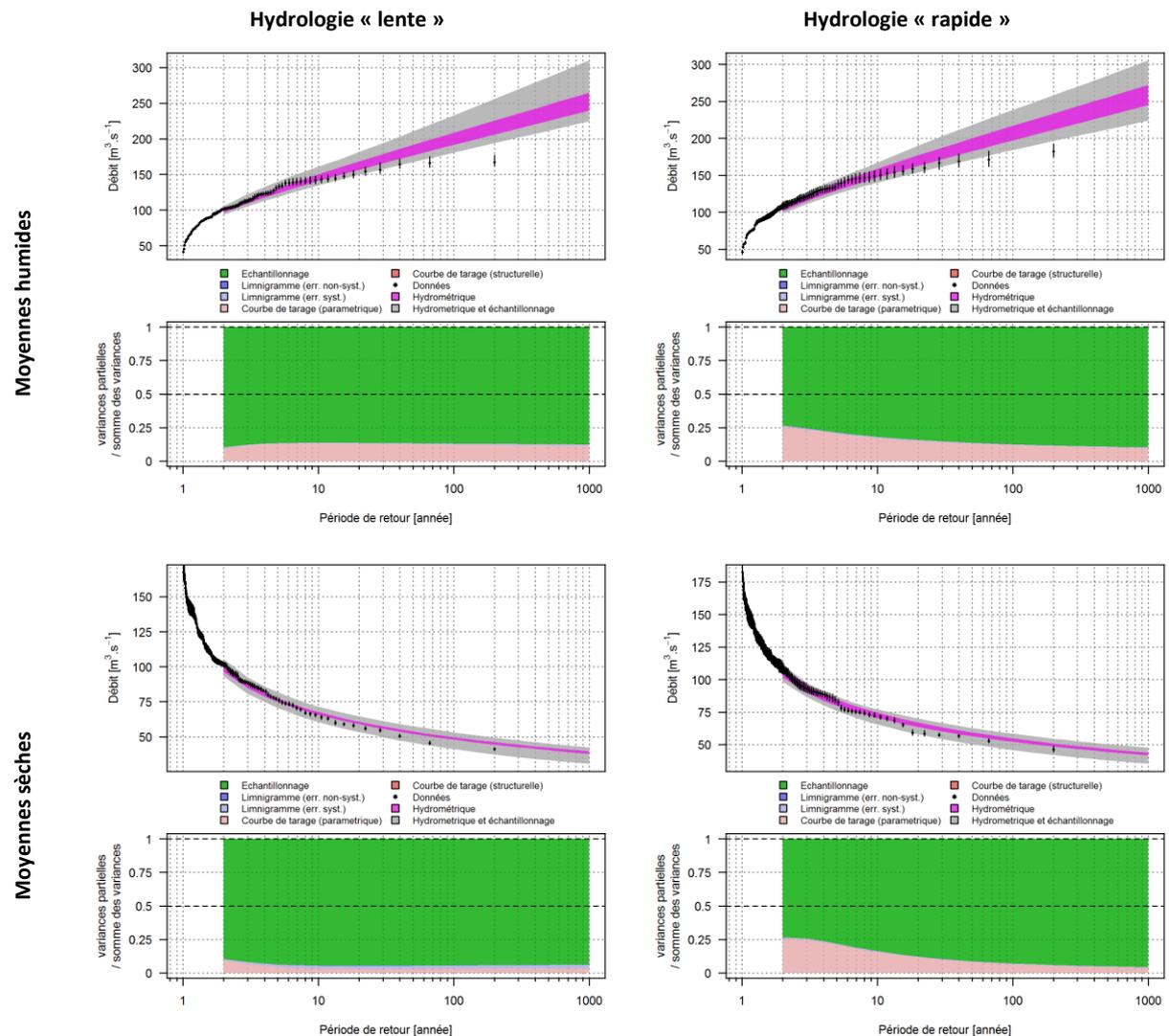


Figure 49: Débits caractéristiques et incertitudes associées selon la période de retour pour les moyennes humides (haut) et les moyennes sèches (bas) (loi LogNormale) ; comparaison des deux hydrologies : « lente » à gauche et « rapide » à droite.

La Figure 49 permet d'observer que :

- Les incertitudes d'échantillonnage sont largement dominante dans tous les cas ;
- les incertitudes hydrométriques semblent plus importantes dans le cas de l'hydrologie « rapide » ;

La Figure 50 permet de voir l'évolution des incertitudes en fonction de la période de retour.

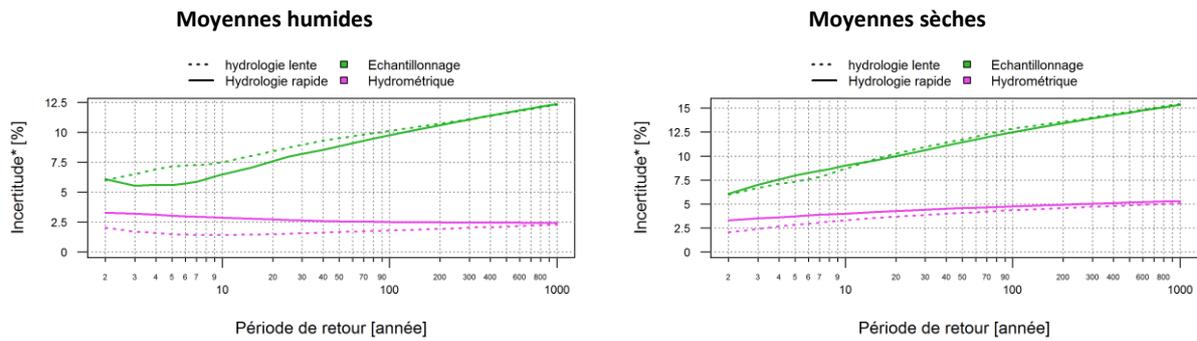


Figure 50: Incertitudes (\* demi-longueur de l'intervalle d'incertitude à 95% normalisé par la médiane) hydrométriques et d'échantillonnage selon la période de retour pour les moyennes humides (gauche) et sèches (droite); comparaison des deux hydrologies.

On constate que l'hydrologie n'a que très peu d'effet sur les incertitudes. Plus la période de retour est grande, plus les incertitudes d'échantillonnage sont grandes. En revanche, les incertitudes hydrométriques semblent peu influencées par la période de retour ; on note tout de même une légère augmentation des incertitudes avec la période de retour dans le cas des moyennes sèches.

La Figure 51 permet d'observer l'impact du nombre d'années disponibles pour l'estimation des paramètres de la loi LogNormale sur les incertitudes. Les résultats sont montrés pour une période de retour de 100 ans.

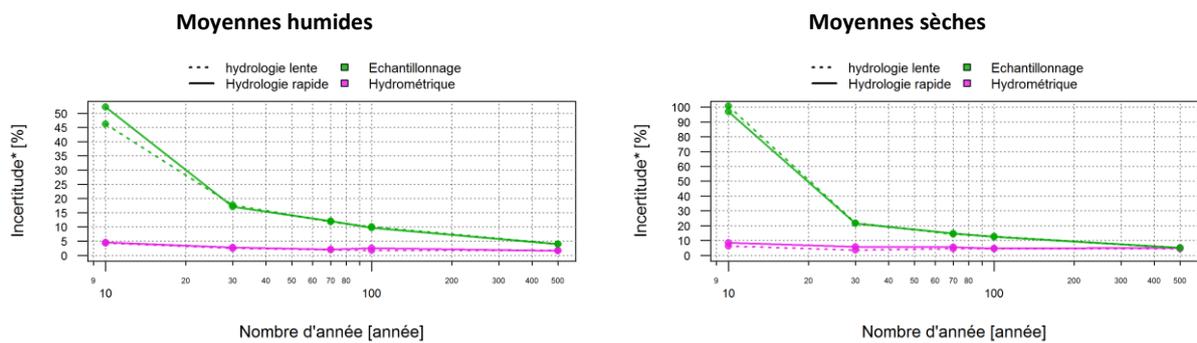


Figure 51: Incertitudes (\* demi-longueur de l'intervalle d'incertitude à 95% normalisé par la médiane) hydrométriques et d'échantillonnage selon le nombre d'années disponibles pour l'estimation des paramètres de la loi LogNormale pour les moyennes humides (gauche) et sèches (droite) ; comparaison des deux hydrologies.

On observe une nette diminution des incertitudes d'échantillonnage avec le nombre d'années et très peu d'influence du nombre d'années sur les incertitudes hydrométriques. La Figure 51 ne montre également aucun effet de l'hydrologie.

### 5.4.4.3. LES VCN<sub>10</sub>

Les résultats pour les VCN<sub>10</sub> sont présentés par la Figure 52 pour 100 ans de données.

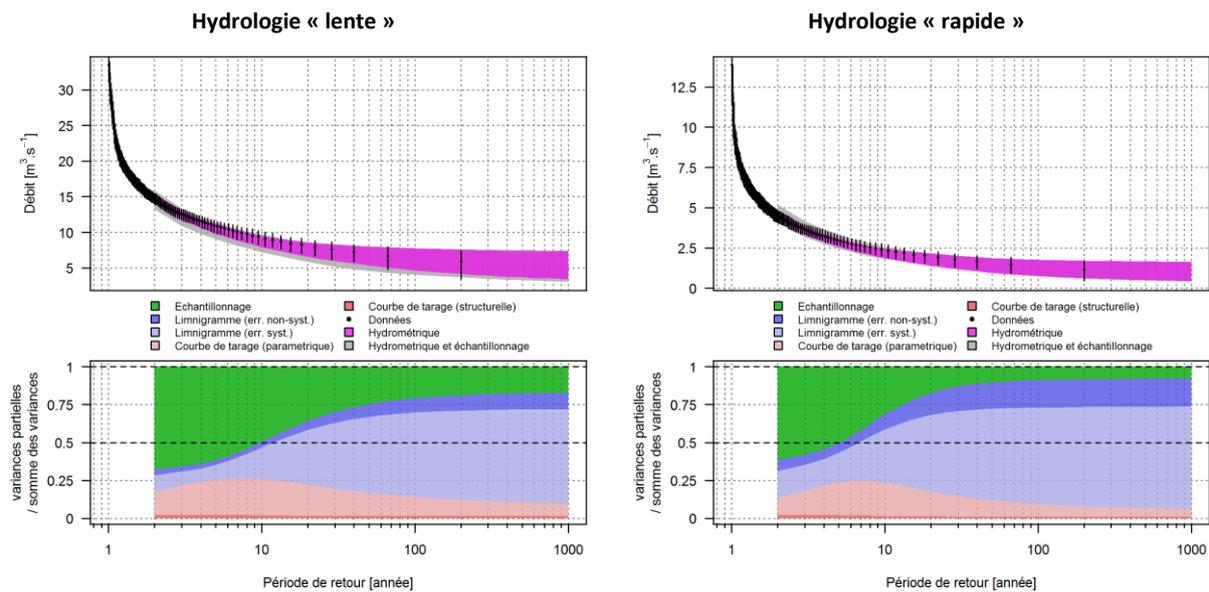


Figure 52: Débits caractéristiques et incertitudes associées selon la période de retour pour les VCN<sub>10</sub> (loi GEV<sub>min</sub>). Comparaison de l'hydrologie « lente » (gauche) et « rapide » (droite).

La Figure 52 montre également qu'il y a très peu d'influence de l'hydrologie sur la répartition des incertitudes. On observe une très forte domination des incertitudes hydrométriques (en particulier des incertitudes limnimétriques) pour les deux hydrologies ; cette domination semble légèrement plus forte dans le cas de l'hydrologie « rapide ».

La Figure 53 permet de visualiser l'évolution des incertitudes hydrométriques et des incertitudes d'échantillonnage selon la période de retour.

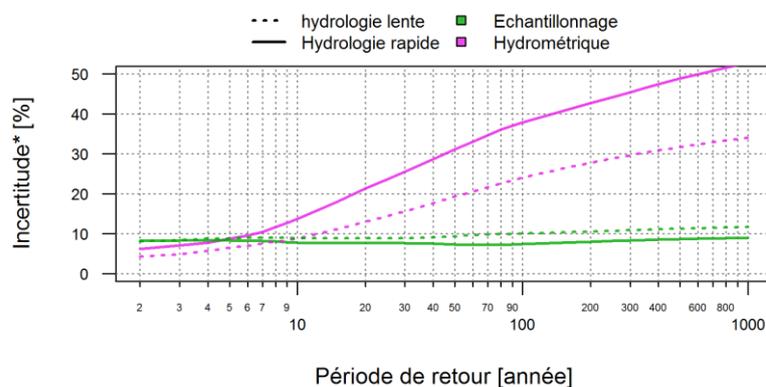


Figure 53: Incertitudes (\* demi-longueur de l'intervalle d'incertitude à 95% normalisé par la médiane) hydrométriques et d'échantillonnage selon la période de retour pour les VCN<sub>10</sub>; comparaison des deux hydrologies.

Les incertitudes d'échantillonnage évoluent très peu avec la période de retour, contrairement à ce qui était observé pour les deux autres variables (MAXAN et moyennes annuelles). Ceci est probablement lié au fait que les bas débits sont bornés par zéro, si bien que la courbe des quantiles estimés a tendance à s'aplatir pour les fortes périodes de retour. Les incertitudes hydrométriques, quant à elles, augmentent quand la période de retour augmente. On note également que les incertitudes hydrométriques, exprimées en relatif, sont plus fortes dans le cas de l'hydrologie « rapide » ; ce résultat est dû aux débits plus faibles dans le cas de l'hydrologie « rapide ».

Les importantes différences dans les répartitions des incertitudes hydrométriques observées dans la Figure 53 peuvent être étudiées avec plus de précision avec la Figure 54.

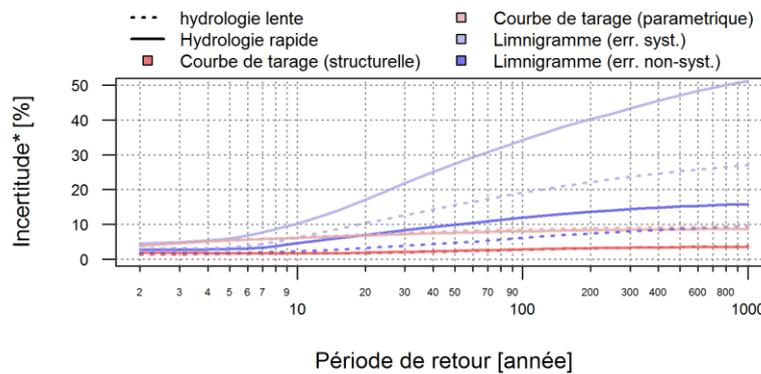


Figure 54 : Incertitudes (\* demi-longueur de l'intervalle d'incertitude à 95% normalisé par la médiane) hydrométriques la période de retour pour les VCN<sub>10</sub>; comparaison des deux hydrologies.

Ce sont les incertitudes limnimétriques, particulièrement celles liées aux erreurs systématiques, qui sont responsables de la forte augmentation des incertitudes hydrométriques avec la période de retour.

La Figure 55 présente les incertitudes selon le nombre d'années disponibles pour une période de retour de 100 ans.

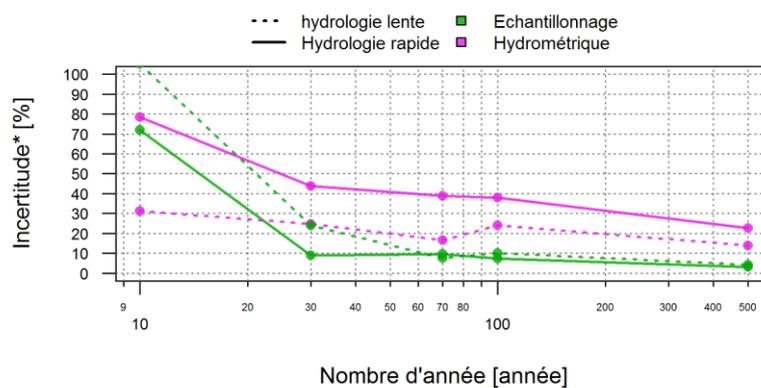


Figure 55: Incertitudes (\* demi-longueur de l'intervalle d'incertitude à 95% normalisé par la médiane) hydrométriques et d'échantillonnage selon le nombre d'années disponibles pour l'estimation des paramètres de la loi GEV<sub>min</sub> pour les VCN<sub>10</sub> ; comparaison des deux hydrologies.

On observe très peu de différences de tendance entre les deux hydrologies. Les incertitudes diminuent quand le nombre d'année augmente. On peut également noter que les incertitudes d'échantillonnage sont presque toujours inférieures aux incertitudes hydrométriques, sauf pour un nombre d'années très faible.

### 5.4.5. CONCLUSION

#### 5.4.5.1. QUELQUES CONCLUSIONS GENERALES

Il est utile de dégager les résultats généraux qui se dégagent selon la variable hydrologique, la période de retour et le nombre d'années.

#### POUR LES MAXIMUMS ANNUELS :

Les incertitudes hydrométriques, bien que dominantes pour les faibles périodes de retour, sont très vite dominées par les incertitudes d'échantillonnage pour les grandes périodes de retour. Cela est essentiellement dû à la loi GEV pour laquelle les incertitudes d'échantillonnage augmentent très vite avec la période de retour. Les incertitudes d'échantillonnage diminuent fortement avec le nombre d'années surtout entre 10 et 70 ans alors qu'aucun effet n'est visible sur les incertitudes hydrométriques. Ceci explique pourquoi les incertitudes d'échantillonnage dominaient largement pour les stations réelles : la longueur des chroniques n'était pas suffisante pour permettre à l'incertitude hydrométrique d'être discernable par rapport à la très forte incertitude d'échantillonnage.

#### **POUR LES MOYENNES ANNUELLES :**

Les incertitudes hydrométriques sont largement dominées par les incertitudes d'échantillonnage que ce soit pour les moyennes sèches ou humides. L'agrégation temporelle de la variable hydrologique qui lisse toutes les incertitudes non-systématiques (les incertitudes structurelles et les incertitudes limnimétriques dues aux erreurs non-systématiques) est la cause principale du faible poids des incertitudes hydrométriques par rapport aux incertitudes d'échantillonnage. Les incertitudes d'échantillonnage augmentent avec la période de retour alors que les incertitudes hydrométriques n'évoluent que très peu. On a également constaté que le nombre d'années induisait une forte diminution des incertitudes d'échantillonnage et n'avait aucun effet sur les incertitudes hydrométriques.

#### **POUR LES VCN<sub>10</sub> :**

Les incertitudes hydrométriques dominent largement pour cette variable hydrologique. En particulier, on constate une grande importance des incertitudes limnimétriques, principales incertitudes pour cette variable (Figure 56). Les incertitudes d'échantillonnage ne sont pas du tout influencées par la période de retour tandis que les incertitudes hydrométriques augmentent avec la période de retour. On a donc une tendance inverse par rapport aux moyennes annuelles et aux maximums. L'augmentation des incertitudes hydrométriques est essentiellement due à l'augmentation des incertitudes limnimétriques. Les incertitudes hydrométriques (et, dans une moindre mesure les incertitudes d'échantillonnage) diminuent quand le nombre d'années augmente.

#### **5.4.5.1. IMPORTANCE DE L'HYDROLOGIE**

Pour la question concernant l'impact de l'hydrologie sur les parts relatives des incertitudes hydrométriques et d'échantillonnage, nos résultats suggèrent que l'hydrologie n'a que peu d'influence. On peut cependant mentionner qu'une hydrologie « lente » semblerait induire une plus grande importance des incertitudes hydrométriques sur les maximums et inversement pour les VCN<sub>10</sub> et les moyennes. Cette conclusion est néanmoins à relativiser : en effet, dans le processus de simulation que nous avons adopté, la différence entre les deux hydrologies est uniquement induite par une différence dans les paramètres du modèle hydrologique. Des hydrologies beaucoup plus contrastées pourraient certainement être obtenues en faisant également varier les propriétés des variables d'entrée du modèle hydrologique (pluie et évapotranspiration potentielle) ainsi que la taille des bassins versants. Il s'agit là d'une perspective de travail importante afin de mieux comprendre comment les propriétés hydrologiques du bassin versant influencent les parts relatives des incertitudes hydrométriques et d'échantillonnage.

## 5.5. IMPACT DE LA SENSIBILITE DES CONTROLES

### 5.5.1. INTRODUCTION

La sensibilité des contrôles hydrauliques correspond à l'effet que ceux-ci auront sur l'importance de la variation de débit pour une variation de hauteur d'eau donnée : plus cette variation est petite plus les contrôles hydrauliques sont sensibles. La sensibilité peut se définir de la façon suivante :

$$s = \frac{Qdh}{dQ}$$

Cette équation donne une valeur  $s$  qui correspond au « poids » en mètre d'une variation de débit donnée. Plus  $s$  est grand, i.e. plus le « poids » est grand, plus la sensibilité est grande. En d'autres termes : plus, pour une variation de débit donnée, la variation de hauteur en mètre est grande, plus la sensibilité est grande. Remarquez que l'ajout du débit  $Q$  au numérateur afin que la variation de débit soit exprimée en proportion du débit :  $dQ/Q$ .

La sensibilité d'un contrôle a un impact direct sur l'influence des incertitudes limnimétriques. En effet, plus le contrôle est sensible, plus les erreurs affectant le limnigramme ont un impact faible sur l'hydrogramme. L'objectif de cette section est donc d'étudier dans quelle mesure la sensibilité des contrôles hydrauliques influence les incertitudes associées aux débits caractéristiques.

Deux stations hydrométriques fictives sont imaginées, et suivent un bassin versant ayant exactement la même hydrologie. L'hydrologie retenue pour cette partie et celle correspondant à l'hydrologie « lente » dans la section 5.4.

### 5.5.2. CREATIONS DE LA STATIONS HYDROMETRIQUES FICTIVES

Les stations hydrométriques imaginées consistent en deux contrôles par déversoir à crête horizontale qui s'ajoutent l'un à l'autre à partir d'une certaine hauteur et qui se trouvent noyés pour les hauteurs les plus fortes, remplacés alors, par un unique contrôle chenal. Pour faire varier la sensibilité des contrôles, nous avons fait varier la largeur et la hauteur de la crête du déversoir en faisant attention qu'environ 90% des débits (d'après la courbe des débits classés, Figure 42, hydrologie « lente ») soient pris en charge par ce premier contrôle.

Les configurations hydrauliques des deux stations hydrométriques sont présentées par la Figure 57.

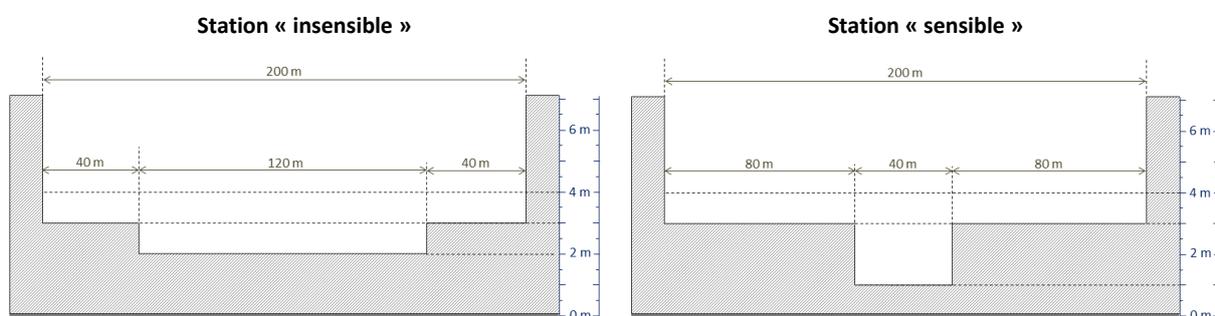


Figure 57 : Vues aval des contrôles hydrauliques en jeu des deux stations hydrométriques fictives étudiées : la station « insensible » (gauche) et « sensible » (droite).

Les équations des courbes de tarages sont rassemblées dans le tableau ci-dessous (les valeurs correspondant aux largeurs sont mises en évidence en gras) :

|                           |  |
|---------------------------|--|
| Station<br>« insensible » | $Q(h) = \begin{cases} 0, & h < 2 \\ 0.4 \times \mathbf{120} \times \sqrt{2g} \times (h - 2)^{3/2}, & 2 \leq h < 3 \\ 0.4 \times \mathbf{120} \times \sqrt{2g} \times (h - 2)^{3/2} + 0.4 \times \mathbf{80} \times \sqrt{2g} \times (h - b_2)^{3/2}, & 3 \leq h < 4 \\ 200 \times 30 \times \sqrt{0.005} \times (h - b_3)^{5/3}, & h \geq 4 \end{cases}$ |
|                           | avec, par continuité :<br>$b_2 = 3 \text{ m}$<br>$b_3 = 4 - \left( \frac{0.4 \times 120 \times \sqrt{2g} \times (4 - 2)^{3/2} + 0.4 \times 80 \times \sqrt{2g} \times (4 - b_2)^{3/2}}{200 \times 30 \times \sqrt{0.005}} \right)^{3/5} = 2.60 \text{ m}$  |
| Station<br>« sensible »   | $Q(h) = \begin{cases} 0, & h < 1 \\ 0.4 \times \mathbf{40} \times \sqrt{2g} \times (h - 1)^{3/2}, & 1 \leq h < 3 \\ 0.4 \times \mathbf{40} \times \sqrt{2g} \times (h - 2)^{3/2} + 0.4 \times \mathbf{160} \times \sqrt{2g} \times (h - b_2)^{3/2}, & 3 \leq h < 4 \\ 200 \times 30 \times \sqrt{0.005} \times (h - b_3)^{5/3}, & h \geq 4 \end{cases}$  |
|                           | avec, par continuité :<br>$b_2 = 3 \text{ m}$<br>$b_3 = 4 - \left( \frac{0.4 \times 40 \times \sqrt{2g} \times (4 - 1)^{3/2} + 0.4 \times 160 \times \sqrt{2g} \times (4 - b_2)^{3/2}}{200 \times 30 \times \sqrt{0.005}} \right)^{3/5} = 2.71 \text{ m}$<br><br>avec $g = 9.81 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$ , l'accélération de la pesanteur          |

Suivant la méthodologie décrite en 5.2.2.2, deux jeux de 100 jaugeages sont créés à partir de l'hydrogramme simulé par le modèle GR4J correspondant à l'hydrologie « lente » dans la section 5.4.2.1 et d'une séquence de 100 probabilités allant 0.025 à 0.975. Une dispersion de +/- 10% est introduite.

Les courbes de tarage théoriques et les jeux de jaugeages sont présentés par la Figure 58.

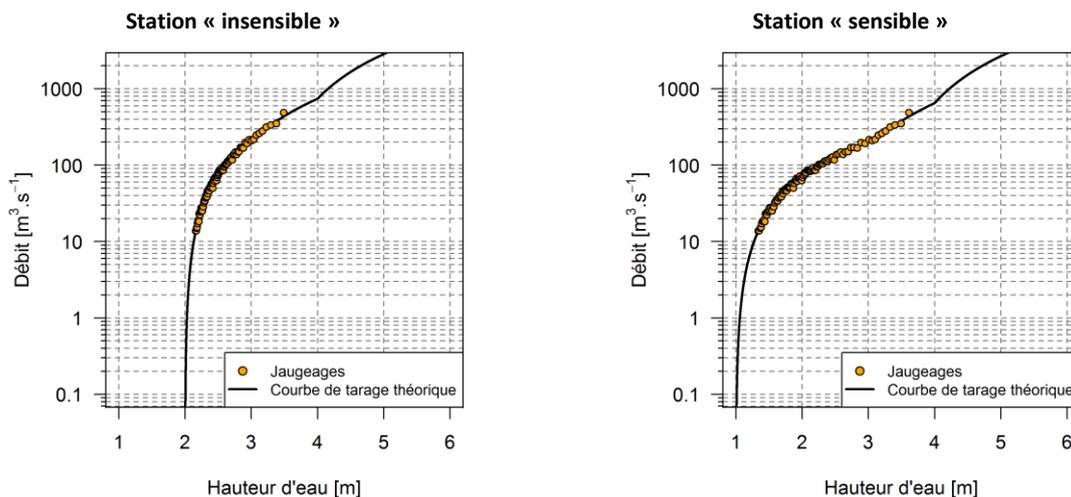


Figure 58: Courbes de tarage théoriques et jeux de jaugeages pour les deux stations hydrométriques étudiées: station « insensible » (gauche) et « sensible » (droite).

Les limnigrammes sont calculés à partir de l'hydrogramme théorique. Pour cela, l'inverse des courbes de tarage théoriques, présentées en 5.5.2, est utilisée.

### 5.5.3. CALCULS DES HYDROGRAMMES ET EXTRACTION DES VARIABLES HYDROLOGIQUES

### 5.5.3.1. ESTIMATION DE LA COURBE DE TARAGE ET DES INCERTITUDES ASSOCIEES

La méthode BaRatin est appliquée aux deux cas fictifs. Les résultats sont présentés par la Figure 59.

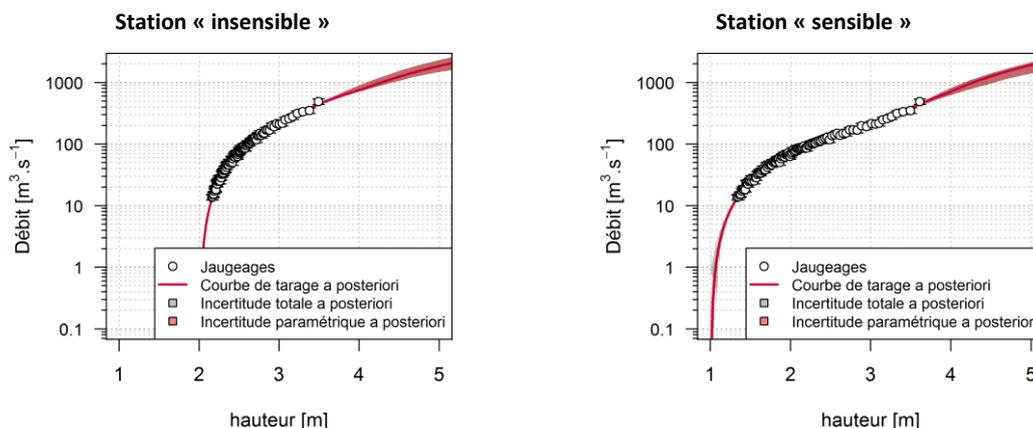


Figure 59: Courbes de tarage et incertitudes estimées par BaRatin (haut) pour les deux stations hydrométriques fictives étudiées : « insensible » à gauche et « sensible » à droite.

La Figure 59 montre des incertitudes assez faibles en dehors des parties extrapolées à haut débit où les incertitudes paramétriques sont très fortes. Cette figure permet également de remarquer les répartitions des jaugeages différentes : les jaugeages couvrent une gamme de hauteur inférieure à 1.5 m dans le cas de la station « insensible » alors que la gamme couverte dans le cas de la station « sensible » est supérieure à 2 m. Il est utile de rappeler que ce sont exactement les mêmes valeurs de débits dans les deux cas ; cette différence de répartition est une illustration de la différence de sensibilité entre les deux stations : pour une même gamme de débit, la gamme de hauteur d'eau correspondant est bien plus grande dans le cas de la station « sensible » par rapport au cas de la station « insensible ».

### 5.5.3.2. PROPAGATION DES INCERTITUDES AUX HYDROGRAMMES

Les deux limnigrammes, correspondant chacun à une des deux stations hydrométriques, sont affectés d'erreurs systématiques et non-systématiques suivant les incertitudes suivantes :

|                                     | Station « insensible » | Station « sensible » |
|-------------------------------------|------------------------|----------------------|
| Erreurs non-systématiques           |                        | +/-4cm               |
| Erreurs systématiques               |                        | +/-4cm               |
| Périodicité des ré-échantillonnages |                        | 30 jours             |

Pour les deux limnigrammes, exactement les mêmes erreurs sont utilisées.

Les résultats de la propagation des incertitudes aux hydrogrammes sont présentés dans la Figure 60 sous forme d'une courbe de débits classés et des incertitudes associées à chaque débit.

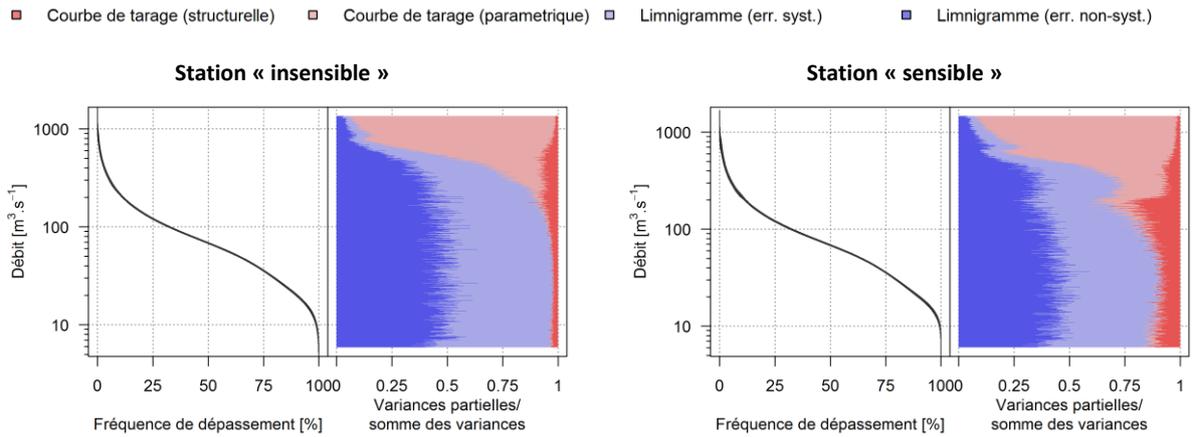


Figure 60: Courbes des débits classés et incertitude totale associée (gauche) et parts des différentes incertitudes hydrométriques (droite) pour les deux stations hydrométriques fictives étudiées : « insensible » (gauche) et « sensible », (droite).

On constate l'effet de la sensibilité entre les deux stations sur la répartition des différentes sources d'incertitudes. En effet, pour le cas de la station « insensible » la part provenant des incertitudes limnimétriques est plus importante que pour la station « sensible ».

### 5.5.3.3. EXTRACTION DES VARIABLES

Les maximums annuels, les moyennes annuelles et les  $VCN_{10}$  sont extraits des hydrogrammes résultants des deux propagations. Les résultats sont présentés par la Figure 61.

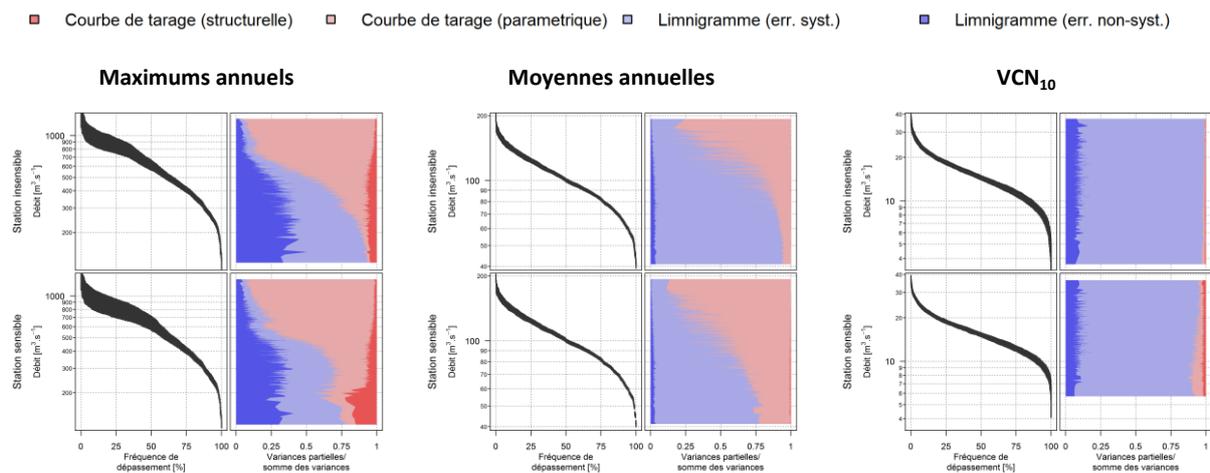


Figure 61: Courbes de débits classés pour les trois variables hydrologiques étudiées, extraites des deux hydrogrammes (station « insensible » en haut et station « sensible » en bas): maximums instantanés (gauche), moyennes annuelles (milieu) et  $VCN_{10}$  (droite).

Les incertitudes limnimétriques ont plus d'importance dans le cas de la station « insensible » en particulière pour les  $VCN_{10}$ . Les incertitudes totales sont, dans l'ensemble, semblables. On note des incertitudes plus fortes pour les maximums annuels.

### 5.5.4. CALCULS DES DEBITS CARACTERISTIQUES

### 5.5.4.1. LES MAXIMUMS ANNUELS

Les résultats sont présentés dans la Figure 62 où les débits et leurs incertitudes pour différentes périodes de retours sont présentés. Ces résultats sont pour 100 ans de données.

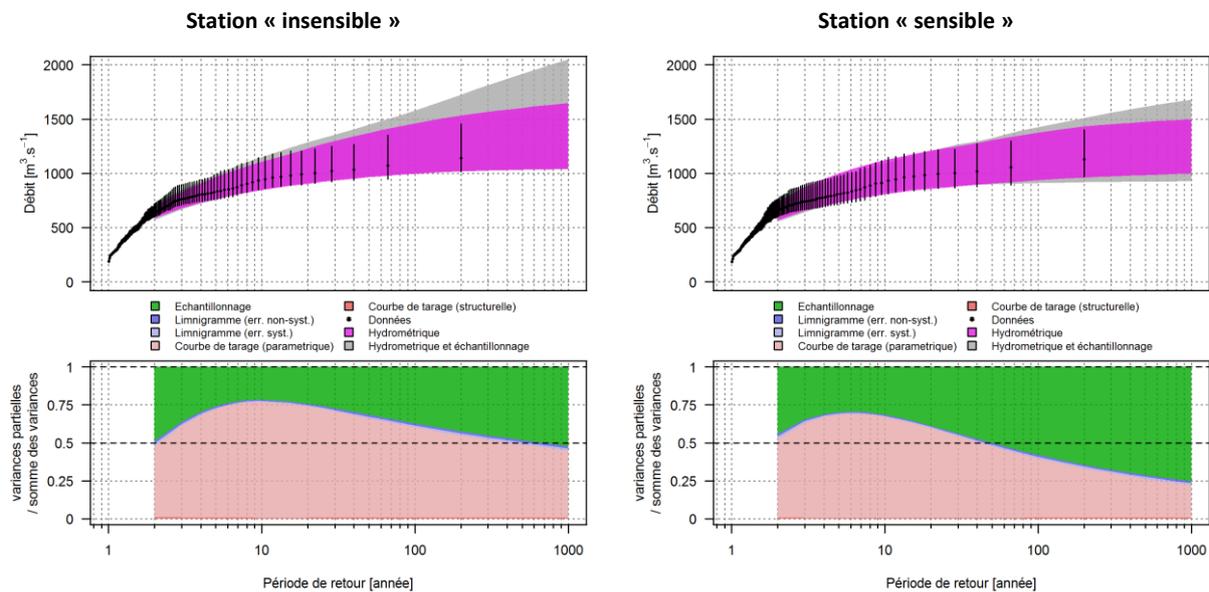


Figure 62: Débits caractéristiques et incertitudes associées selon la période de retour pour les maximums instantanés (loi GEV). Comparaison des deux stations hydrométriques : stations « insensible » (gauche) et « sensible » (droite).

La Figure 62 montre qu'il y a peu d'influence de la sensibilité des contrôles. La sensibilité des contrôles joue essentiellement sur les erreurs limnimétriques et leurs impacts sur incertitudes hydrométriques. Les incertitudes paramétriques sont plus importantes pour la station « insensible » mais il est difficile d'établir un lien entre cette différence d'incertitude et la sensibilité des contrôles.

La Figure 63 présente les incertitudes selon la période de retour.

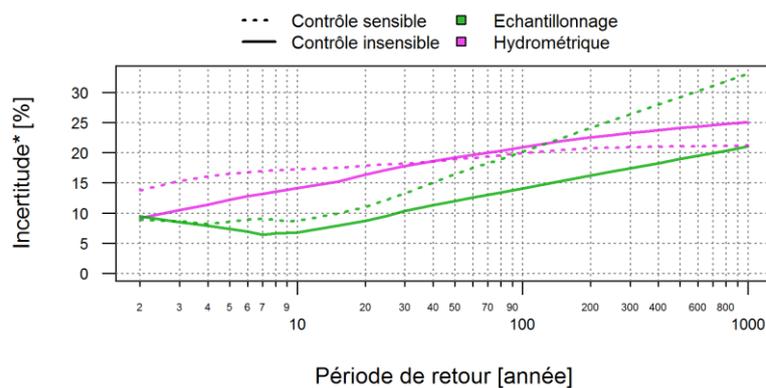


Figure 63: Incertitudes (\* demi-longueur de l'intervalle d'incertitude à 95% normalisé par la médiane) hydrométriques et d'échantillonnage selon la période de retour pour les maximums annuels ; comparaison des deux stations hydrométriques.

La Figure 63 permet de voir que la différence dans l'importance des incertitudes hydrométriques entre les stations « sensible » et « insensible » est principalement due à une différence dans les incertitudes d'échantillonnage qui sont plus grandes dans le cas de la station « sensible ». On peut également remarquer que les incertitudes d'échantillonnage et hydrométriques augmentent avec la période de retour, plus rapidement dans le cas des incertitudes d'échantillonnage.

Les débits et les incertitudes associées selon le nombre d'années sont présentés dans la Figure 64 pour une période de retour de 100 ans.

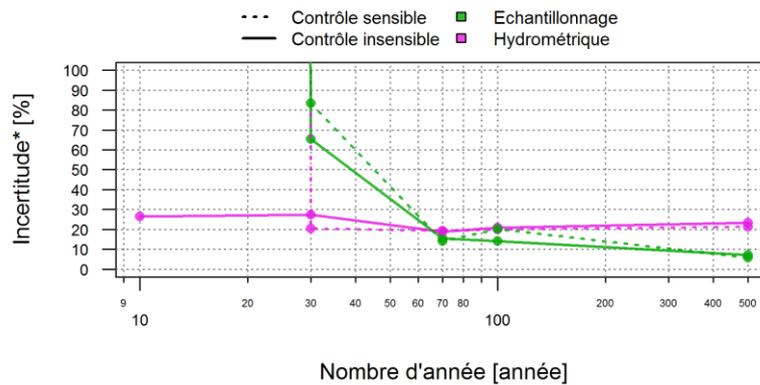


Figure 64: Incertitudes (\* demi-longueur de l'intervalle d'incertitude à 95% normalisé par la médiane) hydrométriques et d'échantillonnage selon le nombre d'années disponibles pour l'estimation des paramètres de la loi GEV ; comparaison des deux stations hydrométriques.

La Figure 64 montre qu'il y a très peu de différences entre les deux stations. On observe également une nette diminution des incertitudes d'échantillonnage quand le nombre d'années augmente et aucun effet sur les incertitudes hydrométriques.

#### 5.5.4.2. LES MOYENNES ANNUELLES

Les résultats de l'estimation sur la loi LogNormale pour les moyennes annuelles sont présentés par la Figure 65 pour le cas où seulement 100 ans de données sont considérés. Cette figure montre les résultats pour les moyennes sèches et humides.

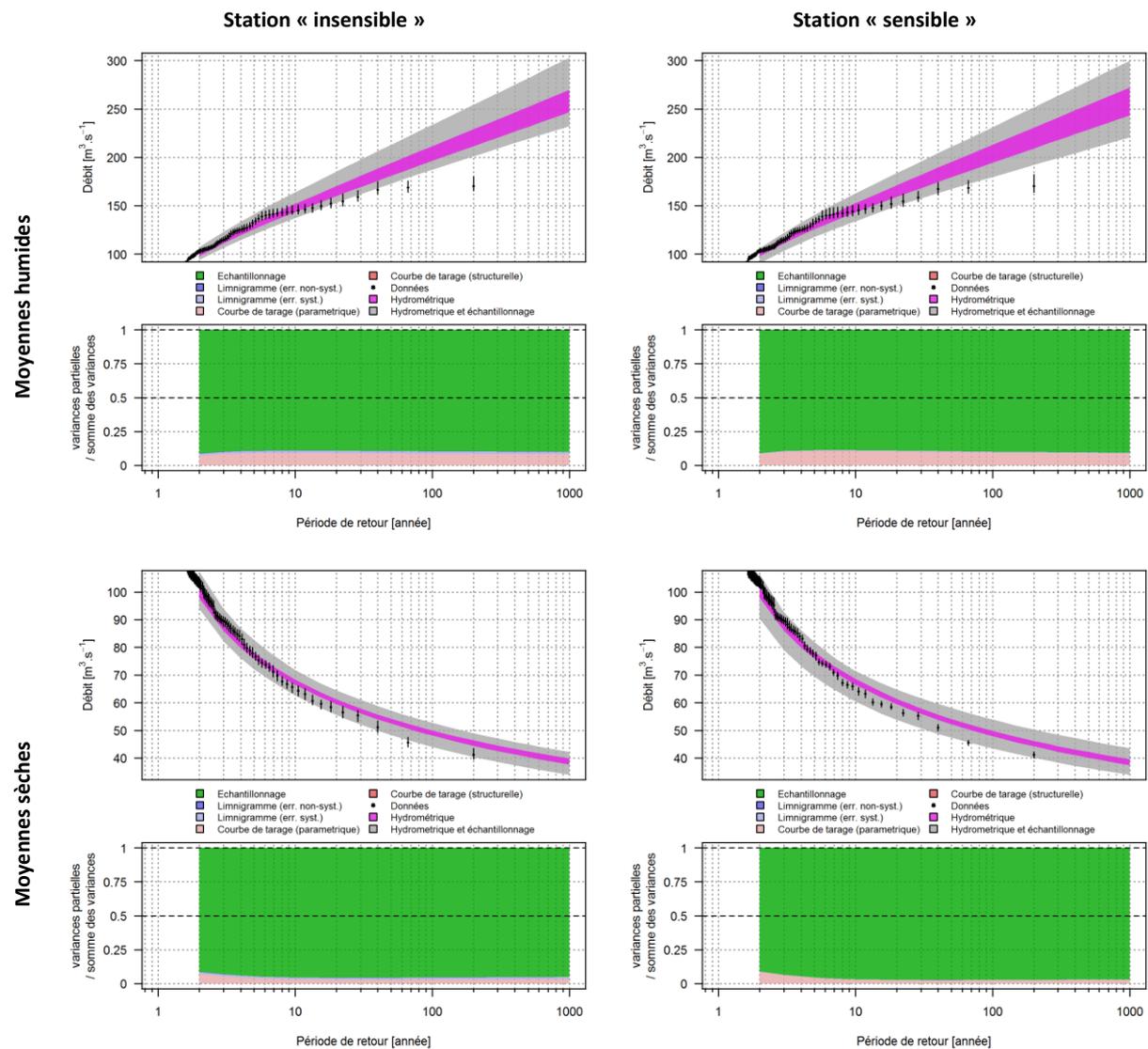


Figure 65: Débits caractéristiques et incertitudes associées selon la période de retour pour les moyennes humides (haut) et les moyennes sèches (bas) (loi LogNormale) ; comparaison des deux stations hydrométriques : « insensible » à gauche et « sensible » à droite.

La Figure 65 ne montre aucune différence entre les deux stations. Les incertitudes d'échantillonnage sont largement dominantes dans tous les cas. De même la Figure 66 ne montre que très peu de différence entre les deux stations ; la station « sensible » semble être tout de même affectée de plus d'incertitude que la station « insensible », en particulier, cela s'observe pour les incertitudes d'échantillonnage dans le cas des moyennes humides.

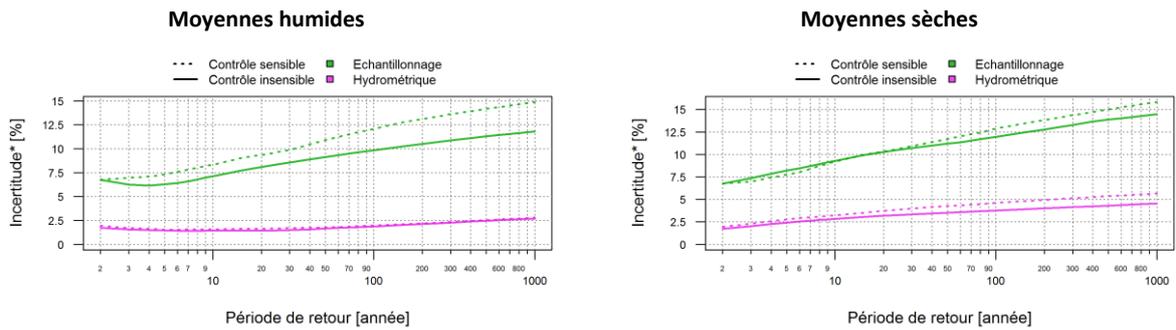


Figure 66 : Incertitudes (\* demi-longueur de l'intervalle d'incertitude à 95% normalisé par la médiane) hydrométriques et d'échantillonnage selon la période de retour pour les moyennes humides (gauche) et sèches (droite); comparaison des deux stations hydrométriques.

La Figure 67 permet d'observer l'impact du nombre d'années disponibles pour l'estimation des paramètres de la loi LogNormale sur les incertitudes. Les résultats sont montrés pour une période de retour de 100 ans.

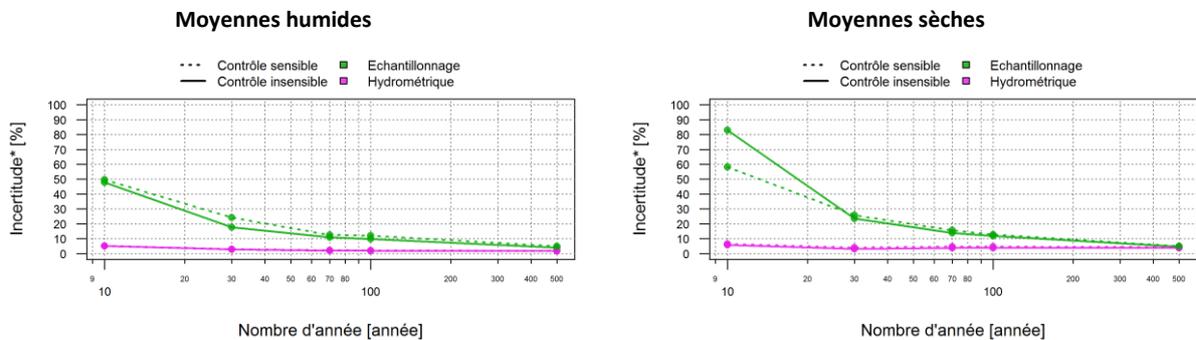


Figure 67: Incertitudes (\* demi-longueur de l'intervalle d'incertitude à 95% normalisé par la médiane) hydrométriques et d'échantillonnage selon le nombre d'années disponibles pour l'estimation des paramètres de la loi LogNormale pour les moyennes humides (gauche). Comparaison des deux stations hydrométriques.

Aucune différence n'est observable entre les deux stations. On remarque que les incertitudes d'échantillonnage diminuent quand le nombre d'années augmente alors que les incertitudes hydrométriques n'évoluent pas.

### 5.5.4.3. LES VCN<sub>10</sub>

Les résultats pour les VCN<sub>10</sub> sont présentés par la Figure 68 pour 100 ans de données.

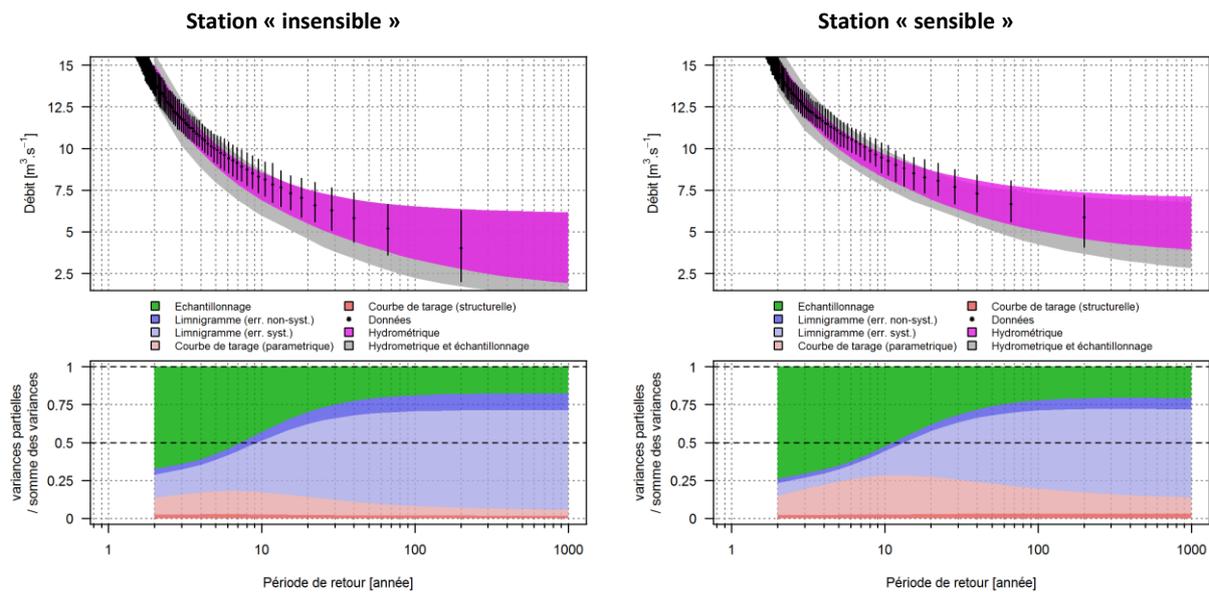


Figure 68: Débits caractéristiques et incertitudes associées selon la période de retour pour les VCN<sub>10</sub> (loi GEV<sub>min</sub>). Comparaison des deux stations hydrométriques : « insensible » (gauche) et « sensible » (droite).

La Figure 68 permet d’observer des incertitudes totales plus fortes dans le cas de la station « insensible ». Les incertitudes hydrométriques sont dominantes dans les deux cas. Celles-ci sont essentiellement dues aux incertitudes limnimétriques et en particulier à celles dues aux erreurs systématiques. On remarque également que la part des incertitudes limnimétriques est plus forte dans le cas de la station « insensible ».

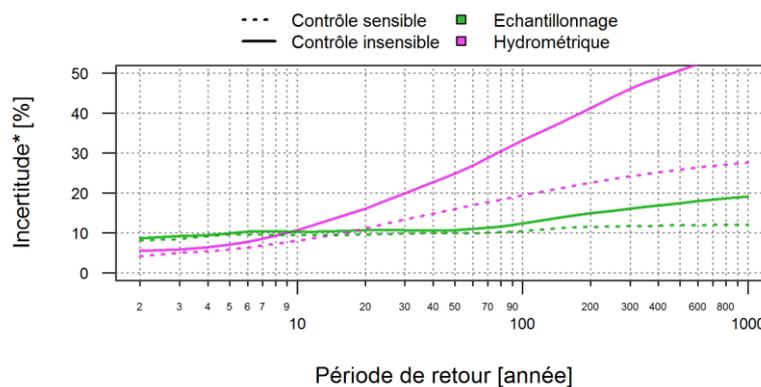


Figure 69: Incertitudes (\* demi-longueur de l’intervalle d’incertitude à 95% normalisé par la médiane) hydrométriques et d’échantillonnage selon la période de retour pour les VCN<sub>10</sub>; comparaison des deux stations hydrométriques.

La Figure 69 montre que les incertitudes d’échantillonnage sont très similaires entre les deux stations mais que les incertitudes hydrométriques, qui augmentent fortement avec la période de retour, sont beaucoup plus fortes dans le cas de la station « insensible ». La Figure 70, qui ne montre que les incertitudes hydrométriques, permet de voir que :

- les incertitudes hydrométriques augmentent avec la période de retour surtout du fait des incertitudes limnimétriques (en particulier celles provenant des erreurs systématiques) ;
- ce sont les différences entre les incertitudes limnimétriques qui sont à l’origine des différences entre les incertitudes hydrométriques des deux stations : les incertitudes limnimétriques sont plus fortes (presque le double) dans le cas de la station « insensible » par rapport à la station « sensible ».

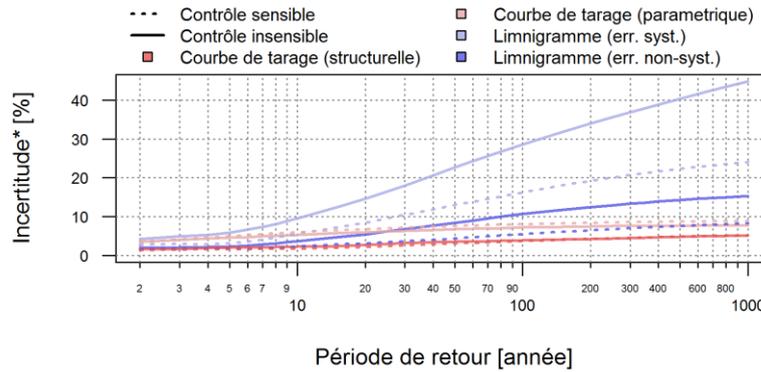


Figure 70: Incertitudes (\* demi-longueur de l'intervalle d'incertitude à 95% normalisé par la médiane) hydrométriques la période de retour pour les VCN<sub>10</sub>; comparaison des deux stations hydrométriques.

La Figure 71 présente les incertitudes selon le nombre d'années disponibles pour une période de retour de 100 ans.

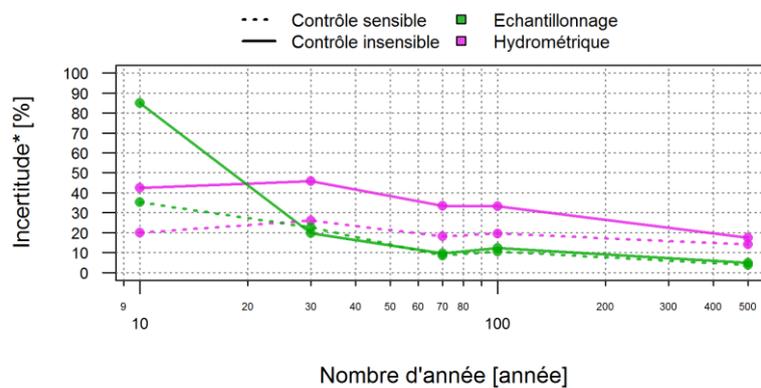


Figure 71: Incertitudes (\* demi-longueur de l'intervalle d'incertitude à 95% normalisé par la médiane) hydrométriques et d'échantillonnage selon le nombre d'années disponibles pour l'estimation des paramètres de la loi GEV pour les VCN<sub>10</sub>; comparaison des deux stations hydrométriques.

On observe que très peu de différence entre les deux stations au niveau des incertitudes d'échantillonnage. En revanche, on constate que les incertitudes hydrométriques sont plus fortes dans le cas de la station « insensible » et cela, quel que soit le nombre d'années. On note tout de même que la différence entre les deux stations tend à s'estomper quand le nombre d'années est grand. La Figure 72 confirme que les différences entre les deux stations, pour les incertitudes hydrométriques, sont dues aux incertitudes limnimétriques et en particulier, à celles provenant des erreurs systématiques.

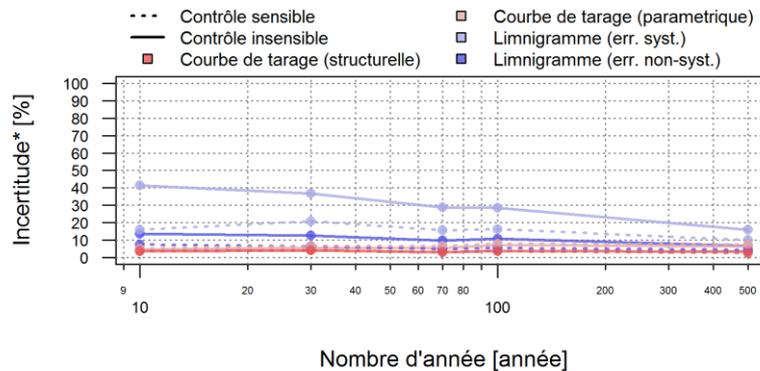


Figure 72: : Incertitudes (\* demi-longueur de l'intervalle d'incertitude à 95% normalisé par la médiane) hydrométriques selon le nombre d'années disponibles pour l'estimation des paramètres de la loi GEV pour les  $VCN_{10}$  ; comparaison des deux stations hydrométriques.

### 5.5.5. CONCLUSION

Des résultats généraux similaires à ceux listés en 5.4.5 peuvent être dégagés ici. Cette partie a pour ambition de tenter d'esquisser une réponse quant à l'impact de la sensibilité des contrôles hydrauliques sur les incertitudes associées aux débits caractéristiques.

Les résultats présentés dans cette partie suggèrent un impact très limité de la sensibilité des contrôles sur les maximums annuels et les moyennes annuelles. A l'inverse, des différences non négligeables ont été observées entre les stations « sensible » et « insensible » pour les  $VCN_{10}$ . En effet, une prédominance des incertitudes hydrométriques plus fortes est observée dans le cas « insensible ». Cette différence est directement liée aux différences d'incertitudes limnimétriques (principales causes des incertitudes hydrométriques dans le cas des  $VCN_{10}$ ) entre les deux stations hydrométriques. Les incertitudes limnimétriques de la station « insensible » représentent près du double des incertitudes limnimétriques de la station « sensible ».

Il est utile de rappeler que la sensibilité des contrôles hydrauliques d'une station affecte l'impact des incertitudes limnimétriques. En conséquence, tout effet de la sensibilité des contrôles sur les parts relatives des incertitudes d'échantillonnage et hydrométriques n'aura de l'importance que dans le cas où les incertitudes limnimétriques sont importantes par rapport aux autres sources d'incertitudes.

## 5.6. IMPACT DU CHOIX DE LA LOI STATISTIQUE

### 5.6.1. INTRODUCTION

Les incertitudes d'échantillonnage sont fortement contrôlées par la taille de l'échantillon permettant d'estimer les paramètres de la loi statistique : en général, plus le nombre d'années disponibles est grand, plus l'incertitude d'échantillonnage est faible. Le nombre de paramètre de la loi statistique choisie peut également influencer les incertitudes d'échantillonnage : plus il y a de paramètres, plus, pour un nombre d'années donné, l'incertitude d'échantillonnage sera grande.

L'hydrologue, quand il s'intéresse aux périodes de retour des crues, est fréquemment confronté au choix de la loi statistique : loi de Gumbel ou loi GEV. La loi de Gumbel n'est qu'un cas particulier de la loi GEV et elle ne nécessite que 2 paramètres contre 3 dans le cas d'une loi GEV. La question qui est

posée ici est : « dans quelle mesure le choix, entre une distribution Gumbel et une distribution GEV, impacte-t-il les incertitudes ? ». Pour cette question, on se concentre uniquement sur les maximums annuels.

### 5.6.2. CALCULS DES DEBITS CARACTERISTIQUES

Une série de débit de 100 ans est utilisée. Il s'agit à l'hydrogramme correspondant à l'hydrologie « rapide » présentée dans la section 5.4.2. Les maximums instantanés de chaque année sont extraits (section 5.4.3) et utilisés pour le calage d'une distribution GEV et d'une distribution Gumbel. Les résultats sont présentés par la Figure 73.

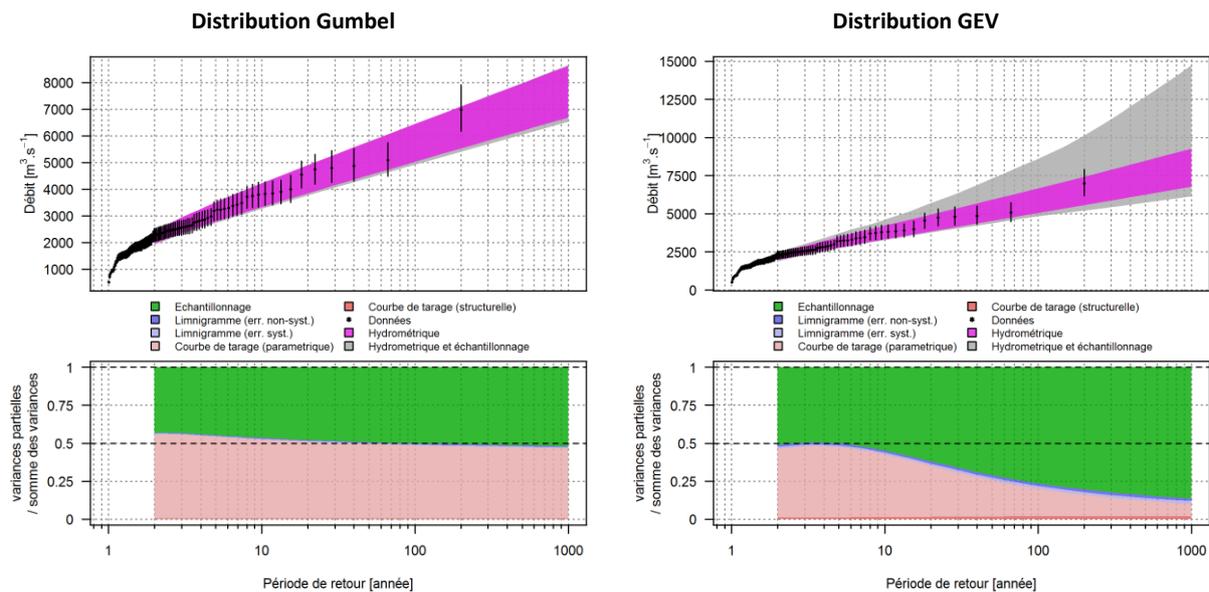


Figure 73: Débits caractéristiques et incertitudes associées selon la période de retour pour les maximums instantanés  
Comparaison de l'estimation d'une loi de Gumbel (gauche) et d'une loi GEV (droite).

La Figure 73 permet de constater de gros écarts d'incertitudes entre les deux distributions. Globalement les incertitudes totales sont plus fortes dans le cas de la distribution GEV. De plus, les incertitudes hydrométriques qui sont équivalentes aux incertitudes d'échantillonnage dans le cas de la distribution Gumbel sont bien moins importantes dans le cas la distribution GEV, surtout pour les grandes périodes de retour.

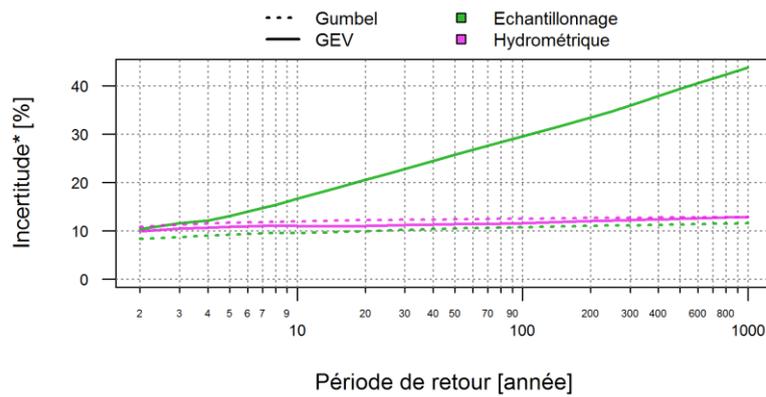


Figure 74: Incertitudes (\* demi-longueur de l'intervalle d'incertitude à 95% normalisé par la médiane) hydrométriques et d'échantillonnage selon la période de retour pour les maximums annuels ; comparaison des estimations entre les deux lois statistiques : Gumbel et GEV.

La Figure 74 montre, pour une chronique longue de 100 ans, la différence entre la distribution GEV et Gumbel. Les incertitudes d'échantillonnage sont largement plus grandes dans le cas de la loi GEV par rapport à la loi de Gumbel ; Celles-ci augmentent quand la période de retour augmente.

Les incertitudes d'échantillonnage, dans le cas de la loi de Gumbel, n'augmentent que très peu avec la période de retour et sont aux alentours de +/-10%. De même, les incertitudes hydrométriques n'augmentent que très peu avec la période de retour et sont très similaires pour les deux stations (autour de +/-10%), ce qui paraît logique car exactement les mêmes données sont utilisées dans les deux cas.

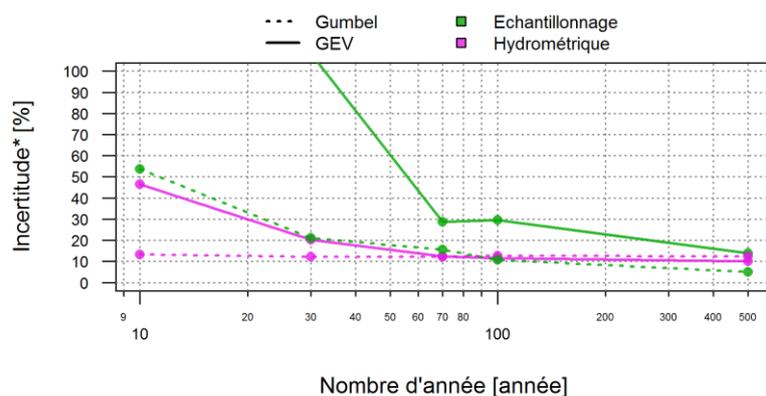


Figure 75: Incertitudes (\* demi-longueur de l'intervalle d'incertitude à 95% normalisé par la médiane) hydrométriques et d'échantillonnage selon le nombre d'années disponibles pour l'estimation des paramètres de la loi GEV et de la loi de Gumbel.

La Figure 75 permet de comparer les incertitudes d'échantillonnage et hydrométriques entre les deux distributions selon le nombre d'années utilisées dans l'estimation des paramètres des lois. On constate que les incertitudes d'échantillonnage sont largement plus grande dans le cas de la distribution GEV quel que soit le nombre d'années.

Il est également intéressant de noter que, par exemple, avec 70 ans de données, l'incertitude d'échantillonnage dans le cas de la loi de Gumbel est similaire à l'incertitude d'échantillonnage dans le cas de la loi GEV avec 500 ans de données. Pour des stations hydrométriques réelles, les tailles d'échantillons typiques sont de l'ordre de 30-60 ans ; il n'est donc pas étonnant que les incertitudes d'échantillonnage dominent largement lorsqu'on utilise une loi GEV.

### **5.6.3. CONCLUSION**

Les résultats suggèrent un impact considérable du choix de la loi sur l'importance des incertitudes d'échantillonnage : celles-ci sont beaucoup plus importantes dans le cas de la loi GEV par rapport à la loi de Gumbel. En conséquence, la part relative des incertitudes hydrométriques est plus faible dans le cas d'une loi GEV. Ces résultats nécessiteraient d'être d'avantages exhaustifs pour permettre une meilleure investigation des importances respectives du nombre d'années, du nombre de paramètres de la loi statistique, et de l'adéquation entre la loi statistique choisie et les données.

## 6 CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES

Le présent rapport vise à étudier les parts relatives des incertitudes d'échantillonnage (liées aux manques de données dans l'estimation de lois statistiques) et des incertitudes hydrométriques (provenant des mesures de hauteurs d'eau et de la conversion en débit via la courbe de tarage). Une méthodologie permettant de propager les incertitudes hydrométriques à des débits caractéristiques (e.g. crue centennale) est détaillée dans la première partie du rapport. La méthodologie est ensuite appliquée à trois cas réels permettant d'illustrer sa mise en œuvre et de présenter quelques résultats. La dernière partie du rapport s'attache à étudier, sur des cas fictifs, l'effet de quelques facteurs susceptibles d'influencer l'importance des incertitudes d'échantillonnage et hydrométriques : l'hydrologie, la sensibilité des contrôles hydrauliques et le choix de la loi statistique. L'ensemble du travail se concentre sur trois variables hydrologiques : les maximums annuels, les moyennes annuelles et les  $VCN_{10}$ . Une loi GEV, une loi Log-Normale et une loi GEV\_min (adaptation d'une loi GEV aux minimums) ont respectivement été utilisées pour ces trois variables hydrologiques.

Les résultats montrent, tant sur les cas d'application réels que fictifs, que les incertitudes d'échantillonnage sont généralement largement dominantes pour les maximums annuels et les moyennes annuelles, au moins avec les tailles de chronique typiquement disponibles (30-60 ans). En revanche, les résultats montrent que les incertitudes hydrométriques sont largement dominantes dans le cas des  $VCN_{10}$ .

L'application de la méthode sur les cas fictif a permis d'observer la diminution des incertitudes d'échantillonnage quand le nombre d'années disponibles augmente : plus on dispose d'années, plus les incertitudes d'échantillonnage sont faibles et, en conséquence, plus les incertitudes hydrométriques ont de l'importance. Les résultats concernant les trois facteurs étudiés susceptibles d'influencer les parts relatives des incertitudes montrent que :

- l'hydrologie n'a que peu d'influence ; ce résultat demande néanmoins à être confirmé en utilisant plus de bassins versants (réels ou fictifs) présentant des hydrologies beaucoup plus contrastées que celles ayant été utilisées dans ce rapport.
- la sensibilité des contrôles hydrauliques n'a de l'influence que pour les  $VCN_{10}$  et cela uniquement si les incertitudes limnimétriques sont grandes par rapport aux incertitudes de la courbe de tarage ;
- Pour l'étude des crues, le choix d'une loi GEV ou d'une loi de Gumbel a un effet très important sur la part relative des incertitudes d'échantillonnage : celles-ci sont beaucoup plus grandes et dominantes dans le cas d'une loi GEV, surtout pour les fortes périodes de retour.

L'étude offre donc des résultats qui semblent assez généraux selon la variable hydrologique étudiée. Cependant, des différences non négligeables apparaissent selon les cas d'application. De manière générale, ces différences sont dues à de très nombreux facteurs : types de contrôles hydrauliques à la station, fiabilité de la courbe de tarage (elle-même influencée par la stabilité des contrôles, le nombre, la répartition et l'incertitude des jaugeages, etc.), incertitudes limnimétriques, type d'hydrologie (bassins rapides très réactifs ou bassins plus lents, présence éventuelle d'une composante nivale, etc.), taille des chroniques, etc. Etant donnée la grande variabilité de tous ces facteurs d'influence, il nous est impossible de fournir un ordre de grandeur général sur la part relative des incertitudes hydrométriques et d'échantillonnage, ni même de fournir un quelconque abaque.

En conséquence, une approche au cas par cas semble nécessaire afin de quantifier les importances relatives des différentes sources d'incertitudes. La méthodologie proposée dans ce rapport permet une telle analyse. Celle-ci à l'avantage de reposer sur des outils déjà existant (BaRatin et JBay) et de profiter de la force de l'approche par simulations Monte Carlo (ou « approche spaghetti ») qui rend la représentation de l'incertitude explicite. En l'état, seul un prototype recherche a été développé sous R; il est néanmoins envisageable d'en faire émerger un outil opérationnel, soit sous la forme d'un code R général et réutilisable, soit sous la forme d'un logiciel à part entière (ce qui demanderait des développements plus importants).

Le travail réalisé fournit également une illustration de la propagation des incertitudes hydrométriques à des calculs classiques pour l'hydrologue; d'autres possibilités restent à explorer comme la propagation de ces incertitudes dans le calage ou l'évaluation des modélisations hydrologiques ou hydrauliques. Ce rapport illustre également l'importance de considérer les incertitudes hydrométriques qui parfois sont considérables afin d'améliorer, par exemple, d'éventuelles prises de décision.

## 7 BIBLIOGRAPHIE

- Arnaud, P. e. (1999). Using a stochastic model for generating hourly hyetographs to study extreme rainfalls. *Hydrological Sciences Journal*, 44 (3), 433-446.
- Horner, I. (2014). *Quantification des incertitudes hydrométriques et impact sur les bilans hydrologiques - Application au bassin versant de l'Yzeron (ouest Lyonnais)*. Mémoire de fin d'étude.
- Horner, I., Le Coz, J., & Renard, B. (2015). *Estimation des incertitudes sur les hydrogrammes avec BaRatin*.
- Horner, I., Le Coz, J., Renard, B., Mansanarez, V., Pierrefeu, G., Le Boursicaud, R., . . . Berthet, T. (2015). *BaRatin: propagation des incertitudes aux chroniques de débit*.
- Horner, I., Renard, B., Le Coz, J., Branger, F., McMillan, H. K., & Pierrefeu, G. (soumis). How much are streamflow uncertainties increased by stage measurement errors? *Water Resources Research*.
- ISO. (2013). *Hydrométrie -- Mesurage du débit des liquides dans les canaux découverts au moyen de moulinets ou de flotteurs*. ISO.
- Le Coz, J., Camenen, B., Dramais, G., Ribot-Bruno, J., Ferry, M., & Rosique, J. L. (2011). *Contrôle des débits réglementaires*. ONEMA.
- Le Coz, J., Camenen, B., Peyrard, X., & Dramais, G. (2012). Uncertainty in open-channel discharges measured with the velocity-area method. *Flow Measurement and Instrumentation*, 26, pp. 18-29.
- Le Coz, J., Renard, B., Bonnifait, L., Branger, F., & Le Boursicaud, R. (2014). Combining hydraulic knowledge and uncertain gaugings in the estimation of hydrometric rating curves: A Bayesian approach. *Journal of Hydrology*, 509, pp. 573-587.
- Perrin, C., Michel, C., & Andreassian, V. (2003). Improvement of a parsimonious model for streamflow simulation. (*J. o. Hydrology, Ed.*) 279(1-4), 275-289.



**Irstea – centre de Lyon-Villeurbanne**

UR Hydrologie-Hydraulique

5 rue de la Doua – BP 32108

69616 Villeurbanne Cedex

tél. +33 (0)4 72 20 87 87

[www.irstea.fr](http://www.irstea.fr)