



HAL
open science

Quantification des incertitudes hydrométriques et impact sur les bilans hydrologiques : application au bassin versant de l'Yzeron (ouest Lyonnais)

Ivan Horner

► **To cite this version:**

Ivan Horner. Quantification des incertitudes hydrométriques et impact sur les bilans hydrologiques : application au bassin versant de l'Yzeron (ouest Lyonnais). Sciences agricoles. 2014. dumas-01096007

HAL Id: dumas-01096007

<https://dumas.ccsd.cnrs.fr/dumas-01096007>

Submitted on 16 Dec 2014

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.

**AGROCAMPUS
OUEST**

- CFR Angers
 CFR Rennes



**IRSTEA
UR HHLY**

5, rue de la Doua,
69100 Villeurbanne



Année universitaire : 2013-2014

Spécialité :

Génie de l'environnement

Spécialisation (et option éventuelle) :

Sol Eau Hydrosystèmes

Mémoire de Fin d'Études

- d'Ingénieur de l'Institut Supérieur des Sciences agronomiques, agroalimentaires, horticoles et du paysage
 de Master de l'Institut Supérieur des Sciences agronomiques, agroalimentaires, horticoles et du paysage
 d'un autre établissement (étudiant arrivé en M2)

Quantification des incertitudes hydrométriques et impact sur les bilans hydrologiques - Application au bassin versant de l'Yzeron (ouest Lyonnais)

Par : Ivan HORNER

Soutenu à Rennes le* 19/09/2014

Devant le jury composé de :

Président : Youssef Fouad

Maîtres de stage :

Flora Branger et Raphaël Le Boursicaud

Enseignant référent : Youssef Fouad

Autres membres du jury (Nom, Qualité) :

Z. Thomas, équipe pédagogique SEH

F. Moatar, rapporteur externe

K. Gallagher, rapporteur externe

Les analyses et les conclusions de ce travail d'étudiant n'engagent que la responsabilité de son auteur et non celle d'AGROCAMPUS OUEST

Remerciements

Le travail effectué lors du stage n'aurait pas été possible sans les nombreuses aides dont j'ai bénéficié.

Je remercie tout particulièrement Flora Branger pour sa présence et sa disponibilité et pour m'avoir guidé tout en me laissant une large marge de manœuvre tout au long de mon stage. Je la remercie aussi pour le regard apporté lors de la rédaction de ce mémoire depuis la définition du sujet jusqu'à la relecture finale.

Je remercie également Raphaël Le Boursicaud pour avoir été toujours très disponible durant ces six mois, pour son importante contribution dans ma prise en main de BaRatin, pour ces conseils pertinents ainsi que pour la relecture attentive de mon mémoire.

Je remercie également Benjamin Renard pour m'avoir éclairé sur beaucoup de notions statistiques et pour le temps pris pour mes nombreuses questions concernant BaRatin.

Un grand merci à Jérôme Le Coz pour ses avis et conseils précieux sur les analyses hydrauliques des stations hydrométriques et sur les estimations des incertitudes associées aux jaugeages.

Merci également à Mickaël Lagouy pour la présentation du bassin versant de l'Yzeron et pour son aide lors des relevés topographiques. Merci à Aurélien Despax pour les codes R de la méthode Q+. Merci à Guillaume Dramais pour l'initiation pratique au jaugeage.

Le travail n'aurait également pas été possible sans les données fournies par la DREAL Rhône-Alpes. Je les remercie, en particulier Gaëlle Guignon.

Je suis également très reconnaissant envers tous les enseignants de l'option « Sol Eau Hydrosystème » de la spécialisation « Génie de l'Environnement » d'Agrocampus Ouest pour la formation complète et de grande qualité que j'ai reçue.

Enfin, merci à tous ceux qui m'ont donné un « coup de pouce » ici et là au cours de mon stage et que je n'ai pas cité ici et à toute l'équipe Hydrologie-Hydraulique d'IRSTEA pour leur sympathie et la bonne ambiance.

Sommaire

Introduction	1
Chapitre I. Définitions et état de l'art	2
I.1. Les courbes de tarage	2
I.1.1. Principe général	2
I.1.2. Les contrôles hydrauliques	2
I.1.3. Les jaugeages	3
I.2. Les incertitudes	4
I.2.1. Le guide pour l'expression des incertitudes de mesure (GUM)	4
I.2.2. Les différentes sources d'incertitudes	5
Chapitre II. Matériels et méthodes	7
II.1. Le bassin versant de l'Yzeron	7
II.1.1. Présentation générale et historique du bassin versant	7
II.1.2. L'instrumentation et le suivi du bassin versant	8
II.2. BaRatin (BAYesian RATINg curve analysis)	9
II.2.1. Principe général	9
II.2.2. Calcul des courbes de tarages et de leurs incertitudes	10
II.2.3. Propagation des incertitudes aux hydrogrammes	13
II.3. Application de BaRatin au bassin versant de l'Yzeron	14
II.3.1. Estimation des incertitudes de jaugeages	14
II.3.2. L'analyse hydraulique des stations hydrométriques	17
II.3.3. Propagation des incertitudes aux hydrogrammes	20
II.4. Séries temporelles à différents pas de temps et indicateurs hydrologiques	21
II.4.1. Les débits : d'un pas de temps variable à un pas de temps fixe	21
II.4.2. Quelques indicateurs de bilan	23
Chapitre III. Résultats	25
III.1. Les résultats de la méthode BaRatin	25
III.1.1. La station hydrométrique du Mercier	25
III.1.2. La station de Charbonnières	31
III.1.3. La station de Craponne	33
III.2. Quelques indicateurs de bilan hydrologique	41
III.2.1. Débits moyens et débits spécifiques moyens	41
III.2.2. Lames d'eau mensuelles	42
III.2.3. Lames d'eau annuelles	43
III.2.4. Les courbes de débits classés	44
Chapitre IV. Discussion	46
IV.1. Les courbes de tarage issues de BaRatin	46
IV.2. Propagation des incertitudes aux hydrogrammes	47
IV.3. Impacts des incertitudes sur les indicateurs de bilans hydrologiques	48
Conclusions et perspectives	50
Bibliographie	51
Annexe I. Les contrôles et formules hydrauliques les plus courantes	1

Annexe II. Résultats BaRatin : Taffignon	3
Annexe III. Résultats BaRatin : Pont de la Barge	9
Annexe IV. Résultats BaRatin : La Léchère	12
Annexe V. Résultats BaRatin : Le Ratier	15
Annexe VI. Calcul du paramètre a et de son incertitude	18
Annexe VII. Les courbes de débit spécifique classées	19
Annexe VIII. Les lacunes dans les chroniques de débits	20
Annexe IX. Fonctions utilisées pour l'agrégation à pas de temps fixe	21
Annexe X. Lame d'eau mensuelles	24

Table des figures

1	Contrôle hydraulique : contrôle par un chenal ou par une section	3
2	Localisation du bassin versant de l'Yzeron, des stations de mesure et du réseau hydrographique.	7
3	Succession de contrôles hydrauliques	10
4	Schéma de principe de la méthode BaRatin.	11
5	Arbre de décision utilisé pour le choix de la méthode d'estimation des incertitudes de jaugeages.	15
6	Incertitude-type et incertitude élargie (au niveau de confiance 95%) pour une distribution gaussienne / normale.	19
7	Chaîne de traitement en amont et en aval de BaRatin pour la propagation des incertitudes aux hydrogrammes. Les carrés bleus correspondent aux fichiers textes, les rouges aux fonctions R et les oranges aux objets R contenant des données (vecteurs, matrices, etc...).	20
8	Principe du passage d'un pas de temps variable à un pas de temps fixe par le calcul des moyennes	22
9	Méthodologie employée pour les calculs des lames d'eau mensuelles et annuelles ainsi que des moyennes interannuelles de lames d'eau mensuelles et annuelles. . . .	23
10	Photos de la station hydrométrique du Mercier (a) avant et (b) après les travaux.	26
11	Courbe de tarage et enveloppe d'incertitude à 95% de la station hydrométrique du Mercier calculés par BaRatin pour la période précédant les travaux. (échelle logarithmique pour les débits)	28
12	Courbe de tarage et enveloppe d'incertitude à 95% de la station du Mercier après les travaux : (a) avec uniquement les jaugeages indépendants et (b) avec tous les jaugeages. (échelle logarithmique pour les débits).	29
13	Limnigramme, hydrogramme et enveloppe d'incertitude à 95% de l'événement hydrologique du 6, 7 et 8 février 2009 sur la station du Mercier. (pas de temps variable)	30
14	Hydrogramme et enveloppe d'incertitude à 95% calculés par BaRatin sur le mois de février 2009 pour la station du Mercier. (pas de temps variable)	30
15	Photo de la section de contrôle de Charbonnières.	31
16	Courbe de tarage et enveloppe d'incertitude à 95% de la station hydrométrique de Charbonnières calculées par BaRatin. (échelle logarithmique pour les débits)	32
17	Hydrogramme et enveloppe d'incertitude à 95% de l'événement hydrologique du 5 au 10 septembre 2010 de la station de Charbonnières. (pas de temps variable)	33
18	Photo de la section de contrôle actuelle de la station hydrométrique de Craponne.	34
19	Courbe de tarage et enveloppe d'incertitude à 95% de la station de Craponne après la suppression de la souche : (a) vue complète,(b) zoom sur les faibles hauteurs d'eau. (échelle logarithmique pour les débits)	38
20	Courbe de tarage et enveloppe d'incertitude à 95% de la station de Craponne avant la suppression de la souche : (a) vue complète,(b) zoom sur les faibles hauteurs d'eau. (échelle logarithmique pour les débits)	39
21	Hydrogramme et enveloppe d'incertitude à 95% de l'événement hydrologique d'avril 1989 de la station de Craponne. (pas de temps variable)	40
22	Hydrogramme et enveloppe d'incertitude à 95% de l'événement hydrologique de février 2009 de la station de Craponne. (pas de temps variable)	40
23	Moyenne inter-annuelle des lames d'eau mensuelles	42

24	Lames d'eau annuelles écoulées pour toutes les stations hydrométriques de l'Yzeron	43
25	courbes de débits classés (MaxPost et enveloppe d'incertitude à 95%) des stations de Taffignon, Craponne, Charbonnières, Ratier et Mercier.	45
26	Courbe de débits classés (MaxPost et enveloppe d'incertitude à 95%) de la station de Pont de la Barge mettant en évidence le problème introduit par les modèles statistiques utilisés par BaRatin pour l'erreur restante.	45
27	Photo de la section de contrôle de la station hydrométrique de Taffignon	3
28	Courbe de tarage et enveloppe d'incertitude à 95% de la station de Taffignon : (a) vue complète,(b) zoom sur les faibles hauteurs d'eau. (échelle logarithmique pour les débits)	6
29	Limnigramme, hydrogramme et enveloppe d'incertitude à 95% de l'événement hydrologique d'avril 1989 de la station de Taffignon. (pas de temps variable)	7
30	Limnigramme, hydrogramme et enveloppe d'incertitude à 95% de l'événement hydrologique de février 2009 de la station de Taffignon. (pas de temps variable)	8
31	Photo de la section de contrôle de la station hydrométrique de Pont de la Barge	9
32	Courbe de tarage et enveloppe d'incertitude à 95% de la station de Pont de la Barge. (échelle logarithmique pour les débits)	10
33	Limnigramme, hydrogramme et enveloppe d'incertitude à 95% de l'événement hydrologique de février 2009 de la station de Pont de la Barge. (pas de temps variable)	11
34	Photo de la section de contrôle de la station hydrométrique de la Léchère	12
35	Courbe de tarage et enveloppe d'incertitude à 95% de la station de la Léchère. (échelle logarithmique pour les débits)	13
36	Limnigramme, hydrogramme et enveloppe d'incertitude à 95% de l'événement hydrologique de février 2009 de la station de la Léchère. (pas de temps variable)	14
37	Photo de la section de contrôle de la station hydrométrique du Ratier	15
38	Courbe de tarage et enveloppe d'incertitude à 95% de la station du Ratier. (échelle logarithmique pour les débits)	16
39	Limnigramme, hydrogramme et enveloppe d'incertitude à 95% de l'événement hydrologique du 15 au 17 mai 2013 de la station du Ratier. (pas de temps variable)	17
40	Courbes de débit spécifique classées (MaxPost et enveloppe d'incertitude à 95%) des stations de Taffignon, Craponne, Charbonnières, Ratier et du Mercier.	19
41	Disponibilité des données entre 1969 et 2013 pour les stations du bassin versant de l'Yzeron.	20

Liste des tableaux

1	Informations sur les stations hydrométriques du bassin versant de l'Yzeron. Les dates de mises en service correspondent aux dates de début d'acquisition des données de hauteurs d'eau.	9
2	Valeurs moyennes des paramètres a , b et c données par les formules hydrauliques classiques pour les types de contrôles hydrauliques les plus classiques (d'après Le Coz et al., 2014). Plus de détails sur ces équations sont disponibles en Annexe I.. . . .	10
3	Valeurs d'incertitude de référence issues du guide de l'ONEMA (Le Coz et al., 2011) au niveau de confiance 95%.	16
4	Jaugeages de la station du Mercier avant (à gauche) et après (à droite) les travaux. Les dates, les heures, les hauteurs d'eau (H), les débits (Q) et les incertitudes élargies relatives (U) sont indiqués. Les jaugeages précédés par * correspondent aux jaugeages considérés indépendants.	26
5	Valeurs (et écarts-type) des paramètres $a priori$ et $a posteriori$ pour la station du Mercier avant les travaux. ($U(0, 10000)$ fait référence à une loi uniforme sur l'intervalle $[0, 10000]$).	28
6	Valeurs (et écart-types) des paramètres $a priori$ et $a posteriori$ pour les deux résultats BaRatin : avec uniquement les jaugeages indépendants (soit trois jaugeages) et avec tous les jaugeages (soit neuf jaugeages). ($U(0, 10000)$ fait référence à une loi uniforme sur l'intervalle $[0, 10000]$)	29
7	Valeurs (et écarts-type) des paramètres $a priori$ et $a posteriori$ pour la station hydrométrique de Charbonnières. ($U(0, 10000)$ fait référence à une loi uniforme sur l'intervalle $[0, 10000]$)	33
8	Incertitudes maximales des jaugeages calculées par la méthode ISO 748 pour trois catégories de hauteur d'eau.	35
9	Incertitudes estimées moyennes (et écarts-types) des jaugeages de la station de Craponne selon la méthode employée et les informations disponibles.	35
10	Valeurs (et écarts-type) des paramètres $a priori$ et $a posteriori$ de la courbe de tarage de Craponne pour la période suivant la suppression de la souche. ($U(0, 10000)$ fait référence à une loi uniforme sur l'intervalle $[0, 10000]$)	37
11	Valeurs (et écarts-type) des paramètres $a priori$ et $a posteriori$ de la courbe de tarage de Craponne pour la période précédant la suppression de la souche. ($U(0, 10000)$ fait référence à une loi uniforme sur l'intervalle $[0, 10000]$)	39
12	Débits moyens et débits spécifiques moyens (MaxPost, quantiles 2.5% et 97.5% et incertitude élargie relative (U)) pour toutes les stations de l'Yzeron.	41
13	MaxPost, écarts-types, quantiles 2.5% (Q. 2.5%) et 97.5% (Q. 97.5%) et incertitudes élargies relatives (U) des moyennes inter-annuelles de lames d'eau annuelles écoulées pour chaque station. La dernière ligne indique le nombre d'années utilisé pour le calcul des moyennes.	44
14	Incertitudes maximales des jaugeages calculées par la méthode ISO 748 pour trois catégories de hauteur d'eau et incertitude maximale calculée par la méthode Q+ sur les jaugeages par intégration documentés	4
15	Incertitudes estimées moyennes (et écarts-type) des jaugeages de la station de Taffignon selon la méthode employée et les informations disponibles	4
16	Valeurs (et écarts-type) des paramètres $a priori$ et $a posteriori$ de la courbe de tarage de Taffignon. ($U(0, 10000)$ fait référence à une loi uniforme sur l'intervalle $[0, 10000]$)	5

17	Incertitudes estimées moyennes (et écarts-type) des jaugeages de la station de Pont de la Barge selon la méthode employée.	9
18	Valeurs (et écarts-type) des paramètres <i>a priori</i> et <i>a posteriori</i> de la courbe de tarage de Pont de la Barge. ($U(0, 10000)$ fait référence à une loi uniforme sur l'intervalle $[0, 10000]$)	10
19	Incertitudes estimées moyennes (et écarts-type) des jaugeages de la station de la Léchère selon la méthode employée.	13
20	Valeurs (et écarts-type) des paramètres <i>a priori</i> et <i>a posteriori</i> de la courbe de tarage de la Léchère. ($U(0, 10000)$ fait référence à une loi uniforme sur l'intervalle $[0, 10000]$)	13
21	Incertitudes estimées moyennes (et écarts-type) des jaugeages de la station du Ratier selon la méthode employée.	16
22	Valeurs (et écarts-type) des paramètres <i>a priori</i> et <i>a posteriori</i> pour la station hydrométrique du Ratier. ($U(0, 10000)$ fait référence à une loi uniforme sur l'intervalle $[0, 10000]$)	16
23	Pourcentage de lacunes sur l'ensemble des chroniques de débits pour les différentes stations. Les lacunes issues du limnigramme et celles introduites par BaRatin (que l'on trouve dans les spaghettis) sont comptées séparément. On s'intéresse aux nombres de pas de temps et non à des durées.	20

Introduction

Les eaux de surface, et plus précisément les eaux circulant dans les cours d'eau sont au cœur des sociétés humaines. Les cours d'eau constituent une source d'eau douce pour l'alimentation en eau potable, une source d'énergie par l'intermédiaire des centrales hydroélectriques, un moyen de dilution et transport des pollutions, des voies de transport ainsi que des lieux où se développent des loisirs. Ils constituent également un danger lors d'événements météorologiques extrêmes pouvant entraîner des inondations dévastatrices et meurtrières (WMO, 2010). Les données hydrométriques, et plus précisément les données de débit sont essentielles pour le suivi des cours d'eau. Elles servent pour la conception et la gestion de projets liés aux ressources en eau et également comme données de calibration et validation des modèles hydrologiques utilisés, par exemple, pour les prévisions de crues (WMO, 2010).

Les données observées sont des données incertaines. McMillan et al. (2012) soulignent l'importance de reconnaître et évaluer les incertitudes associées aux données observées, notamment pour les données de débits.

Les études où les incertitudes associées aux chroniques de débit ont été estimées ont montré que celles-ci étaient souvent très importantes (Di Baldassarre and Montanari, 2009; Westerberg and McMillan, 2014). De plus elles se propagent inéluctablement à toute utilisation que l'on peut en faire : dans les étapes de calage et validation et les résultats de modélisations hydrologiques (McMillan et al., 2010), ou les calculs d'indicateurs hydrologiques (Westerberg and McMillan, 2014), et même parfois jusqu'aux décisions prises par les politiques et gestionnaires de cours d'eau (Pappenberger and Beven, 2006).

Michel (2009) mettait en évidence les incertitudes associées aux chroniques de débit pour deux sous-bassins versant de l'Yzeron. D'autres doutes sur les incertitudes associées aux données hydrométriques ont été exprimés par Braud et al. (2013) lors de leur analyse hydrologique du bassin versant de l'Yzeron. Cependant, les incertitudes hydrométriques n'ont jamais été quantifiées et prises en compte. La méthode BaRatin a été appliquée à l'Yzeron afin de les quantifier et d'étudier leurs impacts sur quelques bilans hydrologiques du bassin versant.

Une première partie présentera quelques définitions et un court état de l'art sur les incertitudes hydrométriques et le contexte dans lequel s'inscrit la méthode BaRatin. Suivra une partie présentant le bassin versant, la méthode BaRatin ainsi que les méthodes employées pour le calcul des indicateurs hydrologiques retenus. En troisième partie, les résultats obtenus seront présentés avant d'être discutés dans une quatrième partie. Enfin, le mémoire se conclura sur les limites et perspectives sur le travail effectué.

Chapitre I. Définitions et état de l'art

I.1. Les courbes de tarage

I.1.1. Principe général

Une chronique de débit (ou hydrogramme) est une donnée acquise en un point donné d'un cours d'eau au niveau d'une station hydrométrique. Une station hydrométrique est un site instrumenté mesurant de façon continue la hauteur d'eau. Une chronique de hauteurs d'eau (ou limnigramme) est issue de mesures par un limnigraphe. Aux abords d'une station hydrométrique, des mesures ponctuelles de débit (les jaugeages) sont alors faites pour différentes hauteurs d'eau afin d'estimer la relation entre la hauteur d'eau et le débit, appelée courbe de tarage (WMO, 2010). Une courbe de tarage est, dans la plupart des cas, le moyen utilisé pour obtenir une chronique de débit (Hersch, 1994; Moyeed and Clarke, 2005; Le Coz et al., 2014). Il existe d'autres méthodes basées sur la mesure en continu de plusieurs variables à partir desquelles le débit est calculé. Ces méthodes peuvent par exemple permettre de rendre compte du phénomène d'hystérésis (Petrovic et al., 2013) et/ou d'influences aval variables (Hidayat et al., 2011). Celles-ci ne seront pas abordées dans le mémoire.

I.1.2. Les contrôles hydrauliques

La relation hauteur-débit au niveau d'une station hydrométrique (sur la section de cours d'eau où est situé le limnigraphe) est contrôlée par les conditions du chenal en aval par ce qu'on appelle les contrôles hydrauliques (WMO, 2010). La stabilité et la validité d'une relation entre la hauteur d'eau et le débit dépendent donc de la stabilité des contrôles hydrauliques. Ceux-ci peuvent progressivement changer au cours du temps du fait de changements de géométrie du chenal causés par des phénomènes d'érosion et/ou sédimentation ou par la végétation (par exemple les variations saisonnières) (WMO, 2010; Le Coz et al., 2014); on parle alors de détarage. Ces cas de changements progressifs des contrôles hydrauliques ne seront pas abordés. Cependant, un changement net (changement de contrôle en une période de temps relativement courte) impliquant l'utilisation d'une relation hauteur-débit différente avant et après cette cassure ne sera pas écarté par la suite.

Deux types de contrôles hydrauliques sont à distinguer : les contrôles par des sections et les contrôles par des chenaux (WMO, 2010; Le Coz et al., 2014). Il y a contrôle par une section lorsqu'une chute d'eau (seuil, barrage, ...) ou un rétrécissement du cours d'eau induit une section critique. La géométrie de la section de contrôle régule alors la relation hauteur-débit à l'amont (Le Coz, 2012). Lorsqu'un contrôle par chenal intervient, la géométrie et la rugosité (résistance à l'écoulement) sur une distance plus ou moins grande en aval régulent l'écoulement au niveau de la station hydrométrique (Le Coz, 2012). La [Figure 1](#) illustre les deux types de contrôle pouvant intervenir.

La formulation mathématique de la relation-hauteur débit la plus courante est une fonction puissance à base hydraulique (Hersch, 1994; Moyeed and Clarke, 2005; Di Baldassarre and Montanari,

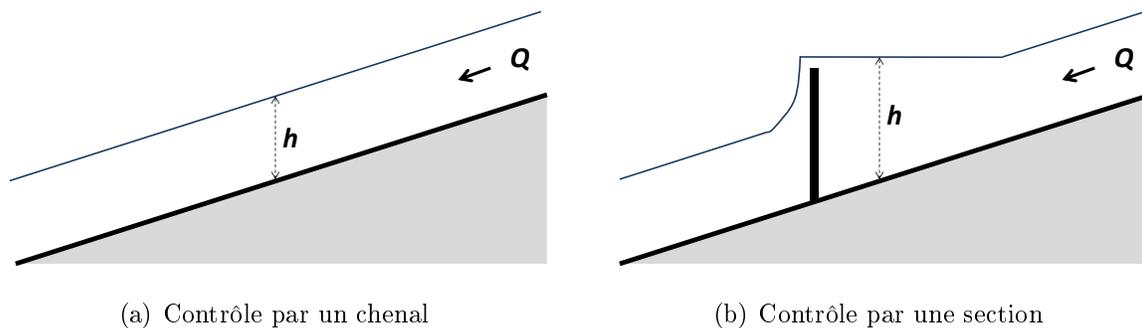


FIGURE 1 – Les deux types de contrôles hydrauliques. Q correspond au débit, les flèches le sens de l'écoulement et h à la hauteur d'eau. (d'après Le Coz, 2012)

2009; WMO, 2010; Le Coz et al., 2014) du type :

$$Q(h) = a(h - b)^c \quad (1)$$

Q et h correspondent respectivement au débit et à la hauteur échelle (hauteur d'eau mesurée par le limnigraphe). Les paramètres a , b et c prennent des valeurs spécifiques selon le contrôle hydraulique en jeu. Le [Tableau 2](#) donne des exemples de calculs des paramètres pour quelques types de contrôles hydrauliques. D'autres formalismes peuvent être utilisés comme par exemple une fonction polynomiale (Di Baldassarre and Montanari, 2009). Celles-ci ont le désavantage de n'avoir aucune base physique et de ce fait elles ne permettent pas d'extrapolation de la relation au-delà des gammes de hauteurs d'eau où des jaugeages ont été faits.

Selon la hauteur d'eau, si plusieurs contrôles s'ajoutent ou se succèdent (voir [Figure 3](#)), l'équation de la courbe de tarage peut combiner plusieurs équations du type de l'[Équation 1](#) pour une ou plusieurs gammes de hauteurs d'eau (Petersen-Overleir and Reitan, 2005; Le Coz et al., 2014). On parle alors de courbe de tarage par morceau ou par segment.

I.1.3. Les jaugeages

Un jaugeage est une mesure du débit instantanée (en réalité, la mesure prend généralement quelques dizaines de minutes) accompagnée d'une mesure de la hauteur d'eau (hauteur échelle) constituant un couple de valeurs (Q_i, h_i) . La mesure du débit est rarement une mesure directe. Il existe de nombreuses méthodes de jaugeage : jaugeage par capacité, jaugeage par exploration du champ des vitesses, jaugeage par ADCP (Acoustic Doppler Current Profiler), jaugeage par dilution... Pour une présentation des différentes méthodes, se référer, par exemple, au guide pour le contrôle des débits réglementaires de l'ONEMA (Le Coz et al., 2011).

La méthode par exploration du champ des vitesses est la plus utilisée (Le Coz et al., 2012). Elle est basée sur des mesures ponctuelles de vitesses d'écoulement avec un courantomètre, au droit de plusieurs verticales et à différentes profondeurs. L'ensemble des vitesses mesurées sont interpolées sur la profondeur et sur la largeur. La section jaugée est découpée en sous-section. Pour chaque sous-section, un débit partiel q_i est calculé par produit entre la surface et la vitesse moyenne de

la sous-section : $q_i = v_i.s_i$. Le débit total est ensuite calculé par somme des débits partiels.

Les jaugeages sont utilisés pour établir une courbe de tarage soit par simple interpolation, soit par calage des paramètres d'une relation mathématique (par exemple l'Équation 1) (McMillan et al., 2012). Ils doivent être faits pour la plus large gamme de hauteurs d'eau possible et être le plus nombreux possible afin de bien rendre compte de l'ensemble de la relation entre la hauteur d'eau et le débit. Cela permet également d'éviter trop d'interpolations (entre les jaugeages) ou d'extrapolations (au-delà de la gamme de hauteur d'eau jaugée) lors de l'utilisation de la courbe de tarage.

I.2. Les incertitudes

I.2.1. Le guide pour l'expression des incertitudes de mesure (GUM)

Le guide pour l'expression des incertitudes de mesure (Guide to the expression of Uncertainty in Measurement (GUM), JCGM (2008)) publiée par l'Organisme International de Normalisation (ISO) est produit, maintenu et promu par le comité joint pour des guides en métrologie (Joint Comitee for Guides in Metrology (JCGM)) qui rassemble plusieurs organismes métrologiques internationaux. Il expose des règles générales pour évaluer et exprimer l'incertitude de mesure pour tout domaine d'application et fait référence en la matière.

Toute mesure d'une quantité physique est entachée d'une erreur et quelle que soit la méthode employée, la valeur obtenue ne sera qu'une valeur estimée de la « vraie » valeur (Herschy, 2002). L'erreur de mesure est la différence entre la « vraie » valeur et la valeur mesurée. Deux types d'erreurs existent : les erreurs systématiques et les erreurs aléatoires. Le GUM (JCGM, 2008) ne fait pas la distinction entre ces deux types d'erreurs qui sont traitées de la même façon. Les erreurs systématiques sont supposées être corrigées au maximum par un étalonnage rigoureux des appareils de mesure.

L'incertitude est synonyme de doute dans son sens le plus général (JCGM, 2008). Une définition plus précise est également donnée : l'incertitude-type u_X est un paramètre, associée au résultat d'une mesure, caractérisant la dispersion de l'erreur (JCGM, 2008; Le Coz et al., 2011). Dans le cas des incertitudes de mesure, cette distribution est supposée gaussienne, l'incertitude-type correspond alors à un écart-type.

L'incertitude élargie U_X est une expression de l'incertitude à un certain niveau de confiance. Classiquement en hydrométrie, un niveau de confiance de 95% est utilisé (Le Coz et al., 2011) : $U_X = k.u_X$ avec $k=2$, le facteur d'élargissement.

L'incertitude associée à un jaugeage est souvent exprimée en pourcentage. Il s'agit de l'incertitude relative qui est une expression de l'incertitude en pourcentage de la valeur X considérée : $u'_X = u_X/X$.

Le GUM (JCGM, 2008) différencie deux types d'estimation des incertitudes : l'estimation de type A lorsque l'estimation de l'incertitude se fait par l'intermédiaire d'une méthode statistique ;

et l'estimation de type B, lorsque d'autres moyens sont utilisés (études déjà faites, avis d'expert, connaissances sur la variable mesurée, etc...). En hydrométrie, la répétabilité, dans des conditions identiques, est souvent difficile voire impossible empêchant l'estimation de type A de l'incertitude (Herschky, 2002).

Dans le cadre de la modélisation, la définition d'incertitude n'est plus si évidente. Les paramètres et les résultats d'un modèle n'ayant pas de « vraies » valeurs, il devient difficile de parler d'erreurs. L'analyse d'incertitude garde tout de même son sens, car il s'agit toujours de caractériser une dispersion ; même s'il ne s'agit plus de celle d'une erreur et qu'elle ne suit pas nécessairement une distribution gaussienne.

I.2.2. Les différentes sources d'incertitudes

Le GUM propose une méthode de propagation de l'incertitude lorsque le résultat d'une mesure y est le résultat de N mesures élémentaires (x_1, x_2, \dots, x_N) liées par une fonction $f : y = f(x_1, x_2, \dots, x_N)$. En supposant les incertitudes-types de toutes les mesures élémentaires indépendantes, l'incertitude-type combinée u_C peut être approchée par un développement en série de Taylor de premier ordre qui donne (JCGM, 2008) :

$$u_C^2 = \sum_{i=1}^N \left(\frac{\partial f}{\partial x_i} \right)^2 u^2(x_i) \quad (2)$$

Les jaugeages sont des mesures souvent indirectes du débit nécessitant de nombreuses mesures élémentaires, des calculs et des simplifications avant l'obtention du résultat final. Le calcul des incertitudes de jaugeages peut passer par l'Équation 2 pour beaucoup de méthodes de jaugeages comme le proposent Le Coz et al. (2011) dans le guide de l'ONEMA sur le contrôle des débits réglementaires.

Le Coz (2012) propose également d'appliquer cette même approximation de premier ordre (cf. Équation 2) pour exprimer l'incertitude d'une donnée instantanée de débit produit à partir d'une courbe de tarage :

$$u_{Q_i}^2 = u_{RC}^2 + u_{HC}^2 + \left(\frac{\partial Q}{\partial h} \right)^2 u_{h_t}^2 \quad (3)$$

Le premier terme u_{RC} est dû à la simplification induite par la modélisation de la vraie relation entre la hauteur et le débit par la courbe de tarage. Le deuxième terme u_{HC} concerne les écarts aux conditions d'écoulement de référence pour lesquelles la courbe de tarage a été construite. Dans les cas où la relation entre la hauteur et le débit n'est pas univoque, ce terme peut devenir très important. Le dernier terme u_{h_t} concerne l'incertitude sur la mesure en continu des hauteurs d'eau. Le rapport $\partial Q / \partial h$ est un coefficient de sensibilité : plus une variation faible de hauteur induira une forte variation de débit, plus ce terme sera important.

Le Coz et al. (2014) précisent que les incertitudes causées par des écoulements transitoires, des effets aval variables ou encore des changements de rugosité et/ou de géométrie du chenal ou même des changements de la section de contrôle sont à distinguer des incertitudes issues de la relation hauteur-débit construite pour des conditions d'écoulement définis de référence. L'Équation 3 rend bien compte de cette distinction. Dans la suite du mémoire, on se place dans des situations où le terme u_{HC} peut être considéré négligeable devant les deux autres sources d'incertitude.

La conversion entre la hauteur et le débit (terme u_{RC} de l'Équation 3) est souvent considéré comme la source principale d'incertitude dans les chroniques de débit devant les incertitudes sur les mesures de hauteur d'eau en continu (McMillan et al., 2010).

Trois sources d'incertitudes sont souvent admises pour les modèles hydrologiques (McMillan et al., 2010; Di Baldassarre and Montanari, 2009) : (1) les données de calibration/validation, (2) la structure du modèle et (3) les paramètres. De même pour les courbes de tarage qui sont également des modèles, ces mêmes sources peuvent être identifiées : (1) les jaugeages, (2) le formalisme mathématique et (3) la valeur des paramètres de la relation.

Le Coz et al. (2014) identifient trois types d'approches pour quantifier les incertitudes associées aux courbes de tarage :

- des modélisations numériques de la relation associées à des analyses de sensibilités sur les paramètres permettant d'estimer les erreurs limites
- les analyses statistiques des jaugeages basée notamment sur des régressions non linéaires de fonctions puissances (Équation 1) simple ou par segments
- l'inférence Bayésienne et les simulations MCMC combinant à la fois une approche hydraulique et statistique.

Chapitre II. Matériels et méthodes

II.1. Le bassin versant de l'Yzeron

II.1.1. Présentation générale et historique du bassin versant

Le bassin versant de l'Yzeron est situé en Rhône-Alpes, à l'ouest de Lyon (France) (voir Figure 2). C'est un bassin versant d'environ 150 km^2 avec un exutoire dans le Rhône au niveau de la ville d'Oullins. Les principaux cours d'eau constituant le réseau hydrographique du bassin versant sont l'Yzeron, le Charbonnières, la Chaudanne et le Ratier (voir Figure 2). La topographie est assez contrastée avec une altitude qui varie de 917 m à 162 m (Lagouy, 2010).

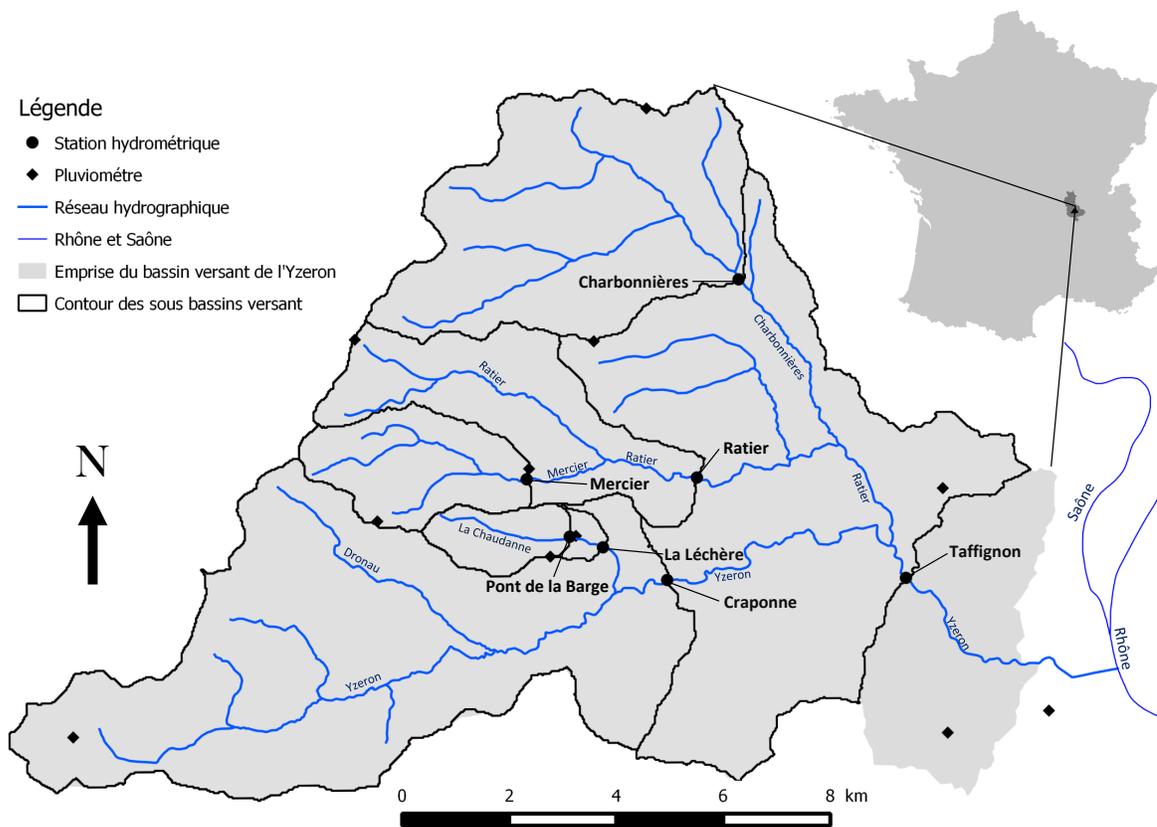


FIGURE 2 – Localisation du bassin versant de l'Yzeron, des stations de mesure et du réseau hydrographique.

Le substrat géologique est essentiellement marqué par la présence de roches cristallines et métamorphiques dans la partie amont du bassin versant (ouest du bassin versant) et des alluvions du quaternaire sur socle cristallin et métamorphique dans la partie aval, à l'est du bassin versant (Lagouy, 2010). Les caractéristiques géologiques et pédologiques du bassin versant mènent à une capacité de réserve en eau des sols limitée (Branger et al., 2013; Braud et al., 2013).

L'occupation du sol a beaucoup évolué depuis plusieurs décennies avec une urbanisation importante depuis les années 1980 influencée par la proximité de Lyon s'accompagnant d'une déprise

agricole dans la partie amont du bassin versant (Lagouy, 2010). Le bassin versant est aujourd'hui marqué par une urbanisation dense à l'est. En allant vers l'ouest, l'occupation des sols évolue vers des zones essentiellement de type agricole (prairies et zones cultivées) puis vers des forêts sur les collines qui marquent la limite ouest et l'amont du bassin versant (Braud et al., 2013).

Le régime hydrologique du bassin versant est marqué par des crues rapides pouvant impacter les zones urbanisées à l'aval du bassin versant et des périodes d'étiage sévères pendant les périodes estivales (Lagouy, 2010; Braud et al., 2013). Le régime hydrologique est influencé par l'urbanisation. L'imperméabilisation croissante des surfaces a entraîné une importante augmentation du ruissellement. Le réseau d'assainissement (majoritairement unitaire) par l'intermédiaire des déversoirs d'orage, lorsqu'ils sont actifs, change considérablement les surfaces drainées des sous bassins versant (Braud et al., 2013). De plus le réseau d'assainissement n'est pas complètement imperméable et participe de façon importante à la réduction des débits dans la partie aval du bassin versant par son action drainante des nappes (Braud et al., 2013).

Le bassin versant est suivi par l'Institut National de Recherche en Sciences et Technologies pour l'Environnement et l'Agriculture (IRSTEA) depuis les années 1990 afin d'étudier l'impact de l'urbanisation sur le régime hydrologique. Il fait partie de l'Observatoire de Terrain en Hydrologie Urbaine (OTHU)¹ (Braud et al., 2013).

II.1.2. L'instrumentation et le suivi du bassin versant

Le bassin versant est instrumenté depuis la fin des années 1960 (station de Craponne, voir la Figure 2 et le Tableau 1). Dès les années 1990, d'autres dispositifs de mesures ont été rajoutés dans le cadre de l'OTHU (Branger et al., 2013). Actuellement sept stations hydrométriques sont en service sur le bassin versant. La station de Taffignon (voir Figure 2) est la station la plus proche de la confluence avec le Rhône et sera le point exutoire considéré lorsqu'on parlera du bassin versant de l'Yzeron. Les sept stations hydrométriques (dont les noms sont indiqués entre parenthèse ci-dessous) de l'Yzeron sont réparties sur cinq cours d'eau : L'Yzeron (Taffignon et Craponne), le Charbonnières (Charbonnières), le Ratier (Ratier), le Mercier (Mercier) et la Chaudanne (Pont de la Barge et la Léchère) (voir Figure 2). Les stations de Taffignon et Craponne sont gérées par la Direction Régionale de l'Environnement, de l'Aménagement et du Logement (DREAL) de Rhône-Alpes et les cinq autres par IRSTEA.

Toutes les stations sont équipées de limnigraphes permettant des mesures en continu des hauteurs d'eau. Les hauteurs d'eau sont mesurées par des capteurs de pression. Les limnigraphes sont toujours placés en amont de déversoirs (rectangulaires et/ou triangulaires, ou dans le cas de la station de la Léchère, il s'agit d'un canal Parshall). Les déversoirs permettent, entre autres, d'assurer une forte stabilité des contrôles hydrauliques dans le temps (pas de détarage).

Les données disponibles sont donc les limnigrammes (et les hydrogrammes calculés à partir des courbes de tarage actuellement utilisées), les jaugeages pour chaque station et des données de topographie et géométrie sur les contrôles hydrauliques des stations. Le Tableau 1 résume les

1. OTHU 2011 – <http://www.graie.org/othu/>

données disponibles et les caractéristiques de chaque station. Les surfaces des sous bassins versant (Tableau 1) sont issues de l'article Branger et al. (2013). Elles ont été obtenues à partir du MNT (Modèle Numérique de Terrain) d'une résolution de 25 m disponible sur le bassin versant de l'Yzeron.

TABLEAU 1 – Informations sur les stations hydrométriques du bassin versant de l'Yzeron. Les dates de mises en service correspondent aux dates de début d'acquisition des données de hauteurs d'eau.

Nom Code	Taffignon V3015020	Craponne V3015010	Mercier V3015810	Pont de la Barge V30191002	La Léchère V3019130	Charbonnières V3015301	Ratier V3015410
Gestion	DREAL	DREAL	IRSTEA	IRSTEA	IRSTEA	IRSTEA	IRSTEA
Cours d'eau	L'Yzeron	L'Yzeron	Le Mercier	La Chaudanne	La Chaudanne	Le Charbonnières	Le Ratier
Date de mise en service	sept. 1988	oct. 1969	jan. 1997	juin 1997	fev. 2005	mars 2009	nov. 2010
Nombre de jaugeages	71	140	10	21	10	33	35
Superficie du bassin versant	124.5 km ²	40.9 km ²	7.8 km ²	2.9 km ²	4.3 km ²	22.9 km ²	18.9 km ²
Ouvrages hydrauliques	Seuil rectangulaire	Seuil rectangulaire	seuil(s) rectangulaire(s)	Seuil rectangulaire	Canal Parshall 36"	Seuil triangulaire et rectangulaire	Seuil triangulaire et rectangulaire

II.2. BaRatin (BAYesian RATINg curve analysis)

II.2.1. Principe général

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

Une analyse hydraulique de la station permet d'identifier les différents contrôles hydrauliques en jeu selon le régime d'écoulement, des plus faibles aux plus forts débits. Selon le type de contrôle, différentes formules hydrauliques classiques, pouvant se mettre sous la forme de l'Équation 1 ($Q = a(h - b)^c$), peuvent être utilisées (voir le Tableau 2). La topographie et/ou la géométrie des contrôles font qu'ils s'activent et/ou se désactivent (Figure 3) selon la hauteur d'eau. Ces successions ou ajouts de contrôle sont pris en compte et permettent ainsi de décrire précisément le fonctionnement hydraulique du site via une équation générale de la courbe de tarage (Équation 5). Les valeurs moyennes (ainsi que des écarts-types associés) de tous les paramètres a , b et c sont déterminés *a priori* à partir de l'analyse hydraulique du site.

Par ailleurs, les jaugeages (dont les incertitudes associées sont également estimées) sont donnés à BaRatin qui calcule une distribution *a posteriori* des paramètres a , b et c prenant en compte d'une part les jaugeages et d'autre part, les *a priori* hydrauliques.

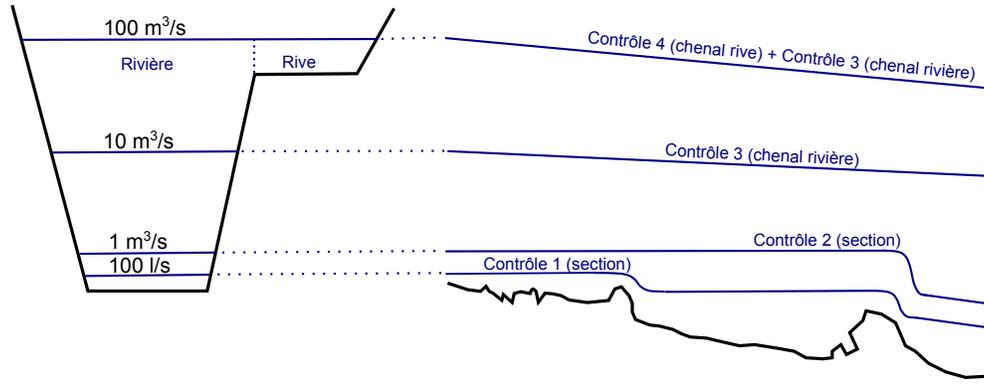


FIGURE 3 – Succession de contrôles par sections et chenaux pour une station hydrométrique classique sans contrôles artificiels. Le fond du cours d'eau et les lignes d'eau pour différents débits sont représentés sur une section (à gauche) et sur le profil en long du cours d'eau (à droite). (d'après Le Coz et al., 2014)

TABLEAU 2 – Valeurs moyennes des paramètres a , b et c données par les formules hydrauliques classiques pour les types de contrôles hydrauliques les plus classiques (d'après Le Coz et al., 2014). Plus de détails sur ces équations sont disponibles en [Annexe I.](#)

Type de contrôle	Hypothèses idéales	a	b	c
Chenal	Large chenal rectangulaire, écoulement stationnaire et uniforme	$KB\sqrt{J}$	Hauteur moyenne du fond du chenal	1.67
Section (rectangle)	Perpendiculaire à l'écoulement, pas d'influence aval	$CB\sqrt{2g}$	Hauteur de la crête du seuil	1.5
Section (triangle)	Perpendiculaire à l'écoulement, pas d'influence aval	$C \tan(\alpha/2)\sqrt{2g}$	Hauteur du sommet bas du triangle	2.5
Section (orifice)	Perpendiculaire à l'écoulement, pas d'influence aval	$CS\sqrt{2g}$	Hauteur du centre de l'orifice	0.5

Un récent développement de BaRatin permet la propagation des incertitudes aux hydrogrammes à partir des incertitudes associées au limnigramme et celles associées aux courbes de tarage. Le schéma de principe de la méthode BaRatin (Figure 4) résume le principe général de la méthode.

Le fonctionnement précis de BaRatin pour les deux étapes, calcul de la courbe de tarage et des incertitudes associées et propagation des incertitudes aux hydrogrammes, est présenté en II.2.2. et II.2.3. . L'application de la méthode au bassin versant de l'Yzeron est présentée dans un second temps, en II.3..

II.2.2. Calcul des courbes de tarages et de leurs incertitudes : les modèles statistiques et hypothèses de BaRatin

Les paragraphes qui suivent s'appuient sur l'article de Le Coz et al. (2014) qui présente la méthode de BaRatin en détail. Quelques modifications ont été apportées à BaRatin depuis la publication de l'article et sont prises en compte ici. Les modèles statistiques utilisés par BaRatin ainsi que les hypothèses faites sont présentés.

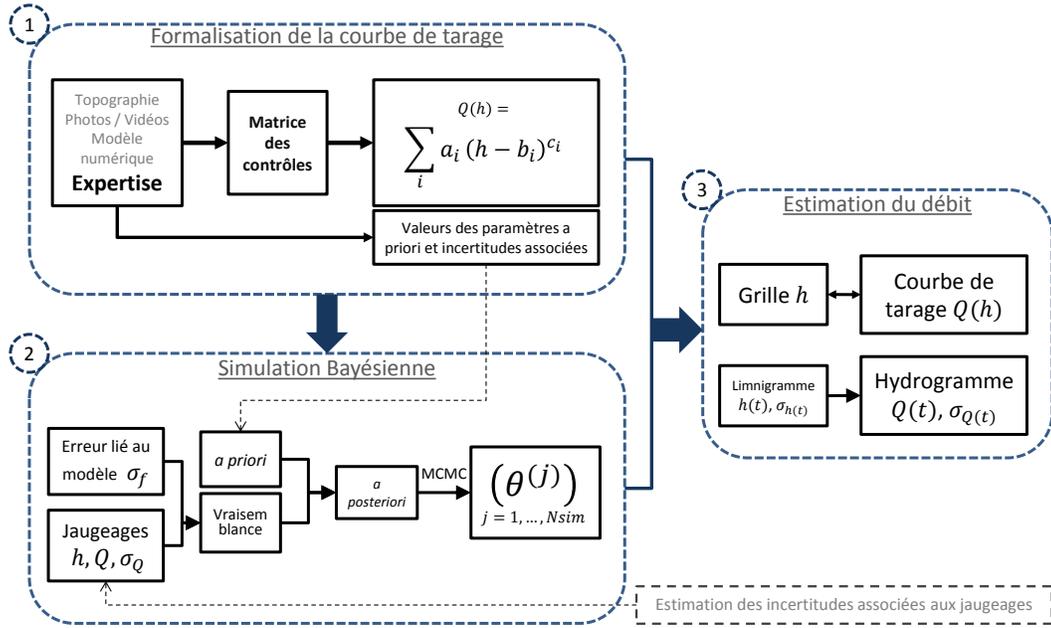


FIGURE 4 – Schéma de principe de la méthode BaRatin.

L'équation de la courbe de tarage : Selon la hauteur d'eau différents contrôles hydrauliques s'ajoutent ou se succèdent. Pour chaque contrôle, une équation du même type que l'Équation 1 est supposée pouvoir représenter la relation hauteur-débit. Les différents types de contrôles et les équations utilisées sont présentés en Annexe I.. Ces successions ou ajouts de contrôles sont représentés par une matrice des contrôles (ou matrice de Bonnifait) M dont un exemple est donné ci-dessous, reprenant les contrôles de la station hydrométrique présentée par la Figure 3 :

$$M = \begin{matrix} & \text{contrôle 1} & \text{contrôle 2} & \text{contrôle 3} & \text{contrôle 4} \\ \text{Gamme 1} & \left(\begin{array}{cccc} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 \end{array} \right) \\ \text{Gamme 2} & & & & \\ \text{Gamme 3} & & & & \\ \text{Gamme 4} & & & & \end{matrix} \quad (4)$$

Chaque ligne de la matrice représente une gamme de hauteur d'eau. Chaque colonne correspond à un contrôle. Pour la gamme r de hauteur d'eau donnée, le contrôle j est actif si $M(r, j) = 1$ et non actif si $M(r, j) = 0$.

Une formulation générale de l'équation de la courbe de tarage peut être écrite de la façon suivante pour N_{gamme} gammes de hauteur et $N_{\text{contrôle}}$ contrôles :

$$Q(h) = \sum_{r=1}^{N_{\text{gamme}}} \left(w_{[k_{r-1}, k_r]}(h) \times \sum_{j=1}^{N_{\text{contrôle}}} M(r, j) \times Q_j(h) \right) \quad (5)$$

où $Q_j(h)$ est un fonction du même type que l'Équation 1 avec trois paramètres (a_j, b_j, c_j) et $w_{[k_{r-1}, k_r]}(h)$ une fonction égale à 1 si $k_{r-1} \leq h \leq k_r$ et 0 sinon (h correspond à la hauteur d'eau). Les k_r sont les hauteurs de transition définissant les différentes gammes (r) de hauteurs d'eau.

Les jaugeages : Les jaugeages sont considérés comme des couples de valeurs mesurées $(\tilde{Q}_i, \tilde{H}_i)_{i=1:N}$ étant des estimations des vraies valeurs $(Q_i, H_i)_{i=1:N}$. Les modèles d'erreur associés sont :

$$\begin{aligned} \tilde{H}_i &= H_i \\ \tilde{Q}_i &= Q_i + \epsilon_i^Q \quad \epsilon_i^Q \sim \mathcal{N}(0, u_{Q_i}) \end{aligned} \quad (6)$$

Les deux hypothèses résultant de ces modèles sont (1) que les hauteurs d'eau sont supposées sans erreurs et (2) que l'erreur sur le débit de chaque jaugeage est uniquement aléatoire (pas de biais) et a une distribution gaussienne d'écart-type u_{Q_i} (estimé en amont de BaRatin), représentant l'incertitude associée au jaugeage.

La relation hauteur-débit : La courbe de tarage est formalisée par une fonction $f(h|\theta)$ (voir paragraphes sur l'équation de la courbe de tarage) où h est la hauteur d'eau (hauteur échelle) et θ est un vecteur contenant tous les paramètres de la courbe de tarage. La relation entre la hauteur d'eau et le débit est formalisée de la façon suivante :

$$Q_i = \underbrace{f(H_i|\theta)}_{\hat{Q}_i} + \epsilon_i^f \quad \epsilon_i^f \sim \mathcal{N}\left(0, g_f(\hat{Q}_i|\sigma_f)\right) \quad (7)$$

Le terme ϵ_i^f représente l'erreur restante, c'est à dire le fait que la courbe de tarage, dans sa forme mathématique supposée ne représente pas parfaitement la relation hauteur-débit. Il possède une distribution gaussienne de moyenne nulle et dont l'écart-type est proportionnel au débit estimé par la fonction f . Ainsi l'erreur due au modèle ne devient pas trop faible pour les forts débits, et inversement elle ne devient pas trop importante pour les faibles débits. Sa valeur est re-échantillonnée pour chaque spaghetti. L'écart-type g_f est défini par la fonction : $g_f(\hat{Q}_i|\sigma_f) = \sigma_{f,1} + \sigma_{f,2}\hat{Q}_i$. Les paramètres σ_f sont inconnus et doivent être estimés.

La combinaison de l'Équation 6 et de Équation 7 donne (la loi de $\epsilon_i^f + \epsilon_i^Q$ suppose que les deux erreurs ϵ_i^f et ϵ_i^Q sont indépendantes) :

$$\tilde{Q}_i = f(H_i|\theta) + \epsilon_i^f + \epsilon_i^Q \quad \epsilon_i^f + \epsilon_i^Q \sim \mathcal{N}\left(0, \sqrt{g_f^2 + u_{Q_i}^2}\right) \quad (8)$$

Les équations bayésiennes : Dans l'Équation 8 se trouvent plusieurs quantités inconnues : les paramètres θ de la courbe de tarage et les paramètres σ_f de l'écart-type g_f de l'erreur restante (les incertitudes u_Q sont connues car estimées en amont de BaRatin). Ces quantités sont déduites de la distribution *a posteriori* définie par la fonction de densité suivante (à une constance de normalisation près, voir l'article de Renard et al. (2006) pour plus de détails) :

$$p\left(\theta, \sigma_f | \tilde{H}, \tilde{Q}\right) \propto p\left(\tilde{Q} | \theta, \sigma_f, \tilde{H}\right) p(\theta, \sigma_f) \quad (9)$$

La vraisemblance des valeurs de débit \tilde{Q} observées (observations supposées indépendantes les unes des autres) connaissant les paramètres θ de la courbe de tarage, les paramètres σ_f de l'écart-type

restant g_f et les valeurs de hauteurs d'eau observées \tilde{H} , est donnée par :

$$p\left(\tilde{Q}|\theta, \sigma_f, \tilde{H}\right) = \prod_{i=1}^N p_N\left(\tilde{Q}_i|f(\tilde{H}_i|\theta), \sqrt{g_f^2 + u_{\tilde{Q}_i}^2}\right) \quad (10)$$

où $p_N(z|m, s)$ est la densité de probabilité d'une distribution gaussienne de moyenne m et d'écart-type s évaluée à la valeur z . La densité de probabilité *a priori* est déterminée en faisant l'hypothèse d'indépendance entre toutes les quantités θ et σ_f :

$$p(\theta, \sigma_f) = p(\sigma_{f,1})p(\sigma_{f,2}) \prod_{i=1}^{N_{paramètres}} p(\theta_i) \quad (11)$$

Les paramètres θ correspondent aux paramètres a , b et c de l'Équation 5. Hormis les paramètres b_i qui sont déterminés de façon à assurer la continuité de la relation (sauf b_1), les paramètres a_i , c_i et k_i sont déterminés *a priori* à partir d'une analyse des contrôles hydrauliques de la station hydrométrique. Par ailleurs, la détermination *a priori* des paramètres σ_f ne peut pas être faite si directement. Une distribution uniforme très large (entre 0 et 10000) est utilisée pour ces quantités.

Les simulations Monte Carlo par Chaine de Markov (MCMC) : La distribution *a posteriori* des paramètres (Équation 9) est explorée par échantillonnage MCMC (dont une description détaillée est disponible dans l'article de Renard et al. (2006)). Un ensemble de réalisations $(\theta_j, \sigma_{f,j})_{j=1:N_{sim}}$ ($N_{sim} \in [10^4 : 10^5]$) est ainsi généré. Pour chacune de ces réalisations, une courbe de tarage est générée à partir des paramètres θ_j . A partir de cet ensemble de courbe de tarage, pour chaque hauteur d'eau, des statistiques simples (quantiles) permettent d'estimer l'incertitude paramétrique de la courbe de tarage. L'évaluation de l'incertitude totale se fait après ajout à chaque courbe de tarage d'un bruit gaussien de moyenne nulle et d'écart-type g_f , rendant ainsi compte de l'incertitude liée au modèle choisi pour représenter la courbe de tarage. La MaxPost (pour MAXimum POSTerior parameter values) est le jeu de paramètres le plus probable trouvé lors de l'exploration de l'espace des paramètres par les simulations MCMC.

A la sortie du solveur/simulateur BaRatin, environ 500 jeux de paramètres *a posteriori* $(\theta_i, \sigma_{f,i})$ sont sauvegardés dans un fichier texte ainsi que le jeu de paramètres correspondant à la MaxPost. La MaxPost correspond à la courbe de tarage, les 500 autres courbes sont appelées les spaghettis et servent uniquement au calcul de l'enveloppe d'incertitude (enveloppe à 95% à partir des quantiles 2.5% et 97.5%) associée à la courbe de tarage (MaxPost) (voir, par exemple, la Figure 12 en III.1.1. pour une illustration).

II.2.3. Propagation des incertitudes aux hydrogrammes

Incertaine sur le limnigramme : Le limnigramme $(\tilde{h}(t))$ est une série de donnée issue de mesures en continu (pas de temps fixe ou variable) de hauteurs d'eau. Les erreurs associées aux mesures sont supposées uniquement aléatoires (pas de biais) et de distribution gaussienne. Le

modèle choisi pour rendre compte des incertitudes associées aux limnigrammes est le suivant :

$$h(t) = \tilde{h}(t) + \delta(t) \quad \delta(t) \sim \mathcal{N}(0, \sigma_h(t)) \quad (12)$$

Pour chaque pas de temps et pour chaque spaghetti (jeu de paramètres), la valeur de h est ré-échantillonnée à partir de sa valeur mesurée ($\tilde{h}(t)$) et de l'erreur associée $\delta(t)$.

Calcul des hydrogrammes : Les jeux de paramètres *a posteriori* $(\theta_j, \sigma_{f,j})_{j=1:N_{sim}}$ ($N_{sim} \in [10^4 : 10^5]$) de tous les spaghettis sont enregistrés dans un fichier texte. La matrice des contrôles (Équation 4) est également enregistrée dans un fichier texte et permet de reconstruire l'équation de la courbe de tarage (Équation 5) pour chaque jeu de paramètres. On appelle f la fonction de la courbe de tarage. Pour chaque spaghetti (i), un hydrogramme est calculé de la façon suivante :

$$Q_i(t) = \underbrace{f(h_i(t)|\theta_i)}_{\hat{Q}_i(t)} + \epsilon_i^f(t) \quad \epsilon_i^f(t) \sim \mathcal{N}(0, \sigma_{f,1,i} + \sigma_{f,2,i}\hat{Q}_i(t)) \quad (13)$$

Le terme d'erreur $\epsilon_i^f(t)$ est l'erreur restante due au modèle et le terme $h_i(t)$ est la valeur du limnigramme, ré-échantillonnée pour chaque spaghetti (et à chaque pas de temps).

Tous les hydrogrammes spaghettis ainsi produits sont ensuite utilisés pour estimer l'incertitude associée à l'hydrogramme par le calcul des quantiles 2.5% et 97.5% à chaque pas de temps (voir, par exemple, la Figure 13 en III.1.1., pour une illustration).

Calcul de l'hydrogramme MaxPost : Une courbe de tarage doit donner toujours la même valeur de débit pour une valeur de hauteur d'eau donnée. Les valeurs de l'hydrogramme (que l'on appellera l'hydrogramme MaxPost) sont donc calculées à partir de la fonction f et le jeu de paramètres de la courbe de tarage MaxPost ($\theta_{MaxPost}$). Le terme d'erreur $\epsilon_i^f(t)$ est omis et le limnigramme est supposé sans erreurs :

$$Q_{MaxPost}(t) = f(\tilde{h}(t)|\theta_{MaxPost}) \quad (14)$$

II.3. Application de BaRatin au bassin versant de l'Yzeron

II.3.1. Estimation des incertitudes de jaugeages

L'estimation des incertitudes de jaugeages précède l'utilisation du solveur BaRatin. Selon la méthode de jaugeage utilisée, les incertitudes proviennent de différentes sources qu'il convient de prendre en compte. Le guide sur le contrôle des débits réglementaires de l'ONEMA (Le Coz et al., 2011) présente les différentes sources d'incertitudes selon la méthode utilisée. Des valeurs de référence d'incertitudes issues de la littérature et d'études empiriques sont proposées ainsi que des méthodes d'estimation plus précises conformes à la méthodologie du GUM (JCGM, 2008) (voir en I.2.1.).

Les incertitudes sur les jaugeages des stations hydrométriques de l'Yzeron ont été estimées par

les méthodes présentées dans les paragraphes qui suivent. Le choix de la méthode d'estimation de l'incertitude a essentiellement été conditionné par la disponibilité des informations : les données de dépouillement. Ces données peuvent être détaillées (le calcul du débit peut entièrement être refait), agrégées (moyennes, résultats de calculs intermédiaires, etc...) ou absentes (uniquement la date, la méthode employée, les valeurs de hauteurs d'eau et de débit). La Figure 5 présente un arbre de décision explicitant les choix faits et les méthodes employées selon les informations disponibles.

La plupart des jaugeages faits par IRSTEA fournissait uniquement des informations agrégées. Les jaugeages faits par la DREAL étaient soit complètement documentés (toutes les informations de dépouillement) soit sans aucune information, pour les plus anciens.

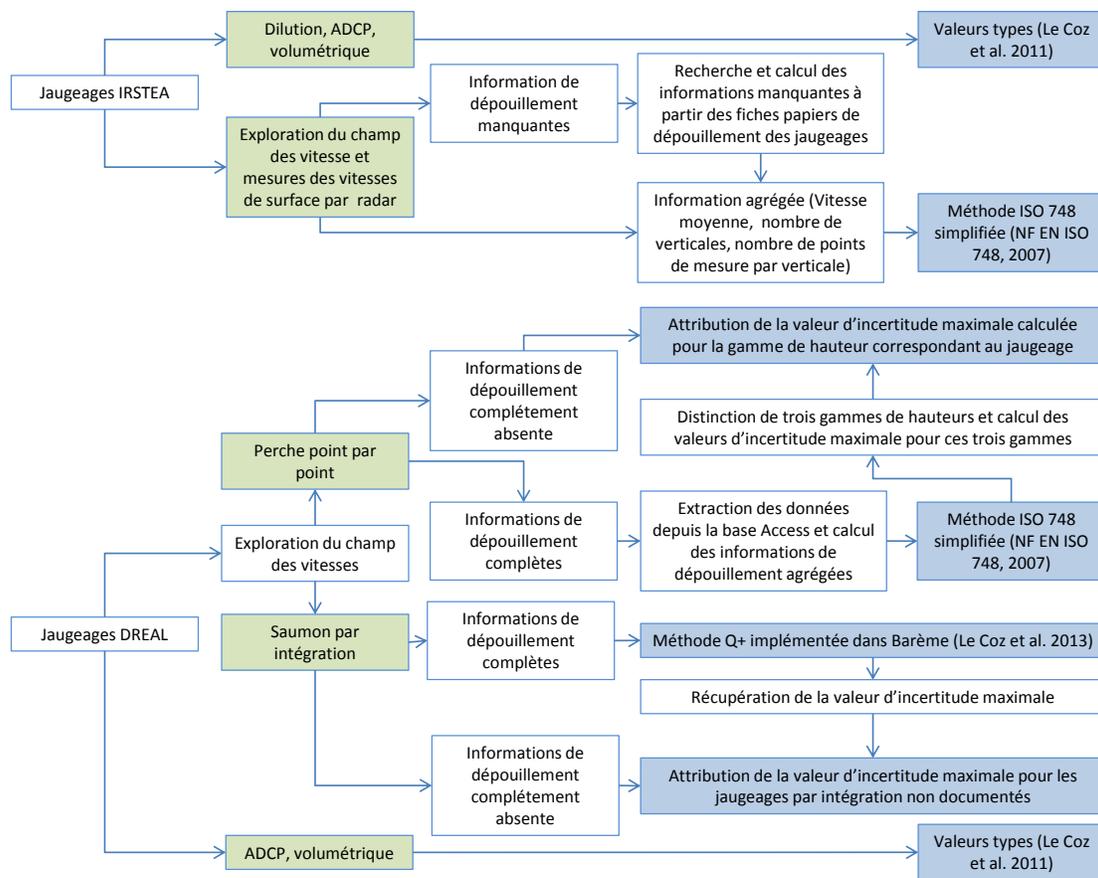


FIGURE 5 – Arbre de décision utilisé pour le choix de la méthode d'estimation des incertitudes de jaugeages.

II.3.1.a. Attribution de valeurs de référence

Pour les jaugeages par dilution, les jaugeages par ADCP et les jaugeages par capacité des valeurs de référence d'incertitudes proposées par Le Coz et al. (2011) ont été utilisées. Celles-ci ont été rassemblées dans le Tableau 3. Ce choix a été fait au regard de l'absence presque systématique d'information sur le dépouillement de ces jaugeages ou l'absence de méthodologie adaptée pour le calcul de l'incertitude.

TABLEAU 3 – Valeurs d'incertitude de référence issues du guide de l'ONEMA (Le Coz et al., 2011) au niveau de confiance 95%.

Méthodes de jaugeage	ADCP	Dilution	Volumétrie
Incertitude-type de référence (95%)	5%	5%	10%

II.3.1.b. Méthode ISO 748

La méthode NF ISO 748 (ISO, 2007) est une méthode normalisée pour le calcul des incertitudes pour les jaugeages par exploration du champ des vitesses. Une version simplifiée de la méthode (Équation 15) est également proposée. Elle présente l'avantage de ne pas nécessiter l'intégralité des données de dépouillement du jaugeage. Les seules informations nécessaires sont : le nombre de verticales, le nombre de points de mesure par verticale, la vitesse moyenne mesurée par le courantomètre et le temps d'exposition du courantomètre. Selon ces informations, des tableaux de valeurs issues d'études empiriques proposés dans l'annexe E de la norme ISO 748 ainsi que les informations des constructeurs sur les précisions des appareils de mesure permettent de déterminer les différents termes d'incertitude de l'Équation 15.

La formulation simplifiée de l'équation de calcul d'incertitude pour les jaugeages par exploration du champ de vitesse est (ISO, 2007; Herschy, 2002; Le Coz et al., 2011) :

$$u_Q = \left[u_m^2 + u_s^2 + \frac{1}{m} \left(u_b^2 + u_d^2 + u_p^2 + \frac{1}{n} (u_c^2 + u_e^2) \right) \right]^{1/2} \quad (15)$$

Avec les différents termes d'incertitudes liées aux erreurs suivantes :

- u_s : erreurs systématiques restantes des appareils de mesure (de vitesses, de longueurs).
- u_m : erreurs d'intégration des vitesses et des profondeurs sur la largeur.
- u_b : erreurs de mesure des largeurs entre les verticales.
- u_d : erreurs de mesure des profondeurs.
- u_p : erreurs d'intégration des vitesses sur la verticale.
- u_c : erreurs aléatoires du courantomètre utilisé (précision du courantomètre).
- u_e : temps d'exposition du courantomètre et fluctuations des vitesses sur cette période.
- m : nombre de verticales.
- n : nombre de points par verticale.

Cette méthode, établie pour les jaugeages par exploration du champ des vitesses faits avec un courantomètre à hélice, surestime certainement les incertitudes pour les jaugeages réalisés avec des courantomètres électromagnétiques ou acoustiques (le cas de tous les jaugeages fait par IRSTEA sur l'Yzeron). Mais comme il est mentionné par Le Coz et al. (2012, 2013) la méthode ISO 748 est surtout sensible au nombre de verticales ; les composantes liées au courantomètre (u_c et u_e) sont relativement faibles. La méthode ISO 748 a donc été utilisée, jugée plus précise qu'une simple attribution d'une valeur de référence.

II.3.1.c. Méthode Q+

La méthode Q+ est une méthode d'estimation des incertitudes associées aux jaugeages par exploration du champ des vitesses développée à IRSTEA (Le Coz et al., 2012).

Une grande partie des jaugeages de la DREAL dispose de toutes leurs données de dépouillement, offrant la possibilité d'appliquer la méthode Q+ pour tous les jaugeages par exploration du champ des vitesses. Les jaugeages par intégration sont des jaugeages par exploration du champ des vitesses où pour chaque verticale, les mesures de vitesse ne sont pas ponctuelles mais continues. Un courantomètre est progressivement abaissé dans l'eau au droit d'une verticale jusqu'au fond et mesure la vitesse sur toute la verticale. La méthode Q+ permet également le calcul des incertitudes pour les jaugeages de ce type, ce qui n'est pas le cas de la méthode ISO 748.

La méthode Q+ présente le grand intérêt de remédier à certains défauts de la méthode ISO 748 mis en avant par Le Coz et al. (2012, 2013). La limite principale de cette méthode réside dans le choix d'un angle α qui permet de rendre compte des variations transversales de la géométrie du fond de la section jaugée. La détermination de cet angle doit être faite au cas par cas pour chaque jaugeage. Des essais de calculs automatisés (via le code R² de la méthode Q+ fourni par A. Despax, doctorant EDF/LTHE travaillant sur les incertitudes hydrométriques) sur l'ensemble des jaugeages ont démontré une trop forte sensibilité au choix de l'angle. Le nombre de jaugeages étant élevé (plus de 150 jaugeages) et aucune automatisation étant possible, la méthode Q+ n'a pas été retenue, au profit de la méthode ISO 748. Par ailleurs, le faible nombre de jaugeages par intégration a permis un calcul individuel de l'incertitude par la méthode Q+.

II.3.1.d. Les jaugeages non-documentés

Les jaugeages non documentés concernent uniquement les plus anciens jaugeages de la DREAL Rhône-Alpes. Un jaugeage est non documenté lorsqu'aucune donnée de dépouillement n'est disponible. Pour estimer l'incertitude de tels jaugeages, les incertitudes calculées sur les jaugeages documentés ont été utilisées comme référence. Trois gammes de hauteurs ont été définies et pour chacune des gammes, la valeur d'incertitude maximale a été retenue et appliquée à chaque jaugeage non documenté de la gamme.

II.3.2. L'analyse hydraulique des stations hydrométriques

Une analyse hydraulique des stations hydrométriques permet d'identifier les contrôles hydrauliques en jeu, les différentes gammes de hauteurs à considérer ainsi que la détermination des valeurs *a priori* des paramètres de l'équation de la courbe de tarage.

II.3.2.a. Identification des contrôles hydrauliques

Toute information sur l'écoulement pour toute hauteur d'eau peut être utilisée : des visites sur le terrain, des photos, des vidéos, des témoignages, des avis d'experts, etc... L'analyse hydraulique repose sur la compréhension des processus physiques contrôlant les écoulements. Il s'agit d'identifier

2. Logiciel de calcul statistique et scientifique. R CRAN project : <http://cran.r-project.org>

les différents éléments contrôlant la relation hauteur-débit pour toutes les gammes de hauteurs d'eau : des plus faibles aux plus forts débits. Les cas les plus classiques sont des contrôles par des radiers naturels, des seuils artificiels (rectangulaire ou triangulaire), des contrôles par le chenal (application de la loi de Manning-Strickler pour le lit mineur et/ou le lit majeur) ou encore un pont, lorsqu'il entre en charge (Le Boursicaud et al., 2012). Pour les différentes stations, cette analyse a été faite et différents contrôles ont été identifiés selon les hauteurs d'eau. Quelques analyses hydrauliques qui avaient déjà été faites ont été confirmées lors de sorties terrains.

L'identification des contrôles hydrauliques oblige également à une analyse historique des stations. En effet, si depuis la mise en service de la station hydrométrique, des changements de contrôles hydrauliques (cf. I.1.2.) ont eu lieu, il convient de définir plusieurs périodes. Chaque période est alors supposée stable d'un point de vue hydraulique et la méthode BaRatin doit être appliquée séparément à chacune de ces périodes.

II.3.2.b. Détermination des *a priori* hydrauliques

Une fois les contrôles hydrauliques identifiés, une formule hydraulique doit être choisie pour chaque contrôle. Les formules hydrauliques utilisées sont présentées en [Annexe I.](#) Selon la formule hydraulique, différentes informations sont nécessaires pour déterminer les paramètres a_i , c_i (avec $i \in [1 : N_{\text{contrôle}}]$) et b_1 de la formulation générale présentée en II.2.2. ([Équation 5](#)). Les informations pouvant être nécessaires sont :

- la géométrie précise des déversoirs ou des orifices
- la pente moyenne du lit du cours d'eau
- Le coefficient de Strickler (coefficient rendant compte de la résistance à l'écoulement)

Une campagne de mesures au tachéomètre³ a permis d'obtenir les informations de géométries pour les stations du Mercier, de Craponne et Taffignon. Des mesures antérieures sur les autres stations hydrométriques ont pu être utilisées par ailleurs. L'ensemble de ces données (topographie/géométrie, rugosité, etc...) permet le calcul des valeurs *a priori* des paramètres θ (c'est-à-dire les paramètres a , b et c , voir le [Tableau 2](#)). Pour chaque paramètre, on suppose une distribution gaussienne dont la valeur centrale et l'écart-type doivent être estimés.

L'écart type d'une mesure faite sur le terrain ou une estimation du coefficient de Strickler, en supposant une distribution gaussienne, peut être approché de manière simple par les valeurs limites maximales et minimales (considérées acceptables) en utilisant l'[Équation 16](#) (Le Boursicaud et al., 2012) :

$$\sigma_\theta = \frac{\theta_{\max} - \theta_{\min}}{4} \quad (16)$$

En pratique, à une valeur x , une incertitude sous la forme d'un intervalle $\pm U$ est donnée. Sous l'hypothèse d'une distribution normale, U est équivalent à une incertitude élargie au niveau de confiance 95% : $U = (\theta_{\max} - \theta_{\min})/2$. L'incertitude-type, donc l'écart-type, est donnée par $u = U/2$. Le schéma de la [Figure 6](#) illustre les distinctions entre ces différents termes.

3. Campagne de mesures faite le 23 avril 2014

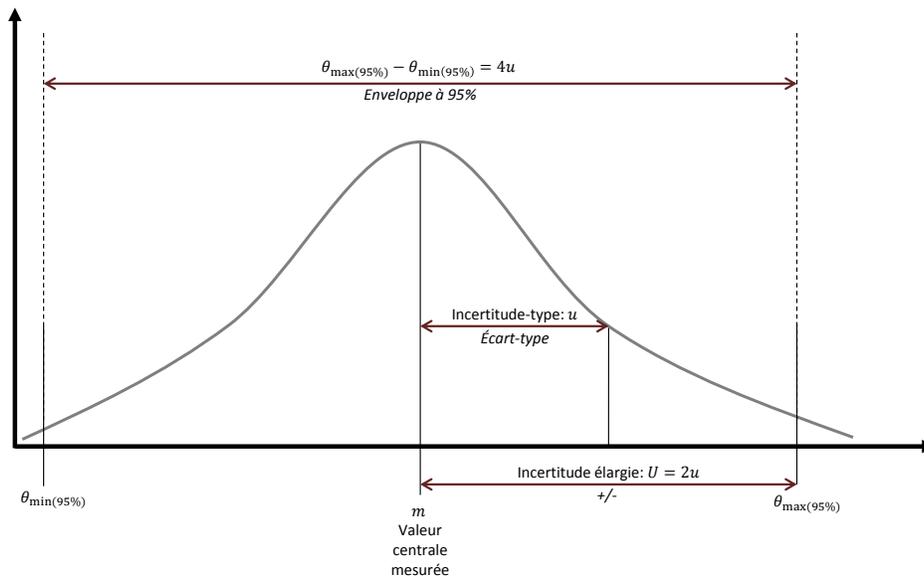


FIGURE 6 – Incertitude-type et incertitude élargie (au niveau de confiance 95%) pour une distribution gaussienne / normale.

L'incertitude associée à toutes les données servant aux calculs des paramètres a (les paramètres b et c sont déterminés directement) a été propagée suivant l'approximation d'ordre 1 du GUM présentée en 1.2.2. (Équation 2). Un exemple de calcul est présenté en Annexe VI..

Les hauteurs de transitions (k_r avec $r \in [1 : N_{gamme}]$, voir en II.2.2.) entre les différents contrôles doivent également être estimées. Lorsqu'il s'agit de déterminer à partir de quelle hauteur un seuil est noyé et que le contrôle hydraulique change complètement (passage à un contrôle par un seuil plus grand et plus en aval ou à un contrôle par le chenal), la tâche est particulièrement délicate et des *a priori* très incertains en découlent souvent. Dans les cas où les contrôles s'ajoutent, l'exercice est bien plus aisé. En effet, les hauteurs de transition correspondent aux côtes des crêtes respectives de chaque seuil ou aux hauteurs de débordement (par exemple, le début d'un contrôle de type chenal sur le lit majeur). De même que précédemment, les distributions *a priori* des hauteurs de transition sont supposées être de type gaussien ; une valeur centrale et un écart-type doivent donc être estimés.

II.3.2.c. Utilisation du modèle hydraulique 1-D MAGE

Dans le cas de la station du Mercier (voir en III.1.1.), un modèle hydraulique 1-D a été construit par F. Riou (Riou, 2012) sous le logiciel MAGE développé à IRSTEA (Faure, 2009). Le modèle est basé sur une résolution numérique de l'équation de Barré Saint Venant. Les seuils où les passages en régime torrentiel sont très probables constituent des singularités et sont modélisés par des formules hydrauliques de déversoirs classiques (cf. Annexe I.). Le déversoir rectangulaire y était représenté par une singularité de ce type. Des simulations pour la plus large gamme de débits possibles ont été faites. Pour tous les débits simulés par le modèle au niveau du seuil, MAGE indiquait si oui

ou non le seuil était noyé, permettant ainsi d'estimer la hauteur de transition entre un contrôle par le seuil et un contrôle par le chenal.

II.3.3. Propagation des incertitudes aux hydrogrammes : mise en place d'une chaîne de traitement

II.3.3.a. Préparation des données en amont de BaRatin

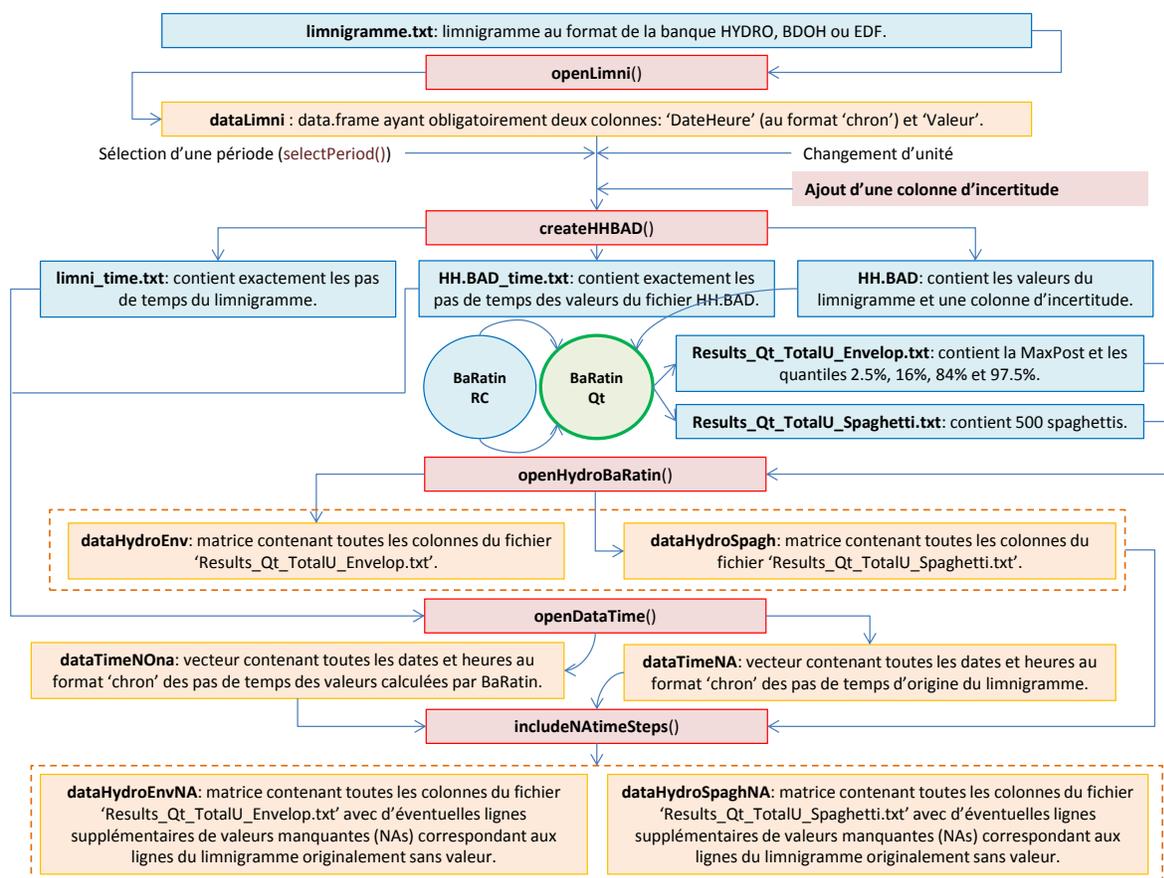


FIGURE 7 – Chaîne de traitement en amont et en aval de BaRatin pour la propagation des incertitudes aux hydrogrammes. Les carrés bleus correspondent aux fichiers textes, les rouges aux fonctions R et les oranges aux objets R contenant des données (vecteurs, matrices, etc...).

L'utilisateur doit fournir en entrée de BaRatin un fichier texte comportant les valeurs du limnigramme (première colonne) pour chaque pas de temps et l'incertitude (deuxième colonne) sous forme d'un écart-type. La mise sous un format compréhensible par BaRatin du limnigramme depuis les différents formats (format de la banque HYDRO, format de la BDOH (Base de Données des Observatoires en Hydrologie), format EDF, etc...) est donc nécessaire.

De plus, l'incertitude doit être ajoutée au limnigramme. Le choix a été fait de conserver une incertitude fixe de $\pm 0.005m$. Cette valeur a été choisie par rapport aux valeurs qui se trouvent dans la littérature. McMillan et al. (2012), s'appuyant sur les résultats de nombreux travaux, indiquent que les incertitudes associées aux mesures de hauteurs d'eau n'excèdent que très rarement $\pm 10mm$

et que les valeurs d'incertitudes sont souvent situées entre $\pm 2mm$ et $\pm 10mm$. Une incertitude fixe de $\pm 5mm$ est une hypothèse très simplificatrice. Il est probable que l'incertitude soit dépendante du temps séparant la mesure de la dernière vérification de l'étalonnage du limnigraphe, ou même que les fluctuations dues à des vaguelettes lors des crues augmentent considérablement les incertitudes associées aux mesures de hauteurs d'eau.

Très souvent, dans les limnigrammes de nombreux pas de temps sans valeur peuvent être trouvés : les lacunes. Ces pas de temps doivent être retirés du limnigramme avant le passage à BaRatin (qui n'accepte aucune valeur manquante) mais ne doivent pas être perdus. Deux fichiers (en plus du fichier d'entrée de BaRatin) doivent donc être produits : un fichier contenant les pas de temps du fichier d'entrée de BaRatin, et un fichier contenant tous les pas de temps du limnigramme d'origine afin de pouvoir réintroduire les lacunes dans l'hydrogramme une fois ce dernier calculé par BaRatin.

II.3.3.b. Les résultats de BaRatin :

Deux fichiers résultats produits par BaRatin ont été utilisés :

- un fichier contenant les valeurs de l'hydrogramme MaxPost ainsi que les quantiles 2.5%, 16%, 84% et 97.5% calculés après l'ajout de l'erreur $\epsilon_i(t)$ rendant ainsi compte de l'incertitude totale.
- un fichier contenant les valeurs des hydrogrammes produits par tous les spaghetti après l'ajout de l'erreur $\epsilon_i(t)$

Ces fichiers sont utilisés pour visualiser les résultats et propager les incertitudes pour tout autres calculs ultérieurs (cf. II.4.). Pour finaliser la reconstruction des hydrogrammes, il faut associer les valeurs aux pas de temps conservés au préalable (paragraphe ci-dessus) et ré-introduire les lacunes également sauvegardées.

L'ensemble des étapes de cette chaîne de traitement est présenté par la [Figure 7](#). Tous ces traitements ont été faits avec le logiciel de calcul scientifique et statistique R⁴.

II.4. Séries temporelles à différents pas de temps et indicateurs hydrologiques

II.4.1. Les débits : d'un pas de temps variable à un pas de temps fixe

Le calcul des hydrogrammes à pas de temps fixe est essentiel pour de nombreuses utilisations de la donnée, notamment pour l'utilisation comme donnée de validation et/ou de calibration d'un modèle hydrologique. La méthodologie employée pour le calcul à pas de temps fixe est expliquée ici. Les fonction R codées et utilisées pour cette tâche se trouvent en intégralité en [Annexe IX.](#)

4. R CRAN project : <http://cran.r-project.org>

La fonction permet de calculer l'hydrogramme MaxPost ainsi que tous les hydrogrammes à pas de temps fixe. Les pas de temps fixe implémentés sont l'heure, le jour et le mois.

Un vecteur contenant les pas de temps variables et une matrice contenant la MaxPost et les spaghetti (ayant autant de ligne que de pas de temps) sont les données d'entrée de la fonction. Le pas de temps fixe de sortie désiré doit également être spécifié. La fonction définit un vecteur de pas de temps cible et une matrice cible ayant autant de lignes que de pas de temps cibles et autant de colonnes que la matrice d'entrée.

Ensuite, pour chaque pas de temps cible, tous les pas de temps sources inclus dedans et les pas de temps sources extérieurs les plus proches sont recherchés. Toutes les lignes (pas de temps sources) de la matrice d'entrée sont récupérées. Les valeurs de chaque spaghetti et de la MaxPost (toutes les colonnes de la matrice d'entrée) sont interpolées linéairement aux limites du pas de temps cible (début et fin du pas de temps). La surface sous chaque spaghetti et sous la MaxPost pour le pas de temps cible considéré est ensuite calculée puis divisée par la durée du pas de temps. Il s'agit d'un calcul de moyenne permettant d'obtenir la valeur de chaque spaghetti et de la MaxPost pour le pas de temps cible. Si un pas de temps source correspond à une lacune, tout pas de temps cible nécessitant sa valeur est défini comme lacune. La Figure 8 illustre le principe du passage à un pas de temps fixe tel qu'il a été fait ici.

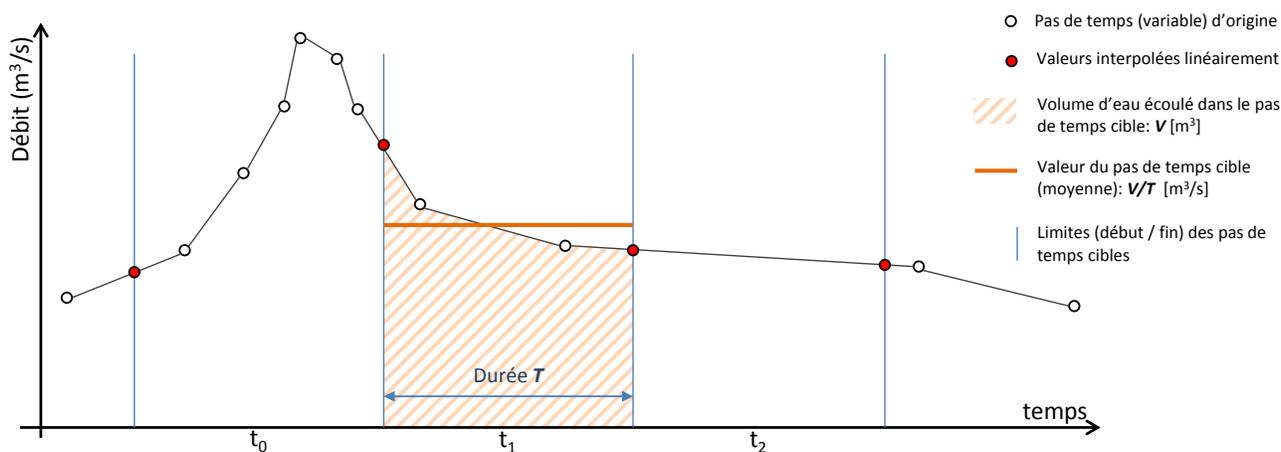


FIGURE 8 – Principe du passage d'un pas de temps variable à un pas de temps fixe par le calcul des moyennes

L'incertitude (enveloppe à 95%) pour chaque pas de temps cible est ensuite obtenue par calcul des quantiles 2.5% et 97.5% de tous les spaghetti.

Certaines lacunes dans les spaghetti ne correspondaient pas à des lacunes réelles (c'est-à-dire, à des lacunes provenant du limnigramme) et étaient introduites par BaRatin lors de la propagation des incertitudes. Pour les plus faibles hauteurs du limnigramme, l'ajout de l'erreur liée à l'incertitude associée au limnigramme (ré-échantillonnage à chaque pas de temps et pour chaque

spaghetti) peut impliquer que la valeur de la hauteur d'eau soit inférieure au minimum de la courbe de tarage (inférieur à la valeur de b_1 pour un spaghetti donnée). BaRatin introduit alors dans le résultat (spaghettis correspondant) une valeur manquante (voir en [Annexe VIII.](#)). Des interpolations linéaires au niveau de ces lacunes ont été faites pour tous les spaghettis pour combler les lacunes introduites par BaRatin sur les hydrogrammes à pas de temps variable avant le calcul des pas de temps fixes.

II.4.2. Quelques indicateurs de bilan

II.4.2.a. Les lames d'eau écoulées

Quelques indicateurs de bilans hydrologiques ont été calculés ainsi que leurs incertitudes associées pour les différents sous bassins versant de l'Yzeron : les lames d'eau mensuelles écoulées, les moyennes interannuelles de lames d'eau mensuelles, les lames d'eau annuelles, les moyennes interannuelles de lames d'eau annuelles. La méthodologie employée pour leurs calculs, résumé par la [Figure 9](#), est présentée ici.

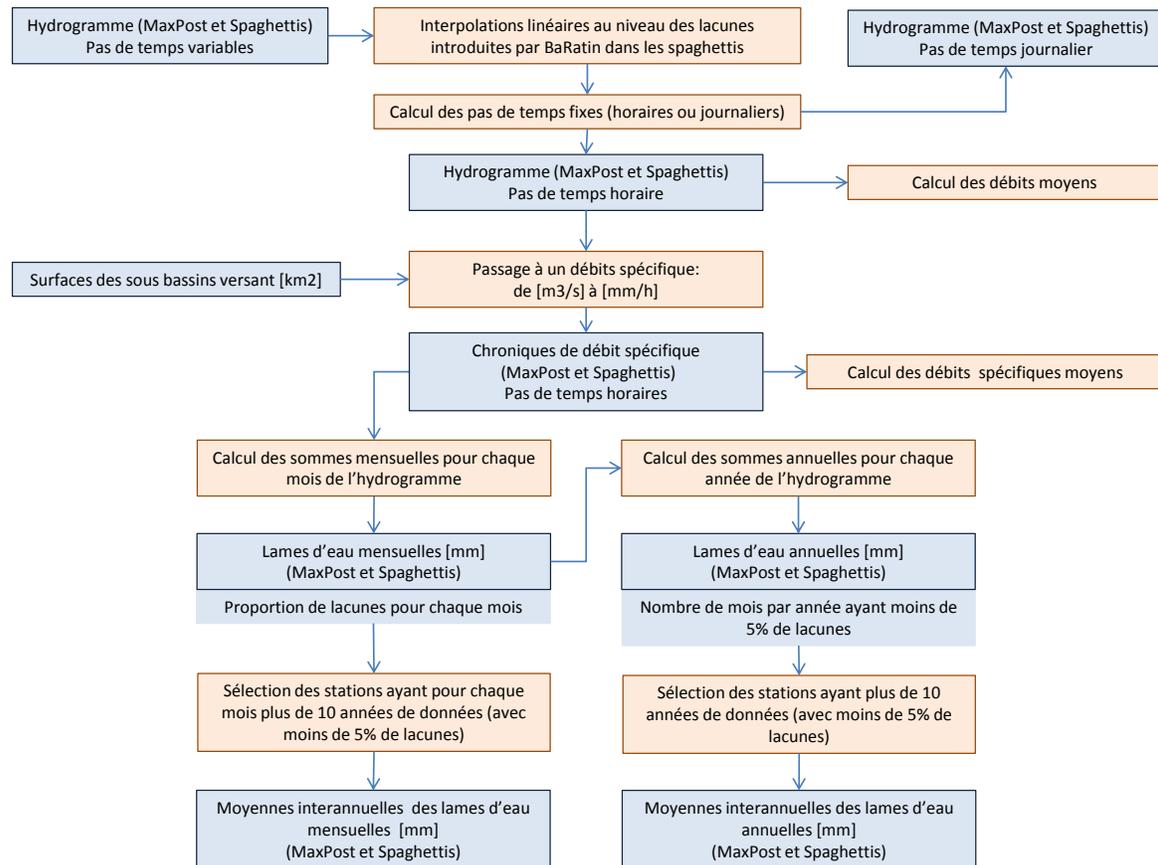


FIGURE 9 – Méthodologie employée pour les calculs des lames d'eau mensuelles et annuelles ainsi que des moyennes interannuelles de lames d'eau mensuelles et annuelles.

Les calculs ont été faits à partir des hydrogrammes à pas de temps horaire. Les débits spécifiques de chaque bassin versant ont été calculés en utilisant les surfaces de chaque sous bassin versant dans

le [Tableau 1](#). Les incertitudes associées aux surfaces des sous-bassins versant ont été considérées nulles. Les surfaces sont pourtant très incertaines dû fait qu'elles sont calculées uniquement à partir de la topographie (MNT d'une résolution de $25m$) et qu'elles ne prennent pas en compte les surfaces urbaines lorsque les déversoirs d'orage sont actifs.

Ensuite, les volumes d'eau écoulés chaque mois et chaque année ont été calculés. Des moyennes interannuelles ont été faites pour les stations pour lesquelles on disposait d'au moins 8 années de données.

Les hydrogrammes comportaient beaucoup de lacunes qui ont dû être prises en compte dans les calculs :

- Tout mois ayant plus de 5% de lacunes a été écarté des calculs.
- Toute année avec plus de 2 mois ayant plus de 5% de lacunes a été écartée.

Les calculs ont été faits sur l'ensemble des données disponibles pour chaque station (cf. [Tableau 1](#)). Les moyennes inter-annuelles sont sur des périodes différentes pour chaque station.

II.4.2.b. Les courbes de débits classés

Les courbes de débits classés ont été calculées à partir des pas de temps horaire. Toutes les valeurs de débit, pour chaque spaghetti et pour la MaxPost, ont été classées puis les quantiles ont été extraits.

Chapitre III. Résultats

III.1. Les résultats de la méthode BaRatin

Dans cette partie sont présentés les résultats obtenus par l'application de la méthode BaRatin (pour le calcul des courbes de tarage et la propagation des incertitudes aux hydrogrammes) aux stations du Mercier, Charbonnières et Craponne (voir Figure 2). Le choix a été fait de ne présenter que trois résultats représentatifs du travail effectué afin de ne pas surcharger le rapport. Les résultats pour les autres stations sont présentés en Annexe II., Annexe III., Annexe IV. et Annexe V.. Une présentation succincte des résultats pour ces stations est faite dans les paragraphes ci-dessous.

La station de Taffignon (cf. Annexe II.) disposait de deux courbes de tarage mises en place par la DREAL pour deux périodes différentes. Une seule période a été considérée ici, car aucun changement de contrôle n'a été identifié. Lors de la comparaison entre l'ancien hydrogramme et l'hydrogramme calculé par BaRatin, d'importantes différences ont été observées pour la chroniques antérieure au changement de courbe de tarage fait par la DREAL.

Le faible nombre de jaugeages de la station de Pont de la Barge (cf. Annexe III.) et la forte incertitude sur la hauteur de transition entre le contrôle par le seuil et le contrôle par le chenal impactent fortement l'incertitude totale associée à la courbe de tarage. De plus, de fortes différences ont été observées sur les hydrogrammes (BDOH vs BaRatin) pour des hauteurs d'eau supérieures à 10cm.

Malgré un contrôle hydraulique très fiable (canal Parshall), une incertitude assez forte est calculée par BaRatin pour la station de la Léchère (cf. Annexe IV.). Il est probable qu'une surestimation de l'incertitude soit causée par le faible nombre de jaugeages et des *a priori* hydraulique dont les incertitudes associées ont été définies trop grandes. Les *a priori* sur l'incertitude restante (lois uniformes entre 0 et 10000) ne semblent par rendre compte de façon réaliste de l'incertitude restante liée au modèle. *A posteriori*, celle-ci contribue fortement à l'incertitude totale.

D'importantes simplifications ont été faites dans le cas du Ratier (cf. Annexe V.) lors de la traduction de l'analyse hydraulique en *a priori* hydrauliques pour prendre en compte de façon rigoureuse le seuil triangulaire (voir le cas similaire de la station de Charbonnières, en III.1.2.). Cependant, les résultats de BaRatin semblent donner une représentation réaliste de l'incertitude totale associée à la courbe de tarage et aux hydrogrammes.

III.1.1. La station hydrométrique du Mercier

III.1.1.a. Présentation de la station

La station du Mercier a la particularité d'avoir subi de récents travaux. En effet, de nouveaux seuils ont été construits en novembre 2013. Ces travaux ont entraîné une modification importante de la géométrie du cours d'eau en aval du limnigraphe de la station. Il y a donc eu une modification importante des contrôles hydrauliques. Il convient de considérer deux périodes distinctes durant

lesquelles les contrôles hydrauliques sont supposés stables. Les photos de la Figure 10 permettent de voir les changements de contrôles dus aux travaux.



(a) Contrôle hydraulique avant les travaux : de la mise en service de la station à novembre 2013.



(b) Contrôles hydrauliques après les travaux : de janvier 2014 à aujourd'hui.

FIGURE 10 – Photos de la station hydrométrique du Mercier (a) avant et (b) après les travaux.

III.1.1.b. Les jaugeages :

Avant les travaux, uniquement cinq jaugeages ont été faits. Quatre de ces jaugeages ont été faits par exploration du champ des vitesses et un par dilution (Tableau 4). Le calcul des incertitudes de jaugeage a suivi la méthodologie présentée en II.3.1..

TABLEAU 4 – Jaugeages de la station du Mercier avant (à gauche) et après (à droite) les travaux. Les dates, les heures, les hauteurs d'eau (H), les débits (Q) et les incertitudes élargies relatives (U) sont indiqués. Les jaugeages précédés par * correspondent aux jaugeages considérés indépendants.

Avant les travaux :					Après les travaux				
Date	Heure	$H(m)$	$Q(m^3/s)$	$U(\%)$	Date	Heure	$H(m)$	$Q(m^3/s)$	$U(\%)$
05/11/2008	13 :54	0.12	0.28	9.6	* 10/02/2014	13 :36	0.311	0.2599	5
14/11/2008	10 :20	0.045	0.048	10.8	10/02/2014	13 :42	0.309	0.2575	5
09/02/2009	14 :25	0.14	0.44	8.4	10/02/2014	13 :50	0.308	0.2506	5
15/11/2010	13 :35	0.11	0.224	11.9	* 13/02/2014	12 :49	0.288	0.2292	5
23/12/2008	12 :09	0.076	0.113	5	13/02/2014	13 :20	0.287	0.2364	5
					13/02/2014	13 :32	0.286	0.2136	5
					* 04/03/2014	15 :10	0.225	0.1092	5
					04/03/2014	15 :05	0.225	0.1006	5
					04/03/2014	15 :16	0.225	0.1042	5

Neuf jaugeages ont été faits en 2014, après les travaux, mais ils ne couvrent qu'une petite gamme de hauteurs d'eau. Tous les jaugeages ont été faits par dilution ; une incertitude de 5% a donc été attribuée à tous les jaugeages (voir Tableau 4). Les neuf jaugeages ont été faits trois jours différents : avec trois jaugeages par jour espacés de quelques minutes. Les jaugeages faits

le même jour ne sont peut-être pas indépendants, violant de ce fait une des hypothèses de la méthode BaRatin. La méthode BaRatin a donc été appliquée avec uniquement trois jaugeages faits différents jours et considérés indépendants (voir [Tableau 4](#)). Afin de pouvoir comparer les résultats, la méthode BaRatin a également été appliquée une seconde fois avec tous les jaugeages.

III.1.1.c. Les *a priori* hydrauliques

Avant les travaux, deux contrôles ont été identifiés : un contrôle par un seuil rectangulaire et un contrôle par le chenal pour les plus forts débits. Le modèle hydraulique 1-D sous le logiciel MAGE (voir [II.3.2.](#)) a permis de montrer que le seuil n'était jamais noyé même pour les débits les plus forts (pour lesquelles les hauteurs d'eau au droit du limnigraphe étaient largement supérieures aux hauteurs enregistrées dans le limnigramme). De ce fait, un seul contrôle a été retenu pour cette station sur cette période.

Après les travaux, trois contrôles par des seuils rectangulaires ont été identifiés. Aucun contrôle par chenal n'a été considéré étant donnée la hauteur de chute importante imposée par les seuils. Selon la hauteur d'eau, les contrôles s'ajoutent. La matrice des contrôles correspondante est la suivante :

$$M = \begin{matrix} & \text{seuil 1} & \text{seuil 2} & \text{seuil 3} \\ \text{Gamme 1} & \left(\begin{array}{ccc} 1 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 \\ 1 & 1 & 1 \end{array} \right) \\ \text{Gamme 2} & & & \\ \text{Gamme 3} & & & \end{matrix} \quad (17)$$

Les mesures de géométrie des seuils ont permis de déterminer les largeurs B (voir [Annexe I.](#)) et les hauteurs k_i des crêtes des différents seuils (avant et après les travaux). De cette façon, les *a priori* hydrauliques (et les incertitudes associées) ont pu être déterminés. Les incertitudes associées aux paramètres ont surtout été déterminées à partir des incertitudes instrumentales sur les mesures des éléments de géométrie. Une incertitude de $\pm 1cm$ (soit une incertitude-type de $0.005m$) a été retenue pour toutes les mesures de distance.

L'ensemble des *a priori* (et les incertitudes-type associées) des paramètres est présenté dans le [Tableau 5](#) (avant les travaux) et le [Tableau 6](#) (après les travaux).

III.1.1.d. Les courbes de tarage calculées par BaRatin

Avant les travaux :

La [Figure 11](#) montre la courbe de tarage, l'enveloppe d'incertitude ainsi que les jaugeages. Les paramètres *a posteriori* sont présentés dans le [Tableau 5](#). Les valeurs *a posteriori* sont comprises dans les intervalles définis *a priori*, confirmant la validité des résultats fournis par BaRatin.

TABLEAU 5 – Valeurs (et écarts-type) des paramètres *a priori* et *a posteriori* pour la station du Mercier avant les travaux. ($U(0, 10000)$ fait référence à une loi uniforme sur l'intervalle $[0, 10000]$).

	a_1	b_1	c_1	$\sigma_{f,1}$	$\sigma_{f,2}$
<i>a priori</i> :	5.8	-0.025	1.5	$U(0, 10000)$	$U(0, 10000)$
	(0.35)	(0.0125)	(0.025)		
<i>a posteriori</i> :	5.795	-0.013	1.501	0.0145	0.1555
	(0.339)	(0.01)	(0.024)	(0.0635)	(0.1917)

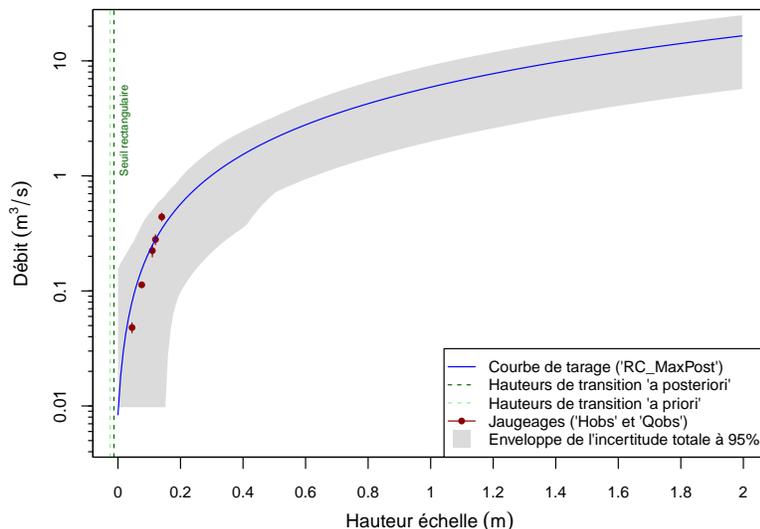
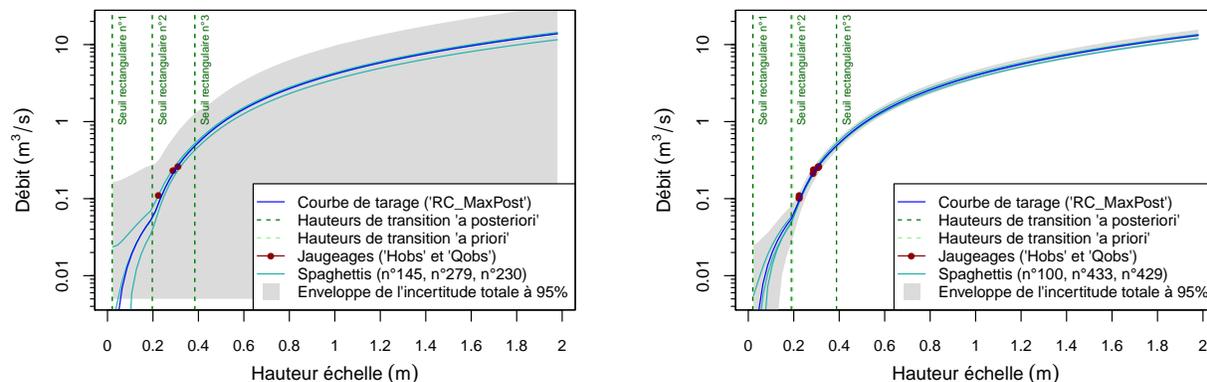


FIGURE 11 – Courbe de tarage et enveloppe d'incertitude à 95% de la station hydrométrique du Mercier calculés par BaRatin pour la période précédant les travaux. (échelle logarithmique pour les débits)

L'enveloppe d'incertitude est assez conséquente probablement du fait du paramètre $\sigma_{f,2}$ dont la valeur *a posteriori* est assez élevée (0.156 (0.19)) rendant compte de l'incertitude restante, due au modèle. Le faible nombre de jaugeages ne permet pas de réduire l'incertitude paramétrique de la courbe de tarage qui contribue également de façon importante à l'incertitude totale.

Après les travaux :

Les courbes de tarage résultats de BaRatin sont présentées par la figure Figure 12 et les valeurs des paramètres *a posteriori* sont présentées dans le Tableau 6.



(a) Avec uniquement les trois jaugeages indépendants

(b) Avec les neuf jaugeages

FIGURE 12 – Courbe de tarage et enveloppe d'incertitude à 95% de la station du Mercier après les travaux : (a) avec uniquement les jaugeages indépendants et (b) avec tous les jaugeages. (échelle logarithmique pour les débits).

 TABLEAU 6 – Valeurs (et écart-types) des paramètres *a priori* et *a posteriori* pour les deux résultats BaRatin : avec uniquement les jaugeages indépendants (soit trois jaugeages) et avec tous les jaugeages (soit neuf jaugeages). ($U(0, 10000)$ fait référence à une loi uniforme sur l'intervalle $[0, 10000]$)

	Contrôle 1				Contrôle 2			
	a_1	b_1	c_1	k_1	a_2	b_2	c_2	k_2
<i>a priori</i> :	0.7 (0.05)	0.023 (0.005)	1.5 (0.025)	-	0.196 (0.005)	3.7 (0.25)	1.5 (0.025)	-
<i>a posteriori</i> :								
Trois jaugeages	0.761 (0.051)	0.021 (0.005)	1.503 (0.025)	0.197 (0.005)	0.197 (0.005)	3.838 (0.261)	1.495 (0.023)	0.384 (0.005)
Tous les jaugeages	0.728 (0.049)	0.02 (0.005)	1.461 (0.024)	0.189 (0.004)	0.189 (0.004)	3.551 (0.231)	1.495 (0.023)	0.388 (0.005)
	Contrôle 3							
	a_3	b_3	c_3	$\sigma_{f,1}$	$\sigma_{f,2}$			
<i>a priori</i> :	0.387 (0.005)	1.4 (0.1)	1.5 (0.025)	$U(0, 10000)$	$U(0, 10000)$			
<i>a posteriori</i> :								
Trois jaugeages	0.384 (0.005)	1.307 (0.098)	1.516 (0.025)	0.0104 (0.1898)	0.0405 (0.5601)			
Tous les jaugeages	0.388 (0.005)	1.379 (0.11)	1.482 (0.024)	0.0086 (0.0064)	0.0076 (0.0345)			

L'enveloppe d'incertitude de la courbe de tarage calculée par BaRatin avec uniquement les trois jaugeages indépendants n'est pas réaliste. A l'inverse, lorsque tous les jaugeages sont utilisés, l'enveloppe d'incertitude est très réduite. Les différences dans les écarts-types des paramètres a

posteriori des deux résultats de BaRatin sont faibles hormis pour les paramètres σ_f .

L'ensemble des résultats, avant et après les travaux, semble montrer que l'incertitude liée au modèle (écarts-types des paramètres σ_f), prend des proportions très importantes lorsque le nombre de jaugeages est faible. Il est impossible ici, de conclure sur l'importance de l'indépendance entre les jaugeages.

III.1.1.e. Les résultats de la propagation des incertitudes aux hydrogrammes

Uniquement la période précédant les travaux a été considérée pour la propagation des incertitudes aux hydrogrammes. Les calculs ont été faits sur l'intégralité du limnigramme mais uniquement un événement hydrologique de février 2009 est représenté ici. Le limnigramme et l'hydrogramme correspondant, après propagation des incertitudes et ré-introduction des lacunes, sont présentés dans la Figure 13.

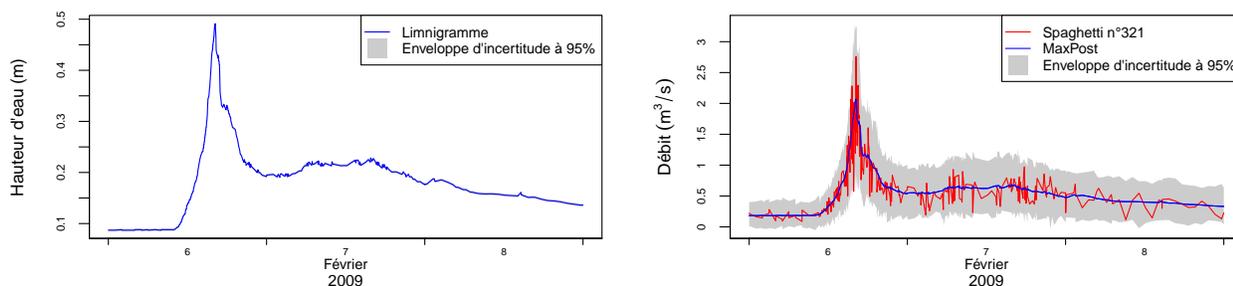


FIGURE 13 – Limnigramme, hydrogramme et enveloppe d'incertitude à 95% de l'événement hydrologique du 6, 7 et 8 février 2009 sur la station du Mercier. (pas de temps variable)

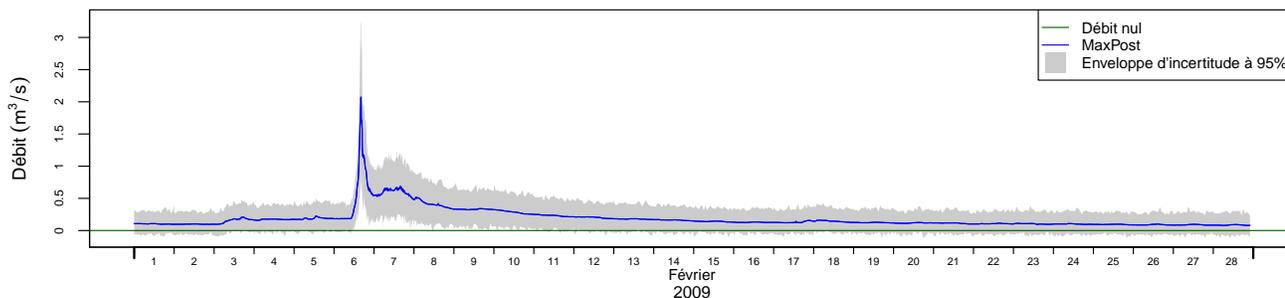


FIGURE 14 – Hydrogramme et enveloppe d'incertitude à 95% calculés par BaRatin sur le mois de février 2009 pour la station du Mercier. (pas de temps variable)

L'enveloppe d'incertitude associée à la courbe de tarage, assez importante, impacte directement l'enveloppe d'incertitude de l'hydrogramme. Le bruit visible sur le spaghetti est liée aux paramètres σ_f . Ce bruit ne semble pas expliquer la largeur importante de l'enveloppe, suggérant que l'incertitude paramétrique associée à la courbe de tarage contribue également de façon importante à l'incertitude totale.

L'enveloppe d'incertitude associée à l'hydrogramme sur mois de février 2009 (Figure 14) implique que des débits négatifs sont possibles, résultat non réaliste. L'incertitude restante due au modèle, responsable en partie du bruit visible sur les spaghetti (Figure 13), est à l'origine de ce résultat. L'erreur restante étant aléatoire gaussienne centrée sur 0, des valeurs impossibles de débit peuvent se retrouver dans les spaghetti dont on se sert pour le calcul des quantiles 2.5% et 97.5%.

III.1.2. La station de Charbonnières

III.1.2.a. Présentation de la station

La station hydrométrique de Charbonnières (Figure 2) a été mise en service en 2009. Trente-trois jaugeages ont été faits depuis sa mise en service. Elle est caractérisée par la présence d'un seuil rectangulaire à crête épaisse avec un déversoir triangulaire à lame fine en son milieu (voir la photo, Figure 15).



FIGURE 15 – Photo de la section de contrôle de Charbonnières.

III.1.2.b. Les jaugeages

Différentes méthodes de jaugeage ont été utilisées pour les jaugeages de la station de Charbonnières : deux par capacité, un par ADCP, quinze par dilution, quinze par exploration du champ des vitesses et un par mesure des vitesses de surface par radar. Les incertitudes associées aux jaugeages ont été calculées suivant la méthodologie présentée en II.3.1..

III.1.2.c. Les *a priori* hydrauliques

Les informations sur l'historique de la station de Charbonnières n'indiquent aucun changement de contrôle hydraulique depuis la mise en service de la station. Deux contrôles hydrauliques ont été identifiés : un contrôle par seuil triangulaire et un deuxième contrôle par un seuil rectangulaire. La hauteur de chute étant assez importante par rapport aux hauteurs d'eau maximales enregistrées par la station hydrométrique, les seuils ne sont probablement jamais noyés. L'Équation 22 a été utilisée pour le seuil triangulaire et l'Équation 21 pour le seuil rectangulaire (cf. Annexe I.).

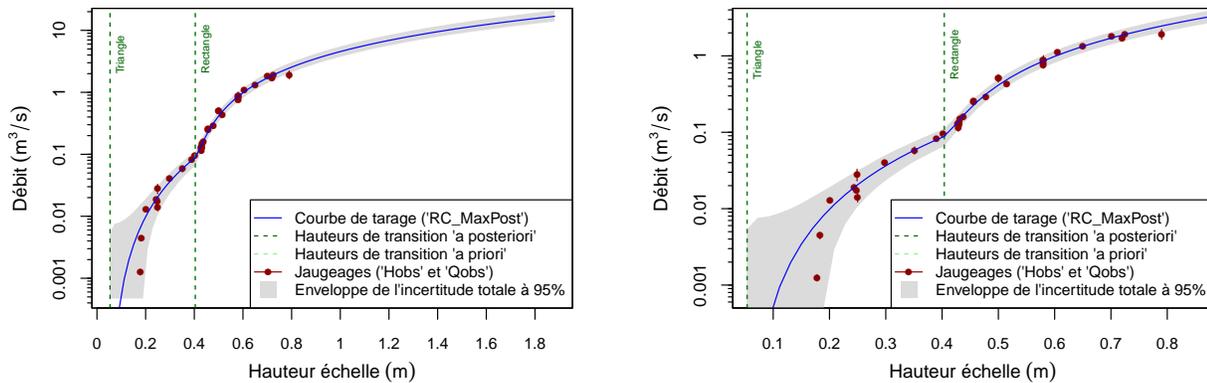
L'équation [Équation 22](#) (cf. [Annexe I.](#)) peut bien se mettre sous la forme d'une équation puissance ([Équation 1](#)). Quand le niveau d'eau dépasse la crête du seuil rectangulaire celui-ci devient actif en même temps que le seuil triangulaire. Cependant l'écoulement correspondant au seuil triangulaire n'a pas plus d'emprise latérale lorsque le niveau d'eau augmente. L'équation générale de la courbe de tarage ([Équation 5](#)) n'est alors plus adaptée. Une équation particulière a été implémentée dans BaRatin pour ce cas de figure. L'équation de la courbe de tarage de BaRatin devient alors (Le Coz et al. 2014) :

$$\begin{aligned}
 Q(h) &= a_1(h - b_1)^{c_1} && \text{si } k_0 < h \leq k_1 \\
 Q(h) &= \underbrace{a_1(h - b_1)^{c_1} - a_1(h - b_2)^{c_1}}_{\text{seuil triangulaire avec limites}} + \underbrace{a_2(h - b_2)^{c_2}}_{\text{seuil rectangulaire}} && \text{si } h > k_1
 \end{aligned}
 \tag{18}$$

Dans cette équation, $b_2 = k_1$ et $k_0 = b_1$. Les valeurs centrales des paramètres et les écart-types associés ont été déterminés par des mesures de géométrie déjà faites (voir [Tableau 7](#)).

III.1.2.d. La courbe de tarage calculée par BaRatin

Les résultats sont présentés par le [Tableau 7](#) qui récapitule les valeurs des paramètres *a priori* et *a posteriori* et par la [Figure 16](#).



(a) Courbe de tarage complète

(b) Zoom sur les faibles hauteurs d'eau

FIGURE 16 – Courbe de tarage et enveloppe d'incertitude à 95% de la station hydrométrique de Charbonnières calculées par BaRatin. (échelle logarithmique pour les débits)

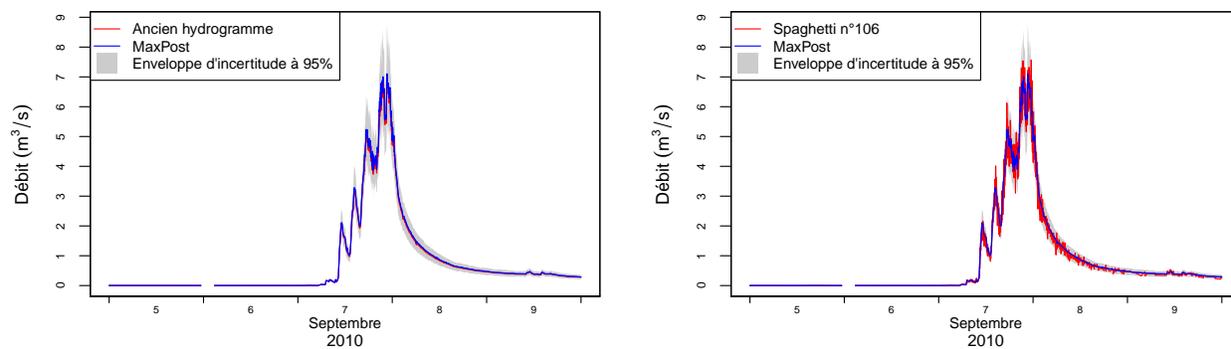
TABLEAU 7 – Valeurs (et écarts-type) des paramètres *a priori* et *a posteriori* pour la station hydrométrique de Charbonnières. ($U(0, 10000)$ fait référence à une loi uniforme sur l'intervalle $[0, 10000]$)

	Contrôle 1				Contrôle 2			$\sigma_{f,1}$	$\sigma_{f,2}$
	a_1	b_1	c_1	k_1	a_2	b_2	c_2		
<i>a priori</i> :	1.2 (0.1)	0.053 (0.005)	2.5 (0.025)	0.403 (0.005)	7.9 (1)	-	1.5 (0.025)	$U(0, 10000)$	$U(0, 10000)$
<i>a posteriori</i> :	1.23 (0.067)	0.054 (0.0045)	2.51 (0.025)	0.40 (0.0035)	8.18 (0.423)	0.054 (0.0045)	1.478 (0.025)	0.0028 (0.0013)	0.081 (0.02)

L'enveloppe d'incertitude est assez réduite. Les paramètres *a posteriori* et *a priori* sont assez proches indiquant que l'analyse *a priori* de la station est bonne. On observe aussi que les écarts-types *a posteriori* sont systématiquement plus faibles que les écarts-types *a priori*.

III.1.2.e. Les résultats de la propagation des incertitudes aux hydrogrammes

Un événement hydrologique de septembre 2010 a été choisi pour présenter les résultats de la propagation des incertitudes aux hydrogrammes (Figure 17).



(a) Comparaison avec l'ancien hydrogramme

(b) Un spaghetti pris au hasard

FIGURE 17 – Hydrogramme et enveloppe d'incertitude à 95% de l'événement hydrologique du 5 au 10 septembre 2010 de la station de Charbonnières. (pas de temps variable)

Le spaghetti (Figure 17) est très bruité et couvre presque toute la largeur de l'enveloppe de l'incertitude totale. Cela suggère que l'incertitude associée à l'hydrogramme est essentiellement due au modèle, et/ou à l'incertitude associée au limnigramme et non aux paramètres de l'équation de la courbe de tarage.

III.1.3. La station de Craponne

III.1.3.a. Présentation de la station

La station de Craponne est la plus ancienne du bassin versant de l'Yzeron. Mise en service en novembre 1969, quatre courbes de tarage différentes ont été utilisées par la DREAL jusqu'à aujourd'hui, définissant ainsi quatre périodes distinctes :

- Du 01/01/1969 au 01/01/1985
- Du 01/01/1985 au 16/07/1998
- Du 16/07/1998 au 02/11/2008
- Du 02/11/2008 au 01/01/2050

Un entretien téléphonique avec un gestionnaire de la station de Craponne à la DREAL¹, ainsi que les informations disponibles dans la base Barème ont permis d'identifier quels changements de courbe de tarage correspondaient bien à un changement de contrôle hydraulique. De plus une analyse fine des jaugeages a été faite afin de mettre en évidence des détarages qui auraient été causés par un changement de contrôle hydraulique.

Le changement de 1985 est très peu documenté et semble être un choix arbitraire ne rendant probablement pas compte d'un changement de contrôle hydraulique. De plus, aucune différence de tendance entre les jaugeages faits avant et après n'a été observée. Le changement de courbe de tarage de 1998 correspond à la coupe d'une souche sur le seuil. Cette modification a entraîné un important changement du contrôle hydraulique de la station. En 2008, à l'instar de 1985, les différences entre les courbes de tarage « avant » et « après » sont minimes. Une modification du lit de la rivière au niveau du limnigraphe a été observée par les gestionnaires de la station mais ces modifications ne concernent pas la section de contrôle.

En résumé, ce n'est que le 16 juillet 1998 qu'un réel changement de contrôle hydraulique a eu lieu. Deux périodes distinctes ont donc été retenues pour l'application de la méthode BaRatin. La photo de la [Figure 18](#) montre la section de contrôle actuelle de la station hydrométrique.



FIGURE 18 – Photo de la section de contrôle actuelle de la station hydrométrique de Craponne.

1. Entretien téléphonique avec Gaëlle Guignon (DREAL Rhône Alpes - SPR-HSPC) le 24/03/2014

III.1.3.b. Les jaugeages

Depuis la mise en service de la station, cent-cinquante-cinq jaugeages ont été faits : soixante-seize avant la coupe de la souche le 16 juin 1998 et soixante-dix-neuf après. Différentes méthodes de jaugeages ont été employées bien que la méthode par exploration du champ des vitesses soit prédominante.

Tous les jaugeages avant le changement de contrôle de 1998 et cinq jaugeages faits après étaient non documentés. La méthodologie présentée en II.3.1. a été utilisée. Les trois catégories de hauteurs d'eau définies et les incertitudes maximums calculées par la méthode ISO 748 pour chacune des catégories sont présentées dans le Tableau 8. Ces valeurs ont été utilisées pour tous les jaugeages non documentés.

TABLEAU 8 – Incertitudes maximales des jaugeages calculées par la méthode ISO 748 pour trois catégories de hauteur d'eau.

Hauteur d'eau (m)	< 0.495	[0.495,0.60]	> 0.60
Incertitude maximale (%)	30	17	13

Les incertitudes moyennes (et les écarts-types) des jaugeages selon la méthode de jaugeage et la méthode d'estimation d'incertitude sont présentées dans le Tableau 9.

TABLEAU 9 – Incertitudes estimées moyennes (et écarts-types) des jaugeages de la station de Craponne selon la méthode employée et les informations disponibles.

	Exploration du champ des vitesses			ADCP	Volumétrique
	documenté	non documenté	par intégration		
Nombre de jaugeages	65	79	3	3	5
Incertitude moyenne (%)	13.2 (4.2)	18.6 (6.5)	4.7 (0.6)	5 (0)	10 (0)

III.1.3.c. La détermination des *a priori* hydraulique

Après la suppression de la souche (après juillet 1998) : A bas et moyen débit, la section (voir la Figure 18) contrôle la relation hauteur-débit. Pour les plus forts débits, le pont agit comme contrôle du fait du rétrécissement qu'il impose. Cinq gammes de hauteurs ont été distinguées faisant intervenir différents contrôles.

Gamme 1 : A très bas débit, l'écoulement est entièrement assuré par le seuil en béton légèrement triangulaire.

Gamme 2 : Pour des débits un petit peu plus importants, l'eau s'écoule par le seuil en béton et à l'ancien emplacement de la souche (à droite sur la photo, Figure 18). L'angle du seuil en béton étant très faible (167°), l'ensemble de la section de contrôle (seuil en béton et emplacement de la souche) a été assimilé à un seuil rectangulaire.

Gamme 3 : Pour les débits plus forts, l'eau déborde en rive gauche et droite. L'eau ne reste pas sur les rives, bloquée par le pont, et chute sous le pont au niveau du seuil. Le contrôle assuré par les rives a été assimilé à un contrôle par un seuil rectangulaire.

Gamme 4 : Une vidéo de la crue d’avril 2005 a mis en évidence un contrôle par le pont avant sa mise en charge complète du fait du rétrécissement qu’il impose. Une section critique en arc de cercle pouvait être clairement identifiée. Un seuil rectangulaire équivalent a été choisi pour rendre compte de ce contrôle.

Gamme 5 : Pour les plus forts débits, lorsque le pont est complètement en charge, l’eau ne s’écoule que par l’orifice sous le pont. Bien que l’eau en aval du pont influe sur l’écoulement passant sous le pont, un contrôle par orifice dénoyé à l’aval a été choisi (voir [Équation 23](#) en [Annexe I.](#)).

Pour la période suivant la suppression de la souche, cinq gammes et cinq contrôles hydrauliques ont été identifiés, conduisant à la matrice des contrôles suivante :

$$M = \begin{matrix} & \text{Triangle} & \text{Rect. rivière} & \text{Rect. rives} & \text{Rect. pont} & \text{Orifice} \\ \text{Gamme 1} & \left(\begin{array}{ccccc} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{array} \right) & & & & \end{matrix} \quad (19)$$

Les formules hydrauliques utilisées pour les différents contrôles sont présentés en [Annexe I.](#). Les valeurs (et écarts-types) des paramètres *a priori* sont rassemblées dans le [Tableau 10](#).

Avant la suppression de la souche (avant juillet 1998) : Aucune information précise, aucune photo ou représentation de la section de contrôle avant la coupe de la souche en 1998 étant disponible, la détermination des *a priori* pour cette période s’est basée sur les *a priori* de la période actuelle. Un obstacle de largeur et de hauteur incertaines a été imaginé à l’emplacement de la souche. Six gammes de hauteur d’eau ont été retenues pour cette période sur la station de Craponne :

Gamme 1 : pour les plus faibles débits, l’écoulement est uniquement assuré par le seuil en béton (seuil triangulaire pour les plus faibles débits)

Gamme 2 : pour des débits un peu plus importants l’écoulement est toujours uniquement assuré par le seuil en béton, assimilé à un seuil rectangulaire (écoulement limité à la partie gauche du seuil, une souche, sur la partie droite du seuil faisant obstacle à l’eau)

Gamme 3 : lorsqu’il y a débordement de la rivière, l’écoulement est assuré par le seuil en béton et la rive gauche (assimilé à un seuil rectangulaire).

Gamme 4 : pour des débits plus importants, il y a débordement au dessus de la souche et sur la rive droite, un seuil rectangulaire équivalent est choisi pour rendre compte de ces contrôles hydrauliques.

Gammes 5 et 6 : pour les plus forts débits, le pont contrôle la relation hauteur-débit (de la même façon que pour la période après la suppression de la souche).

Cette analyse hydraulique de la station conduit à la construction de la matrice des contrôles suivante :

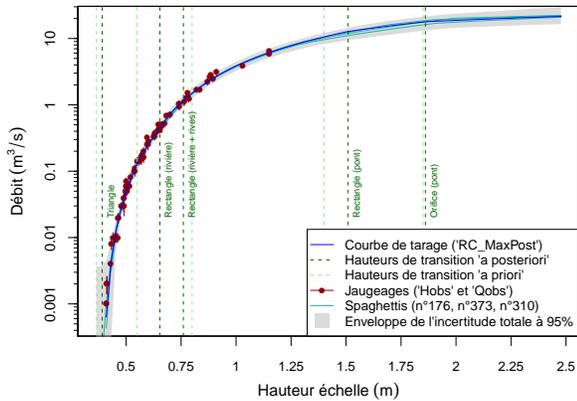
$$M = \begin{matrix} & \text{Triangle} & \text{Rect. rivière} & \text{Rect. rive g.} & \text{Rect. souche} & \text{Rect. pont} & \text{Orifice} \\ \text{Gamme 1} & \left(\begin{array}{cccccc} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{array} \right) & \end{matrix} \quad (20)$$

III.1.3.d. Les courbes de tarage calculées par BaRatin

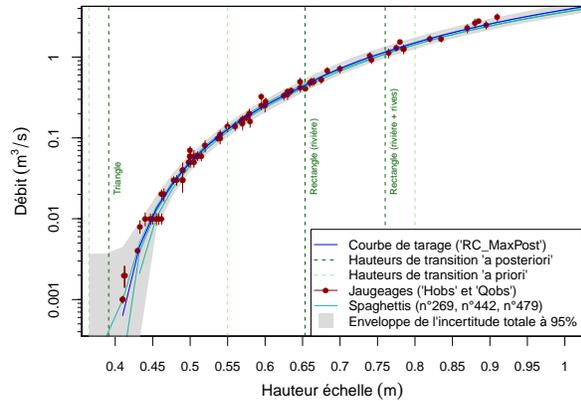
Après la suppression de la souche (après juillet 1998) : Le [Tableau 10](#) rassemble les paramètres *a posteriori* de la courbe de tarage et la [Figure 19](#) présente la courbe de tarage pour la station de Craponne après la suppression de la souche.

TABLEAU 10 – Valeurs (et écarts-type) des paramètres *a priori* et *a posteriori* de la courbe de tarage de Craponne pour la période suivant la suppression de la souche. ($U(0, 10000)$ fait référence à une loi uniforme sur l'intervalle $[0, 10000]$)

	Contrôle 1				Contrôle 2			
	a_1	b_1	c_1	k_1	a_2	b_2	c_2	k_2
<i>a priori</i> :	12.1	0.365	2.5	0.55	9.8	-	1.5	0.8
	(1.25)	(0.025)	(0.025)	(0.05)	(0.65)		(0.025)	(0.05)
<i>a posteriori</i> :	12.21	0.391	2.476	0.653	10.394	0.536	1.475	0.76
	(0.663)	(0.003)	(0.024)	(0.018)	(0.545)	(0.008)	(0.025)	(0.036)
	Contrôle 3				Contrôle 4			
	a_3	b_3	c_3	k_3	a_4	b_4	c_4	k_4
<i>a priori</i> :	4.3	-	1.5	1.4	8.9	-	1.5	1.85
	(0.04)		(0.025)	(0.15)	(2.1)		(0.1)	(0.1)
<i>a posteriori</i> :	4.289	0.76	1.499	1.509	8.152	0.151	1.465	1.861
	(0.04)	(0.036)	(0.024)	(0.141)	(2.098)	(0.267)	(0.097)	(0.098)
	Contrôle 5							
	a_5	b_5	c_5	$\sigma_{f,1}$	$\sigma_{f,2}$			
<i>a priori</i> :	17.3	-	0.5	$U(0, 10000)$	$U(0, 10000)$			
	(4.5)		(0.1)					
<i>a posteriori</i> :	14.457	0.367	0.532	0.0018	0.0833			
	(4.521)	(3.387)	(0.095)	(6e-04)	(0.014)			



(a) Courbe de tarage complète



(b) Zoom sur les faibles hauteurs d'eau

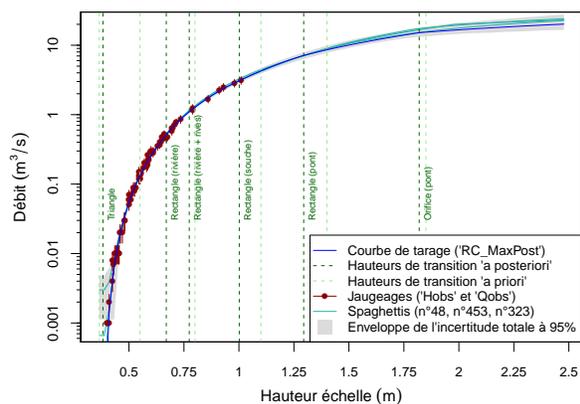
FIGURE 19 – Courbe de tarage et enveloppe d'incertitude à 95% de la station de Craponne après la suppression de la souche : (a) vue complète, (b) zoom sur les faibles hauteurs d'eau. (échelle logarithmique pour les débits)

Malgré les fortes simplifications introduites lors de la traduction de l'analyse hydraulique de la station en *a priori* hydraulique pour BaRatin, les paramètres *a posteriori* sont tous dans les intervalles d'incertitude définis *a priori*. On observe que l'incertitude totale est très importante pour les forts débits (correspondant aux deux derniers contrôles, causé par le pont). Ceci est dû à des *a priori* très incertains et à l'absence de jaugages pour ces gammes de hauteurs d'eau.

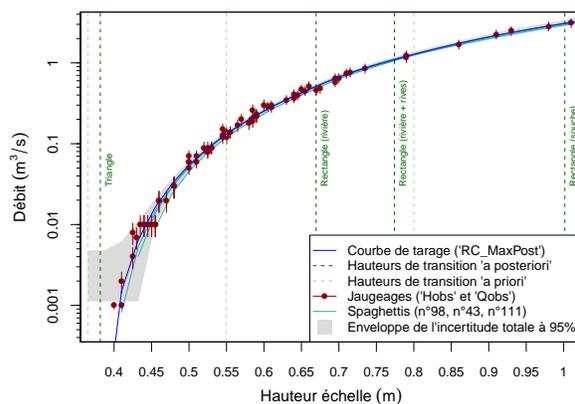
Avant la suppression de la souche (avant juillet 1998) : Le [Tableau 11](#) rassemble les paramètres *a posteriori* de la courbe de tarage et la [Figure 20](#) présente la courbe de tarage pour la station de Craponne après la suppression de la souche.

TABLEAU 11 – Valeurs (et écarts-type) des paramètres *a priori* et *a posteriori* de la courbe de tarage de Craponne pour la période précédant la suppression de la souche. ($U(0, 10000)$ fait référence à une loi uniforme sur l'intervalle $[0, 10000]$)

	Contrôle 1				Contrôle 2					
	a_1	b_1	c_1	k_1	a_2	b_2	c_2	k_2		
<i>a priori</i> :	12.1 (1.9)	0.365 (0.025)	2.5 (0.025)	0.55 (0.05)	8.9 (0.7)	1.5 (0.025)	-	0.8 (0.05)		
<i>a posteriori</i> :	11.703 (0.432)	0.382 (0.002)	2.516 (0.025)	0.67 (0.024)	8.168 (0.47)	1.496 (0.024)	0.513 (0.009)	0.774 (0.039)		
	Contrôle 3				Contrôle 4					
	a_3	b_3	c_3	k_3	a_4	b_4	c_4	k_4		
<i>a priori</i> :	2.7 (0.2)	1.5 (0.025)	-	1.1 (0.25)	3.5 (0.3)	1.5 (0.025)	-	1.4 (0.15)		
<i>a posteriori</i> :	2.574 (0.197)	1.487 (0.027)	0.774 (0.039)	1.002 (0.16)	3.374 (0.284)	1.525 (0.024)	1.002 (0.16)	1.294 (0.139)		
	Contrôle 5				Contrôle 6					
	a_5	b_5	c_5	k_5	a_6	b_6	c_6	$\sigma_{f,1}$	$\sigma_{f,2}$	
<i>a priori</i> :	10.6 (1.6)	1.5 (0.05)	-	1.85 (0.1)	17.3 (4.4)	0.5 (0.1)	-	$U(0, 10000)$	$U(0, 10000)$	
<i>a posteriori</i> :	9.808 (1.526)	1.504 (0.052)	0.484 (0.108)	1.82 (0.099)	16.443 (4.408)	0.496 (0.1)	0.972 (1.082)	0.0022 (7e-04)	0.0074 (0.0144)	



(a) Courbe de tarage complète



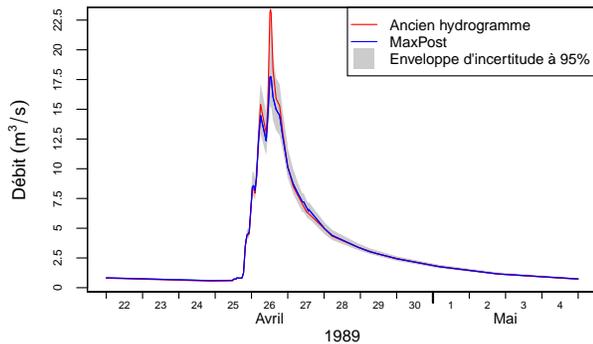
(b) Zoom sur les faibles hauteurs d'eau

FIGURE 20 – Courbe de tarage et enveloppe d'incertitude à 95% de la station de Craponne avant la suppression de la souche : (a) vue complète, (b) zoom sur les faibles hauteurs d'eau. (échelle logarithmique pour les débits)

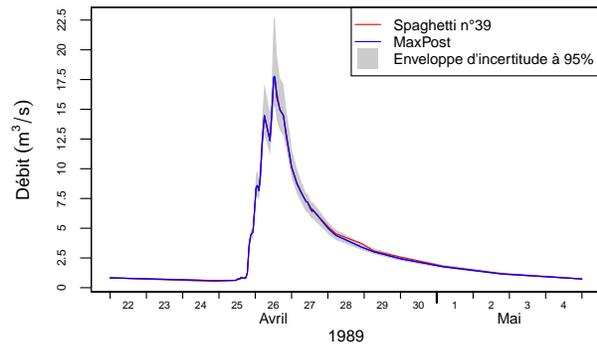
La hauteur de transition k_3 est très incertaine *a priori* car elle correspond au haut de la souche que l'on ne connaît pas. Celle-ci a pu être ajustée grâce au nombre de jaugeages assez important dans ces gammes de hauteurs d'eau. Lorsque le pont contrôle la relation hauteur-débit (deux derniers contrôles), l'incertitude totale devient très importante du fait des *a priori* très incertains et de l'absence de jaugeages pour ces gammes de hauteurs d'eau.

III.1.3.e. La propagation des incertitudes aux hydrogrammes

Deux événements hydrologiques ont été choisis pour présenter la propagation des incertitudes aux hydrogrammes : un événement d'avril 1989 (courbe de tarage avant la coupe de la souche) et un événement de février 2009 (courbe de tarage après la coupe de la souche). La Figure 21 et la Figure 22 présentent les limnigrammes, les hydrogrammes et les enveloppes d'incertitude pour ces deux événements hydrologiques.

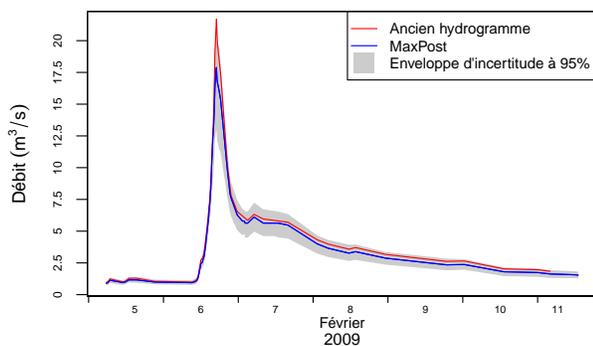


(a) Comparaison avec l'ancien hydrogramme

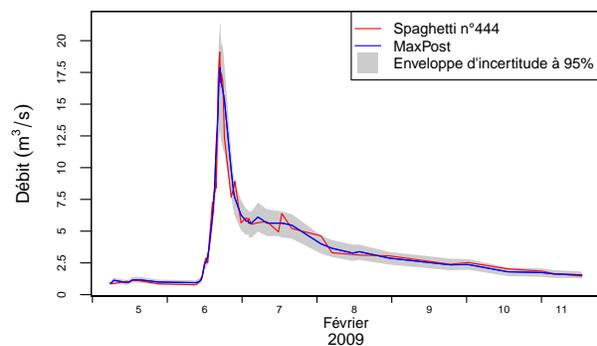


(b) Un spaghetti pris au hasard

FIGURE 21 – Hydrogramme et enveloppe d'incertitude à 95% de l'événement hydrologique d'avril 1989 de la station de Craponne. (pas de temps variable)



(a) Comparaison avec l'ancien hydrogramme



(b) Un spaghetti pris au hasard

FIGURE 22 – Hydrogramme et enveloppe d'incertitude à 95% de l'événement hydrologique de février 2009 de la station de Craponne. (pas de temps variable)

Les courbes de tarage calculées par BaRatin baissent significativement les estimations des pics de crues. L'extrapolation de la courbe de tarage faite par BaRatin, s'appuyant sur l'analyse hydraulique de la station, donne certainement de meilleurs résultats que les courbes de tarage utilisées jusqu'ici par la DREAL.

L'enveloppe d'incertitude associée aux hydrogrammes est d'autant plus importante que la hauteur d'eau atteinte est importante. On observe également que le bruit associé au spaghetti est assez réduit comparé aux stations du Mercier et de Charbonnières. Ceci semble être essentiellement

dû au nombre beaucoup plus réduit de pas de temps par jour (résolution temporelle de l'acquisition des données de hauteurs d'eau).

III.2. Quelques indicateurs de bilan hydrologique

III.2.1. Débits moyens et débits spécifiques moyens

Les moyennes de débit et de débit spécifique pour toutes les stations ont été calculées. Les périodes utilisées pour le calcul diffèrent pour chaque station et sont, pour certaines stations, très courtes (voir la longueur des chroniques dans le [Tableau 1](#)). Celles-ci sont présentées dans la [Tableau 12](#).

TABLEAU 12 – Débits moyens et débits spécifiques moyens (MaxPost, quantiles 2.5% et 97.5% et incertitude élargie relative (U)) pour toutes les stations de l'Yzeron.

	Taffignon (124.5 km ²)	Craponne (40.9 km ²)	Charbonnières (22.9 km ²)	Ratier (18.9 km ²)	Mercier (7.8 km ²)	Léchère (4.3 km ²)	Pont de la Barge (2.9 km ²)
Débit moyen (m³/s)							
MaxPost	0.689	0.33	0.119	0.14	0.074	0.036	0.014
Quantile 2.5%	0.662	0.323	0.112	0.137	0.05	0.031	0.013
Quantile 97.5%	0.707	0.336	0.123	0.148	0.119	0.046	0.017
U (%)	±3.3	±2.0	±4.5	±3.8	±46.2	±20.4	±16.8
Débit spécifique moyen (l/s/km²)							
MaxPost	5.534	8.061	5.201	7.426	9.532	8.302	4.911
Quantile 2.5%	5.319	7.899	4.911	7.237	6.408	7.289	4.33
Quantile 97.5%	5.68	8.218	5.382	7.805	15.218	10.673	5.977
U (%)	±3.3	±2.0	±4.5	±3.8	±46.2	±20.4	±16.8
Nombre de jaugeages	71	140	33	35	5	10	21

Les incertitudes élargies relatives sont d'autant plus importantes que le nombre de jaugeages est faible. Les incertitudes associées à la station de la Léchère semblent être surestimées par rapport à ce qui est attendu pour une station hydrométrique ayant un contrôle hydraulique de type canal parshall. Ce résultat suggère une trop forte sensibilité au nombre de jaugeages de la méthode BaRatin ou une définition trop incertaine des *a priori* hydrauliques.

De plus, on peut observer une surestimation des quantiles 2.5% pour les plus petits sous-bassins versant. Il est suspecté que les interpolations linéaires faites sur les spaghetti (cf. [II.4.1.](#)) pour combler les lacunes introduites par BaRatin (qui concerne surtout les petits sous bassins versant, voir le [Tableau 23](#) en [Annexe VIII.](#)) sont à l'origine de cette surestimation.

Une fois moyenné, les incertitudes associées aux valeurs de débits (ou aux lames d'eau, cf. [III.2.2.](#) et [III.2.3.](#)) sont uniquement d'origine paramétriques ; les incertitudes liées aux hauteurs d'eau et aux modèles de courbes de tarage utilisée ont disparu du fait de leurs natures aléatoires gaussiennes centrées sur 0.

III.2.2. Lames d'eau mensuelles

Les lames d'eau mensuelles, leurs incertitudes associées, ainsi que les proportions de lacunes pour chaque mois sont présentées en [Annexe X.](#) Les proportions de lacunes pour chaque mois sont également présentées dans la [Figure 41 en Annexe VIII.](#) En considérant la disponibilité des données, uniquement les stations de Taffignon, Craponne, La Léchère et du Mercier ont été retenues pour le calcul des moyennes inter-annuelles. La [Figure 23](#) présente les moyennes inter-annuelles des lames d'eau mensuelles écoulées pour chaque mois de l'année pour les stations de Taffignon, Craponne, la Léchère et le Mercier.

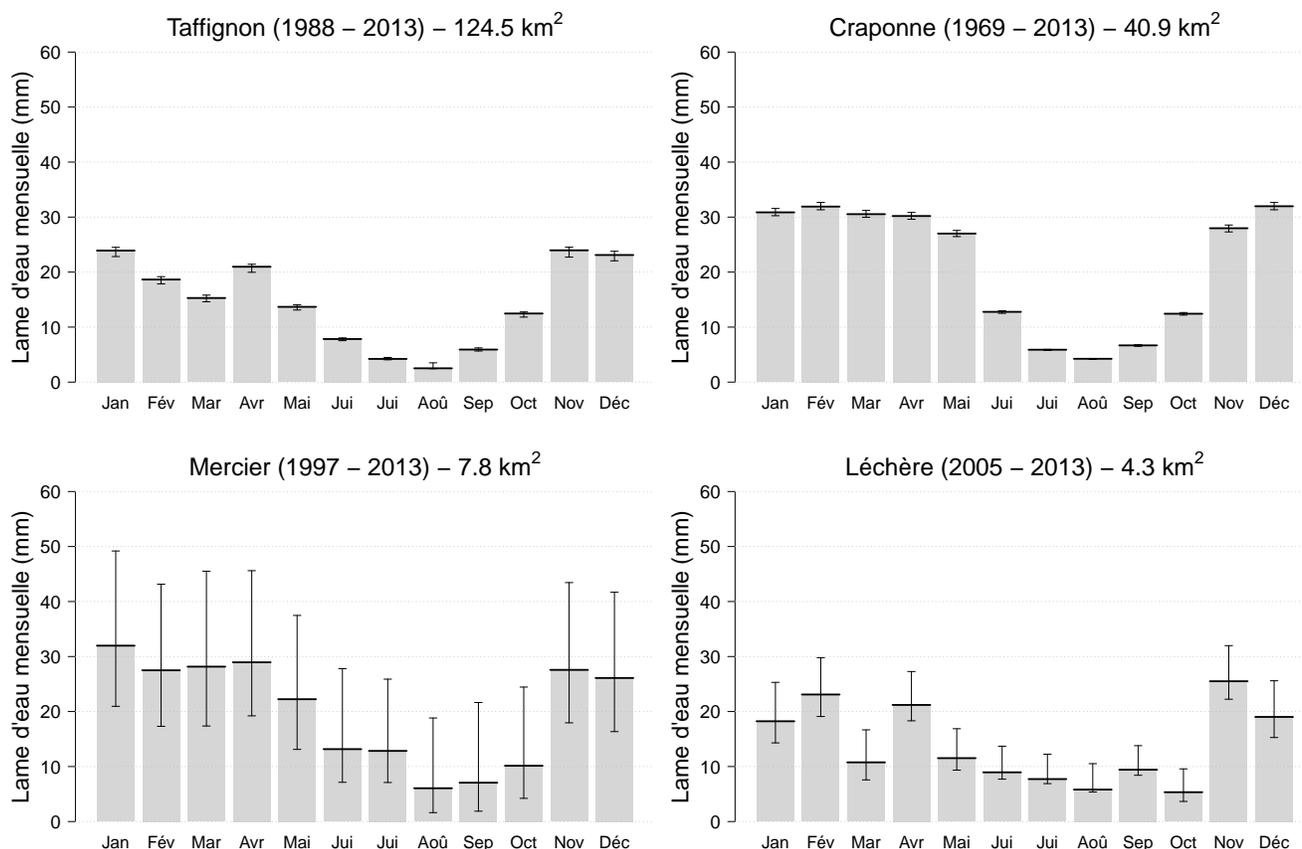


FIGURE 23 – Moyenne inter-annuelle des lames d'eau mensuelles

On remarque que les incertitudes associées moyennes interannuelles des lames d'eau mensuelles sont beaucoup plus importantes pour les stations du Mercier et de la Léchère que des pour les stations de Taffignon et Craponne. De même que pour les débits moyens (cf. [III.2.1.](#)), cette différence semble liée au nombre de jaugeages très différents entre ces stations.

Les incertitudes pour la station de la Léchère sont bien plus importantes que pour les stations de Taffignon et Craponne alors que le canal Parshall, contrôle hydraulique de la station de la Léchère, est bien plus fiable que les contrôles hydrauliques des stations DREAL. Les incertitudes associées aux lames d'eau mensuelles de la Léchère sont surestimées du fait du faible nombre de jaugeages. Cette surestimation concerne sans doute également la station du Mercier.

Il est important de noter que les moyennes sont faites sur des périodes différentes pour chaque station. De plus, pour les stations du Mercier et de la Léchère, uniquement les mois ayant moins de 5% de lacune ont été conservés (voir Figure 41 en Annexe VIII.) ce qui peut entraîner d'importants biais du fait que certaines années humides (ou sèches) ont pu être prises en compte pour une des deux stations et pas pour l'autre. La même remarque peut être faite pour les comparaisons entre les différents mois de l'année.

III.2.3. Lames d'eau annuelles

Les lames d'eau annuelles pour chaque station (et le nombre de mois ayant moins de 5% de lacunes chaque année pour le calcul du cumul annuel) sont présentées dans la Figure 24. Les moyennes interannuelles des lames d'eau annuelles écoulées sont présentées dans le Tableau 13. Toutes les stations sont présentes dans ce tableau. Cependant, uniquement les stations de Taffignon, Craponne, Mercier et de la Léchère ont plus de 8 années avec au moins 10 mois ayant moins de 5% de lacunes.

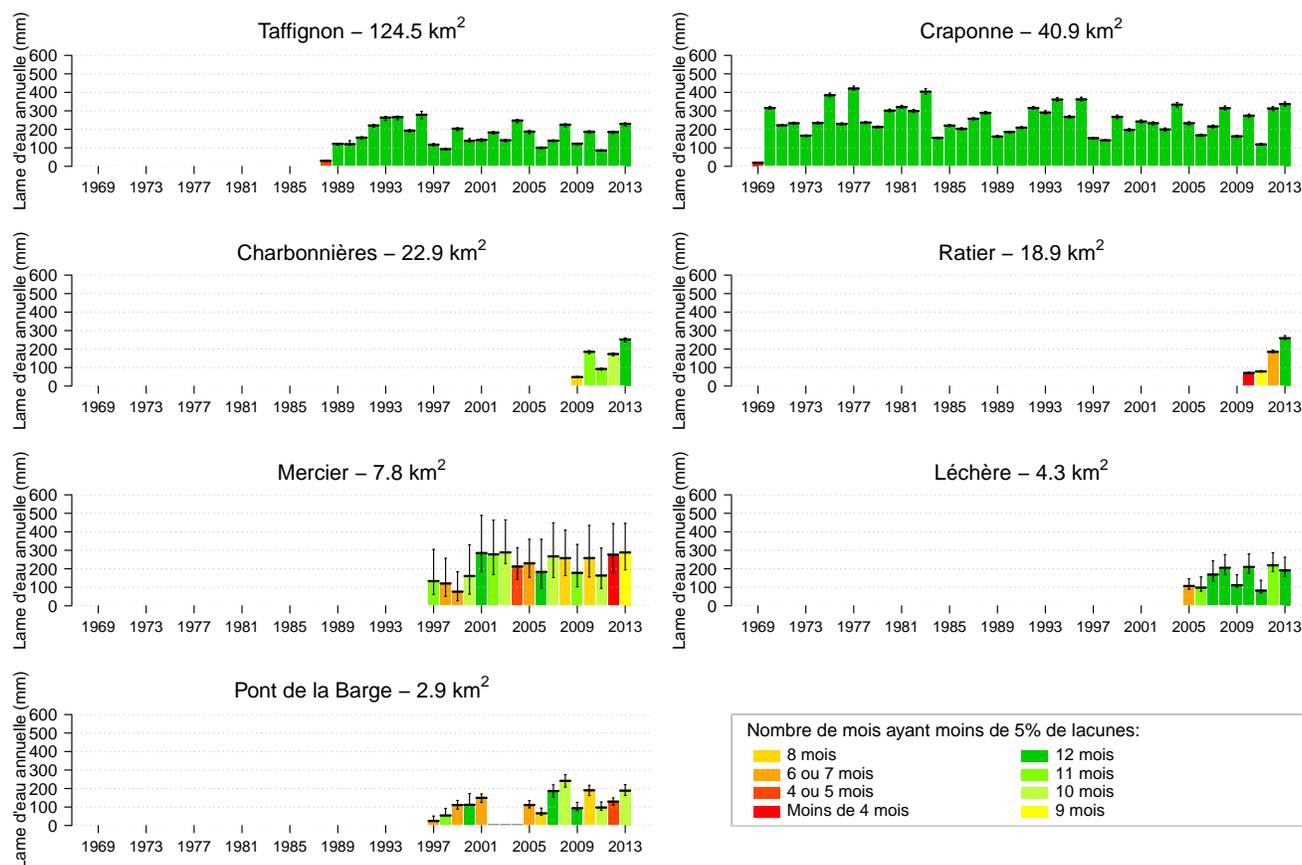


FIGURE 24 – Lames d'eau annuelles écoulées pour toutes les stations hydrométriques de l'Yzeron

Il convient de séparer la variabilité inter-annuelle de l'incertitude associée à la moyenne inter-annuelle de lame d'eau annuelle. L'incertitude propagée ici concerne l'incertitude associée à la moyenne. Celle-ci a une valeur donnée pour les années sur lesquelles le calcul est fait mais qui est susceptible d'être différente si d'autres années sont prises pour le calcul.

TABLEAU 13 – MaxPost, écarts-types, quantiles 2.5% (Q. 2.5%) et 97.5% (Q. 97.5%) et incertitudes élargies relatives (U) des moyennes inter-annuelles de lames d’eau annuelles écoulées pour chaque station. La dernière ligne indique le nombre d’années utilisé pour le calcul des moyennes.

	Taffignon (124.5 km ²)	Craponne (40.9 km ²)	Charbonnières (22.9 km ²)	Ratier (18.9 km ²)	Mercier (7.8 km ²)	Léchère (4.3 km ²)	Pont de la Barge (2.9 km ²)
MaxPost (mm)	173.94	253.646	175.701	-	215.286	160.757	139.085
Ecart-type (mm)	2.917	2.507	3.985	-	63.031	23.91	11.841
Q. 2.5% (mm)	166.759	248.585	166.221	-	139.764	136.705	125.022
Q. 97.5% (mm)	178.168	258.609	181.551	-	378.761	225.439	171.658
U (%)	±3.3	±2.0	±4.4	-	±55.5	±27.6	±16.8
Nombre d’années	25	44	4	1	9	8	7

L’incertitude est très réduite pour les stations de Craponne et Taffignon alors qu’elle est largement plus importante pour les stations de la Léchère ou du Mercier. Il paraît raisonnable de penser que le choix des années ou le nombre d’années disponibles pour le calcul de la moyenne aura un impact bien plus important que l’incertitude associée à la moyenne pour les station DREAL. Ce n’est sans doute pas le cas des stations de la Léchère et du Mercier.

III.2.4. Les courbes de débits classés

Les courbes de débits classés des stations de Taffignon, Craponne, Charbonnières, Ratier et du Mercier sont présentées dans la [Figure 25](#).

Pour les plus petites stations, les débits des spaghettis sont très influencés par l’incertitude associée au limnigramme (erreur gaussienne centrée sur 0) et par l’incertitude restante (erreur gaussienne centrée sur 0) (cf. [II.2.3.](#)). Deux conséquences en découlent :

- Pour une partie des faibles débits dans les spaghettis, des lacunes sont introduites par BaRatin (cf. [II.4.1.](#)). Les pourcentages de lacunes que l’on trouve dans les spaghettis qui sont introduits par la méthode BaRatin sont présentés dans le [Tableau 23](#) en [Annexe VIII.](#) La proportion de lacunes pour la station de Pont de la Barge (7.8%) est bien plus importante que pour les autres stations (< 1% sauf pour la Léchère (2.24%)).
- Quand le calcul de la valeur de débit est possible, l’ajout de l’erreur restante liée au modèle introduit un nouveau bruit qui se combine à celui introduit par l’erreur liée à l’incertitude associée au limnigramme (voir l’[Équation 13](#) en [II.2.3.](#)). De ce fait, la probabilité de dépassement des débits les plus faibles est beaucoup plus importante pour les spaghettis que pour la MaxPost (où ces deux erreurs sont absentes, voir l’[Équation 14](#) en [II.2.3.](#)). Il s’agit d’un problème qui résulte des modèles statistiques utilisés par BaRatin pour l’erreur restante et l’erreur associée au limnigramme. Cette conséquence explique les résultats obtenus pour les courbes de débits classée de la plus petite station pour laquelle les faibles débits sont beaucoup plus fréquents (cf. [Figure 26](#)).

Hormis pour les stations du Mercier et de la Léchère, les enveloppes d’incertitude sont assez réduites. La taille de l’enveloppe d’incertitude est directement liée à la taille des enveloppes d’incertitude des courbes de tarage des stations correspondantes. Il est probable qu’elle soit surestimée pour les stations de la Léchère et du Mercier, tout comme les débits moyens et les lames d’eau écoulées.

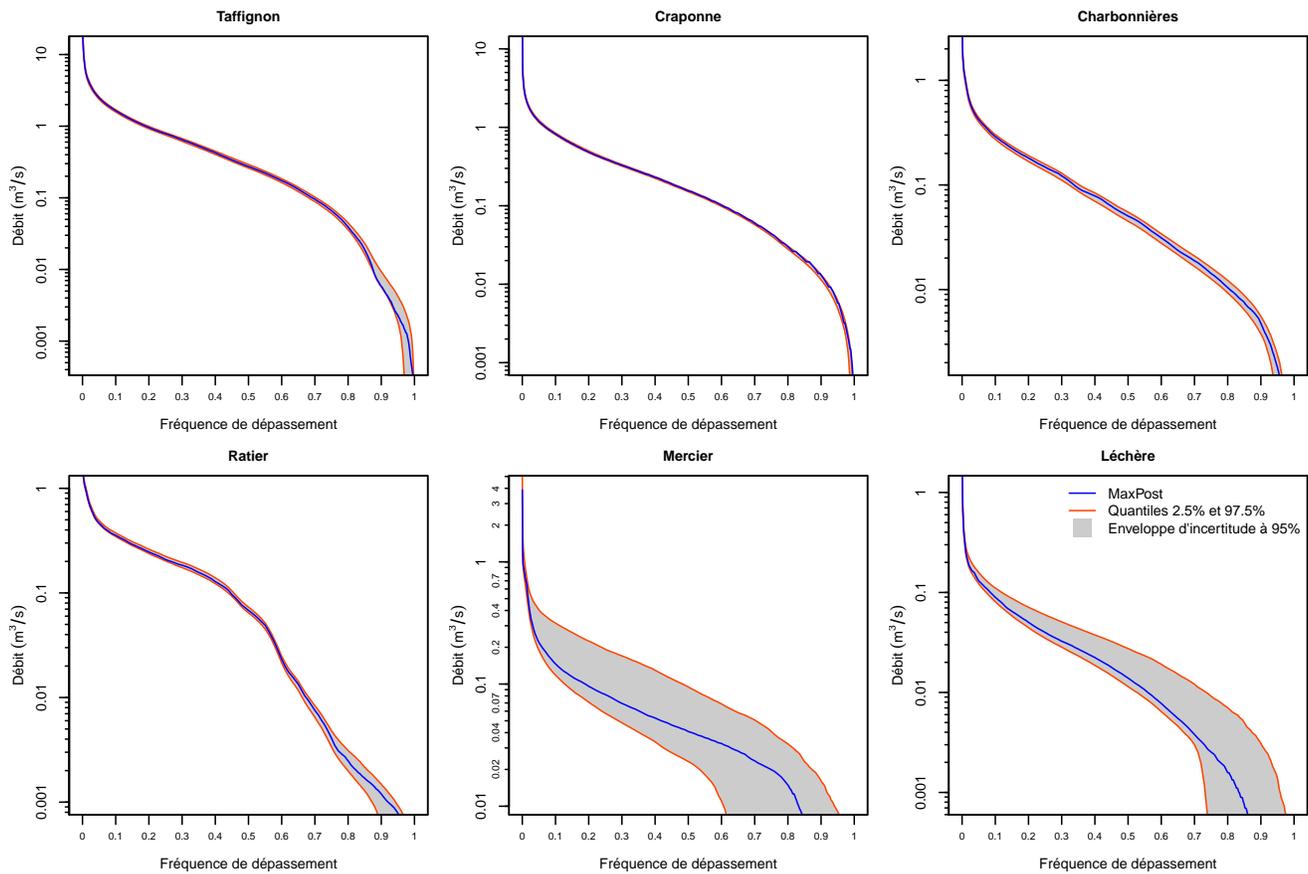


FIGURE 25 – courbes de débits classés (MaxPost et enveloppe d'incertitude à 95%) des stations de Taffignon, Craponne, Charbonnières, Ratier et Mercier.

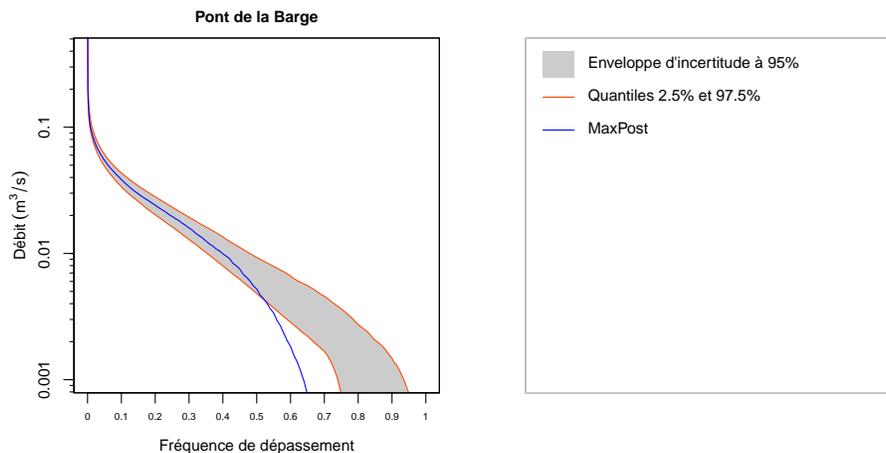


FIGURE 26 – Courbe de débits classés (MaxPost et enveloppe d'incertitude à 95%) de la station de Pont de la Barge mettant en évidence le problème introduit par les modèles statistiques utilisés par BaRatin pour l'erreur restante.

Chapitre IV. Discussion

IV.1. Les courbes de tarage issues de BaRatin

Les applications antérieures de la méthode BaRatin s'appuyaient sur des valeurs d'incertitudes de référence pour chaque jaugeage (Le Boursicaud et al., 2012; Le Coz et al., 2014). Dans le cadre de BaRatin, pour la première fois, les incertitudes associées aux jaugeages sont estimées au cas par cas. Les différences observées entre les résultats de BaRatin sur la station de Charbonnières obtenus ici (cf. III.1.2.) et obtenus par Le Coz et al. (2014) sont minimales. La méthode BaRatin ne semble pas très sensible aux incertitudes individuelles de chaque jaugeage ; l'absence de données de dépouillement sur les jaugeages (cas fréquent) ne représente pas un frein à l'utilisation de la méthode BaRatin.

Le nombre de jaugeages disponibles pour appliquer la méthode BaRatin semble important pour la diminution de l'incertitude paramétrique, surtout lorsque les *a priori* hydrauliques sont très incertains, et/ou pour obtenir une incertitude liée au modèle (incertitude restante) réaliste (voir, par exemple, le cas non réaliste de la station du Mercier en III.1.1.). Dans le cas de la Léchère, le faible nombre de jaugeages fait que les enveloppes d'incertitude associées à la courbe de tarage, aux hydrogrammes et aux indicateurs de bilans sont surestimées (cf. Annexe IV. et III.2.2.).

Pour toutes les stations, l'absence de jaugeage fait en crue oblige à extrapoler la courbe de tarage. L'avantage de la méthode BaRatin est que l'extrapolation s'appuie sur des *a priori* hydrauliques et que l'enveloppe d'incertitude (pour la partie extrapolée) prend alors en compte les incertitudes définies pour ces *a priori*. La confiance que l'on a dans les *a priori* hydrauliques pour les contrôles à haut débit est donc déterminante pour l'incertitude associée à la partie extrapolée de la courbe de tarage.

Il est à noter également, que les résultats de BaRatin permettent d'identifier clairement les gammes de hauteurs (pour les faibles et moyens débits) où des jaugeages sont nécessaires, en priorité, afin de diminuer l'incertitude associée à la courbe de tarage (voir le cas de Pont de la Barge en Annexe III.). Cela peut permettre de concentrer les efforts pour réaliser des jaugeages uniquement dans les gammes de hauteurs d'eau définies comme étant prioritaires.

Des fortes simplifications sont introduites lors de la traduction de l'analyse hydraulique en *a priori* hydrauliques pour BaRatin via des simplifications de géométrie, ou bien des applications de formules hydrauliques hors de leurs cadres d'application. Le but est d'avoir une représentation robuste de la relation entre la hauteur et le débit. Ces simplifications sont acceptables dans la mesure où les jaugeages restent au cœur du calage des paramètres de la relation par BaRatin.

Certains contrôles sont difficiles à identifier notamment lors des crues ou pour les périodes d'étiage. Le travail d'identification des contrôles effectué pour les stations de Taffignon (cf. Annexe II.) et Craponne (cf. III.1.3.) a été considérablement aidé par la vidéo prise par les hydromètres de la DREAL sur la crue d'avril 2005. Les informations visuelles sont indispensables pour ce travail. Des visites sur le terrain seraient à envisager lors de crues sur toutes les stations afin d'améliorer la

compréhension hydraulique des sites. De même à très bas débit, où par exemple, dans le cas de la station de Taffignon, l'origine de l'écoulement et donc le type de contrôle reste inconnu (cf. [Annexe II.](#)).

Une analyse historique des stations est indispensable pour pouvoir identifier les changements de contrôles hydrauliques passés (cas du Mercier (cf. [III.1.1.](#)), de Craponne (cf. [III.1.3.](#)) et de Taffignon (cf. [Annexe II.](#))). Ceci montre bien l'importance de noter et de conserver toutes les informations relatives aux stations hydrométriques dès leur mise en service. L'identification des changements de contrôles est essentielle pour savoir s'il y a bien lieu de changer de courbe de tarage. Le changement de courbe de tarage réalisé par la DREAL sur la station de Taffignon (cf. [Annexe II.](#)) a sans doute été motivé par le nouveau jaugeage lors de la crue d'avril 2005 qui déviait de la courbe antérieure. Cependant, il est probable que ce nouveau jaugeage ait simplement mis en évidence que la courbe de tarage antérieure était mauvaise sur sa partie extrapolée. Il convient donc de recalculer l'ensemble de la chronique de débit de la station de Taffignon à partir d'une courbe de tarage prenant en compte ce nouveau jaugeage ; c'est ce qui a été fait ici et qui explique l'écart important entre la chronique de débit issue de la banque HYDRO et la chronique calculée par BaRatin (cf. [Annexe II.](#)).

Cet exemple illustre l'importance de la notion de contrôle hydraulique qui permet de comprendre l'origine d'un détarage, et qui n'est pas toujours connu des services en charge de la gestion des stations.

IV.2. Propagation des incertitudes aux hydrogrammes

La plupart des hydrogrammes calculés par BaRatin est très proche des hydrogrammes antérieurs, utilisés jusqu'ici ; à l'exception des stations de Pont de la Barge (cf. [Annexe III.](#)) et de Taffignon (sur l'hydrogramme de 1989, [Figure 29](#) en [Annexe II.](#)). Ceci est simplement dû aux ressemblances entre les courbes de tarage calculées par BaRatin et celles utilisées jusqu'à maintenant.

Les enveloppes d'incertitude des hydrogrammes calculées à partir des résultats de BaRatin sont directement liées aux enveloppes d'incertitude associées aux courbes de tarage. On retrouve souvent une incertitude forte pour les hauts débits et plus faible pour les moyens et faibles débits. L'incertitude totale associée aux hydrogrammes est de l'ordre de $\pm 20\%$ pour la plupart des stations et dépasse $\pm 50\%$ pour les plus forts débits de certaines stations (cf. [III.1.1.](#), [Annexe IV.](#) et [Annexe III.](#)). Les résultats de BaRatin montrent que les incertitudes associées aux hydrogrammes sont loin d'être négligeables, confirmant les résultats de Westerberg and McMillan (2014) et McMillan et al. (2010).

Comme l'indiquent McMillan et al. (2010), de telles enveloppes d'incertitude permettent, lors de la validation de modèles hydrologiques, d'englober les prédictions des modèles et de ce fait, de rendre la validation plus réaliste au regard des incertitudes associées aux chroniques de débits. La même remarque peut être faite pour les étapes de calages et de validations dans le cadre de modélisations hydrauliques.

Une incertitude fixe de $\pm 5mm$ a été choisie pour le limnigramme. Ce choix implique des hypothèses qui ne sont certainement pas vraies : indépendance entre la hauteur d'eau et l'incertitude associée à sa mesure, indépendance entre l'incertitude associée à la mesure et le temps écoulé depuis le dernier contrôle de l'étalonnage du limnigraphe, etc ... De plus, la prise en compte de cette incertitude par BaRatin suppose une erreur gaussienne, centrée sur 0 (pas de biais) indépendante entre tous les pas de temps (cf. II.2.3.) ; hypothèse également certainement fautive.

Plusieurs types d'incertitudes sont englobées dans l'incertitude totale associée aux hydrogrammes. L'erreur restante, liée au modèle, ainsi que l'erreur liée au limnigramme, sont toutes les deux aléatoires gaussiennes centrées sur 0. Dans les différents résultats de BaRatin, ces erreurs sont responsables du bruit important visible sur les spaghetti (voir, par exemple, l'hydrogramme de la station du Ratier, Figure 39 en Annexe V.). Lors du calcul de moyenne sur des périodes plus ou moins longues (par exemple, lors du passage à un pas de temps fixe horaire, journalier ou lors du calcul de moyennes mensuelles ou annuelles), cette incertitude disparaît et uniquement l'incertitude paramétrique reste. Cependant, des enveloppes d'incertitude non réalistes (quantile 2.5% inférieur à 0) peuvent découler des résultats BaRatin, du fait du modèle statistique utilisé pour l'erreur restante (voir le cas de l'hydrogramme du Mercier, Figure 14 en III.1.1.).

IV.3. Impacts des incertitudes sur les indicateurs de bilans hydrologiques

Les incertitudes associées aux débits moyens et aux lames d'eau mensuelles et annuelles sont inférieures à $\pm 5\%$ pour les stations de Taffignon, Craponne, Charbonnières et du Ratier alors qu'elles vont de $\pm 17\%$ à $\pm 56\%$ pour les stations du Mercier, de la Léchère et de Pont de la Barge. Les incertitudes associées à ces quantités correspondent uniquement aux incertitudes paramétriques des courbes de tarage (les incertitudes issues du limnigramme et de l'erreur restante du modèle ont presque complètement disparu car elles ont été moyennées). Comme il a été dit en IV.1., l'incertitude paramétrique est directement liée au nombre de jaugeages ; plus ceux-ci sont nombreux, plus l'incertitude paramétrique est faible. Les différences d'incertitudes entre les deux stations DREAL (Craponne et Taffignon) et les stations de la Léchère et du Mercier rendent bien compte de l'influence du nombre de jaugeages (cf. Tableau 12, Figure 23, Tableau 13 en III.2.).

Lorsque le nombre de jaugeages est important, les enveloppes d'incertitude calculées par BaRatin semblent réalistes. Cependant, lorsque celui-ci est faible, les enveloppes d'incertitude produites par BaRatin semblent surestimer fortement l'incertitude comme il a été mis en évidence pour la station de la Léchère (cf. Annexe IV. et III.2.). Lorsque le nombre de jaugeages est faible, la méthodologie suivie pour la détermination des valeurs des *a priori* hydraulique ne semble pas adapter : des incertitudes *a priori* plus faibles seraient à définir. Il en est de même pour les *a priori* sur les incertitudes restantes (paramètres σ_f) : les lois uniformes très larges ne semblent pas adaptées dans ces cas (voir le cas non réaliste du Mercier, cf. III.1.1.).

Les différences entre les années sur les lames d'eau annuelles écoulées et les différences entre les mois sur les moyennes inter-annuelles de lames d'eau mensuelles pour la station du Mercier

peuvent être attribuées aux incertitudes associées aux hydrogrammes et non à de réelles différences (cf. III.2.2. et III.2.3.). Dans une moindre mesure, la même chose peut être dite de la station de la Léchère. Pour les stations de Craponne et Taffignon, les incertitudes sur les bilans hydrologiques sont assez faibles. Les différences mises en avant par Braud et al. (2013) entre ces deux stations ne peuvent pas être attribuées aux incertitudes associées aux hydrogrammes et sont de ce fait bien réelles.

D'autres choix concernant les longueurs et les périodes pour le calcul des moyennes inter-annuelles modifieraient les résultats. Cela constitue une autre source d'incertitude qui n'est pas liée aux incertitudes associées aux chroniques de débit. Celle-ci est certainement prédominante pour les stations telles que Taffignon ou Craponne mais est sans doute négligeable pour des stations telles que la Léchère et le Mercier.

Les mêmes tendances sur les incertitudes associées aux courbes de débits classés ont été observées ; des incertitudes beaucoup plus importantes ont été obtenues pour les stations du Mercier et de la Léchère (et de Pont de la Barge) par rapport aux autres stations (cf. III.2.4.).

Les problèmes rencontrés lors du calcul des courbes de débits classés des stations de la Léchère et de Pont de la Barge ont permis d'identifier une limite actuelle de la méthode BaRatin (cf. III.2.4.). En effet, l'incertitude associée au limnigramme telle qu'elle est prise en compte actuellement oblige BaRatin à introduire aléatoirement des lacunes dans les spaghettis pour les plus faibles débits. Ce problème, contourné par des interpolations linéaires pour combler les lacunes, a des conséquences lors du calcul des enveloppes d'incertitude de toutes les quantités dérivées des hydrogrammes : les débits moyens, les lames d'eau mensuelles et annuelles, les courbes des débits classés, etc... Il provoque une surestimation du quantile 2.5%. L'incertitude associée au limnigramme, discutée en IV.2., mérite un travail supplémentaire et une nette amélioration tant dans son évaluation que dans sa prise en compte par BaRatin lors de la propagation des incertitudes aux hydrogrammes.

De plus, le bruit provoqué par l'erreur restante implique que la fréquence de dépassement des faibles débits est beaucoup plus importante que pour la MaxPost. Le problème a été rencontré pour la station ayant le plus petit sous bassin versant dont les débits sont plus fréquemment très faibles, voire nuls. Ce problème rejoint celui des enveloppes d'incertitude non réalistes associées aux hydrogrammes discuté en IV.2..

Conclusions et perspectives

La méthode BaRatin a déjà été éprouvée sur de nombreuses stations hydrométriques pour l'estimation des courbes de tarage et des incertitudes associées. L'application aux stations hydrométriques de l'Yzeron semble indiquer que le nombre de jaugeages est déterminant sur la validité des résultats comme l'ont montré les cas du Mercier (enveloppe d'incertitudes non-réaliste) et de la Léchère (surestimation de l'incertitude).

La propagation des incertitudes aux hydrogrammes est une nouvelle fonctionnalité de la méthode. Les premiers résultats, présentés dans ce mémoire, montrent que les enveloppes d'incertitude associées aux hydrogrammes (de l'ordre de $\pm 20\%$) se révèlent être supérieures à $\pm 50\%$ dans certains cas. De même, lors de la propagation des incertitudes à des indicateurs de bilan, les incertitudes sont, pour certaines stations, très importantes (supérieures à $\pm 45\%$ dans le cas des bilans mensuels de la station du Mercier). Cependant, le calcul des indicateurs de bilan est sujet à une autre source d'incertitude : le choix et la longueur de la période utilisée pour des calculs des indicateurs, qui est parfois prépondérante par rapport aux incertitudes hydrométriques.

La prise en compte des incertitudes associées aux chroniques de hauteurs d'eau et de l'erreur due au modèle présente certaines limites. Certains résultats se sont avérés non réalistes : enveloppes d'incertitude associées aux hydrogrammes rendant possibles des débits négatifs, MaxPost non comprise dans l'enveloppe d'incertitude pour les courbes de débits classés. D'importantes améliorations sont possibles sur les incertitudes associées aux chroniques de hauteurs d'eau, par une analyse et une estimation fine des sources d'incertitudes qui sont associées à leurs acquisitions (mesures, validations des données, ...). La prise en compte par BaRatin de l'erreur liée au modèle et celle liée aux hauteurs d'eau doit également faire l'objet d'améliorations pour que les résultats de la propagation de l'incertitude aux hydrogrammes aient un sens physique pour les bas débits.

Les résultats ont confirmé que les incertitudes associées aux hydrogrammes et à certains indicateurs hydrologiques sont très importantes et sont à prendre en compte lors de leurs utilisations (par exemple, lors de la validation de modèles hydrologiques) ou leurs interprétations (par exemple, lors de la comparaison de deux stations : les différences observées sont-elles attribuables aux incertitudes hydrométriques ?).

De futurs travaux permettront, d'une part, l'amélioration de la méthode, et d'autre part, d'étudier les impacts des incertitudes hydrométriques sur d'autres indicateurs hydrologiques. Leurs contributions dans les résultats des modèles hydrologiques, par rapport aux incertitudes liées aux données spatiales (occupation du sol, pluie, etc...), souvent considérées prédominantes, pourraient également être étudiées.

Toute donnée n'est complète que lorsqu'elle est accompagnée par une déclaration de l'incertitude qui y est associée. Ainsi, sa pertinence pour une utilisation et les résultats qui en découlent peuvent être jugés avec rigueur. La propagation des incertitudes par BaRatin constitue un premier pas vers une prise en compte des incertitudes hydrométriques, jusqu'ici souvent ignorées. Si cela ne concernera que la recherche dans un premier temps, une prise en main par les services opérationnels de gestions des stations et des données hydrométriques est à envisager dans le futur.

Bibliographie

- Branger, F., Kermadi, S., Jacqueminet, C., Michel, K., Labbas, M., Krause, P., Kralisch, S., and Braud, I. (2013). Assessment of the influence of land use data on the water balance components of a peri-urban catchment using a distributed modelling approach. *Journal of Hydrology*, 505 :312–325.
- Braud, I., Breil, P., Thollet, F., Lagouy, M., Branger, F., Jacqueminet, C., Kermadi, S., and Michel, K. (2013). Evidence of the impact of urbanization on the hydrological regime of a medium-sized periurban catchment in france. *Journal of Hydrology*, 485 :5–23.
- Di Baldassarre, G. and Montanari, A. (2009). Uncertainty in river discharge observations : a quantitative analysis. *Hydrology and Earth System Sciences*, 13(6) :913–921.
- Faure, J.-B. (2009). *MAGE - Documentation théorique et notice d'emploi*. IRSTEA.
- Hersch, R. (1994). The analysis of uncertainties in the stage-discharge relation. *Flow Measurement and Instrumentation*, 5(3).
- Hersch, R. W. (2002). The uncertainty in a current meter measurement. *Flow Measurement and Instrumentation*, 13(6) :281–284.
- Hidayat, H., Vermeulen, B., Sassi, M. G., Torfs, P. J. J. F., and Hoitink, A. J. F. (2011). Discharge estimation in a backwater affected meandering river. *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 15(8) :2717–2728.
- ISO (2007). *ISO 748 : Hydrométrie - Mesurage du débit des liquides dans les canaux découverts au moyen de moulinets et de flotteurs*. ISO.
- JCGM (2008). *Evaluation of measurement data - Guide to the expression of uncertainty in measurement*. Number 100 :2008. JCGM.
- Lagouy, M. (2010). *Recueil de données metrologiques sur le bassin versant de l'Yzeron*. IRSTEA - Unité Hydrologie Hydraulique.
- Le Boursicaud, R., Bonnifait, L., Le Coz, J., and Renard, B. (2012). *Analyse des courbes de tarage de 5 stations hydrométriques pour le SPC Rhin-Sarre*. IRSTEA - Unité Hydrologie Hydraulique.
- Le Coz, J. (2012). A litterature review of the methods for estimating the uncertainty associated with stage-discharge relations. WMO initiative on Assessment of the Performance of Flow Measurement Instruments and Techniques - Project output 6 - Task (a).
- Le Coz, J., Bechon, P.-M., Camenen, B., and Dramais, G. (2013). Quantification des incertitudes sur les jaugeages par exploration du champ des vitesses. In *Congrès SHF : Hydrométrie 2013, Paris, 15-16 mai 2013*.
- Le Coz, J., Camenen, B., Dramais, G., Ribot-Bruno, J., Ferry, M., and Rosique, J.-L. (2011). *Contrôle des débits réglementaires*. ONEMA.
- Le Coz, J., Camenen, B., Peyrard, X., and Dramais, G. (2012). Uncertainty in open channel discharges measured with the velocity area method. *Flow Measurement and Instrumentation*, 26 :18–29.
- Le Coz, J., Renard, B., Bonnifait, L., Branger, F., and Le Boursicaud, R. (2014). Combining hydraulic knowledge and uncertain gaugings in the estimation of hydrometric rating curves : A bayesian approach. *Journal of Hydrology*, 509 :573–587.

- McMillan, H., Freer, J., Pappenberger, F., Krueger, T., and Clark, M. (2010). Impacts of uncertain river flow data on rainfall-runoff model calibration and discharge predictions. *Hydrological Processes*, 24(10) :1270–1284.
- McMillan, H., Krueger, T., and Freer, J. (2012). Benchmarking observational uncertainties for hydrology : rainfall, river discharge and water quality. *Hydrological Processes*, 26(26) :4078–4111.
- Michel, C. (2009). *Exploitation des données hydrologiques de deux sous-bassins versant de l’Yzeron : la Chaudanne et le Mercier*. CEMAGREF et Université des Sciences et Techniques du Languedoc.
- Moyeed, R. A. and Clarke, R. T. (2005). The use of bayesian methods for fitting rating curves, with case studies. *Advances in Water Resources*, 28(8) :807–818.
- Pappenberger, F. and Beven, K. J. (2006). Ignorance is bliss : Or seven reasons not to use uncertainty analysis. *Water Resources Research*, 42(5) :W05302.
- Petersen-Overleir, A. and Reitan, T. (2005). Objective segmentation in compound rating curves. *Journal of Hydrology*, 311(4) :188–201.
- Petrovic, D., Le, H., De Ville, N., Cornet, E., and Verbanck, M. (2013). A water level gradient method for the rapid tuning of the stage-to-discharge relationship in a mild-slope river. *La Houille Blanche*, (6) :42–47.
- Renard, B., Garreta, V., and Lang, M. (2006). An application of bayesian analysis and markov chain monte carlo methods to the estimation of a regional trend in annual maxima. *Water Resources Research*, 42(12) :W12422.
- Riou, F. (2012). *Dimensionnement d’une station de mesure débitométrique sur le bassin versant de l’Yzeron*. IRSTEA and ENSEEIHT.
- Westerberg, I. and McMillan, H. (2014). Uncertainty in hydrological signatures for characterising rainfall-runoff process. In *European Geosciences Union (EGU) General Assembly*.
- WMO (2010). *Manual on Stream Gauging, Vol. II : Computation of discharge*. World Meteorological Organization.

ANNEXE

Annexe I. Les contrôles et formules hydrauliques les plus courantes

Contrôle par un seuil rectangulaire

$$Q(h) = CB\sqrt{2g}(h - h_0)^\delta \quad \text{avec :} \quad (21)$$

C le coefficient de débit (dépend de l'épaisseur du seuil, par défaut, 0.4)

B la largeur du seuil [m]

g l'accélération de la pesanteur [$m.s^{-2}$]

h_0 la hauteur de la crête du seuil [m]

$\delta = 1.5$, l'exposant de la loi puissance

Contrôle par une seuil triangulaire

$$Q(h) = C \tan(\alpha/2)\sqrt{2g}(h - h_0)^\delta \quad \text{avec :} \quad (22)$$

C le coefficient de débit (par défaut, 0.31)

α le demi-angle au sommet du déversoir [$^\circ$]

g l'accélération de la pesanteur [$m.s^{-2}$]

h_0 la hauteur de la crête du seuil [m]

$\delta = 2.5$, l'exposant de la loi puissance

Contrôle par un orifice dénoyé en aval

$$Q(h) = CS\sqrt{2g}(h - h_c)^\delta \quad \text{avec :} \quad (23)$$

C le coefficient de débit (dépend de la contraction de l'orifice, par défaut, 0.6)

S la surface de l'orifice [m^2]

g l'accélération de la pesanteur [$m.s^{-2}$]

h_c la hauteur du centre de l'orifice [m]

$\delta = 0.5$, l'exposant de la loi puissance

Contrôle par le chenal

Pour un chenal rectangulaire et homogène la loi de Manning-Strickler simplifiée permet d'établir une relation entre la hauteur et le débit :

$$Q(h) = KB\sqrt{J}(h - h_0)^\delta \quad \text{avec :} \quad (24)$$

K le coefficient de Strickler ou coefficient de rugosité

B la largeur du chenal [m]

J pente du lit du cours d'eau [$m.m^{-1}$]

h_0 hauteur à l'échelle de la côte moyenne du fond du chenal [m]

$\delta = 1.67$, l'exposant de la loi puissance

Annexe II. Résultats BaRatin : Taffignon

Présentation de la station :

La station hydrométrique de Taffignon est la station la plus proche de la confluence entre l'Yzeron et le Rhône. Elle est caractérisée par un seuil rectangulaire (Figure 27) et un chemin situé en rive gauche.



FIGURE 27 – Photo de la section de contrôle de la station hydrométrique de Taffignon

Un changement de courbe de tarage a été fait par la DREAL le 24 octobre 1993 suite à une crue importante. Un nouveau jaugeage en avril 2005 réalisé à haut débit s'écartait significativement de la courbe de tarage antérieure et a justifié le changement de courbe de tarage¹... Cependant aucun indice ne permet de suspecter un changement de contrôle hydraulique. Il a été supposé que l'extrapolation pour les hauts débits de la courbe de tarage antérieure à octobre 1993 était à remettre en cause et non le jaugeage d'avril 2005. Une seule période a donc été considérée pour l'application de la méthode BaRatin.

Analyse hydraulique :

Gamme 1 : A très bas débit, l'écoulement ne semble pas être assuré par le seuil. Une infiltration d'eau est suspectée d'être responsable du faible débit. Elle a été représentée dans BaRatin par un seuil rectangulaire de dimensions très incertaines.

1. Entretien téléphonique avec Gaëlle Guiglion (DREAL Rhône Alpes - SPR-HSPC) le 24/03/2014

Gamme 2 : Les relevés topographiques ont révélé un bourrelet sur le seuil en amont de l'arête du seuil. Celui-ci assure le contrôle pour une gamme de hauteurs d'eau assez réduite avant que ce contrôle ne soit noyé.

Gamme 3 : Le seuil (au niveau de son arête) assure ensuite le contrôle.

Gamme 4 : Après débordement sur la rive gauche, le seuil assure toujours le contrôle au niveau de la rivière mais un contrôle de type chenal a été choisi pour l'écoulement sur le chemin situé en rive gauche.

Gamme 5 : Pour les plus forts débits, le seuil est noyé et un contrôle de type chenal assure la relation hauteur-débit au niveau de la rivière. Le contrôle de type chenal sur la rive gauche est toujours actif.

Les jaugeages :

Trois gammes de hauteurs ont été établies pour les jaugeages par exploration du champ des vitesses documentés, et l'incertitude maximale a été retenue pour chaque catégorie (Tableau 14). De même, l'incertitude maximale pour les jaugeages par intégration documentés a été retenue. Ces valeurs d'incertitudes ont été utilisées pour tous les jaugeages non-documentés.

TABLEAU 14 – Incertitudes maximales des jaugeages calculées par la méthode ISO 748 pour trois catégories de hauteur d'eau et incertitude maximale calculée par la méthode Q+ sur les jaugeages par intégration documentés

Hauteur d'eau (m) :	<0.12	[0.12,0.2]	>0.2	Jaugeages par intégration
Incertitude maximale (%) :	27	18	13	8

Les moyennes d'incertitudes (et les écarts-types) estimées, selon la méthode utilisée, sont présentées dans le Tableau 15.

TABLEAU 15 – Incertitudes estimées moyennes (et écarts-type) des jaugeages de la station de Taffignon selon la méthode employée et les informations disponibles

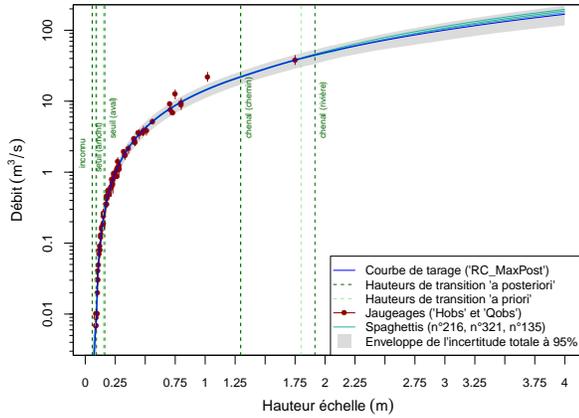
	Exploration du champ des vitesses			ADCP
	documenté	non documenté	par intégration	
Nombre de jaugeages :	50	6	8	9
Incertitude moyenne (%) :	12.8 (4.3)	16.2 (5.7)	5.6 (1.8)	5 (0)

Les Résultats :

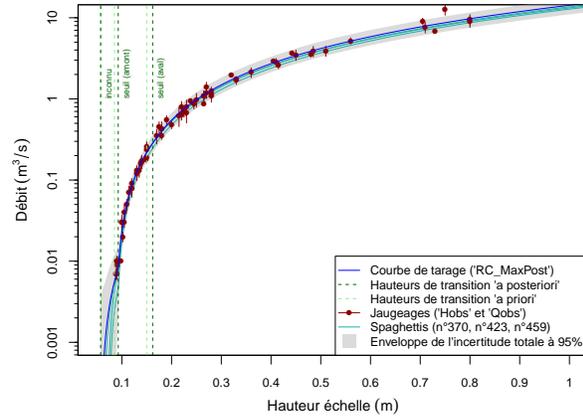
Les résultats sont présentés par la Figure 28, la Figure 29, la Figure 30 et le Tableau 16.

TABLEAU 16 – Valeurs (et écarts-type) des paramètres *a priori* et *a posteriori* de la courbe de tarage de Taffignon. ($U(0, 10000)$ fait référence à une loi uniforme sur l'intervalle $[0, 10000]$)

	Contrôle 1				Contrôle 2			
	a_1	b_1	c_1	k_1	a_2	b_2	c_2	k_2
<i>a priori</i> :	1.8	0.057	1.5	0.085	14.2	-	1.5	0.15
	(0.85)	(0.005)	(0.025)	(0.005)	(0.9)		(0.025)	(0.025)
<i>a posteriori</i> :	1.257	0.058	1.507	0.093	13.787	0.086	1.51	0.162
	(0.408)	(0.005)	(0.026)	(0.002)	(0.742)	(0.001)	(0.021)	(0.021)
	Contrôle 3				Contrôle 4			
	a_3	b_3	c_3	k_3	a_4	b_4	c_4	k_4
<i>a priori</i> :	15.1	-	1.5	1.3	7.1	-	1.67	1.8
	(0.95)		(0.025)	(0.1)	(1.95)		(0.025)	(0.15)
<i>a posteriori</i> :	16.491	0.091	1.536	1.295	7.32	1.295	1.653	1.916
	(0.495)	(0.004)	(0.024)	(0.1)	(1.942)	(0.1)	(0.023)	(0.155)
	Contrôle 5							
	a_5	b_5	c_5	$\sigma_{f,1}$	$\sigma_{f,2}$			
<i>a priori</i> :	12.2	-	1.67	$U(0, 10000)$	$U(0, 10000)$			
	(3.2)		(0.025)					
<i>a posteriori</i> :	11.692	-0.218	1.674	0.0027	0.0974			
	(3.076)	(0.355)	(0.024)	(0.001)	(0.0163)			



(a) Courbe de tarage complète

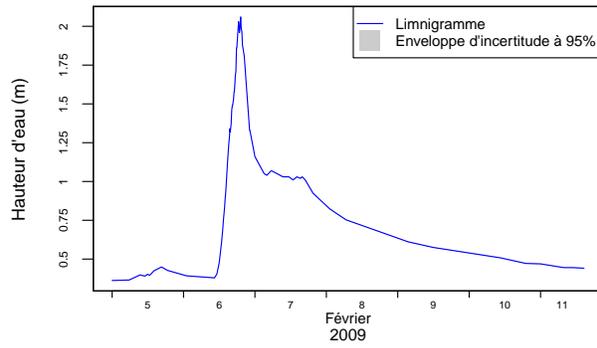


(b) Zoom sur les faibles hauteurs d'eau

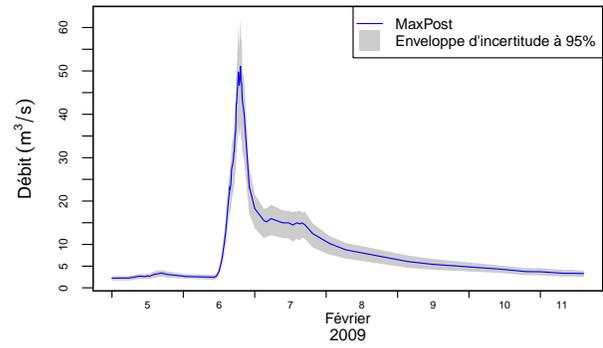
FIGURE 28 – Courbe de tarage et enveloppe d'incertitude à 95% de la station de Taffignon : (a) vue complète, (b) zoom sur les faibles hauteurs d'eau. (échelle logarithmique pour les débits)

A très bas débit, l'origine de l'écoulement est inconnue et aucun jaugeage n'a été fait ; il en résulte une très forte incertitude sur la courbe de tarage pour toutes les hauteurs d'eau inférieures à 6cm . De même que pour les courbes de tarage de Craponne (voir en III.1.3.), l'enveloppe d'incertitude est très importante pour les forts débits car aucun jaugeage n'a été fait pour ces hauteurs d'eau et les lois de chenal sont assez incertaines *a priori*.

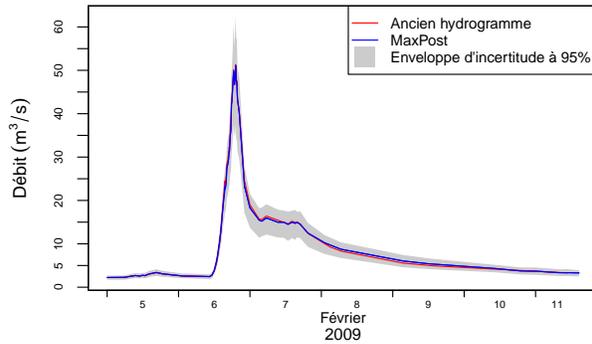
Il est important de noter que deux jaugeages (et leurs incertitudes associées) ne recouvrent pas l'enveloppe d'incertitude associée à la courbe de tarage (voir la Figure 28). Ces deux jaugeages ont été faits le 27 et 28 avril 1989. Il peut être envisagé que les incertitudes associées à ces jaugeages aient été sous-estimées ou bien que des conditions d'écoulement particulières durant cette crue induisent un biais pour ces jaugeages. Il est également possible, que ces deux jaugeages rendent compte de contrôles hydrauliques différents avant 1990 qui n'ont pas été identifiés lors de l'analyse hydraulique de la station ; il aurait été alors nécessaire d'envisager deux périodes distinctes pour l'application de la méthode BaRatin. Cependant aucun élément de l'analyse de l'historique de la station ne laisse supposer qu'un tel changement de contrôle se soit produit.



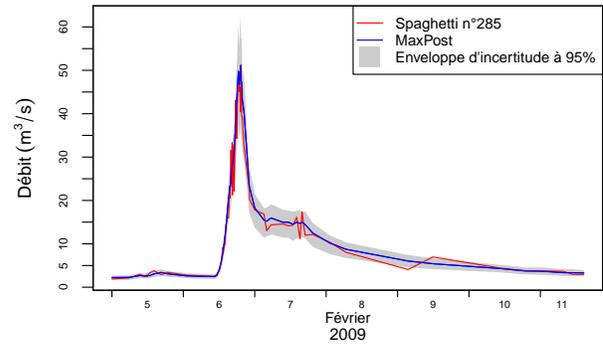
(a) Limnigramme



(b) Hydrogramme BaRatin



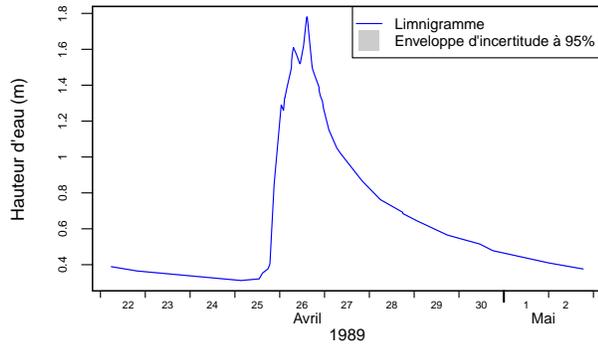
(c) Comparaison avec l'ancien hydrogramme



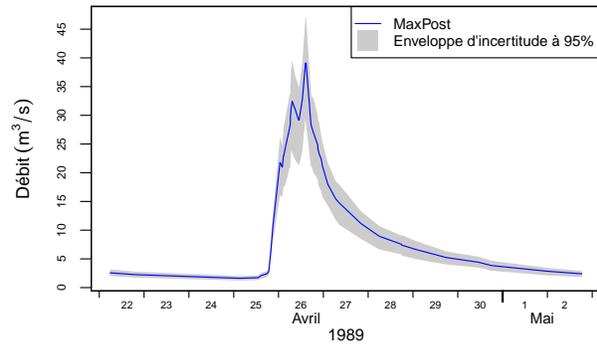
(d) Un spaghetti pris au hasard

FIGURE 29 – Limnigramme, hydrogramme et enveloppe d'incertitude à 95% de l'événement hydrologique d'avril 1989 de la station de Taffignon. (pas de temps variable)

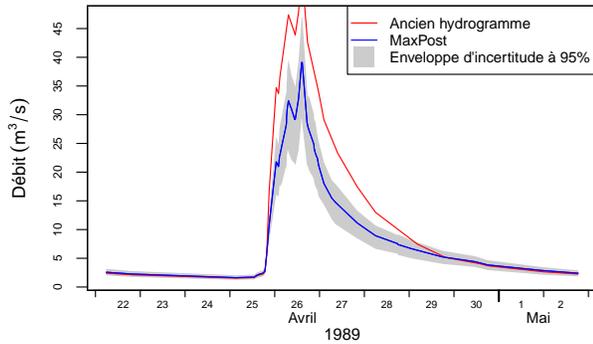
De même que pour la station de Craponne, pour les hauteurs élevées, les incertitudes associées à l'hydrogramme sont plus importantes, résultat découlant directement de la courbe de tarage et de l'enveloppe d'incertitude associée calculées par BaRatin. Le spaghetti semble moins bruité que pour les stations IRSTEA, du fait essentiellement du nombre de pas de temps par jour beaucoup plus réduit.



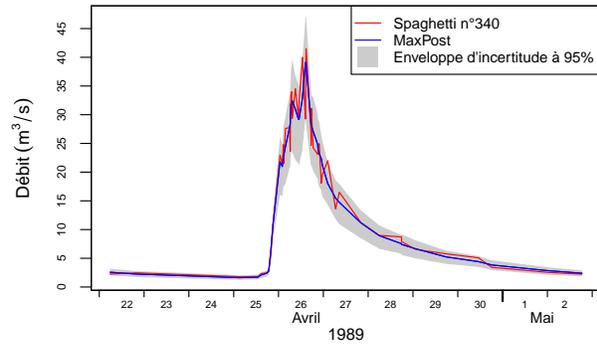
(a) Limnigramme



(b) Hydrogramme BaRatin



(c) Comparaison avec l'ancien hydrogramme



(d) Un spaghetti pris au hasard

FIGURE 30 – Limnigramme, hydrogramme et enveloppe d'incertitude à 95% de l'événement hydrologique de février 2009 de la station de Taffignon. (pas de temps variable)

On remarque ici un écart important entre l'hydrogramme calculé par BaRatin et l'hydrogramme issu de la banque HYDRO. La courbe de tarage utilisée par la DREAL pour les dates antérieures à octobre 1993 était très différente de celle actuellement utilisée et est responsable de cette différence importante. Ce changement de courbe de tarage fait par la DREAL a donc d'importantes conséquences sur les chroniques de débit. Un travail plus approfondi sur l'historique de la station de Taffignon serait nécessaire pour savoir si un changement de contrôle hydraulique a bien eu lieu entre 1989 et 2004 pour justifier l'emploi de deux courbes de tarage distinctes. Si aucun changement de contrôle n'a eu lieu, un recalcul des chroniques de débits antérieurs à octobre 1993 serait nécessaire.

Annexe III. Résultats BaRatin : Pont de la Barge

Présentation de la station :

La station hydrométrique de Pont de la Barge concerne le plus petit sous bassin versant de l'Yzeron. Elle est caractérisée par un seuil rectangulaire situé dans un tunnel bétonné (Figure 31). Aucun changement de contrôle hydraulique n'a eu lieu sur cette station depuis sa mise en service.



FIGURE 31 – Photo de la section de contrôle de la station hydrométrique de Pont de la Barge

Analyse hydraulique :

Gamme 1 : A bas débit, le seuil rectangulaire contrôle la relation hauteur débit.

Gamme 2 : A haut débit, le seuil est noyé et on passe à un contrôle de type chenal. La hauteur de transition, correspondant à la hauteur d'eau à partir de laquelle le seuil est noyé, est assez incertaine.

Les jaugeages :

Vingt-et-un jaugeages ont été faits sur la station de Pont de la Barge entre janvier 2006 et mai 2013. Cinq de ces jaugeages ont été écartés car ils ont été faits très peu de temps après d'autres jaugeages. Il a été considéré qu'ils ne respectaient pas l'hypothèse d'indépendance. Les incertitudes estimées des seize jaugeages sont présentées dans [Tableau 17](#).

TABLEAU 17 – Incertitudes estimées moyennes (et écarts-type) des jaugeages de la station de Pont de la Barge selon la méthode employée.

Méthode :	Exploration du champ des vitesses	Dilution
Nombre de jaugeages :	11	5
Incertitude moyenne :	13.8 (3.2)	5 (0)

Les Résultats :

Les résultats sont présentés par la Figure 32, la Figure 33 et le Tableau 18.

TABLEAU 18 – Valeurs (et écarts-type) des paramètres *a priori* et *a posteriori* de la courbe de tarage de Pont de la Barge. ($U(0, 10000)$ fait référence à une loi uniforme sur l'intervalle $[0, 10000]$)

	Contrôle 1				Contrôle 2			$\sigma_{f,1}$	$\sigma_{f,2}$
	a_1	b_1	c_1	k_1	a_2	b_2	c_2		
<i>a priori</i> :	3.7 (0.4)	0.135 (0.025)	1.5 (0.025)	0.35 (0.075)	5.5 (0.6)	-	1.67 (0.025)	$U(0, 10000)$	$U(0, 10000)$
<i>a posteriori</i> :	3.713 (0.384)	0.13 (0.004)	1.511 (0.025)	0.184 (0.1)	6.657 (0.69)	0.135 (0.017)	1.652 (0.025)	0.0028 (0.0022)	0.081 (0.0633)

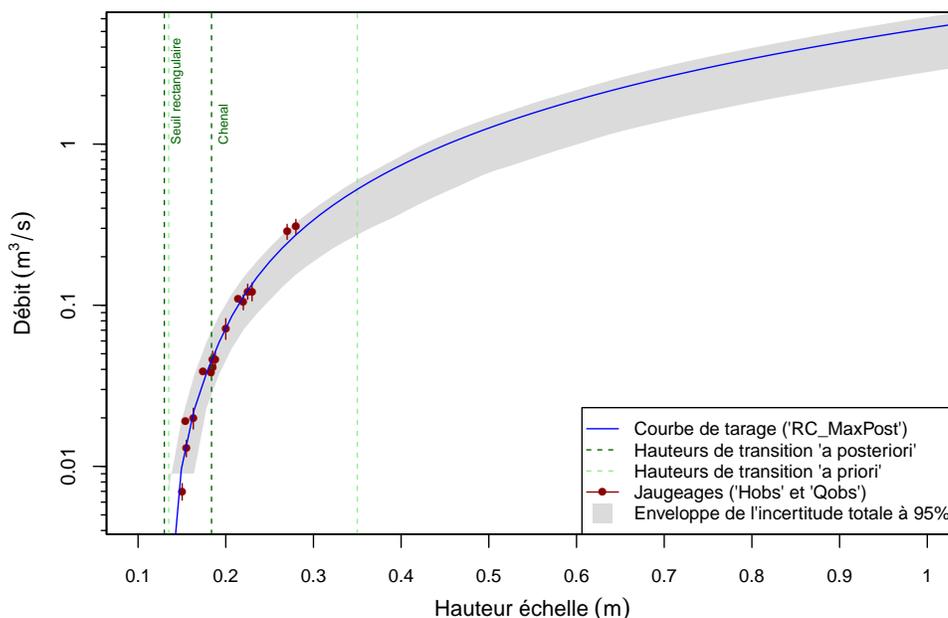
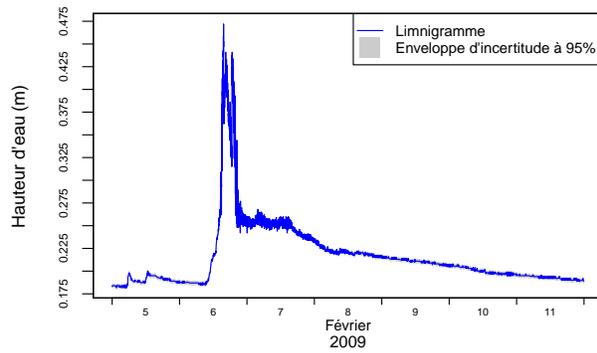


FIGURE 32 – Courbe de tarage et enveloppe d'incertitude à 95% de la station de Pont de la Barge. (échelle logarithmique pour les débits)

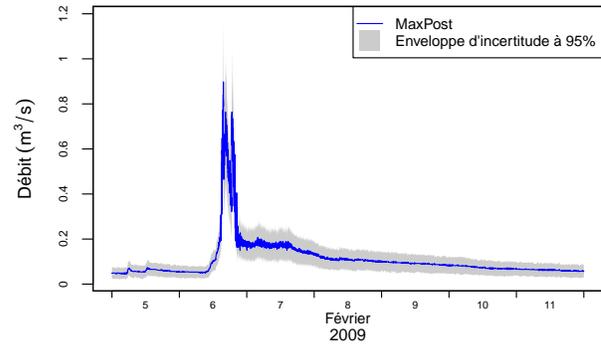
La hauteur de transition est fixée à 35 cm (± 15 cm). *A posteriori*, celle-ci est de 18 cm (± 20 cm). Cela impliquerait que le seuil est noyé dès que le niveau d'eau est 5 cm au dessus de la crête du seuil (située à 13 cm) et que l'on passe alors à la loi de chenal. Cette hauteur de transition semble très basse d'un point de vue hydraulique et ne respecte pas l'intervalle d'incertitude défini *a priori*. Il est probable que les deux jaugeages faits pour les plus hauts débits « obligent » BaRatin à baisser considérablement la hauteur de transition. De nombreux tests, basés sur différents choix d'*a priori* pour la hauteur de transition ont montré une forte instabilité des résultats de BaRatin. D'autres jaugeages sont nécessaires pour des hauteurs supérieures à 25 cm afin d'obtenir une hauteur de transition *a posteriori* plus stable et plus réaliste.

L'incertitude associée à la hauteur de transition est prise en compte dans l'enveloppe d'incertitude totale de la courbe de tarage. Pour des hauteurs supérieures à 30 cm celle-ci devient très importante, résultat que l'on retrouve dans les hydrogrammes pour les fortes hauteurs d'eau.

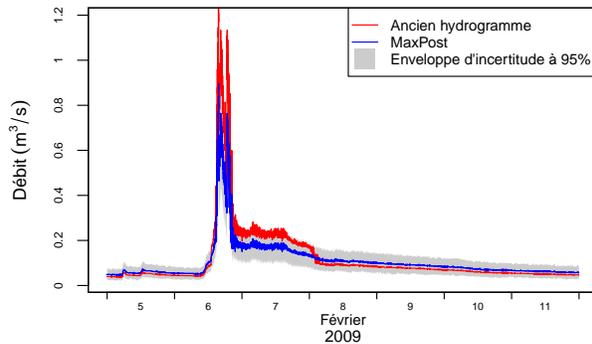
On remarque également qu'il y a un biais systématique avec l'ancien hydrogramme pour les hauteurs supérieures à 10-15 cm. L'estimation du débit par l'ancienne courbe de tarage, pour des



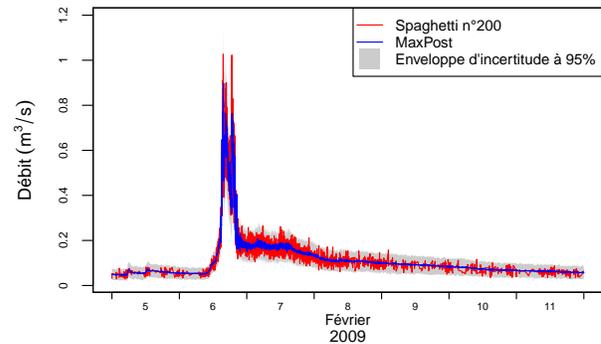
(a) Limnigramme



(b) Hydrogramme BaRatin



(c) Comparaison avec l'ancien hydrogramme



(d) Un spaghetti pris au hasard

FIGURE 33 – Limnigramme, hydrogramme et enveloppe d'incertitude à 95% de l'événement hydrologique de février 2009 de la station de Pont de la Barge. (pas de temps variable)

hauteurs d'eau supérieures à 10-15 *cm* surestimait le débit. Les deux plus hauts jaugeages ont sans doute influencé la mise en place de l'ancienne courbe de tarage et sont responsables de cette surestimation. Les résultats de BaRatin ne résultent pas que des jaugeages mais également de l'analyse hydraulique du site ; de ce fait ils sont moins influencés par ces deux jaugeages.

Annexe IV. Résultats BaRatin : La Léchère

Présentation de la station :

La station hydrométrique de la Léchère se situe sur la Chaudanne (Figure 2) en aval de la station de Pont de la Barge. Un canal Parshall 36" y a été installé (Figure 34) et permet l'utilisation d'une courbe de tarage constructeur pour la conversion des hauteurs d'eau en débit.



FIGURE 34 – Photo de la section de contrôle de la station hydrométrique de la Léchère

Analyse hydraulique :

Gamme 1 : A bas débit et moyen débit le contrôle hydraulique est entièrement assuré par le canal Parshall 36".

Gamme 2 : A haut débit, l'eau déborde sur les marches situées de part et d'autre du canal. Ces bords ont été assimilés à un contrôle par seuil rectangulaire.

Les jaugeages :

Les onze jaugeages faits sur cette station ont tous été faits par exploration du champ des vitesses sauf un, fait par dilution (Tableau 19).

TABLEAU 19 – Incertitudes estimées moyennes (et écarts-type) des jaugeages de la station de la Léchère selon la méthode employée.

Méthode :	Exploration du champ des vitesses	Dilution
Nombre de jaugeages :	9	1
Incertitude moyenne (%) :	12 (2)	5 (0)

Les Résultats :

Les résultats sont présentés par la Figure 35, la Figure 36 et le Tableau 20.

TABLEAU 20 – Valeurs (et écarts-type) des paramètres *a priori* et *a posteriori* de la courbe de tarage de la Léchère. ($U(0, 10000)$ fait référence à une loi uniforme sur l'intervalle $[0, 10000]$)

	Contrôle 1				Contrôle 2			$\sigma_{f,1}$	$\sigma_{f,2}$
	a_1	b_1	c_1	k_1	a_2	b_2	c_2		
<i>a priori</i> :	2.18 (0.025)	0 (0.025)	1.57 (0.025)	0.92 (0.025)	1 (0.05)	-	1.5 (0.025)	$U(0, 10000)$	$U(0, 10000)$
<i>a posteriori</i> :	2.185 (0.025)	-0.005 (0.008)	1.565 (0.023)	0.948 (0.024)	0.996 (0.052)	0.948 (0.024)	1.511 (0.025)	5e-04 (0.0101)	0.0825 (0.0483)

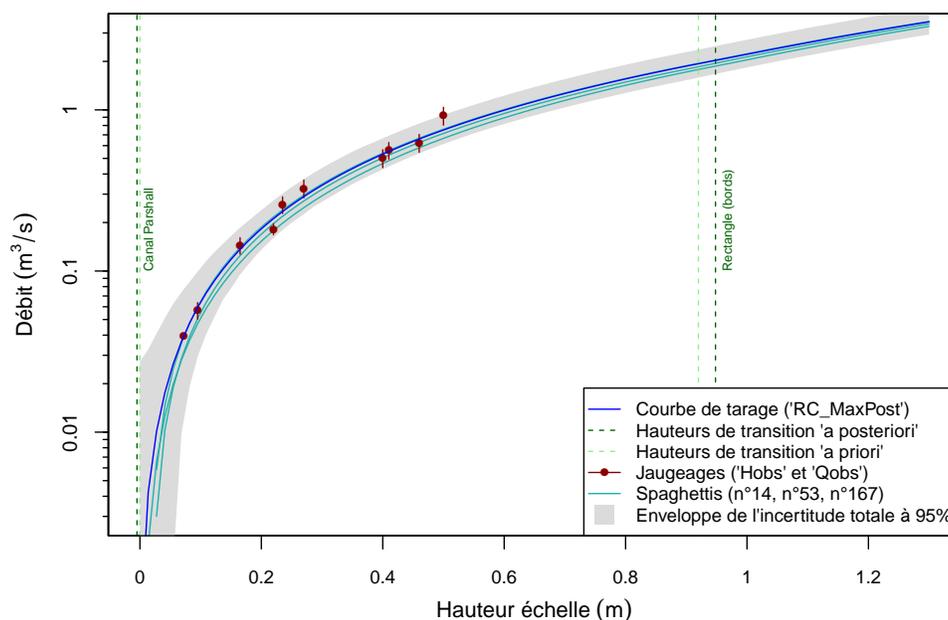
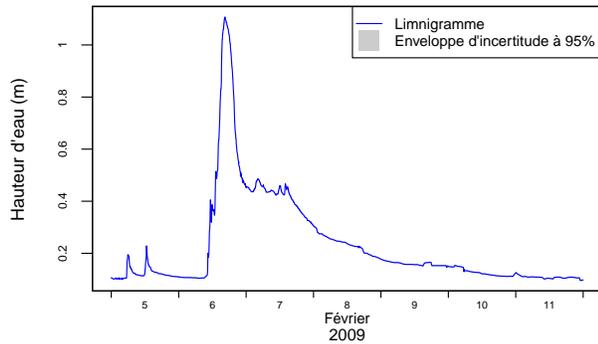
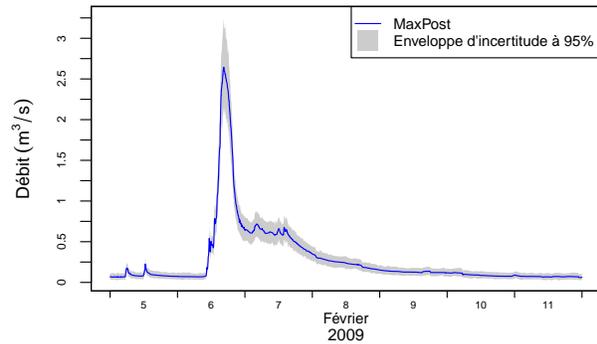


FIGURE 35 – Courbe de tarage et enveloppe d'incertitude à 95% de la station de la Léchère. (échelle logarithmique pour les débits)

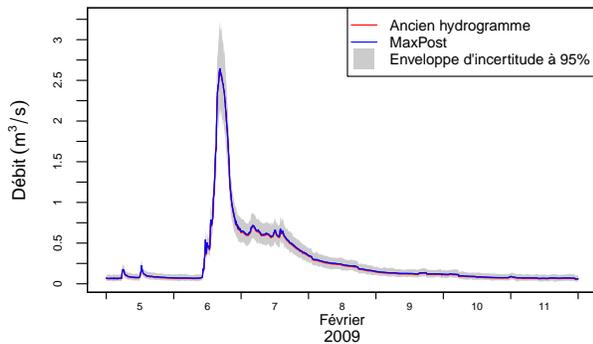
Les *a priori* hydrauliques pour la station de la Léchère sont particulièrement précis du fait qu'il s'agit d'un canal Parshall pour lequel on dispose des données constructeurs concernant la relation hauteur-débit. Les résultats de BaRatin montrent qu'une incertitude, bien qu'assez réduite, est présente pour toutes les hauteurs d'eau et semble trop importante par rapport à ce qui était attendu pour un contrôle hydraulique de type canal Parshall. Un nombre plus important de jaugeages permettrait sans doute de diminuer l'enveloppe d'incertitude associée à la courbe de tarage et



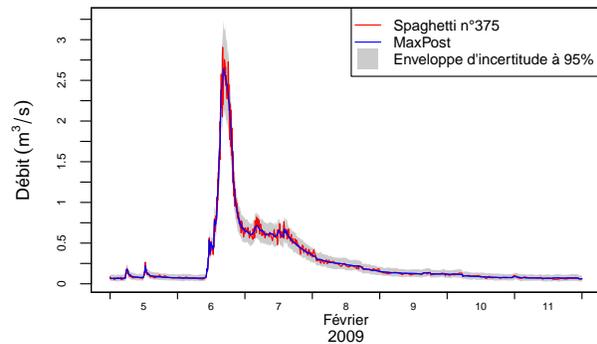
(a) Limnigramme



(b) Hydrogramme BaRatin



(c) Comparaison avec l'ancien hydrogramme



(d) Un spaghetti pris au hasard

FIGURE 36 – Limnigramme, hydrogramme et enveloppe d'incertitude à 95% de l'événement hydrologique de février 2009 de la station de la Léchère. (pas de temps variable)

à l'hydrogramme. De mesures de terrain pourraient permettre de venir confirmer les données constructeurs et de réduire encore davantage les incertitudes associées aux paramètres *a priori*.

Les résultats de cette station suggèrent une surestimation de l'incertitude par BaRatin lorsque le nombre de jaugages est faible.

Annexe V. Résultats BaRatin : Le Ratier

Présentation de la station :

La station hydrométrique du Ratier (Figure 2) se situe à la sortie d'un tunnel. Un seuil rectangulaire à crête épaisse se situe juste en aval du limnigraphe avec un seuil triangulaire placé au milieu (Figure 37). Un chemin, situé sur la rive gauche permet d'accéder facilement à la station.



FIGURE 37 – Photo de la section de contrôle de la station hydrométrique du Ratier

Analyse hydraulique :

Gamme 1 : A très bas débit, le seuil triangulaire assure le contrôle hydraulique.

Gamme 2 : L'écoulement se fait ensuite, à la fois par le seuil triangulaire et par le seuil rectangulaire, ces deux éléments assurent alors le contrôle hydraulique.

Pour les forts débits, l'écoulement se fait également par le chemin en béton situé en rive gauche. Cependant pour prendre en compte le fait que l'écoulement passant par le seuil triangulaire n'augmente pas latéralement une fois le niveau d'eau supérieur à la crête du seuil rectangulaire, l'implémentation du cas particulier de la station de Charbonnières (voir en III.1.2., l'Équation 18) doit être utilisé. Ce cas particulier n'autorise pas plus de deux contrôles.

Plusieurs essais ont montré qu'à hauts débits, l'absence de correction sur l'écoulement assuré par le seuil triangulaire avait bien plus d'influence que l'omission de l'écoulement sur le chemin. Uniquement les contrôles par les seuils triangulaire et rectangulaire ont donc été retenus pour cette station.

Les jaugeages :

Sur la station du Ratier, trente-sept jaugeages ont été faits entre janvier 2010 et avril 2014. Les jaugeages ont été faits par exploration du champ des vitesses, par dilution et par mesure des vitesses de surface par radar (Tableau 21). L'incertitude associée à certains jaugeages par dilution a été définie à 7.5% ou 10% pour prendre en compte certaines remarques du jaugeur sur le déroulement du jaugeage (présence de feuille sur le capteur, doute sur le bon mélange du traceur, etc...), respectant ainsi les recommandations faites par Le Coz et al. (2011).

TABLEAU 21 – Incertitudes estimées moyennes (et écarts-type) des jaugeages de la station du Ratier selon la méthode employée.

Méthode :	Exploration du champ des vitesses	Dilution	Radar
Nombre de jaugeages :	13	20	4
Incertitude moyenne :	10.3 (2.2)	5.3 (1.3)	11.8 (1.4)

Les Résultats :

Les résultats sont présentés par la Figure 38, la Figure 39 et le Tableau 22.

TABLEAU 22 – Valeurs (et écarts-type) des paramètres *a priori* et *a posteriori* pour la station hydrométrique du Ratier. ($U(0, 10000)$ fait référence à une loi uniforme sur l'intervalle $[0, 10000]$)

	Contrôle 1				Contrôle 2			$\sigma_{f,1}$	$\sigma_{f,2}$
	a_1	b_1	c_1	k_1	a_2	b_2	c_2		
<i>a priori</i> :	2.9 (0.25)	0.129 (0.025)	2.5 (0.025)	0.369 (0.01)	5 (0.35)	-	1.5 (0.025)	$U(0, 10000)$	$U(0, 10000)$
<i>a posteriori</i> :	2.78 (0.165)	0.123 (0.0043)	2.51 (0.025)	0.374 (0.0047)	5.34 (0.247)	0.374 (0.0047)	1.484 (0.022)	5e-5 (0.0007)	0.097 (0.018)

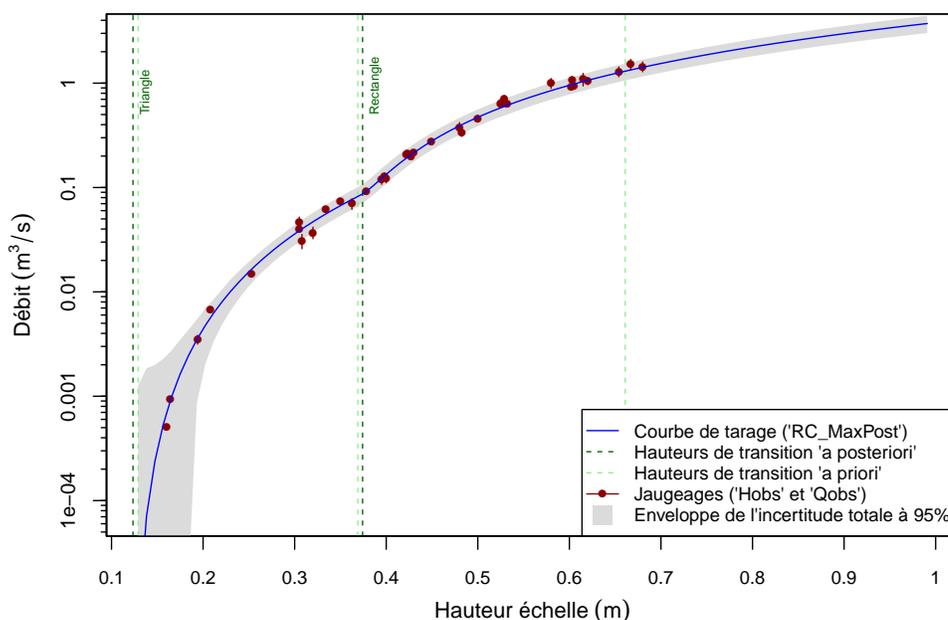
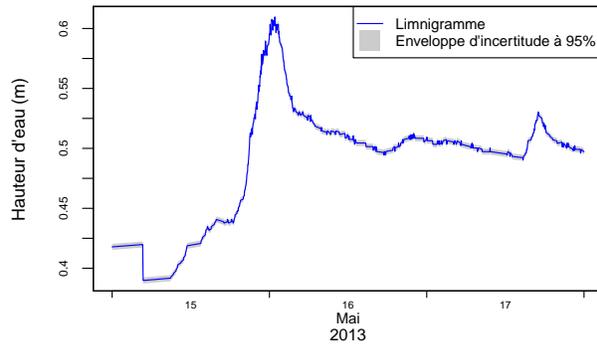
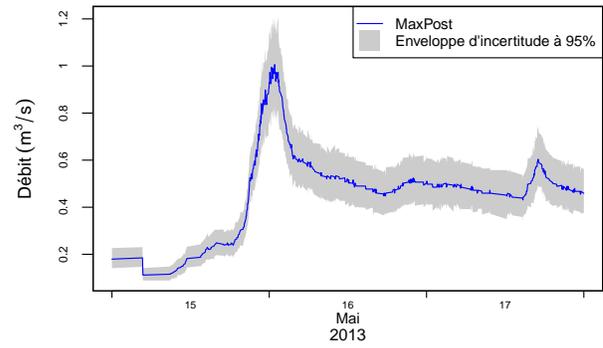


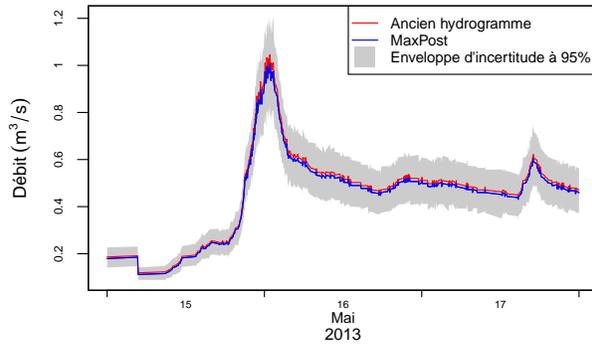
FIGURE 38 – Courbe de tarage et enveloppe d'incertitude à 95% de la station du Ratier. (échelle logarithmique pour les débits)



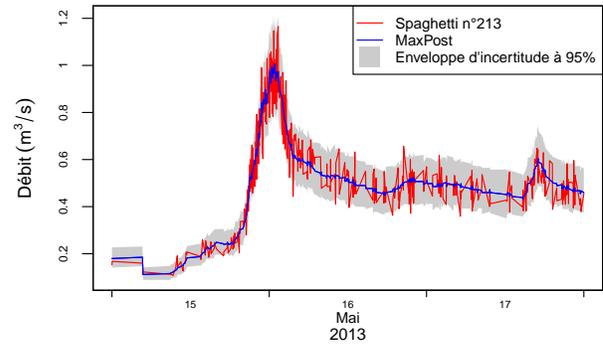
(a) Limnigramme



(b) Hydrogramme BaRatin



(c) Comparaison avec l'ancien hydrogramme



(d) Un spaghetti pris au hasard

FIGURE 39 – Limnigramme, hydrogramme et enveloppe d'incertitude à 95% de l'événement hydrologique du 15 au 17 mai 2013 de la station du Ratier. (pas de temps variable)

Le nombre important de jaugeages a permis d'obtenir une courbe de tarage dont l'enveloppe d'incertitude associée est assez réduite. L'écoulement par le chemin situé en rive gauche n'a cependant pas été pris en compte. Aucun jaugeage pour des hauteurs d'eau supérieures à 66 cm n'a été fait (hauteur à partir de laquelle le chemin agit comme contrôle). L'incertitude associée à la courbe pour sa partie extrapolée est sans doute sous-estimée. Des jaugeages supplémentaires pour les forts débits permettraient de réduire cette sous-estimation et de corriger légèrement la courbe de tarage afin de limiter l'impact de la non prise en compte du chemin.

Une prise en compte par BaRatin d'un troisième contrôle pour ce cas de figure serait également une façon d'améliorer nettement le résultat pour les plus forts débits.

Annexe VI. Calcul du paramètre a et de son incertitude

L'incertitude associée aux différents termes permettant le calcul du paramètre a a été propagée selon la méthode de propagation de l'incertitude proposée par le GUM. Le principe et un exemple sont présentés ici.

Dans le cas d'un contrôle par chenal, la loi simplifiée de Manning-Strickler peut être appliquée (Équation 24). La mise sous la forme de l'Équation 1 ($Q(h) = a(h - b)^c$) implique : $a = KB\sqrt{J} = f(K, B, J)$. Sous l'hypothèse que les termes K , B et J ont des distributions normales, l'Équation 2 appliquée à ce cas donne :

$$\begin{aligned} u_c^2(a) &= \left(\frac{\partial f}{\partial K}\right)^2 u^2(K) + \left(\frac{\partial f}{\partial B}\right)^2 u^2(B) + \left(\frac{\partial f}{\partial J}\right)^2 u^2(J) \\ &= B^2 J u^2(K) + K^2 J u^2(B) + K^2 B^2 \frac{1}{4J} u^2(J) \\ &= \underbrace{(KB\sqrt{J})^2}_{a^2} \left(\left(\frac{u(K)}{K}\right)^2 + \left(\frac{u(B)}{B}\right)^2 + \left(\frac{u(J)}{2J}\right)^2 \right) \end{aligned}$$

Dans le cas où :

- le coefficient de Strickler K est estimé à 25 ± 5 (soit $u(K) = 2.5$)
- la largeur moyenne du chenal (supposé rectangulaire) est mesurée et fait $B=10m \pm 1m$ (soit $u(B) = 0.5$)
- la pente moyenne du fond du cours d'eau est de $J=0.005\% \pm 0.001\%$ (soit $u(J) = 0.0005$)

Le calcul de a donne :

$$a = 25 \times 10 \times \sqrt{0.005} = 17.678$$

Et l'incertitude-type associée est :

$$u(a) = \left[\underbrace{(25 \times 10 \times \sqrt{0.005})^2}_{17.678^2} \left(\left(\frac{2.5}{25}\right)^2 + \left(\frac{0.5}{10}\right)^2 + \left(\frac{0.0005}{2 \times 0.005}\right)^2 \right) \right]^{1/2} = 2.165$$

Soit une incertitude élargie $U(a) = 2 \times 2.165 = 4.330$. On a donc :

$$a = 17.678 \pm 4.330$$

Annexe VII. Les courbes de débit spécifique classées

Les courbes de débit spécifique classées pour les stations de Taffignon, Craponne, Charbonnières, Ratier et du Mercier sont présentées dans la Figure 40. De la même façon que pour les débits non spécifiques, les résultats de la Léchère et de Pont de la Barge ont été écartés car les quantiles 2.5% et 97.5% n'englobaient pas la MaxPost pour les plus faibles débits.

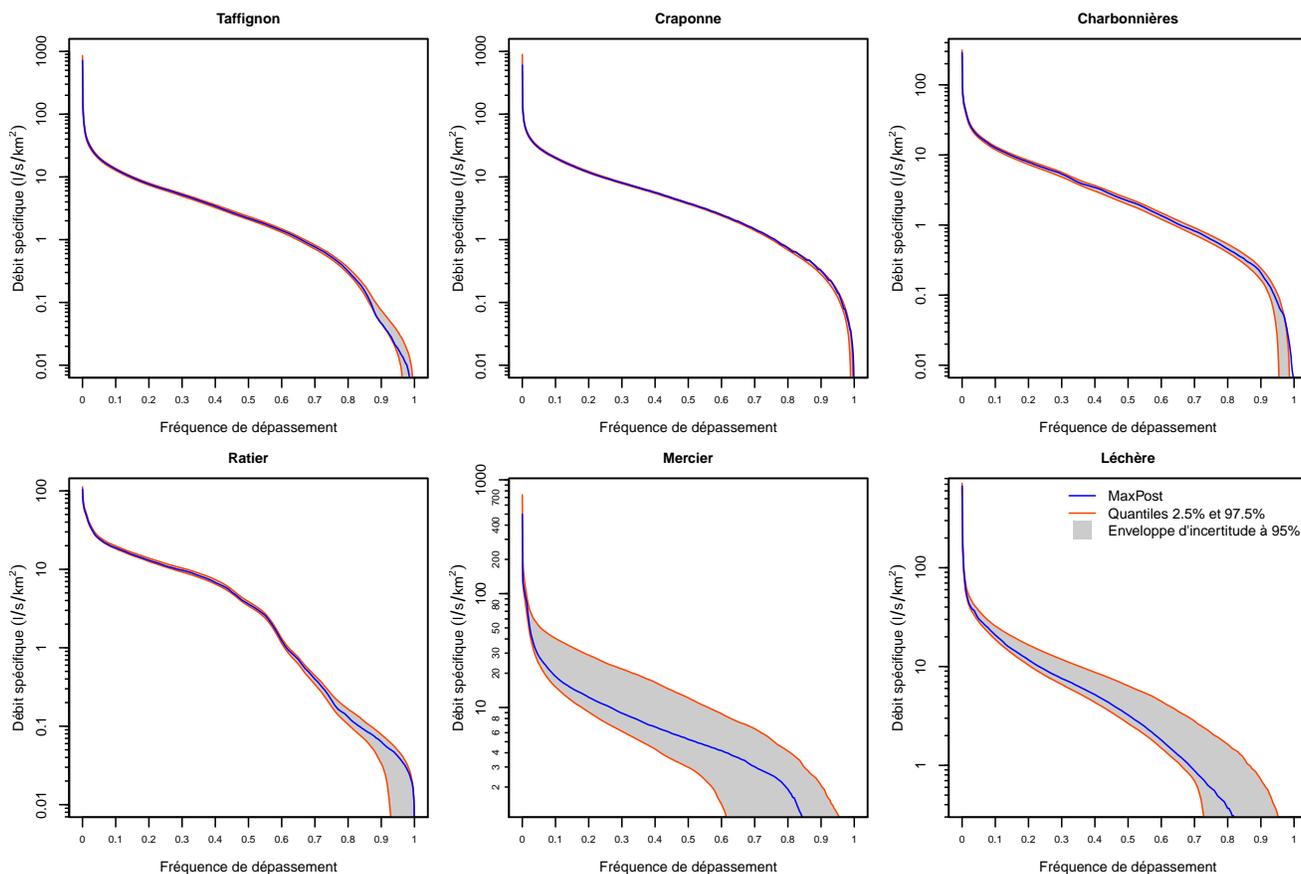


FIGURE 40 – Courbes de débit spécifique classées (MaxPost et enveloppe d'incertitude à 95%) des stations de Taffignon, Craponne, Charbonnières, Ratier et du Mercier.

Annexe VIII. Les lacunes dans les chroniques de débits

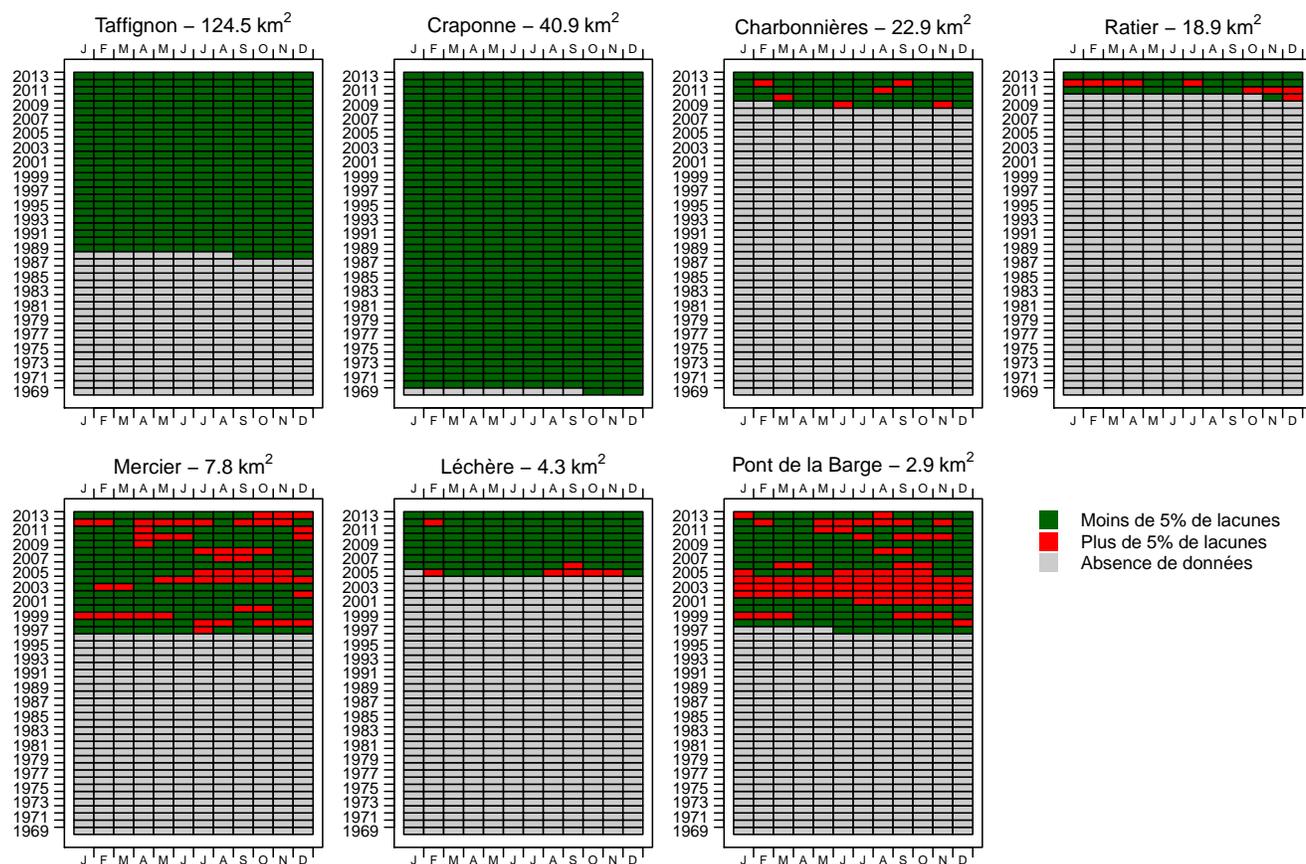


FIGURE 41 – Disponibilité des données entre 1969 et 2013 pour les stations du bassin versant de l'Yzeron.

TABLEAU 23 – Pourcentage de lacunes sur l'ensemble des chroniques de débits pour les différentes stations. Les lacunes issues du limnigramme et celles introduites par BaRatin (que l'on trouve dans les spaghettis) sont comptées séparément. On s'intéresse aux nombres de pas de temps et non à des durées.

	Taffignon	Craponne	Charbonnières	Ratier	Mercier	Léchère	Pont de la Barge
Issues du limnigramme (%)	0.01	0	1.11	6.43	6.28	2.68	5.42
Issues de BaRatin (%)	0.1	0.01	0	0	0.74	2.24	7.8

Annexe IX. Fonctions codées et utilisées pour l'agrégation à pas de temps horaire et journalier

fixedTimeStep.R

```

1 #####
2 # 'sourceMatrice' is a matrix (m x n)
3 # 'dataTime' is a chron vector of length m
4 # 'timeStep' is the desired target time step: 'hours', 'days', 'months'
5 # The function return a list containing a chron vector of length k with
6 # the target time steps and a matrix with k rows and n columns containing aggregated
7 # data of 'sourceMatrice'.
8 calculateTimeStep <- function(sourceMatrice ,dataTime ,timeStep="hours"){
9   colNames=colnames(sourceMatrice)
10  # ----- #
11  # Checking of input data and parameters... #
12  # ----- #
13  if (nrow(sourceMatrice)!=length(dataTime)){
14    stop("Length(dataTime) must be equal to nrow(sourceMatrice)!")
15  }
16  # ----- #
17  # Create chron object containing the target time steps #
18  # ----- #
19  minTime=min(dataTime)
20  maxTime=max(dataTime)
21  if (identical(timeStep,"hours")){
22    minTime=chron(substr(minTime,2,9),paste(substr(minTime,11,12),
23      ":00:00",sep=""),format=c("d/m/y","h:m:s"))
24    maxTime=chron(substr(maxTime,2,9),paste(substr(maxTime,11,12),
25      ":00:00",sep=""),format=c("d/m/y","h:m:s"))
26    t1=chron("27/04/1989","01:10:00",format=c("d/m/y","h:m:s"))
27    t2=chron("27/04/1989","02:10:00",format=c("d/m/y","h:m:s"))
28    timeStepDuration=as.numeric(t2)-as.numeric(t1)
29  }else if (identical(timeStep,"days")){
30    minTime=chron(substr(minTime,2,9),"00:00:00",
31      format=c("d/m/y","h:m:s"))
32    maxTime=chron(substr(maxTime,2,9),"00:00:00",
33      format=c("d/m/y","h:m:s"))
34    timeStepDuration=1
35  }else if (identical(timeStep,"months")){
36    minTime=chron(paste("01",substr(minTime,4,9)),"00:00:00",
37      format=c("d/m/y","h:m:s"))
38    maxTime=chron(paste("01",substr(maxTime,4,9)),"00:00:00",
39      format=c("d/m/y","h:m:s"))
40    timeStepDuration=31
41  }
42  dataTimeTarget=seqTimes(minTime,maxTime,timeStep)
43  nbrTimeStep=length(dataTimeTarget)
44  message("Number of target time steps: ",nbrTimeStep)
45  flush.console()
46  # ----- #
47  # Create the target matrix that will contain as many columns as the #
48  # source matrix and as many rows as the number of target time steps. #
49  # ----- #
50  targetMatrice=matrix(NA,nrow=(nbrTimeStep-1),ncol=ncol(sourceMatrice))
51  initTxtPB(1:(nbrTimeStep-1),percentStep=1) #initialize progress bar (optional)
52  # For each target time steps (i)
53  for (i in 1:(nbrTimeStep-1)){
54  # ----- #
55  # In this (i) targeted time step, get all the source time steps that #
56  # there is to find if any. (strictly) #
57  # ----- #
58  ind=which(dataTime>dataTimeTarget[i] & dataTime<dataTimeTarget[i+1])
59  # ----- #
60  # Get the source time steps that are the closest (or equal) to the #
61  # boundaries and outside the target time step i. #
62  # ----- #
63  indMin=max(which(dataTime<=dataTimeTarget[i]))
64  indMax=min(which(dataTime>=dataTimeTarget[i+1]))
65  if (indMin==-Inf){ indMin=NULL }

```

```

66   if (indMax==+Inf){ indMax=NULL }
67 # ----- #
68 # If it's the first source time or the last, indMin and indMax may be #
69 # empty. Then, 'ind' is redefine to 0 (ind=0) so NAs values will be #
70 # added in target matrix further down in the the code. #
71 # ----- #
72   if (length(indMin)==0 | length(indMax)==0){ind=0}else{ind=c(indMin,ind,indMax)}
73 # ----- #
74 # In case there are at least 2 source time steps (including minimum and #
75 # maximum for boundaries)... #
76 # ----- #
77   if (length(ind)>=2){
78 # ----- #
79 # Interpolate source matrix values to get exactly the values at the #
80 # target time step (i) boundaries. #
81 # ----- #
82     minBoundaryValues=multipleLinearInterpolation (dataTime[ind[c(1,2)]] ,
83     sourceMatrice[ind[c(1,2)]] , dataTimeTarget[i])
84     maxBoundaryValues=multipleLinearInterpolation (dataTime[ind[c(length(ind)-1,length(ind))]] ,
85     sourceMatrice[ind[c(length(ind)-1,length(ind))]] , dataTimeTarget[i+1])
86 # ----- #
87 # Prepare source values matrix containing all the rows (sets of values) #
88 # necessary to the calculation of row i of the target matrix #
89 # ----- #
90     ind_=ind
91     ind=ind[-c(1,length(ind))]
92     sourceValues=matrix(c(minBoundaryValues,t(sourceMatrice[ind,]),
93     maxBoundaryValues),nrow=(2+length(ind)),ncol=ncol(sourceMatrice),byrow=TRUE)
94     sourceTimes=c(dataTimeTarget[i],dataTime[ind],
95     dataTimeTarget[i+1])
96     ind=ind_
97 # ----- #
98 # Calculate duration of each source values and total duration #
99 # this is really necessary for monthly time step! #
100 # ----- #
101     durations=c()
102     duration<-rep(0,ncol(sourceMatrice))
103     for (j in 1:(length(ind)-1)){
104       durations[j]=as.numeric(
105         sourceTimes[j+1]-as.numeric(sourceTimes[j])
106     }
107     totalDuration=sum(durations)
108     if (round(timeStepDuration,5)!=round(totalDuration,5)){
109       warning("Total duration of target time step isn't equal to\ncalculated total duration of
110         time step number ",i,"!\n timeStepDuration = ",timeStepDuration,"\n totalDuration = "
111         ,totalDuration)
112     }
113 # ----- #
114 # Calculate the surface under the curves (columns) #
115 # ----- #
116     surface<-matrix(NA,ncol=ncol(sourceValues),nrow=length(ind)-1)
117     for (j in 1:(length(ind)-1)){
118       surface[j,]<-(as.numeric(sourceTimes[j+1])-as.numeric(sourceTimes[j]))*sourceValues[j,]
119       surface[j,]<-surface[j,]+(sourceValues[j+1,]-sourceValues[j,])*
120       (as.numeric(sourceTimes[j+1])-as.numeric(sourceTimes[j]))/2
121     }
122     totalSurface<-apply(surface,2,sum)
123 # ----- #
124 # Calculate row i of target matrix by dividing the total surface under #
125 # the curves by the total time step duration. #
126 # ----- #
127     targetMatrice[i,]<-totalSurface/totalDuration
128     } else if (length(ind)<2){
129       warning("No data were found in row ",i,"...")
130     }
131     updateTxtPB(i) #update progress bar (optional)
132   }
133   colnames(targetMatrice)=colNames
134   dataTimeTarget=dataTimeTarget[-c(length(dataTimeTarget))]
135   return(list("targetMatrice"=targetMatrice,"dataTimeTarget"=dataTimeTarget))
136 }
137 #####
138 # x and y must both be of length 2
139 # xout can either be a single value or a vector
140 linearInterpolation<-function(x,y,xout){
141   x=as.numeric(x)

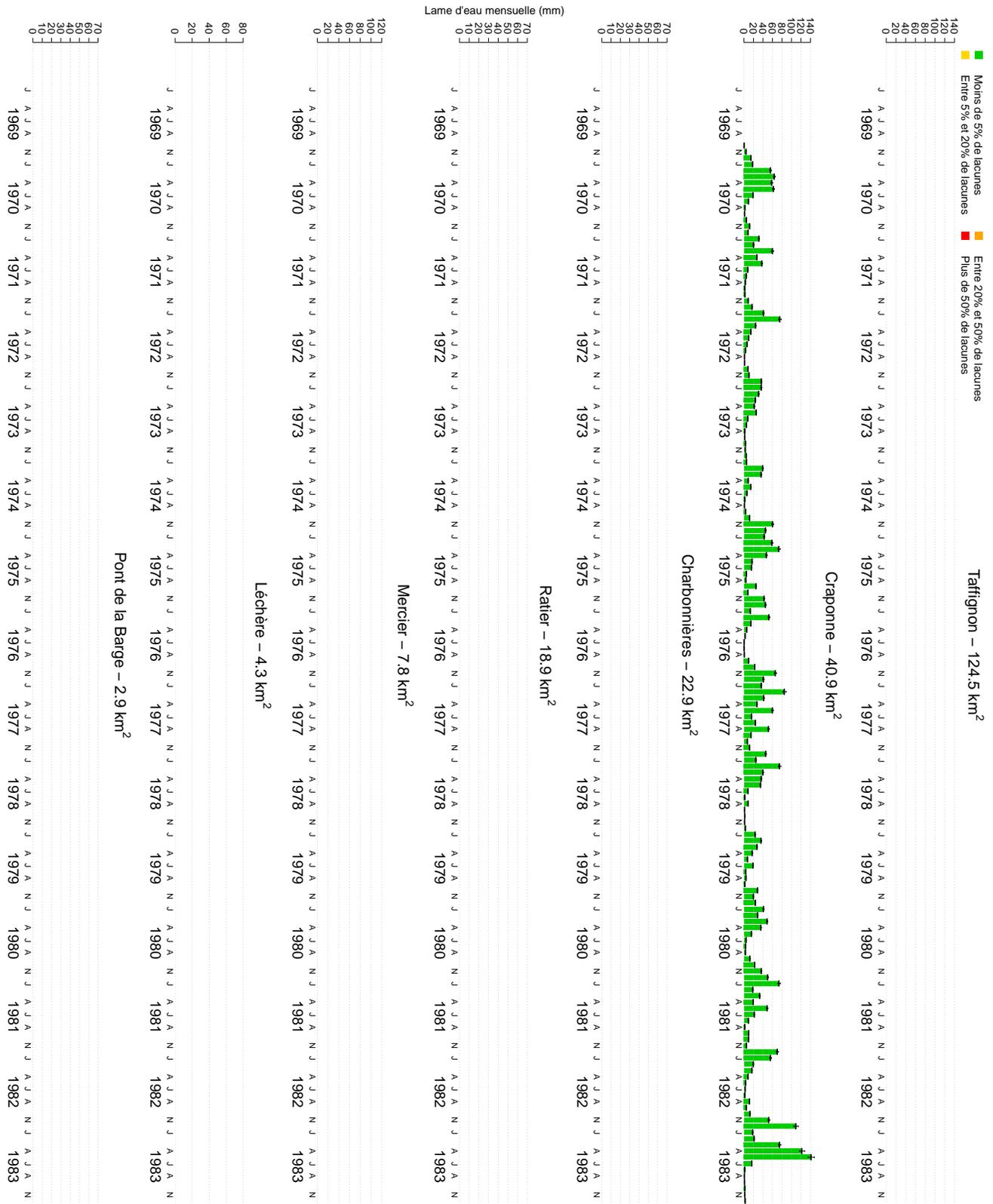
```

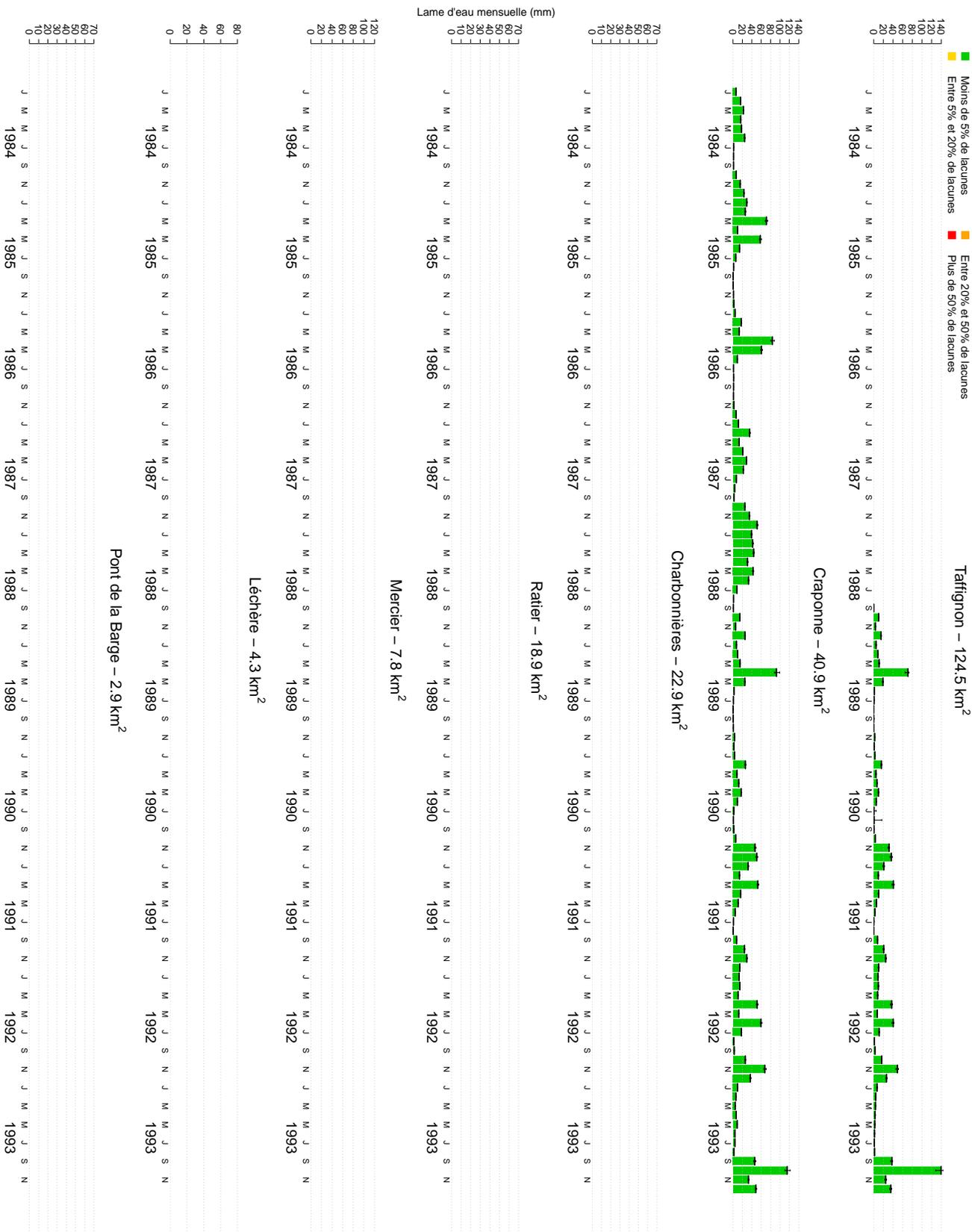
```

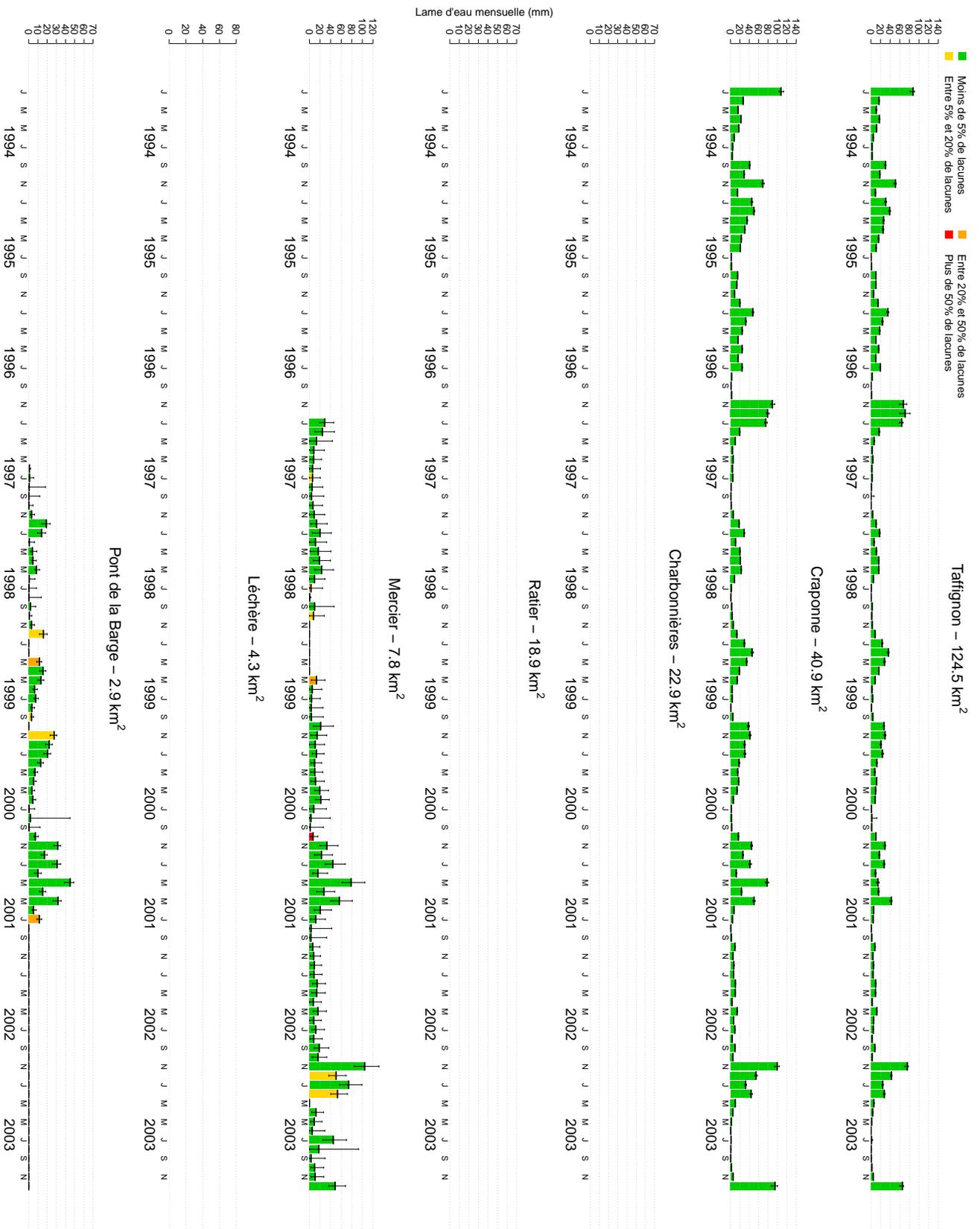
139 y=as.numeric(y)
140 xout=as.numeric(xout)
141 a=(y[1]-y[2])/(x[1]-x[2])
142 b=y[1]-a*x[1]
143 yout=a*xout+b
144 return(yout)
145 }
146 #####
147 # 'x' must be a vector of length 2
148 # 'y' must either have 2 rows and 'n' columns or 2 columns and 'n' rows.
149 # 'xout' can either be a single value or a vector of length 'm'
150 # The function returns a matrix which either has...
151 # - 'm' rows and 'n' columns OR
152 # - 'n' rows and 'm' columns
153 # ... depending on 'y' dimensions.
154 multipleLinearInterpolation<-function(x,y,xout,column=FALSE){
155   if (length(x)!=2){
156     stop("ERROR: 'x' must be a vector of length 2!")
157   }
158   if (nrow(y)==2 & !column){
159     yout=matrix(NA,nrow=length(xout),ncol=ncol(y))
160     for (i in 1:ncol(y)){
161       yout[,i]=linearInterpolation(x,y[,i],xout)
162     }
163   }else{
164     if (ncol(y)==2){
165       yout=matrix(NA,nrow=nrow(y),ncol=length(xout))
166       for (i in 1:nrow(y)){
167         yout[i,]=linearInterpolation(x,y[i,],xout)
168       }
169     }else{
170       stop("ERROR: 'y' must either have 2 rows and n columns OR 2 columns and n rows!")
171     }
172   }
173   return(yout)
174 }
175 #####
176 #create a time sequence between 'beg' and 'end' for different time step
177 #return a chron object with dates sequence
178 seqTimes <-function(beg,end,by){
179   begPOSIXct=ISOdatetime(as.numeric(as.character(years(beg))),as.numeric(months(beg)),as.numeric(
180     days(beg)),
181     as.numeric(hours(beg)),as.numeric(minutes(beg)),as.numeric(seconds(beg)),tz="GMT")
182   endPOSIXct=ISOdatetime(as.numeric(as.character(years(end))),as.numeric(months(end)),as.numeric(
183     days(end)),
184     as.numeric(hours(end)),as.numeric(minutes(end)),as.numeric(seconds(end)),tz="GMT")
185   if (by=="hours"){seq=seq(begPOSIXct,endPOSIXct,by="hour")}
186   }else if (by=="minutes"){ seq=seq(begPOSIXct,endPOSIXct,by="min")}
187   }else if (by=="seconds"){ seq=seq(begPOSIXct,endPOSIXct,by="sec")}
188   }else if (by=="days"){ seq=seq(begPOSIXct,endPOSIXct,by="day")}
189   }else if (by=="months"){ seq=seq(begPOSIXct,endPOSIXct,by="month")}
190   }else if (by=="years"){ seq=seq(begPOSIXct,endPOSIXct,by="year")}
191   }else{stop("ERROR: 'by' must be \"hours\", \"minutes\", or \"seconds\"")}
192   seq=as.chron(seq,out.format=c("d/m/y","h:m:s"))
193   return(seq)
194 }

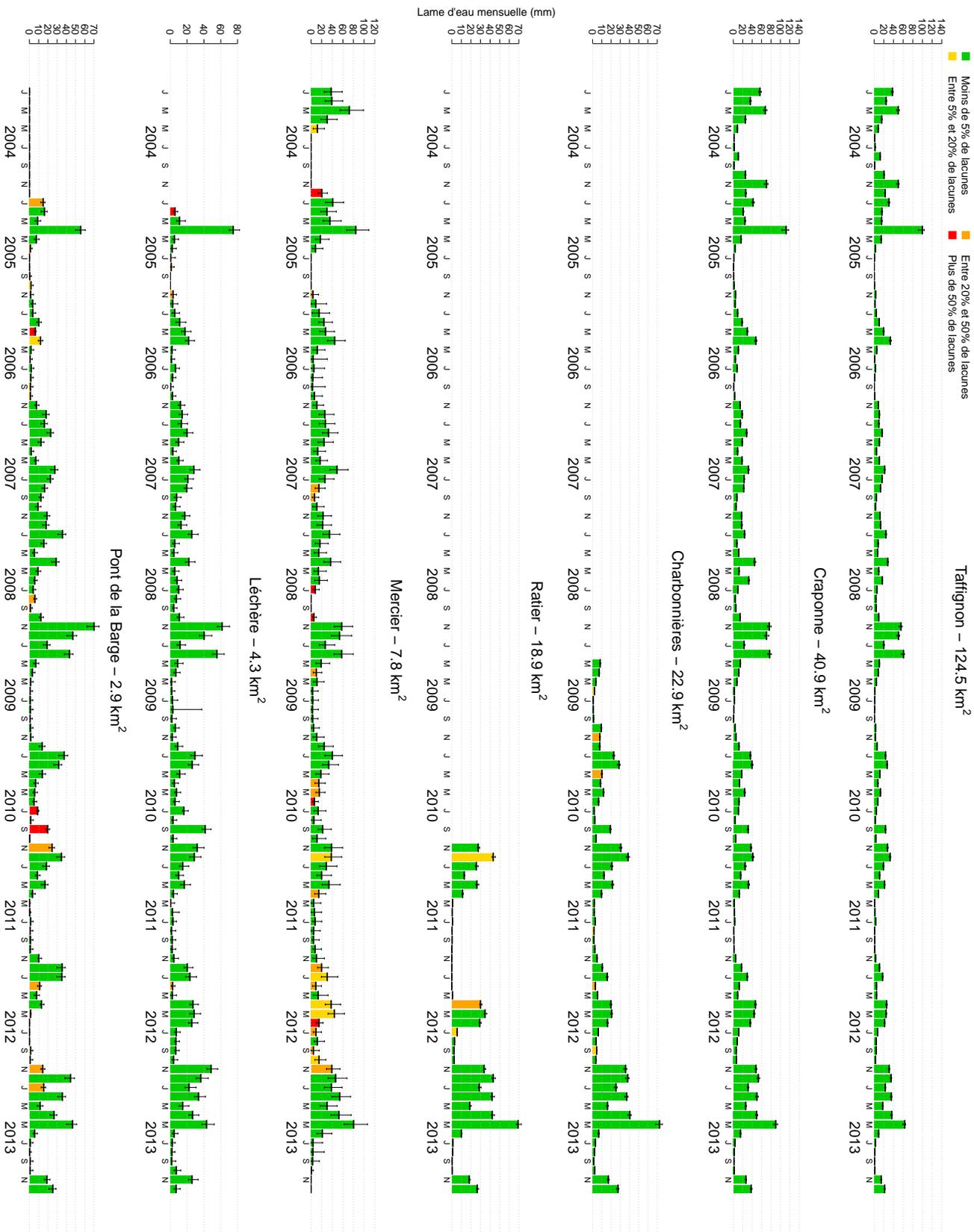
```

Annexe X. Lame d'eau mensuelles









	<p><u>Diplôme</u> : Ingénieur de l'Institut Supérieur des Sciences Agronomiques, Agroalimentaires, Horticoles et du Paysage</p> <p><u>Spécialité</u> : Génie de l'environnement</p> <p><u>Spécialisation / option</u> : Sol Eau Hydrosystèmes</p> <p><u>Enseignant référent</u> : Youssef FOUAD</p>
<p><u>Auteur(s)</u> : Ivan HORNER</p>	<p><u>Organisme d'accueil</u> : IRSTEA Lyon-Villeurbanne</p>
<p><u>Date de naissance*</u> : 27/04/1989</p>	<p><u>Adresse</u> : 5, rue de la Doua, 69100 Villeurbanne</p>
<p><u>Nb pages</u> : 52 <u>Annexe(s)</u> : 10</p>	<p><u>Maîtres de stage</u> :</p>
<p><u>Année de soutenance</u> : 2014</p>	<p>Flora Branger et Raphaël Le Boursicaud</p>
<p><u>Titre français</u> : Quantification des incertitudes hydrométriques et impact sur les bilans hydrologiques - Application au bassin versant de l'Yzeron (ouest Lyonnais)</p>	
<p><u>Titre anglais</u> : Quantification of hydrometric uncertainties and impacts on hydrological signatures – application to the Yzeron catchment (near Lyon, France)</p>	
<p><u>Résumé</u>: Les chroniques de débits ou hydrogrammes sont utilisées à de nombreuses fins : gestion des cours d'eau, d'ouvrages hydrauliques, modélisations hydrologiques, etc. Or, ce sont des données incertaines. Elles sont obtenues par transformation de chroniques de hauteurs d'eau par l'intermédiaire de courbes de tarage, source principale d'incertitude. L'objectif de mon stage de fin d'étude, réalisé dans l'unité Hydrologie-Hydraulique d'IRSTEA Lyon, était de quantifier les incertitudes associées aux hydrogrammes et d'étudier leurs impacts sur quelques indicateurs de bilan pour les sept stations hydrométriques du bassin versant de l'Yzeron (ouest Lyonnais). La méthode BaRatin (BAYesian RATInG curve analysis), combinant une approche hydraulique et les informations fournies par les jaugeages, permet d'estimer les courbes de tarage et les incertitudes associées, et de les propager aux hydrogrammes. Les incertitudes associées aux hydrogrammes et à quelques indicateurs de bilan (moyennes, lames d'eau mensuelles et annuelles, courbes de débits classés) ont été quantifiées. De fortes incertitudes ont été obtenues (de l'ordre de +/-20% pour les hydrogrammes et jusqu'à +/-50% pour certains indicateurs de bilan). L'obtention de certaines enveloppes d'incertitudes non réalistes a permis de mettre en évidence certaines limites de la méthode BaRatin. La méthode semble également surestimer les incertitudes pour certaines stations disposant de peu de jaugeages. En conclusion, les incertitudes hydrométriques méritent d'être quantifiées afin de faire un usage raisonné de ces données et d'aider à l'interprétation et aux décisions qui peuvent découler de leur utilisation. Des améliorations de la méthode BaRatin sont nécessaires et seront apportées dans le futur.</p>	
<p><u>Abstract</u>: Discharge time series, used for many purposes (river and hydraulic structure management, hydrological modeling ...) are uncertain data. They are obtained from stage time series using a rating curve, which is a major source of uncertainty. The objective of my internship in the Hydrology-Hydraulic department of IRSTEA Lyon was to quantify the uncertainties associated to discharge time series and study their impact on some hydrological signatures for seven hydrometric stations of the Yzeron catchment (near Lyon, France). The BaRatin (BAYesian RATInG curve analysis) method, combining hydraulic knowledge and gaugings, was used to estimate rating curves and associated uncertainties and propagate them to discharge time series. Uncertainties associated to discharge time series and a few hydrological signatures (mean discharge, monthly and annual runoff depth, and flood duration curve) were quantified. Important uncertainties were obtained: about +/-20% for most discharge time series and as high as +/- 50% for some hydrological signatures. Some uncertainty envelopes were unrealistic, highlighting limits to the BaRatin method. The method was also found to overestimate uncertainty for hydrometric stations where only a few gaugings were available. To conclude, discharge time series uncertainties should be quantified in order to properly use this data and help interpretations and decisions whenever they are used. Some improvements of the BaRatin method are necessary and will be undertaken in the future.</p>	
<p><u>Mots-clés</u> : chronique de débits, hydrogramme, courbe de tarage, incertitude, BaRatin, jaugeage, contrôle hydraulique, station hydrométrique, bilans hydrologiques</p>	
<p><u>Key Words</u>: discharge time series, hydrograph, rating curve, gauging, uncertainty, BaRatin, hydraulic control, hydrometric station, hydrological signatures.</p>	