



HAL
open science

BaRatin : propagation des incertitudes aux chroniques de débit

I. Horner, Jérôme Le Coz, Benjamin Renard, Valentin Mansanarez, G. Pierrefeu, R. Le Boursicaud, K. Pobanz, Thomas Berthet

► **To cite this version:**

I. Horner, Jérôme Le Coz, Benjamin Renard, Valentin Mansanarez, G. Pierrefeu, et al.. BaRatin : propagation des incertitudes aux chroniques de débit. irstea. 2015, pp.66. hal-02603517

HAL Id: hal-02603517

<https://hal.inrae.fr/hal-02603517v1>

Submitted on 16 May 2020

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

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

BaRatin : propagation des incertitudes aux chroniques de débit

Ivan Horner (Irstea)
Jérôme Le Coz (Irstea)
Benjamin Renard (Irstea)
Valentin Mansanarez (Irstea)
Gilles Pierrefeu (CNR)
Raphaël Le Boursicaud (CNR)
Karine Pobanz (CNR)
Thomas Berthet (CNR)

Erratum :

Modification des figures 7, 12, 17, 22, 29, 34 et 39.

Correction des valeurs d'incertitudes reportées dans le texte.



BaRatin : propagation des incertitudes aux chroniques de débit

Rapport d'étude – Collaboration CNR-IRSTEA

Ivan Horner (Irstea)
Jérôme Le Coz (Irstea)
Benjamin Renard (Irstea)
Valentin Mansanarez (Irstea)
Gilles Pierrefeu (CNR)
Raphaël Le Boursicaud (CNR)
Karine Pobanz (CNR)
Thomas Berthet (CNR)

Novembre 2015
18/08/2016 – version définitive

Table des matières :

1.	Présentation de l'étude CNR/IRSTEA – Introduction	1
1.1.	Contexte et enjeux	1
1.2.	Objectifs de l'étude	1
1.3.	Déroulement de l'étude	2
2.	Présentation de BaRatin	4
2.1.	Analyse des courbes de tarage.....	4
2.2.	Analyse des courbes de tarage double niveau	6
2.3.	Propagation des incertitudes aux hydrogrammes	7
2.3.1.	Origines des erreurs affectant les mesures de hauteurs d'eau	7
2.3.2.	Du limnigramme incertain à l'hydrogramme incertain	8
2.3.3.	Quantification des erreurs de mesures des hauteurs d'eau	9
3.	Evaluation de la méthode de propagation des incertitudes aux hydrogrammes	10
4.	Application de BaRatin à quelques stations CNR.....	11
4.1.	Le Rhône à Bognes.....	12
4.1.1.	Analyse hydraulique du site	12
4.1.2.	Les jaugeages	14
4.1.3.	Résultat BaRatin.....	14
4.1.4.	Propagation des incertitudes aux hydrogrammes	17
4.2.	Le Rhône à Pont de Lagnieu	20
4.2.1.	Analyse hydraulique du site	20
4.2.2.	Les jaugeages	22
4.2.3.	Résultat BaRatin.....	22
4.2.4.	Propagation des incertitudes aux hydrogrammes	24
4.3.	Le Rhône à Anthon.....	27
4.3.1.	Analyse hydraulique du site	27
4.3.2.	Les jaugeages	29
4.3.3.	Résultat BaRatin.....	29
4.3.4.	Propagation des incertitudes aux hydrogrammes	31
4.4.	L'Ain à Port Galland	34
4.4.1.	Analyse hydraulique du site	34
4.4.2.	Les jaugeages	36
4.4.3.	Résultats BaRatin	36
4.4.4.	Propagation des incertitudes aux hydrogrammes	38
4.5.	L'Ardèche à Sauze	41

4.5.1.	Analyse hydraulique du site	41
4.5.2.	Les jaugeages	42
4.5.3.	Résultats BaRatin	44
4.5.4.	Propagation des incertitudes aux hydrogrammes	46
4.6.	Le Rhône à Valence	49
4.6.1.	Présentation de la station	49
4.6.2.	Analyse hydraulique du site	50
4.6.3.	Jaugeages.....	51
4.6.4.	Résultats de BaRatin.....	51
4.6.5.	Propagation des incertitudes aux hydrogrammes	53
4.7.	La Saône à Couzon.....	55
4.7.1.	Présentation de la station	55
4.7.2.	Analyse hydraulique du site	56
4.7.3.	Jaugeages.....	57
4.7.4.	Résultats de BaRatin.....	57
4.7.5.	Propagation des incertitudes aux hydrogrammes	59
5.	Conclusions et perspectives.....	62
6.	Bibliographie	63

1. Présentation de l'étude CNR/IRSTEA – Introduction

1.1. Contexte et enjeux

Aucune méthode normalisée n'existe à l'heure actuelle pour l'estimation de l'incertitude des hydrogrammes produits par les stations hydrométriques à niveau simple (courbes de tarage hauteur-débit) ou à double niveau (courbes de tarage hauteur-dénivelée-débit). Irstea a développé depuis 2010 la méthode BaRatin (Le Coz *et al.*, 2014) qui s'appuie sur une approche bayésienne permettant de croiser l'information hydraulique connue a priori avec l'information contenue dans les jaugeages munis de leur incertitude propre.

Cette méthode d'analyse des courbes de tarage hauteur-débit univoques est depuis plusieurs années diffusée auprès des services opérationnels, à travers un logiciel (compatible avec le logiciel BAREME utilisé par les services de l'Etat), un manuel, une liste de diffusion et des formations. Son extension aux courbes de tarage hauteur-débit non univoques fait l'objet des travaux de thèse de Valentin Mansanarez (2013-2016), cofinancés par la CNR et Irstea, avec l'appui du SCHAPI. Les cas traités couvrent notamment l'hystérésis due à la propagation hydraulique, l'influence aval variable, les pertes de charge par débordement, et les détarages dus à la végétation, à la morphodynamique ou d'autres modifications des contrôles hydrauliques.

Par ailleurs, le stage d'Ivan Horner (2014) a permis de développer et tester l'analyse des incertitudes sur les hydrogrammes des stations du bassin-versant de l'Yzeron avec une nouvelle version étendue de BaRatin et des utilitaires développés sous R. Si l'on considère qu'une courbe de tarage est un modèle comme un autre, les trois principales sources d'incertitudes à évaluer sont : les incertitudes liées à la formulation et aux hypothèses du modèle (ici l'équation utilisée pour approcher les contrôles hydrauliques, le nombre de contrôles considérés et leur succession), celles liées au paramétrage du modèle et enfin celles liées aux données d'entrée du modèle, elles-mêmes incertaines (propagation des incertitudes considérées sur le limnigramme, en fonction de la sensibilité de la station).

BaRatin permet une estimation distincte et mathématiquement rigoureuse de ces différentes sources d'incertitude. Cependant, plusieurs questions métrologiques restent à étudier, en particulier la distinction des effets systématiques et non-systématique dans les modèles d'erreur retenus, et l'hypothèse d'indépendance temporelle des erreurs sur les débits de l'hydrogramme. Ce point est important pour maîtriser la propagation des incertitudes sur les débits moyens et autres statistiques sur le régime hydrologique. Une application opérationnelle permettra de progresser sur l'interprétation et l'estimation de l'incertitude des hydrogrammes et d'améliorer l'utilisation opérationnelle de BaRatin.

1.2. Objectifs de l'étude

L'étude vise à développer une méthodologie rigoureuse permettant l'estimation des incertitudes associées aux hydrogrammes. Pour ce faire, la collaboration entre IRSTEA et la CNR porte sur les points suivants :

- Appliquer les outils BaRatin pour calculer l'incertitude sur les séries temporelles de débit (hydrogrammes) de plusieurs stations à enjeux de la CNR, soit 7 stations parmi les stations suivantes : 8 courbes hauteur-débit sur le Rhône à Bognes, à Anthon et à Pont de Lagnieu, Villeurbanne, Beaucaire (finalement traité en station double niveau, voir en 1.3), l'Ain à Port-

Galland, l'Ardèche à Sauze, le Gard à Remoulins, , et 4 courbes à double niveau à Couzon sur la Saône et Ternay, Valence, Viviers sur le Rhône.

- Mener une validation opérationnelle de l'incertitude calculée avec BaRatin sur les hydrogrammes. Deux cas d'étude ont été retenus :
 - Une comparaison à différent pas de temps des estimations faites à Bognes et des débits turbinés à l'usine de Génissiat situé à 1.5km à l'amont de Bognes.
 - Une comparaison sur les maximums instantanés annuels, les VCN_{30} et les moyennes annuelles entre la station de Sauze sur l'Ardèche et la station de la banque hydro de Vallon situé à quelques kilomètres à l'amont.
- Accompagner les agents CNR chargés d'utiliser les outils BaRatin en interne (en particulier K. Pobanz et Th. Berthet), de façon à ce qu'ils puissent traiter les stations restantes.

L'étude d'Ivan Horner, commencé le 17 novembre 2014, a duré six mois. Les livrables fournis par Irstea consistent en :

- le compte rendu de la première réunion technique de l'Etude (envoyé le 22 décembre 2014) ;
- le présent rapport d'étude synthétisant les études menées et les conclusions sur la méthode actuelle et ses futurs développements ;
- les fichiers complets des calculs BaRatin pour chaque station traitée ;
- le logiciel BaRatin, sa documentation (guide utilisateur) et les utilitaires permettant de réaliser ces calculs.

1.3. Déroulement de l'étude

Une première réunion le 4 décembre 2014 a permis de rappeler le contexte de l'étude et de présenter le principe de la propagation des incertitudes du limnigramme vers l'hydrogramme à partir d'une courbe de tarage issue de BaRatin. Les différentes sources d'incertitudes ont été détaillées et discutées : limnigramme en entrée, paramètres de la courbe de tarage, modèle mathématique de la courbe de tarage. Cette réunion a également permis :

- Une première discussion sur la répartition des stations sur lesquelles BaRatin sera appliqué entre Ivan Horner (IRSTEA) et Thomas Berthet (CNR),
- La mise en place de visites d'Ivan Horner à la CNR pour la récupération de données (fait le 15 janvier 2015 et le 19 février 2015),
- La programmation d'une formation sur BaRatin à la CNR le 5 février 2015

La formation BaRatin, le 5 février 2015, fut l'occasion de faire quelques rappels sur la méthode BaRatin avant une mise en pratique sur trois stations de la CNR : Pougny, Pont de Lagnieu et Beaucaire. Jérôme Le Coz fit une démonstration de l'application de la méthode depuis la définition des *a priori* hydrauliques (fait avant la réunion et à partir de données diverses : topographie du modèle hydraulique du Rhône, lignes d'eau, photos, etc...) jusqu'à la mise en œuvre concrète de BaRatin et l'analyse des résultats. Cette démonstration fut un succès et a permis de montrer qu'à partir d'un minimum d'information sur le fonctionnement hydraulique d'une station, sans connaissance des jaugeages, il était possible de définir de façon suffisamment précise les *a priori* hydrauliques nécessaires à l'application de BaRatin. Lors du « BaRatinage » de Beaucaire, une influence aval de la mer méditerranéenne a été mise en évidence (différentes pentes de lignes d'eau observées entre la station de Beaucaire et une autre station en aval). Il a donc été suggéré de traiter cette station comme une relation hauteur-dénivelée-débit plutôt que hauteur-débit.

Une dernière réunion fut organisée le 6 octobre 2015 à la CNR. Elle avait pour objet de présenter les résultats obtenus et de discuter le contenu du présent rapport. En particulier, les points suivants furent abordés : interprétations des graphiques présents dans le rapport, les attentes de la CNR en termes de

représentation des incertitudes associées aux hydrogrammes ainsi que la description de la méthodologie développée au cours de l'étude.

Enfin, la valorisation du travail effectué a constitué la dernière phase de cette étude aux travers du présent rapport ainsi que la rédaction d'un article scientifique présentant les principaux résultats d'évaluation de la méthode.

Le rapport d'étude comprend :

- Une description de la méthode BaRatin et en particulier une description détaillée des récents développements réalisés dans le cadre de l'étude qui concernent la propagation des incertitudes aux hydrogrammes
- les analyses BaRatin (estimation des incertitudes associées aux courbes de tarage et aux hydrogrammes) pour les stations de Bognes, Anthon, Sauze, Pont de Lagnieu, Port Galland, Couzon et Valence
- une présentation des travaux de validation de la méthode réalisée dans le cadre de l'étude dans l'article scientifique (non publié) en annexe.

2. Présentation de BaRatin

2.1. Analyse des courbes de tarage

La méthode BaRatin (pour Bayesian RATING curve analysis, Le Coz *et al.*, 2014) 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 $Q = a(h - b)^c$ peuvent être utilisées (voir Tableau 1). La topographie et/ou la géométrie des contrôles font qu'ils s'activent et se désactivent (Figure 1) selon la hauteur d'eau. Ces successions ou ajouts de contrôle sont pris en compte et permettent ainsi de décrire le fonctionnement hydraulique du site via des équations par segments. 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.

Tableau 1: Valeurs des paramètres a , b et c données par les formules hydrauliques correspondant aux contrôles les plus classiques (pour plus de détails, voir Le Coz *et al.*, 2014)

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, $V^2/2g \ll H$	$CB\sqrt{2g}$	Hauteur de la crête du seuil	1.5
Section « triangle »	Perpendiculaire à l'écoulement, pas d'influence aval, $V^2/2g \ll H$	$C \tan(\alpha/2) \sqrt{2g}$	Hauteur du sommet bas du triangle	2.5
Orifice	Perpendiculaire à l'écoulement, pas d'influence aval, $V^2/2g \ll H$	$CS\sqrt{2g}$	Hauteur du centre de l'orifice	0.5

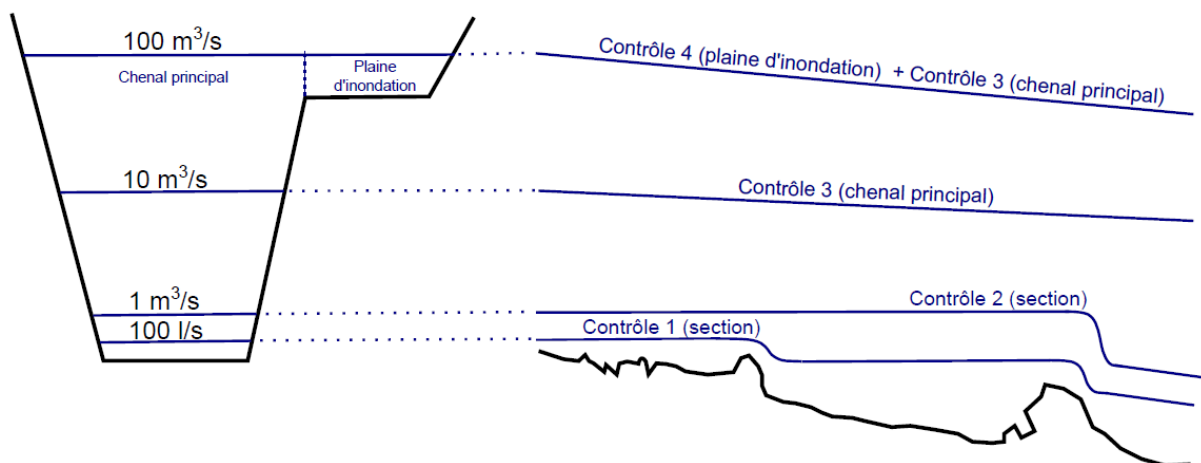


Figure 1: Succession de contrôles par sections et chenaux pour une station hydrométrique classique sans contrôles artificiels. Le fond du cours d'eau et les lignes d'eau pour différents débits sont représentés sur une section (à gauche) et sur un profil en long du cours d'eau (à droite). (D'après Le Coz *et al.*, 2014).

Par ailleurs, les jaugeages (dont les incertitudes associées sont également estimées avant l'application de BaRatin) sont donnés à BaRatin qui calcule une distribution *a posteriori* des paramètres a , b et c . Cette distribution *a posteriori* combine l'information apportée d'une part par les jaugeages et d'autre part, par les *a priori* hydrauliques.

En pratique, à partir d'un jeu de paramètres *a priori* (moyennes et écart-types) et l'information contenue dans les jaugeages, BaRatin produit une multitude de jeux de paramètres, chacun correspondant à une courbe de tarage possible. Une des courbes de tarage, appelée courbe de tarage *MaxPost*, est proposée comme étant la plus probable. La courbe de tarage *MaxPost* est calculée à l'aide de l'équation du modèle hauteur-débit et du jeu de paramètres ayant la plus forte densité de probabilité *a posteriori*. A partir de l'ensemble des échantillons de courbes de tarage, pour une hauteur donnée, on peut calculer l'incertitude à 95% associée à la conversion hauteur-débit en calculant les quantiles 2.5% et 97.5%, ainsi que toute autre enveloppe d'incertitude en adaptant les quantiles souhaités.

Notez que deux incertitudes distinctes affectent la courbe de tarage : l'incertitude paramétrique (liée aux nombreux jeux de paramètres possibles) et l'incertitude structurelle (liée à l'imperfection de l'équation choisie pour la courbe de tarage). Cette dernière est un bruit gaussien centré sur zéro dont l'écart-type est une loi affine proportionnelle au débit (les deux paramètres de l'écart-type sont estimés par BaRatin). La combinaison des deux incertitudes constitue l'incertitude totale associée à la courbe de tarage.

2.2. Analyse des courbes de tarage double niveau

Les courbes de tarage simple niveau (voir la section 2.1) ne sont applicables que dans les cas où la relation hauteur-débit est gouvernée par une section de contrôle ou bien un chenal de contrôle avec une pente d'énergie constante. Dans le cas idéal, la pente d'énergie est parallèle à la pente de la ligne d'eau et au fond du lit du cours d'eau. Or, dans certaines conditions, la pente de la ligne d'eau varie du fait de conditions aval variables : barrage, confluence avec un autre cours d'eau, marées de la mer/océan, etc... Dans ces conditions d'influence aval variable, les courbes de tarage « classiques » ne permettent pas une prédiction correcte du débit. Parmi les développements réalisés dans le cadre de la thèse de Valentin Mansanarez (2013-2016), l'étude du cas de l'influence aval variable a conduit à un modèle de courbe de tarage prenant en compte deux hauteurs d'eau permettant le calcul de la pente de la ligne d'eau et ainsi d'approcher la pente d'énergie variable réelle (Mansanarez *et al.*, en préparation) : le modèle SFD (Stage–Fall–Discharge).

La situation la plus courante pour les stations soumises à des influences aval variables est le cas de deux contrôles distincts. Le premier contrôle est assuré par un chenal « classique », i.e. sans aucune influence aval variable, tandis que le second contrôle prend en compte une pente d'énergie variable. Tout comme dans le formalisme de BaRatin, le contrôle par chenal est approché par une loi de Manning-Strickler simplifiée pour un chenal rectangulaire, de largeur constante et homogène (Tableau 1). Le modèle SFD ainsi développé repose sur l'équation suivante (Mansanarez *et al.*, en préparation) :

$$Q(h_1, h_2) = \begin{cases} K_S B \sqrt{(h_1 - h_2 - \delta_h)/L} (h_1 - h_0)^M & \text{si } h_1 < k(h_2) \\ K'_S B' \sqrt{J} (h_1 - h'_0)^{M'} & \text{si } h_1 \geq k(h_2) \end{cases} \quad (1)$$

Où

Q , h_1 et h_2 sont respectivement le débit, la hauteur mesurée à la station principale (amont) et celle mesurée à la station aval.

K_S , B et h_0 sont respectivement le coefficient de rugosité, la largeur et le niveau moyen du fond pour le chenal de contrôle en cas d'influence aval

L la distance séparant les deux points de mesures des deux hauteurs d'eau (h_1 et h_2)

δ_h est l'écart du zéro des deux échelles de mesures des hauteurs h_1 et h_2

K'_S , B' , J et h'_0 sont respectivement le coefficient de rugosité, la largeur, la pente et le niveau moyen du fond pour le chenal de contrôle en l'absence d'influence aval.

M et M' sont les exposants respectifs des deux lois puissances. Une valeur proche de 5/3 est attendue pour ces deux paramètres.

Il est important de noter que la hauteur de transition entre les deux contrôles (avec ou sans une influence aval) est déterminée par une condition de continuité de la courbe de tarage par la fonction $k(h_2)$.

Tout comme pour les courbes de tarage simple niveau (section 2.1), BaRatin nécessite la définition *a priori* sur les valeurs des paramètres de l'équation (équation (1)) et des données de calage (elles-mêmes incertaines) : les jaugeages. Les *a priori* (moyennes et écart-types) sur les 8 paramètres doivent donc être déterminés d'après les caractéristiques physiques du cours d'eau et les connaissances des écoulements pour le site étudié. Les incertitudes associées aux jaugeages, qui comprennent 3 valeurs (deux hauteurs d'eau h_1 et h_2 et un débit Q) doivent également être estimées. BaRatin fournit un ensemble de 500 jeux de paramètres *a posteriori*. Une incertitude structurelle (imperfection du modèle) affine est également estimée dans l'inférence bayésienne permettant une estimation de l'incertitude totale associée à la courbe de tarage.

2.3. Propagation des incertitudes aux hydrogrammes

Pour estimer les incertitudes associées aux hydrogrammes, il convient de propager les incertitudes associées à la courbe de tarage, estimées précédemment, et les incertitudes associées à la chronique de hauteur d'eau ou limnigramme. Un récent développement de la méthode BaRatin s'est concentré sur les erreurs associées aux limnigrammes et à la propagation de toutes les incertitudes aux chroniques de débit ou hydrogrammes.

2.3.1. Origines des erreurs affectant les mesures de hauteurs d'eau

Aux abords d'une station hydrométrique, une échelle graduée, appelée échelle limnimétrique, est classiquement fixée sur une pile de pont ou sur la berge. Cette échelle permet une lecture directe de la hauteur d'eau. Elle constitue la référence de mesure des hauteurs d'eau pour la station. Cependant, elle ne permet qu'une lecture ponctuelle dans le temps. Les mesures des hauteurs d'eau en continu sont réalisées par un limnigraphe (souvent appelé capteur dans la suite du texte), enregistrant les hauteurs d'eau à pas de temps fixe ou variable. Le capteur nécessite un calage avec l'échelle extérieure, la référence. Ce calage est le plus souvent vérifié et ajusté périodiquement.

Les limnigrammes ainsi obtenus sont affectés par des erreurs ayant des origines et des caractéristiques diverses. Ci-dessous, les principales sources d'erreur ayant été identifiées sont listées et décrites :

(1) Erreurs instrumentales ou « bruit de mesure » :

Quel que soit le type de technologie utilisé (flotteur, capteur de pression à membrane ou pneumatique, radar, ultrasons, télémétrie satellitaire, ...), même dans des conditions d'écoulement idéales (niveau d'eau parfaitement constant) et une calibration parfaite du capteur (avec l'échelle extérieure), une mesure sera toujours affectée d'une erreur. Un ensemble de mesures successives d'une même hauteur d'eau réelle constituera un jeu de valeurs légèrement différentes les unes des autres. Ces erreurs sont complètement indépendantes d'un pas de temps à un autre. Il est communément admis que la distribution de ces erreurs est gaussienne centrée sur zéro.

(2) Erreurs sur la représentativité de la hauteur d'eau mesurée :

La surface libre d'un cours d'eau est rarement complètement plane. Les conditions d'écoulement ainsi que d'autres variables environnementales telles que le vent rident et incurvent la surface de l'eau. A l'endroit précis où a lieu la mesure, le niveau d'eau change continuellement et évolue autour d'une valeur moyenne que l'on suppose représentative du niveau d'eau de la section transversale (supposée représentative des conditions 1D d'écoulement). De ce fait, supposant que le capteur mesure parfaitement la hauteur d'eau réelle locale, la mesure, supposée représentative de la hauteur d'eau de l'ensemble de la section transversale, sera affectée d'une erreur liée aux variations locales de la hauteur. Il est raisonnable de supposer que ces erreurs, indépendantes d'un pas de temps à un autre, suivent une distribution gaussienne centrée sur zéro.

(3) Erreurs de calibration du capteur :

Le calage du capteur consiste à s'assurer du bon accord entre le capteur et l'échelle limnimétrique. La calibration n'est jamais parfaite en raison de l'erreur faite lors de la lecture de l'échelle limnimétrique : résolution de celle-ci, son encrassement, faible éclairage, eau très claire, vaguelettes, etc... Entre deux recalages du capteur, les mesures sont donc affectées par une erreur qui est la même pour chaque pas de temps. Cependant, à chaque recalage, cette erreur change. On a ainsi, pour chaque période séparant deux recalages, une erreur systématique inconnue différente. On suppose alors que l'ensemble des valeurs que peut prendre cette erreur (pour chacune des périodes identifiées) suit une distribution gaussienne centrée sur zéro.

(4) Erreurs dues à la dérive du calage :

Si l'on suppose tout bruit de mesure absent, un cours d'eau complètement plat (absence de vaguelettes) et la calibration du capteur, faite lors d'une précédente visite terrain, parfaite, il est tout de même possible de constater un écart entre échelle et capteur lors d'une nouvelle visite terrain : on parle alors de la dérive du calage. Ces écarts peuvent être dus au vieillissement ou au dysfonctionnement de certains composants du capteur ou encore à une accumulation progressive de sable dans le puits de stabilisation du capteur. Il est très difficile de quantifier cette erreur du fait de son évolution inconnue

au cours du temps (évolution lente, de quelques jours à quelques semaines, ou très soudaine). La description de tels comportements n'étant pas évidente, cette erreur a été approximée par une erreur inconnue et constante (la même pour chaque pas de temps) sur la période séparant deux recalages. On considère alors une erreur systématique inconnue qui est différente pour chacune de ces périodes. On suppose que toutes les valeurs que peut prendre cette erreur (sur une très longue période) suivent une distribution gaussienne centrée sur zéro.

2.3.2. Du limnigramme incertain à l'hydrogramme incertain

La description des différentes erreurs faites ci-dessus permet d'identifier deux types d'erreurs distincts : les erreurs non-systématiques ((1) et (2)) et les erreurs systématiques ((3) et (4)). Cette analyse a conduit à construire un modèle d'erreur parcimonieux comportant deux termes d'erreur :

- Un terme d'erreur non-systématique : les erreurs varient d'un pas de temps au suivant et englobent les erreurs de type (1) et (2).
- Un terme d'erreur systématique : les erreurs sont constantes dans le temps, ou tout du moins constantes sur une période largement plus longue que la durée moyenne d'un pas de temps. Ce terme englobe les erreurs de type (3) et (4).

Le modèle d'erreur est le suivant :

$$h(t) = \tilde{h}(t) + \epsilon(t) + \delta \quad (2)$$

où

$h(t)$ est le vrai limnigramme

$\tilde{h}(t)$ est le limnigramme mesuré

$\epsilon(t)$ est le terme d'erreur non-systématique : $\epsilon(t) \sim N(0, \sigma_A^h)$

δ est le terme d'erreur systématique : $\delta \sim N(0, \sigma_B^h)$

A chaque pas de temps, $\epsilon(t)$ est ré-échantillonné alors que δ ne l'est que pour certains pas de temps, correspondant, idéalement, aux dates réelles des recalages du capteur. La méthode d'échantillonnage est définie de façon à prendre en compte le caractère non-systématique de $\epsilon(t)$ et inversement le caractère systématique de δ .

Notons également qu'à un pas de temps donné, l'erreur totale est égale à $\epsilon(t) + \delta$. Conditionnellement à δ , cette erreur totale suit une loi normale de moyenne δ et d'écart-type σ_A^h . On voit ici le rôle fondamentalement différent que jouent les erreurs systématiques et non-systématiques : en un pas de temps donné, l'erreur systématique δ donne la moyenne (inconnue !) de l'erreur totale, tandis que l'erreur non-systématique $\epsilon(t)$ donne l'écart-type σ_A^h de l'erreur totale.

Ainsi BaRatin, à partir ...

- des 500 échantillons de courbes de tarage estimées par BaRatin précédemment (voir en 4)
- du limnigramme mesuré $\tilde{h}(t)$
- de la valeur de σ_A^h
- de la valeur de σ_B^h ...
- ... ainsi que de la liste des pas de temps où ce dernier doit être ré-échantillonné,

... calcule 500 hydrogrammes possibles combinant toutes les sources d'incertitude (paramétrique, structurelle, limnimétrique systématique, limnimétrique non-systématique). Tout comme les courbes de tarage, un hydrogramme *MaxPost* est également calculé à partir du jeu de paramètres le plus probable (le jeu de paramètres *MaxPost*) et du limnigramme mesuré supposé sans erreur. A chaque pas de temps, le calcul des quantiles 2.5% et 97.5% sur les 500 valeurs possibles de débit, permet d'obtenir l'enveloppe d'incertitude à 95%. Toute autre enveloppe d'incertitude peut être calculée de même.

2.3.3. Quantification des erreurs de mesures des hauteurs d'eau

Il est nécessaire d'estimer les deux écarts-types décrivant les erreurs associées aux mesures des hauteurs d'eau, σ_A^h et σ_B^h , et de connaître les pas de temps de recalage du capteur (ou à défaut, une périodicité moyenne) pour mettre en œuvre la propagation des incertitudes par BaRatin. Les deux écarts-types doivent idéalement être estimés au cas par cas, pour chaque station :

Les erreurs non-systématiques (σ_A^h)

Les deux composantes constitutives de ces erreurs (bruit de mesure, σ_{A1}^h et déformations incohérentes de la surface, σ_{A2}^h) peuvent être estimées séparément (si indépendantes l'une de l'autre). Dans ce cas,

$$\sigma_A^h = \sqrt{(\sigma_{A1}^h)^2 + (\sigma_{A2}^h)^2}.$$

- (σ_{A1}^h) Selon le type de technologie et les informations fournies par le fabricant sur la précision du capteur, une quantification de l'écart-type associé au bruit de mesure peut être faite. Il est également possible de le mesurer directement en laboratoire par des essais en conditions de répétabilité.
- (σ_{A2}^h) Les conditions d'écoulement, la présence ou l'absence d'un puits de stabilisation conditionnent l'estimation de la seconde composante contribuant aux erreurs non-systématiques : les vaguelettes, batillage, toute déformation incohérente de la surface. Pour ce terme d'erreur, il est difficile de faire une estimation directe et précise de l'écart-type. Ce dernier peut être estimé à dire d'expert et par observation de l'écoulement in situ.

Une estimation directe de σ_A^h peut aussi être faite. Celle-ci peut en effet être estimée avec l'écart-type d'une série de mesures successives, directement dans le cours d'eau, dans des conditions de batillage représentatives sur une période où la hauteur d'eau ne varie pas. De telles mesures engloberaient les deux sources d'erreurs non-systématiques.

Il est également possible que la valeur de σ_A^h dépende de la hauteur d'eau h . BaRatin prévoit cette possibilité, proposant à l'utilisateur de faire varier sa valeur selon h pour inclure, par exemple, des erreurs bien plus importantes en crue où les vaguelettes seraient beaucoup plus importantes.

Les erreurs systématiques (σ_B^h)

Nous proposons ici deux méthodes permettant l'estimation de cet écart-type :

- La première méthode, la plus recommandée, nécessite d'avoir les dates des recalages du capteur et les écarts constatés entre capteur et échelle à l'occasion des visites terrain depuis la mise en service du capteur. L'écart-type de ces écarts peut alors être pris directement pour estimer σ_B^h . Les dates de recalage permettent de définir les points de ré-échantillonnage de δ . Il est important de noter qu'une visite terrain n'ayant pas entraîné de recalage n'est pas à prendre en compte.
- Lorsque ces informations-là ne sont pas disponibles, il est possible d'estimer grossièrement l'écart-type, à dire d'expert, à partir de la valeur typique des écarts constatés entre échelle et capteur. Cette valeur typique, divisée par 2, permet de définir σ_B^h . Une estimation de la périodicité moyenne des recalages doit également être faite. Elle permet de choisir des pas de temps également espacés dans le temps pour le ré-échantillonnage de δ .

Attention : les deux incertitudes-types (σ_A^h et σ_B^h) ne peuvent en aucun cas être « additionnées » (même en somme quadratique) pour estimer l'incertitude totale affectant les mesures des hauteurs d'eau du fait de leurs dynamiques temporelles complètement différentes. Par exemple une incertitude de +/- 2cm pour les erreurs non-systématiques et une incertitude de +/- 3cm pour les erreurs systématiques ne donnent pas une incertitude totale de +/- 5cm sur les mesures des hauteurs d'eau. On doit plutôt interpréter l'erreur systématique comme la moyenne inconnue de l'erreur totale sur la hauteur d'eau (cf. discussion en section 2.3.2).

3. Evaluation de la méthode de propagation des incertitudes aux hydrogrammes

Un article scientifique en cours de préparation, en annexe du présent rapport, présente les principaux travaux faits en vue d'évaluer la méthode de propagation des incertitudes aux hydrogrammes de BaRatin. Après une introduction et une description de la méthode, l'article explore deux cas d'étude :

- Le cas Bognes-Génissiat : comparaison de la chronique de débit estimée par BaRatin sur le Rhône à Bognes à une chronique de débit de référence précise (débits turbinés de l'usine hydroélectrique de Génissiat mesurés par un système de mesure par ultrason).
- Le cas Vallon-Sauze : comparaison de trois signatures hydrologiques (maximum instantané, VCN₃₀, moyenne annuelle) calculées à partir des chroniques de débits estimées par BaRatin pour deux stations hydrométriques indépendantes situées de part et d'autre des Gorges de l'Ardèche.

Ces travaux ont permis de mettre en évidence un certain nombre d'éléments concernant la propagation des incertitudes par BaRatin :

- un très bon accord des débits estimés par BaRatin à Bognes par rapport à la donnée de référence fournie par les débits turbinés de Génissiat à pas de temps instantané, horaire et journalier a été montré.
- Une bonne cohérence de trois indicateurs hydrologiques calculés pour deux stations indépendantes a été montrée. Ces trois indicateurs, choisis pour les gammes de débits distinctes qu'ils concernent et leurs différents degrés d'agrégation temporelle, ont permis une évaluation globale de la performance de BaRatin.
- Il a été mis en avant l'importance des composantes systématiques des erreurs (erreurs paramétriques et erreurs systématiques liées aux mesures des hauteurs d'eau) qui jouent un rôle majeur pour tout calcul entraînant une agrégation des chroniques originales : moyennes à différent pas de temps, VCN₃₀, etc... La considération d'erreurs uniquement non-systématiques entraînerait une sous-estimation très importante de l'incertitude sur le résultat de ces calculs.
- La facilité de l'approche « spaghetti » qui permet une propagation simple et efficace de l'incertitude sans une quelconque connaissance des modèles statistiques sous-jacents. L'utilisateur est amené à réaliser son calcul (quel qu'il soit) sur chacun des spaghettis (un spaghetti étant un des 500 hydrogrammes possibles estimés par BaRatin). Ensuite le calcul des quantiles désirés sur les 500 résultats ainsi obtenus permet une quantification de l'incertitude hydrométrique.

Au vu des résultats, il est apparu un certain nombre de limites de la méthode actuelle ainsi que des perspectives d'améliorations :

- Le modèle d'erreur structurelle suppose des erreurs complètement non-systématiques alors qu'il est fortement suspecté que l'erreur structurelle possède une composante systématique non négligeable. Ceci n'est certainement pas un problème majeur pour l'établissement de la courbe de tarage et la propagation aux débits instantanés. Néanmoins, cette hypothèse est certainement plus problématique pour des débits agrégés, étant donné que les erreurs systématiques et non-systématiques se comportent très différemment lors de l'agrégation. Ce point est reconnu comme une limite importante de BaRatin dans son état actuel, qui nécessitera des développements méthodologiques non triviaux.
- L'utilisation de jaugeages non indépendants (même méthode, même opérateur, même crue, etc...) introduit probablement une erreur systématique sur la courbe de tarage. Par exemple, c'est le cas des jaugeages sans contact réalisés à haut débit qui nécessitent l'utilisation d'une topographie (souvent la même pour plusieurs jaugeages faits durant une crue) et d'un même coefficient de vitesse ; ceux-ci introduisent probablement une erreur systématique sur le haut des courbes de tarage et donc dans la partie extrapolée.
- Des limites méthodologiques ont été rencontrées lors de la comparaison de séries de données toutes deux incertaines et combinant erreurs systématiques et non-systématiques. Les méthodes « classiques » pour de telles comparaisons supposent des erreurs exclusivement non-systématiques.

4. Application de BaRatin à quelques stations CNR

La méthode BaRatin a été appliquée sur 7 stations de la CNR dont 5 simples niveaux (relation hauteur-débit) et 2 doubles niveaux (relation hauteurs-dénivelée-débit) :

- Les courbes à simple niveau : le Rhône à Bognes, Pont de Lagnieu, Anthon; l'Ain à Port-Galland, l'Ardèche à Sauze.
- Les courbes à double niveau : Le Rhône à Valence et la Saône à Couzon.

Pour chacune des stations, la présentation de l'application de la méthode sera déclinée en trois parties :

- une analyse hydraulique du site : de l'identification des contrôles à la formulation des *a priori* pour BaRatin ;
- une rapide description des choix faits concernant les jaugeages utilisés et leurs incertitudes ;
- une présentation et critique des courbes de tarage estimées
- une présentation de la mise en œuvre de la propagation des incertitudes aux hydrogrammes et des résultats.

Les informations sur les *a priori* hydrauliques ont essentiellement été tirées :

- des mesures de distances faites sur le site internet Géoportail (<http://www.geoportail.gouv.fr/>) en utilisant les photographies aériennes (prises entre 2000 et 2005) de l'IGN (<http://www.geoportail.gouv.fr/donnee/83/photographies-aeriennes-2000-2005>).
- de mesures et calculs faits à partir des profils topographiques utilisés dans le modèle hydraulique du Rhône (OSR) construit avec MAGE et essentiellement la base de donnée topographique du Rhône (BD topo du Rhône).
- des photos prises sur les différents sites par les jaugeurs.
- des lignes d'eau mesurées dont l'on dispose sur chaque bief aménagé du Rhône.

Il est également important de préciser que, dans le présent rapport, toutes les hauteurs sont indiquées en mètre NGF orthométrique, sauf indication contraire. Ce système de nivellement utilisé par la CNR présente des écarts d'altitude de quelques centimètre avec le système IGN69 en vigueur, écarts connus et variables selon les sites.

Les PK (points kilométriques) utilisés dans le présent rapport correspondent aux PK officiels de la CNR.

Les incertitudes estimées dans le cadre de cette étude sont présentées à titre d'illustration de la mise en œuvre de la méthode de propagation des incertitudes aux hydrogrammes. Une considération des incertitudes absolues (en m^3/s) pourrait avoir plus de sens pour certaines applications et pour certains cas, où des incertitudes relatives (en % de la *MaxPost*) très importantes (plus de +/-50%) ont été trouvées.

4.1. Le Rhône à Bognes

Nom :	Bognes	Aménagement aval :	Seyssel
Rivière / Bassin :	Rhône	N° Hydromet :	1016
PK :	160.625	N° GMAO :	GE-PRGE-S03 & SY-PRSY-S08
Taille BV (km ²):	-	N° OASIS	10-0055
		Banque Hydro :	-



4.1.1. Analyse hydraulique du site

Contrôles hydrauliques en jeu

L'aménagement de Seyssel à l'aval de la station de Bognes ne constitue pas une influence aval. Selon la hauteur d'eau, différents contrôles hydrauliques sont en jeu. Pour les plus faibles débits, il est probable qu'une section du cours d'eau (très irrégulière), en aval de la station, contrôle la relation hauteur-débit. A partir d'une hauteur d'eau assez incertaine, la section de contrôle se trouve noyée et le chenal prend le relais comme contrôle. La courbe de tarage issue de BaRatin sera valable jusqu'à des hauteurs avoisinant les 270m (hauteur de débordement approximative déduite de la BD topo du Rhône).

L'hypothèse suivie est donc de considérer deux contrôles successifs pour deux gammes de hauteur d'eau:

- Gamme 1 (bas débits) : contrôle par un radier naturel irrégulier que l'on peut approcher par un seuil rectangulaire à crête horizontale d'une largeur et cote très incertaines.
- Gamme 2 (haut débits) : contrôle entièrement assuré par le chenal du lit mineur que l'on peut assimiler à un chenal rectangulaire, homogène et de largeur constante.

La matrice des contrôles correspondante qui en découle est :

	Seuil	Chenal
1 ^{ère} gamme de hauteur	1	0
2 ^{ème} gamme de hauteur	0	1

Formulation des a priori hydrauliques pour BaRatin

Contrôle n°1 : seuil rectangulaire à crête horizontale équivalent

- La largeur de ce seuil est très incertaine : de 20m, dans le cas d'une largeur de radier très inférieure à la largeur du cours d'eau jusqu'à 70m si le radier de contrôle est très irrégulier et positionné là où le cours d'eau est le plus large (mesures faites sur Géoportail).
- Le coefficient de débit peut être pris aux alentours de 0.45 étant donné que la vitesse d'approche de l'eau au niveau du seuil n'est peut-être pas négligeable.
- La topographie au PK 160 620 (à 5m en aval de la station) a un point bas vers 258.6m et celle au PK 160 480 (145m en aval de la station) vers 258.27m. Le minimum du limnigramme est aux alentours de 259.3m et correspond à des périodes où il n'y a presque pas de débit venant de l'usine et du barrage de Génissiat. La hauteur de la crête du seuil équivalent devrait se trouver dans cet intervalle de hauteurs d'eau, entre 258.5m et 259.5m environs.

Cela conduit aux *a priori* suivants :

Paramètre	Valeur centrale	Incertitude élargie (95%)
Largeur (m)	45	+/- 25
Coefficient de débit	0.45	+/- 0.05
Crête du seuil / b_1 (m)	259	+/- 0.5

Contrôle n°2 : chenal du lit mineur

- La hauteur de transition apparaît assez incertaine. Elle se situe probablement entre 0.5m et 3m au-dessus de la crête du seuil (b_1) (celle-ci peut être assez haute à cause de la complexité de la section de contrôle, celui-ci étant un radier naturel complètement inconnu).
- Des mesures faites sur Géoportail donnent une largeur moyenne du chenal aux alentours de la station de l'ordre de 65m (+/- 15m). Ces valeurs sont en accord avec celles que l'on trouve avec les relevés topographiques (BD topo du Rhône, modèle OSR).
- La pente moyenne du fond de la rivière, estimée à partir des points bas des relevés topographiques faits aux alentours de la station (BD topo du Rhône, modèle OSR), est de l'ordre de 0.3% (+/- 0.2%).
- Le lit du cours d'eau est assez large et peu sinueux. Cela conduit à estimer une rugosité assez faible. On peut supposer un coefficient de Strickler de l'ordre de $30\text{m}^{1/3} \cdot \text{s}^{-1}$ (+/- $5\text{m}^{1/3} \cdot \text{s}^{-1}$).

Les *a priori* retenus pour le second contrôle sont :

Paramètre	Valeur centrale	Incertitude élargie (95%)
Hauteur de transition (m)	260.75	+/- 1.25
Largeur (m)	65	+/- 15
Pente	0.003	+/- 0.002
Rugosité ($\text{m}^{1/3} \cdot \text{s}^{-1}$)	30	+/- 5

Paramètres pour BaRatin :

Paramètre	Valeur centrale	Incertitude élargie (95%)
a_1	90	+/- 50
b_1	259	+/- 0.5
c_1	1.5	+/- 0.05
k_1	260.75	+/- 1.25
a_2	107	+/- 47
c_2	1.67	+/- 0.05

4.1.2. Les jaugeages

Les 135 jaugeages faits à cette station jugés valides par la CNR ont été conservés pour l'étude. Une rapide analyse des jaugeages n'a montré aucun détarage ni aucun jaugeage anormal requérant une analyse plus fine. 3 des jaugeages les plus bas (<260m) correspondent aux jaugeages du nouveau débit réservé fait en décembre 2013. Le jaugeage qui affiche un débit inférieur à $3\text{m}^3/\text{s}$ a été fait en 1991 après 3h d'arrêt de l'usine de Génissiat.

La majorité des jaugeages ayant été réalisée par ADCP, une incertitude élargie (au niveau de confiance 95%) de +/-5% a été attribuée à chaque jaugeage. Il s'agit d'une valeur recommandée dans le guide de l'ONEMA (Le Coz *et al.*, 2011) et en accord avec les résultats de l'intercomparaison ADCP faite par le Groupe Doppler Hydrométrie en 2010 (Pobanz *et al.*, 2011).

4.1.3. Résultat BaRatin

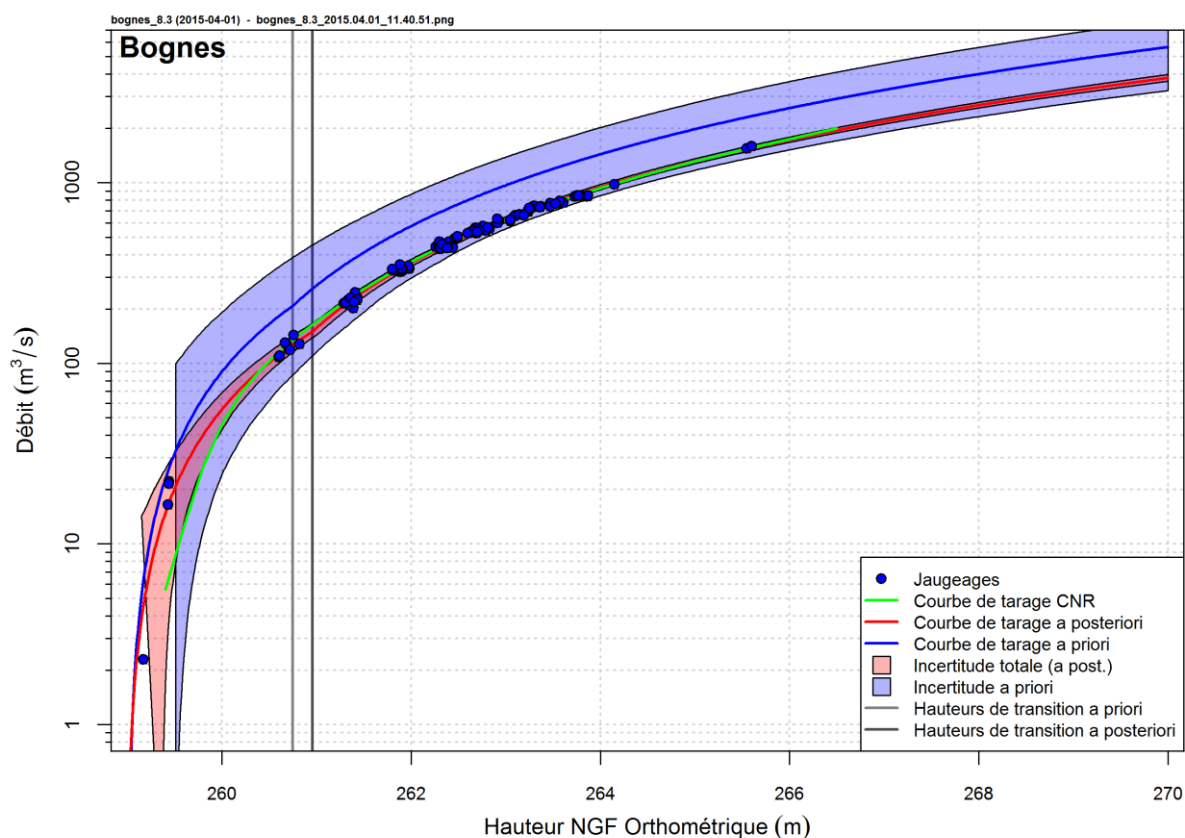


Figure 2: Courbe de tarage de la station de Bognes et enveloppes d'incertitude associées

La demi-longueur de l'intervalle d'incertitude à 95% relatif au débit *MaxPost* estimé par BaRatin est de l'ordre de +/- 3.7% (valeur médiane, Figure 3). Pour les hauteurs inférieures à 261m, celle-ci est supérieure à +/- 9%. Pour les plus fortes hauteurs d'eau, elle ne dépasse jamais les +/- 5%.

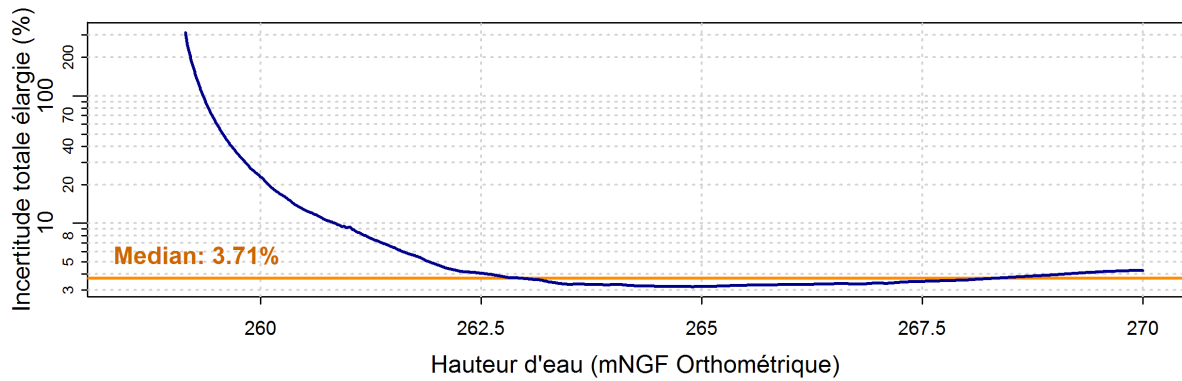


Figure 3: Demi-longueur de l'intervalle d'incertitude à 95% en pourcentage de la *MaxPost* (soit, sous hypothèse Gaussienne, l'incertitude totale élargie) associée à la courbe de tarage de Bognes.

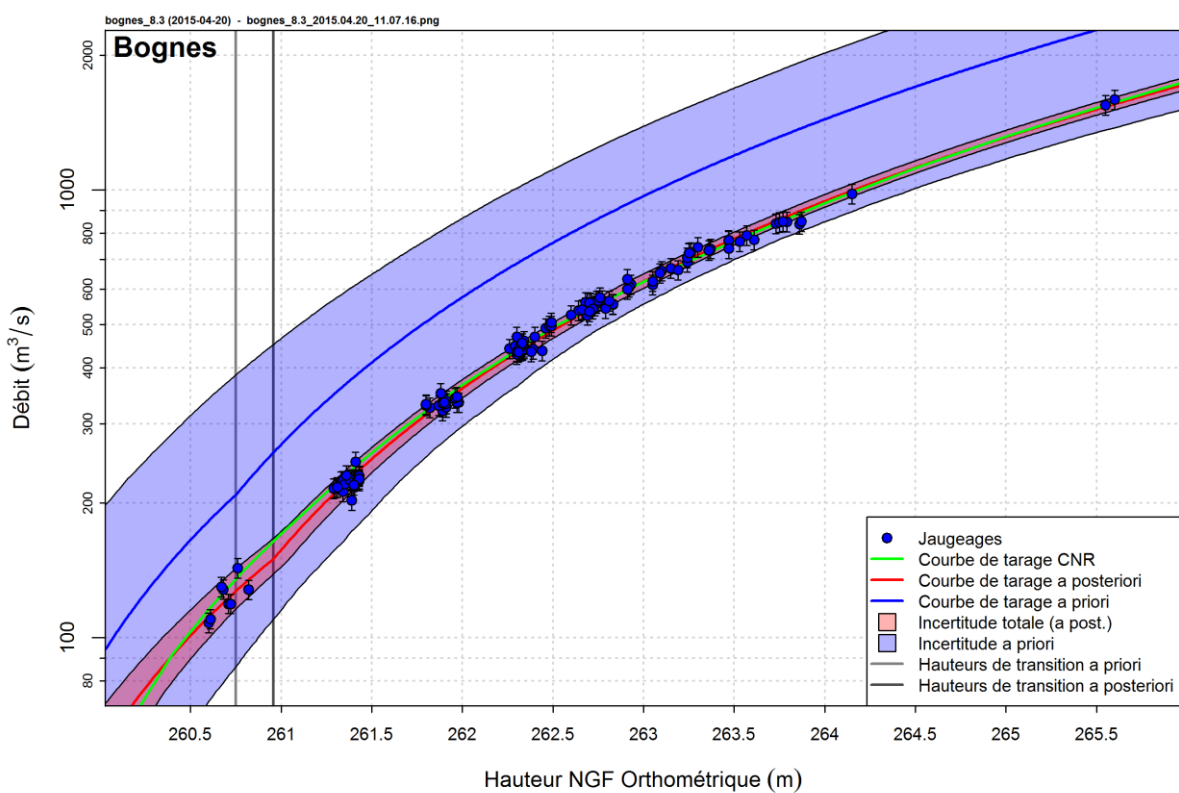


Figure 4: Courbe de tarage de la station de Bognes et enveloppes d'incertitude associées, zoom

La courbe résultante (Figure 2 et Figure 4) est bien en accord avec les jaugeages quelle que soit la gamme de débit considérée. On constate cependant deux écarts avec la courbe de tarage de la CNR actuellement en vigueur (en vert sur le graphique) :

- à bas débit, la courbe de tarage BaRatin est beaucoup plus en accord avec les jaugeages que la courbe de tarage CNR. Les métadonnées sur ces jaugeages bas débit ne permettent pas de les remettre en cause (voir en 4.1.2).
- au niveau de la hauteur de transition, on observe une légère sous-estimation des débits (pour une hauteur d'eau donnée) par la courbe de tarage BaRatin par rapport à la courbe de tarage CNR. Cette cassure nette dans la courbe de tarage BaRatin est due à la transition entre la loi de seuil et la loi de chenal.

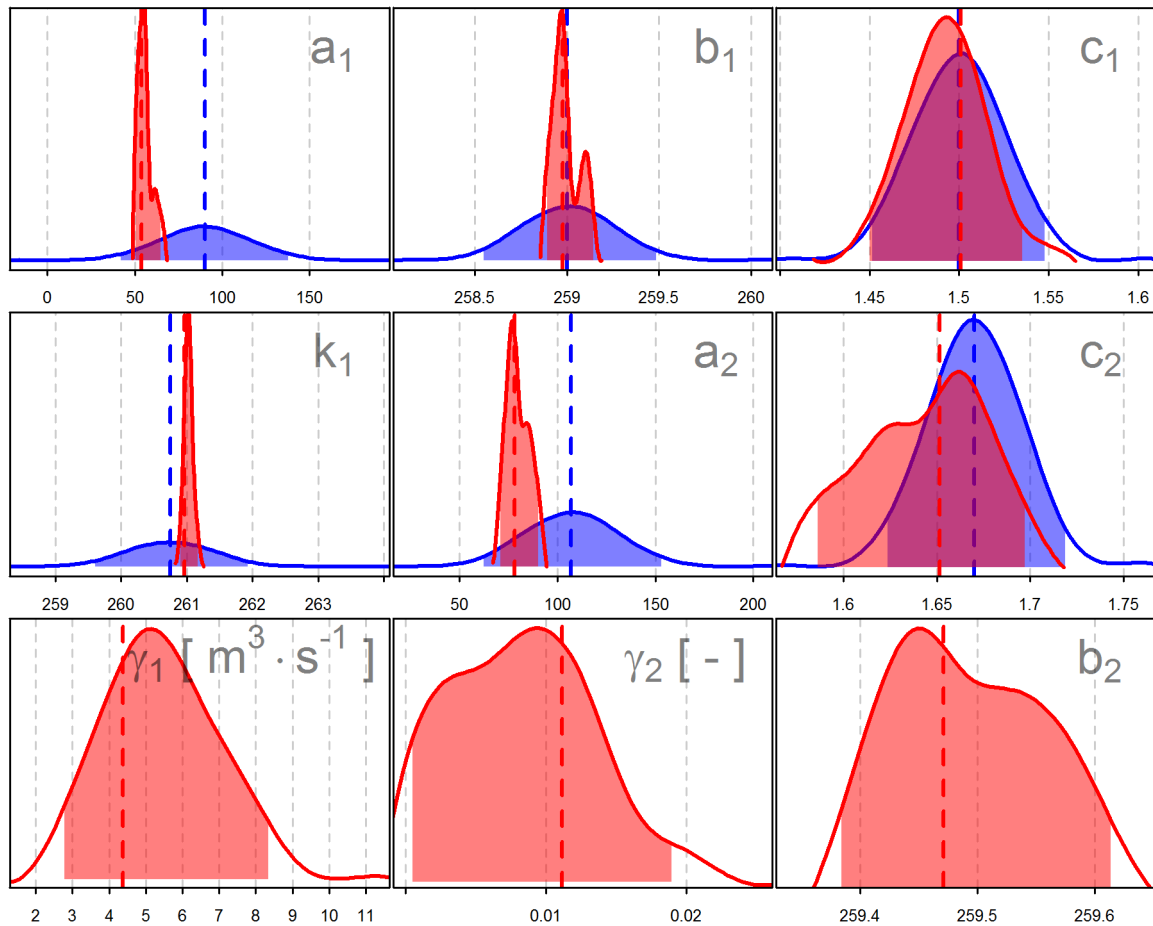


Figure 5: Distributions des paramètres *a priori* (bleu) et *a posteriori* (rouge) pour la station de Bognes, les traits verticaux correspondent aux valeurs moyennes *a priori* (bleu) et *MaxPost* (rouge).

Les paramètres de la courbe de tarage BaRatin *a posteriori* sont tous compris dans les intervalles de confiance fournis *a priori* (voir la Figure 5 et le Tableau 2). On note tout de même un écart important entre la valeur *a priori* et *a posteriori* pour les paramètres a_1 et a_2 . La valeur du paramètre a_1 *a posteriori* suggère une largeur du seuil équivalent d'environ 30m, ce qui paraît faible mais reste réaliste étant donnée la complexité probable du contrôle par le radier pour les bas débits. On constate également une réduction importante des incertitudes associées aux paramètres a_1 , b_1 , k_1 et a_2 grâce à l'information apportée par les jaugeages (bien répartis entre les deux gammes de hauteurs considérées). On note également que le paramètre b_2 , définie par continuité de l'équation de la courbe de tarage, est trouvé vers 259.5m. Cette hauteur, correspondant physiquement au niveau moyen du fond du chenal de contrôle du lit mineur, est donc tout à fait réaliste.

L'incertitude structurelle de la courbe de tarage (imperfection de l'équation choisie) indique *a posteriori* une incertitude incompressible de 3 à $8\text{m}^3/\text{s}$ (paramètre γ_1) et une incertitude relative inférieure à 2% du débit estimé (paramètre γ_2).

Tableau 2: Valeurs des paramètres (et quantiles 2.5% et 97.5%) *a priori* et *a posteriori* pour la station de Bognes.

	<i>a priori</i>		<i>a posteriori</i>	
	moyenne	[2.5% , 97.5%]	MaxPost	[2.5% , 97.5%]
a ₁	90	[40 , 140]	53.734	[50.224 , 65.1]
b ₁	259	[258.5 , 259.5]	258.977	[258.891 , 259.145]
c ₁	1.5	[1.45 , 1.55]	1.501	[1.449 , 1.536]
k ₁	260.75	[259.5 , 262]	260.958	[260.902 , 261.171]
a ₂	107	[60 , 154]	77.888	[70.845 , 90.331]
c ₂	1.67	[1.62 , 1.72]	1.652	[1.585 , 1.698]
γ ₁	Uniforme	[0 , 1000]	4.374	[2.721 , 8.359]
γ ₂	Uniforme	[0 , 1000]	0.011	[0 , 0.019]
b ₂	-	-	259.471	[259.385 , 259.614]

L'équation de la courbe de tarage *MaxPost* est:

$$\text{si } h \leq 260.958: Q(h) = 53.734(h - 258.977)^{1.501}$$

$$\text{sinon } Q(h) = 77.888(h - 259.471)^{1.652}$$

où h est la hauteur d'eau (en mNGF ortho) et Q le débit (en m³/s).

4.1.4. Propagation des incertitudes aux hydrogrammes

L'estimation des incertitudes associées aux mesures des hauteurs d'eau en continu a été faite selon deux stratégies : une estimation de l'écart-type des erreurs non-systématiques (bruit de mesure et vaguelettes) à dire d'expert, d'après la connaissance du site par les gestionnaire de la station et pour les erreurs systématiques (calage du capteur sur l'échelle extérieure et dérive du calage), un nombre non exhaustif de vérifications a permis d'estimer l'écart-type directement à partir des écarts constatés entre échelle et capteur. Ainsi :

- pour les erreurs non-systématique : une incertitude-type élargie de +/-2cm a été estimée (soit un écart-type de 0.01m)
- pour les erreurs systématiques : une incertitude-type élargie de +/-6.8cm a été estimé (soit un écart-type de 0.034m). Une sélection des écarts capteur-échelle jugés les plus représentatifs a constitué la base de cette estimation.

Les résultats sont présentés dans deux figures ci-dessous :

- L'hydrogramme *MaxPost*, sur une courte période, accompagné de son incertitude totale et de chaque incertitude prise individuellement : Figure 6.
- Les demi longueurs des intervalles de confiance à 95% de l'incertitude totale (en pourcentage de la *MaxPost*) sur une années civile à pas de temps horaire, journalier, hebdomadaire, mensuel et annuel : Figure 7.

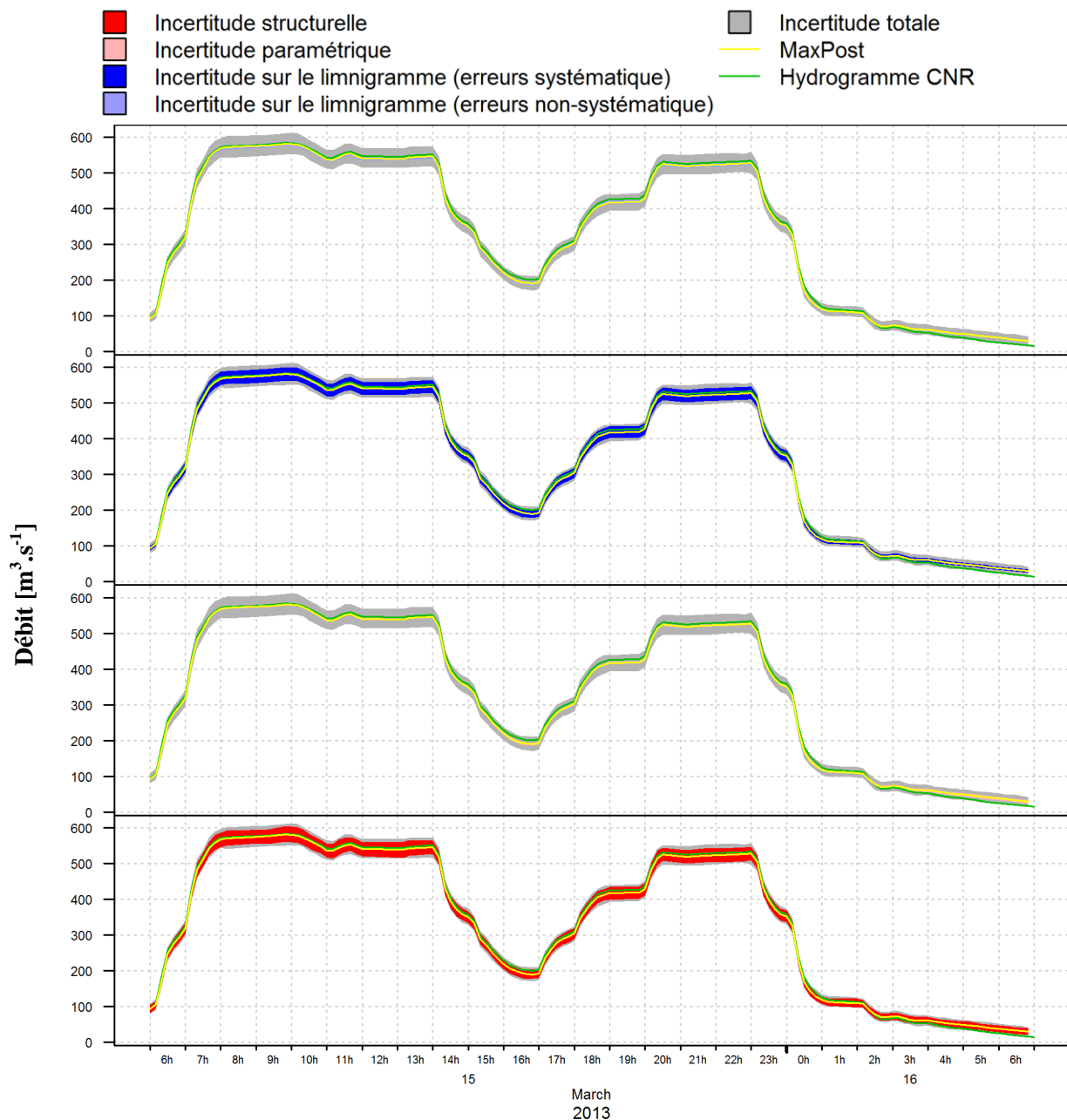


Figure 6: Hydrogrammes *MaxPost* de Bognes et enveloppes d'incertitudes associées. Du graphique du bas à celui du haut sont respectivement présentées : l'incertitude structurelle, l'incertitude paramétrique, l'incertitude sur le limnigramme liée aux erreurs systématiques, l'incertitude sur le limnigramme liée aux erreurs non-systématiques.

La Figure 6 indique que l'hydrogramme à pas de temps variable est essentiellement affecté par les erreurs structurelles (imperfection de la courbe de tarage) et les erreurs systématiques liées aux mesures des hauteurs d'eau. Les erreurs non-systématiques associées aux mesures des hauteurs d'eau paraissent complètement négligeables. On note aussi que les erreurs paramétriques sont très faibles ce qui est une conséquence directe du nombre important de jaugeages.

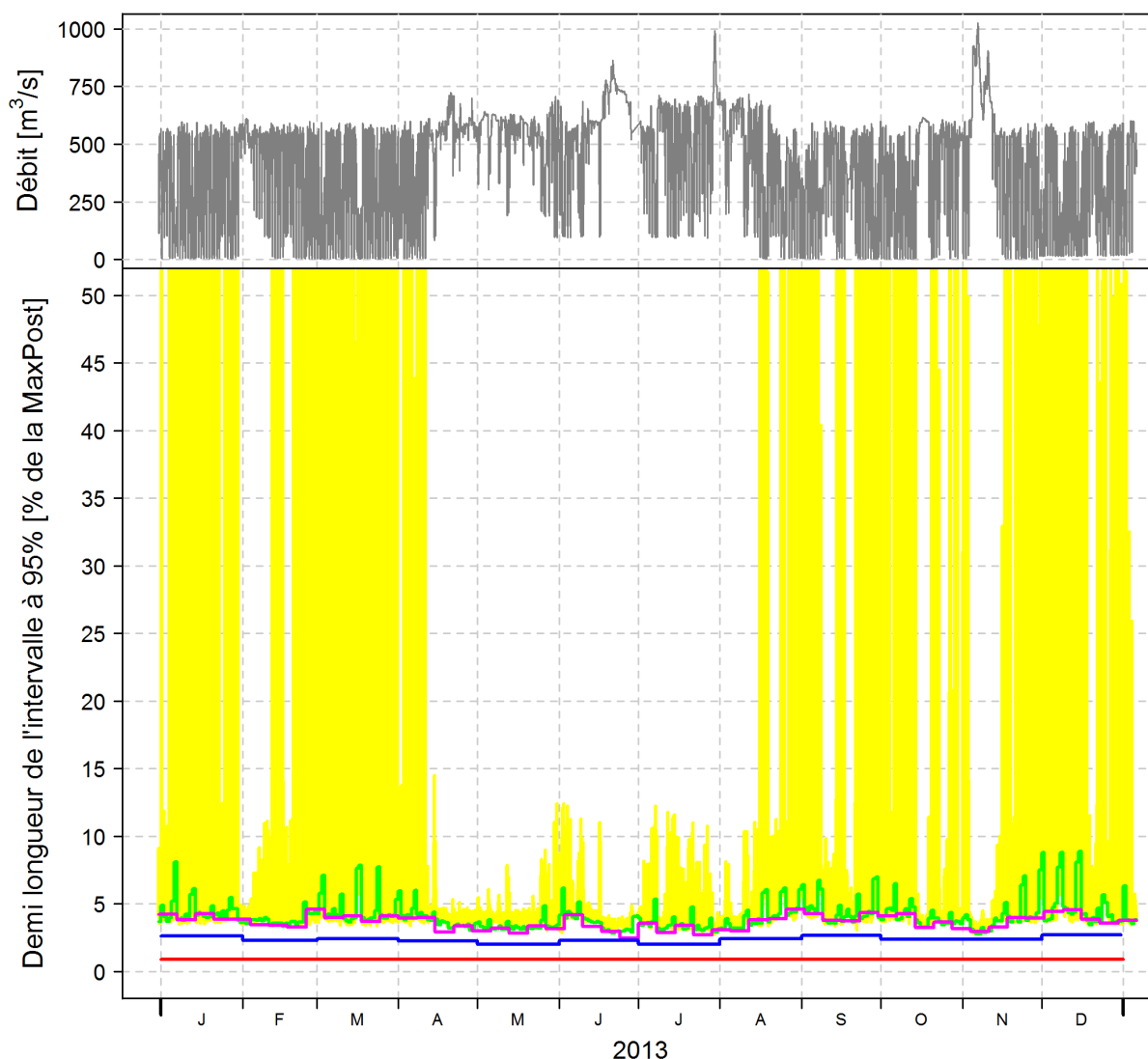


Figure 7: Demis longueurs des intervalles de confiance à 95% pour la station de Bognes à différent pas de temps : horaire (jaune), journalier (vert), hebdomadaire (violet), mensuel (bleu) et annuel (rouge). En haut, l'hydrogramme *MaxPost* de Bognes à pas de temps horaire est également présenté.

La Figure 7 permet de constater d'importantes variations de l'incertitude totale selon la gamme de débit considérée. En effet, à très bas débit, l'incertitude, présentée ici en relatif (par rapport à l'hydrogramme *MaxPost*), devient beaucoup plus importante. On le constate d'une part à pas de temps horaire avec de très fortes variations d'une heure à l'autre et d'autre part à pas de temps journalier où l'incertitude les week-ends (correspondant souvent à des débits faibles) est plus importante que la semaine.

On note également une diminution de l'incertitude totale avec l'agrégation temporelle. A pas de temps horaire celle-ci est difficilement identifiable (du fait des très grandes oscillations entre les bas débits et les haut débits) mais ne semble pas descendre en dessous de +/-3%. A pas de temps journalier celle-ci oscille entre +/-3% et +/-8% alors qu'elle n'oscille plus qu'entre +/-2.5% et +/-5% à pas de temps hebdomadaire. C'est à pas de temps mensuel et annuel, où on observe des incertitudes respectivement de l'ordre de +/-2.5% et +/-1%, que la diminution est la plus nette.

4.2. Le Rhône à Pont de Lagnieu

Nom :	Pont de Lagnieu	Aménagement aval :	-
Rivière / Bassin :	Rhône	N° Hydromet :	283
PK :	56.000	N° GMAO :	SB-PRSB-S09
Taille BV (km ²):	15 400	N° OASIS	10-0285
		Banque Hydro :	V1630020



4.2.1. Analyse hydraulique du site

Contrôles hydrauliques en jeu

La station ne subit aucune influence aval (aucun aménagement ou confluence proche à l'aval). Au vu des lignes d'eau, de l'expertise CNR et des photos aériennes, il est fort probable qu'un contrôle par des radiers naturels se mette en place à bas débit. A partir d'une certaine hauteur d'eau, on passe à un contrôle par le chenal du lit mineur. Pour les hauteurs d'eau supérieures à environ 197m (d'après la BD topo du Rhône), il y a débordement sur le lit majeur, de ce fait, le contrôle par le chenal n'est sans doute plus homogène. L'extrapolation de la courbe de tarage par BaRatin au-delà de cette limite n'est donc pas valide.

On fait donc l'hypothèse que deux contrôles successifs pour deux gammes de hauteurs d'eau :

- Gamme 1 (bas débits) : contrôle par une section de type radier que l'on peut approcher par un seuil rectangulaire à crête horizontale d'une largeur et d'une côte très incertaines.
- Gamme 2 (haut débits) : contrôle par le chenal du lit mineur que l'on peut assimiler à un chenal rectangulaire, uniforme et de largeur constante.

La matrice des contrôles associée est :

	Seuil	Chenal
1 ^{ère} gamme de hauteur	1	0
2 ^{ème} gamme de hauteur	0	1

Contrôle n°1 : seuil rectangulaire à crête horizontale équivalent

- Au vu des photos aériennes, on peut supposer que la largeur est inférieure à la largeur du lit mineur étant données que des zones de haut-fond sont visibles. De tels hauts fonds réduiraient considérablement la largeur de la section de contrôle. De plus, d'après G. Pierrefeu, à bas débits, la largeur n'est plus que de 50% environ de la largeur plein bords du lit de la rivière. La largeur du lit plein bord étant de 190m environ, une largeur incertaine de 75m (+/- 25m) est retenue.
- Le coefficient de débit peut être pris aux alentours de 0.45 étant donné que la vitesse d'approche de l'eau n'est sans doute pas négligeable.
- En aval de la station, au PK 54 700 (à 1 300m en aval de la station), le point bas de la section (BD topographique du Rhône) est plus haut que tous les points bas des sections amont sur plus de 5km. Il se situe vers 190.4m. La hauteur minimale enregistrée par le limnigraphe est de 191.6m. On peut placer la crête du seuil entre ces deux limites, vers 191m (+/- 0.5m).

Cela conduit aux a priori suivants pour le premier contrôle :

Paramètre	Valeur centrale	Incertitude élargie (95%)
Largeur (m)	75	+/- 25
Coefficient de débit	0.45	+/- 0.05
Crête du seuil / b_1 (m)	191	+/- 0.5

Contrôle n°2 : chenal rectangulaire du lit mineur

- On peut situer la hauteur de transition de façon très incertaine entre 0.5m et 3.5m au-dessus de la crête du seuil équivalent.
- Des mesures faites sur Géoportail donnent une largeur moyenne du chenal de l'ordre de 160m (+/- 40m). Ces valeurs sont en accord avec celles que l'on trouve dans la BD topo du Rhône.
- La pente moyenne du fond de la rivière, estimée à partir des points bas des relevés topographiques faits aux alentours de la station (BD topo du Rhône), est de l'ordre de 0.03% (+/- 0.02%).
- Le lit du cours d'eau est assez large et peu sinueux. Cela conduit à estimer une rugosité assez faible de l'ordre de $30m^{1/3}.s^{-1}$ (+/- $5m^{1/3}.s^{-1}$).

Les a priori retenus pour le second contrôle sont :

Paramètre	Valeur centrale	Incertitude élargie (95%)
Hauteur de transition (m)	193	+/- 1.5
Largeur (m)	160	+/- 40
Pente	0.0003	+/- 0.0002
Rugosité ($m^{1/3}.s^{-1}$)	30	+/- 5

Paramètres pour BaRatin :

Paramètre	Valeur centrale	Incertitude élargie (95%)
a_1	150	+/- 53
b_1	191	+/- 0.5
c_1	1.5	+/- 0.05
h_1	193	+/- 1.5
a_2	83	+/- 38
c_2	1.67	+/- 0.05

4.2.2. Les jaugeages

Des 121 jaugeages faits depuis 1993, seul celui du 7 aout 2014 a été écarté, n'ayant pas été validé. La majorité des jaugeages a été faite par ADCP ce qui a conduit à attribuer une incertitude élargie de +/- 5% pour tous les jaugeages.

4.2.3. Résultat BaRatin

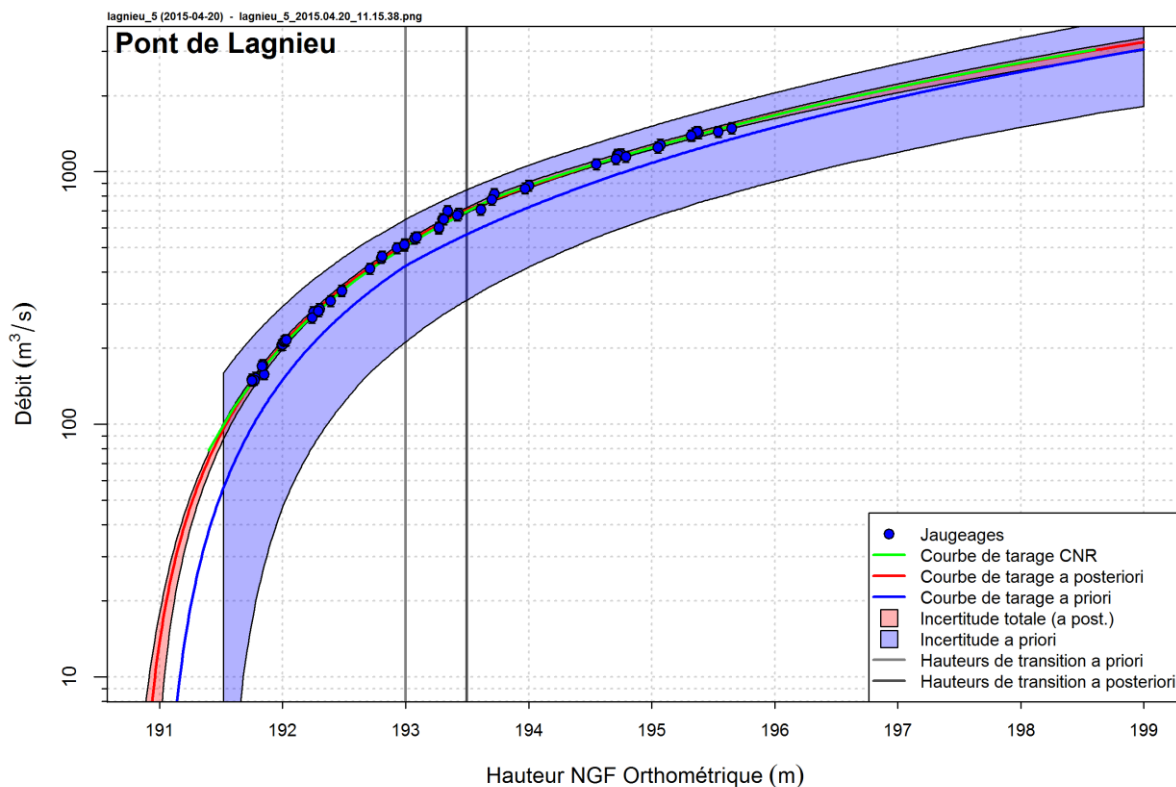


Figure 8: Courbe de tarage de Pont de Lagnieu et enveloppes d'incertitude associées

La courbe de tarage issue de BaRatin (voir Figure 8) est très similaire à celle de la CNR actuellement en vigueur y compris dans ses parties extrapolées, à haut débit et bas débit.

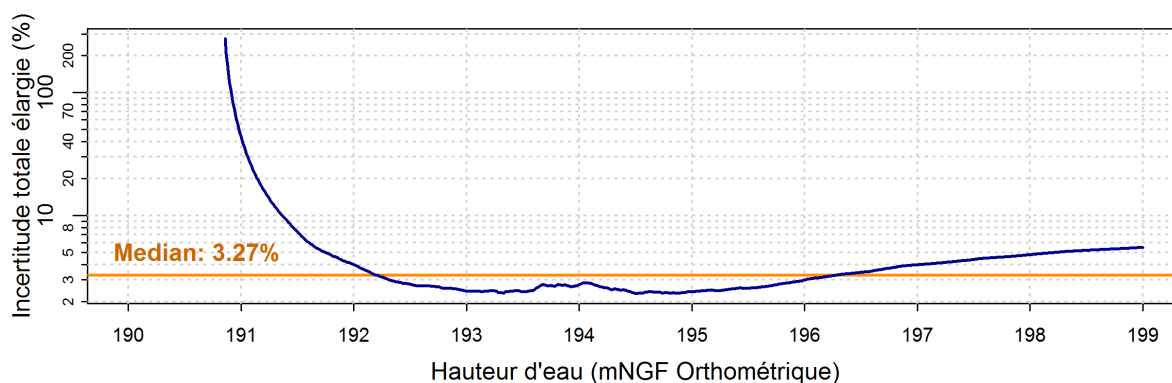


Figure 9: Demi-longueur de l'intervalle d'incertitude à 95% en pourcentage de la *MaxPost* (soit, sous hypothèse Gaussienne, l'incertitude totale élargie) associée à la courbe de tarage de Pont de Lagnieu.

L'incertitude totale a une valeur médiane de +/-3.3% (voir la Figure 9). Celle-ci devient supérieure pour les hauteurs inférieures à 192m et proche de +/-2% pour les gammes de hauteurs d'eau jaugées. Pour les grandes hauteurs d'eau (> 197m, hauteurs non jaugées) l'incertitude est supérieure à +/-4% mais ne dépasse pas les +/-6%.

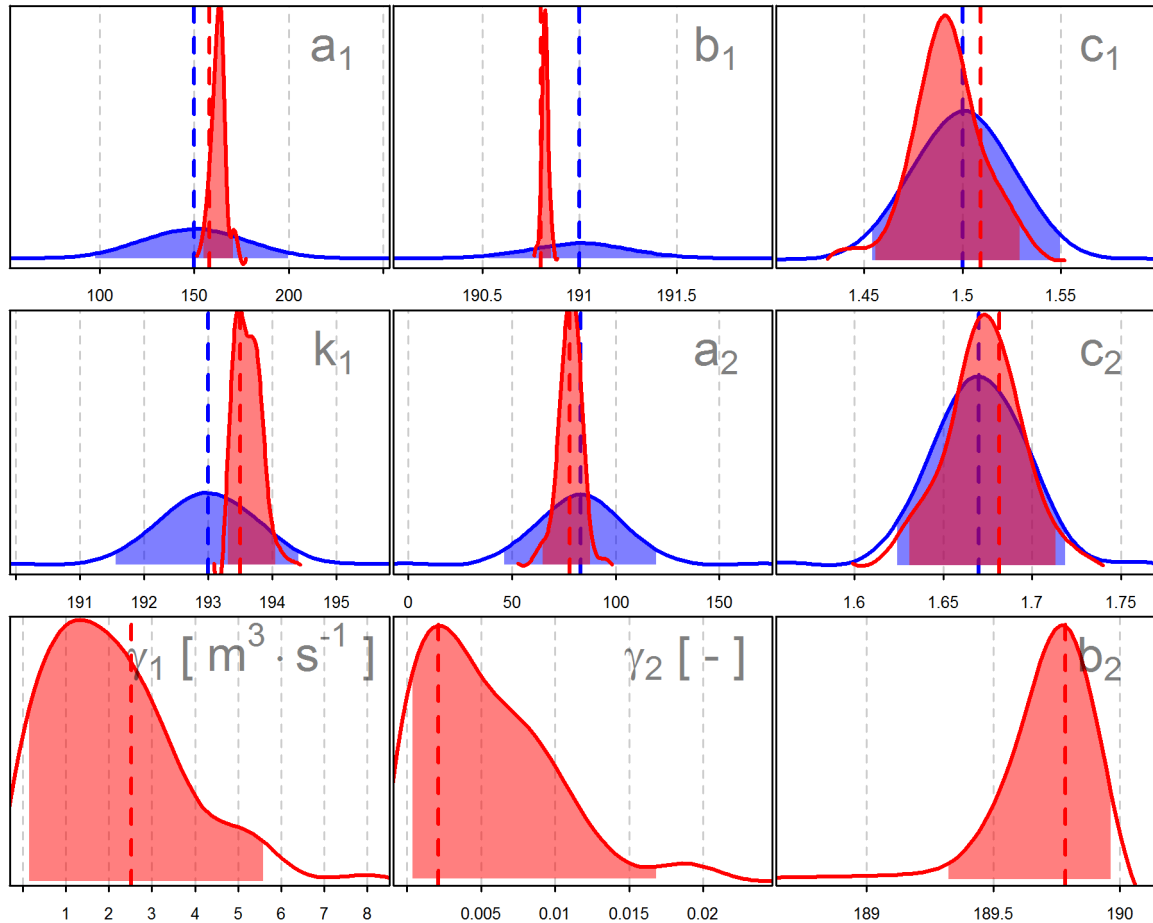


Figure 10: Distributions des paramètres *a priori* (bleu) et *a posteriori* (rouge) pour la station de Pont de Lagnieu, les traits verticaux correspondent aux valeurs moyennes *a priori* (bleu) et *MaxPost* (rouge).

Les paramètres *a posteriori* sont très proches de ceux définis *a priori* (voir Figure 10 et Tableau 3). Le paramètre a_1 qui se situe vers 158 *a posteriori* indique que le radier naturel est plutôt assimilable à un seuil rectangulaire d'une largeur comprise entre 80m et 90m ce qui paraît tout à fait réaliste. Dans l'ensemble, on note une importante réduction des incertitudes pour tous les paramètres (sauf les exposants pour lesquels l'incertitude était déjà très réduite *a priori*) grâce à l'information apportée par les jaugeages. Le paramètre b_2 , défini par continuité, est trouvé vers 189.75m ce qui correspond à un niveau moyen du chenal du lit mineur réaliste.

L'incertitude structurelle est inférieure à $6\text{ m}^3/\text{s}$ (part incompressible : γ_1) et inférieure à 2% (part relative : γ_2) du débit estimé ce qui permet d'être confiant quant au modèle de courbe de tarage choisi pour cette station.

Tableau 3: Valeurs des paramètres (et quantiles 2.5% et 97.5%) *a priori* et *a posteriori* pour la station de Pont de Lagnieu.

	<i>a priori</i>		<i>a posteriori</i>	
	moyenne	[2.5% , 97.5%]	MaxPost	[2.5% , 97.5%]
a ₁	150	[97 , 203]	158.001	[155.04 , 170.791]
b ₁	191	[190.5 , 191.5]	190.801	[190.792 , 190.855]
c ₁	1.5	[1.45 , 1.55]	1.509	[1.456 , 1.528]
k ₁	193	[191.5 , 194.5]	193.498	[193.304 , 194.049]
a ₂	83	[45 , 121]	77.82	[64.71 , 88.186]
c ₂	1.67	[1.62 , 1.72]	1.681	[1.631 , 1.714]
γ ₁	Uniforme	[0 , 1000]	2.519	[0.097 , 5.658]
γ ₂	Uniforme	[0 , 1000]	0.002	[0 , 0.017]
b ₂	-	-	189.785	[189.315 , 189.969]

L'équation de la courbe de tarage *MaxPost* est:

$$\text{si } h \leq 193.498: Q(h) = 158.001(h - 190.801)^{1.509}$$

$$\text{sinon } Q(h) = 77.82(h - 189.315)^{1.681}$$

où h est la hauteur d'eau (en mNGF ortho) et Q le débit (en m³/s).

4.2.4. Propagation des incertitudes aux hydrogrammes

L'estimation des incertitudes associées aux mesures des hauteurs d'eau en continu a été faite à dire d'expert, d'après la connaissance du site par les gestionnaires de la station :

- pour les erreurs non-systématiques (bruit de mesure et vaguelettes), une incertitude-type élargie de +/- 2cm a été estimée
- pour les erreurs systématiques (calage et dérive du calage), une incertitude-type élargie de +/- 3cm a été estimée. Cette valeur correspond à l'écart maximum entre l'échelle extérieure (la référence) et le limnigraphe, qu'il serait possible de constater lors d'une visite terrain. Les visites de terrain, faites en moyenne toutes les semaines (parfois toutes les deux semaines) ont conduit à un ré-échantillonnage régulier à une fréquence similaire. Toutefois, il est important de rappeler que le ré-échantillonnage devrait être fait uniquement en cas de recalage du capteur et non pour un simple contrôle de celui-ci n'ayant pas entraîné de recalage.

Les résultats sont présentés dans deux figures ci-dessous :

- L'hydrogramme *MaxPost*, sur une courte période, associé de son incertitude totale et de chaque incertitude prise individuellement : Figure 6.
- Les demi longueurs des intervalles de confiance à 95% de l'incertitude totale (en pourcentage de la *MaxPost*) sur une année civile à pas de temps horaire, journalier, hebdomadaire, mensuel et annuel : Figure 7.

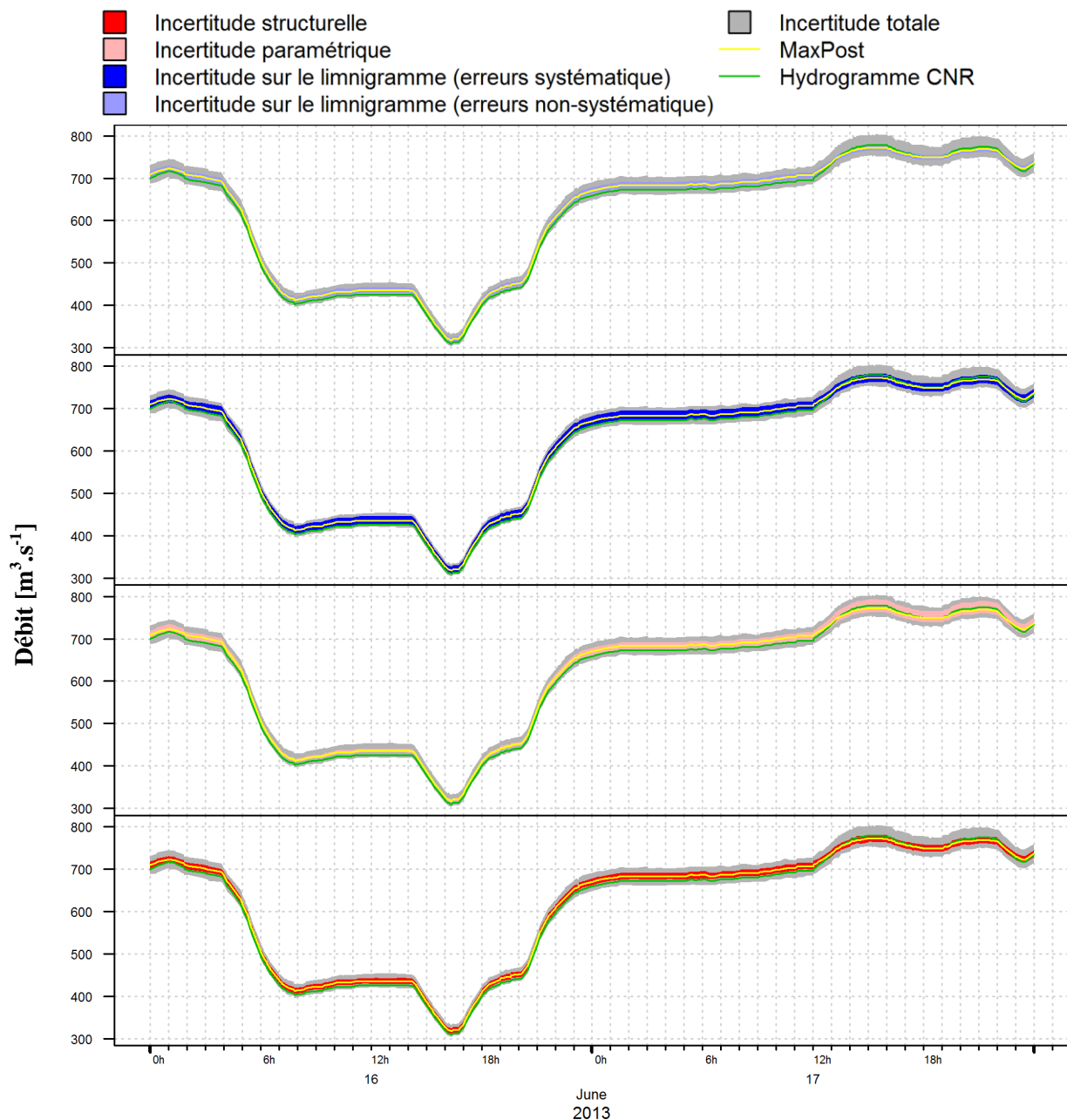


Figure 11: Hydrogrammes *MaxPost* de Pont de Lagnieu et enveloppes d'incertitudes associées. Du graphique du bas à celui du haut sont respectivement présentées : l'incertitude structurelle, l'incertitude paramétrique, l'incertitude sur le limnigramme liée aux erreurs systématiques, l'incertitude sur le limnigramme liée aux erreurs non-systématiques.

La Figure 11 indique que l'hydrogramme à pas de temps variable est essentiellement affecté par :

- les erreurs structurelles (imperfection de la courbe de tarage)
- les erreurs paramétriques
- et les erreurs systématiques associées aux mesures des hauteurs d'eau.

Les erreurs non-systématiques associées aux mesures des hauteurs d'eau sont très faibles.

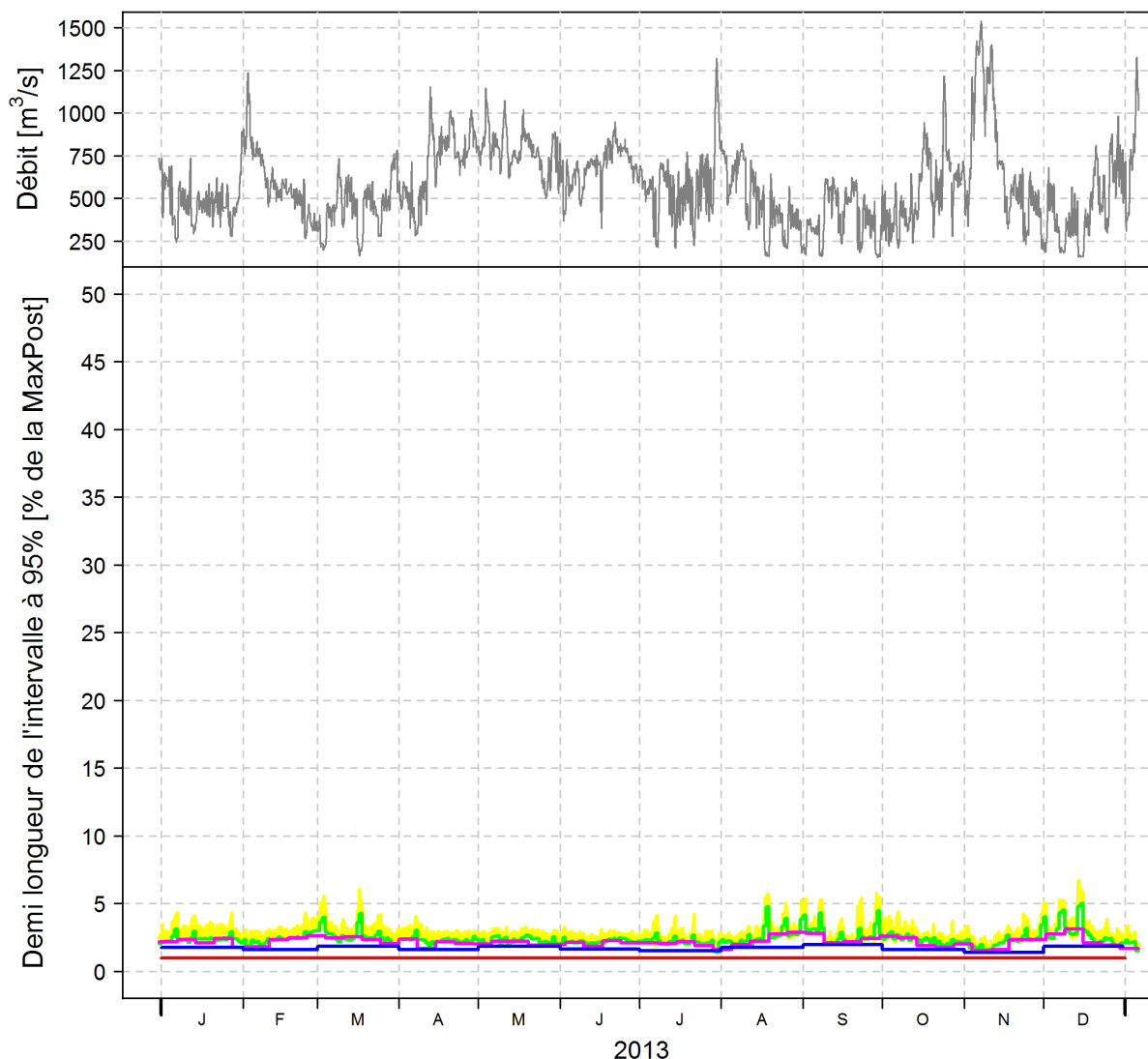


Figure 12: Demis longueurs des intervalles de confiance à 95% pour la station de Pont de Lagnieu à différent pas de temps : horaire (jaune), journalier (vert), hebdomadaire (violet), mensuel (bleu) et annuel (rouge). En haut, l'hydrogramme *MaxPost* de Pont de Lagnieu à pas de temps horaire est également présenté.

En comparaison à d'autres stations (par exemple Bognes), La Figure 12 permet de voir que les incertitudes varient moins d'une heure à une autre et cela est dû au fait que le débit du Rhône à Pont de Lagnieu ne varie qu'entre $250\text{m}^3.\text{s}^{-1}$ et $1500\text{m}^3.\text{s}^{-1}$ pour l'année 2013. La Figure 12 permet, pour chaque pas de temps considéré, de lire l'ordre de grandeur de l'incertitude totale :

- à pas de temps horaire : incertitude comprise entre +/-2.5% et +/-6%
- à pas de temps journalier : incertitude comprise entre +/-2% et +/-5% (on note des pics certains week-ends qui coïncident avec des débits très faibles du Rhône.)
- à pas de temps hebdomadaire : incertitude comprise +/-2% et +/-3%.
- à pas de temps mensuel : incertitude de l'ordre de +/-2%.
- à pas de temps annuel : incertitude de l'ordre de +/-1%

4.3. Le Rhône à Anthon

Nom :	Anthon	Aménagement aval :	-
Rivière / Bassin :	Rhône	N° Hydromet :	9116
PK :	33.400	N° GMAO :	SB-PRSB-S19 & PB-PRPB-S06
Taille BV (km ²):	-	N° OASIS	10-0320
		Banque Hydro :	-



4.3.1. Analyse hydraulique du site

Contrôles hydrauliques en jeu

Il n'y a aucune influence aval pour la station d'Anton. Deux contrôles hydrauliques successifs déterminent probablement la relation hauteur-débit. Pour les plus faibles débits, un contrôle par un radier naturel agit avant d'être remplacé par un contrôle par le chenal du lit mineur à partir d'un certain niveau d'eau. Un débordement sur le lit majeur a probablement lieu à partir d'une hauteur de 189-190m d'après le BD topo du Rhône. Une troisième contrôle, rendant compte du débordement devrait donc être pris en compte pour extrapoler la courbe au-delà de cette hauteur ; ce contrôle est ignoré ici.

On fait donc l'hypothèse que deux contrôles successifs pour deux gammes de hauteurs d'eau :

- Gamme 1 (bas débits) : contrôle par un radier naturel que l'on peut approcher par un seuil rectangulaire à crête horizontale d'une largeur très incertaine.
- Gamme 2 (haut débits) : contrôle par le chenal du lit mineur que l'on assimile à un chenal rectangulaire, homogène et de largeur constante.

La matrice des contrôles est donc :

	Seuil	Chenal
1 ^{ère} gamme de hauteur	1	0
2 ^{ème} gamme de hauteur	0	1

Formulation des a priori hydrauliques pour BaRatin

Contrôle n°1 : seuil rectangulaire à crête horizontale équivalent

- D'après les photos aériennes sur Géoportail (IGN, Photographies Aériennes 2000-2005) (où l'eau est très claire et permet de voir d'éventuels hauts fonds) et les relevés topographiques en aval immédiat de la station (BD topo du Rhône), la section de contrôle (le radier) peut être supposée d'une largeur inférieure à la largeur du chenal du lit mineur. La largeur minimum envisageable peut être prise vers 40m et la largeur maximum vers 130m.
- Le coefficient de débit peut être pris aux alentours de 0.45 (vitesse d'approche non négligeable).
- En aval de la station, au PK 34 250 (à 150m en aval de la station), le point bas de la section (BD topo du Rhône) se situe vers 180.9m. La hauteur minimale enregistrée par le limnigraphe est environ de 183m. On peut placer la crête du seuil entre ces deux limites, vers 182m (+/- 1m).

Cela conduit aux *a priori* suivants pour le contrôle par le radier à bas débit :

Paramètre	Valeur centrale	Incertitude élargie (95%)
Largeur (m)	85	+/- 45
Coefficient de débit	0.45	+/- 0.05
Crête du seuil / b_1 (m)	182	+/- 1

Contrôle n°2 : chenal rectangulaire large

- Aucune information ne permet de prévoir la hauteur de transition. On peut cependant faire l'hypothèse qu'elle se situe entre 1m et 3m au-dessus de la crête du seuil.
- Des mesures faites sur Géoportail donnent une largeur moyenne du chenal de l'ordre de 135m (+/- 30m). Cette valeur est en accord avec ce que l'on trouve à partir de calculs sur les profils topographiques aux alentours du site (BD topo du Rhône).
- La pente moyenne du fond de la rivière, estimée à partir des points bas des relevés topographiques (BD topo du Rhône), est de l'ordre de 0.07% (+/- 0.06%).
- Le lit du cours d'eau est assez large et peu sinueux. Cela conduit à estimer une rugosité assez faible de l'ordre de $30\text{m}^{1/3} \cdot \text{s}^{-1}$ (+/- $5\text{m}^{1/3} \cdot \text{s}^{-1}$).

Les *a priori* retenus pour le second contrôle sont :

Paramètre	Valeur centrale	Incertitude élargie (95%)
Hauteur de transition (m)	184.5	+/- 1.5
Largeur (m)	135	+/- 30
Pente	0.0007	+/- 0.0006
Rugosité ($\text{m}^{1/3} \cdot \text{s}^{-1}$)	30	+/- 5

Paramètres pour BaRatin :

Paramètre	Valeur centrale	Incertitude élargie (95%)
a_1	169	+/- 92
b_1	182	+/- 1
c_1	1.5	+/- 0.05
h_1	184.5	+/- 1.5
a_2	107	+/- 55
c_2	1.67	+/- 0.05

4.3.2. Les jaugeages

Des 24 jaugeages disponibles, seulement le jaugeage du 7 aout 2014 n'a pas été conservé car pas encore validé. Une incertitude élargie de +/- 5% a été attribuée à chaque jaugeage du fait qu'ils étaient, pour la plupart, faits par ADCP.

4.3.3. Résultat BaRatin

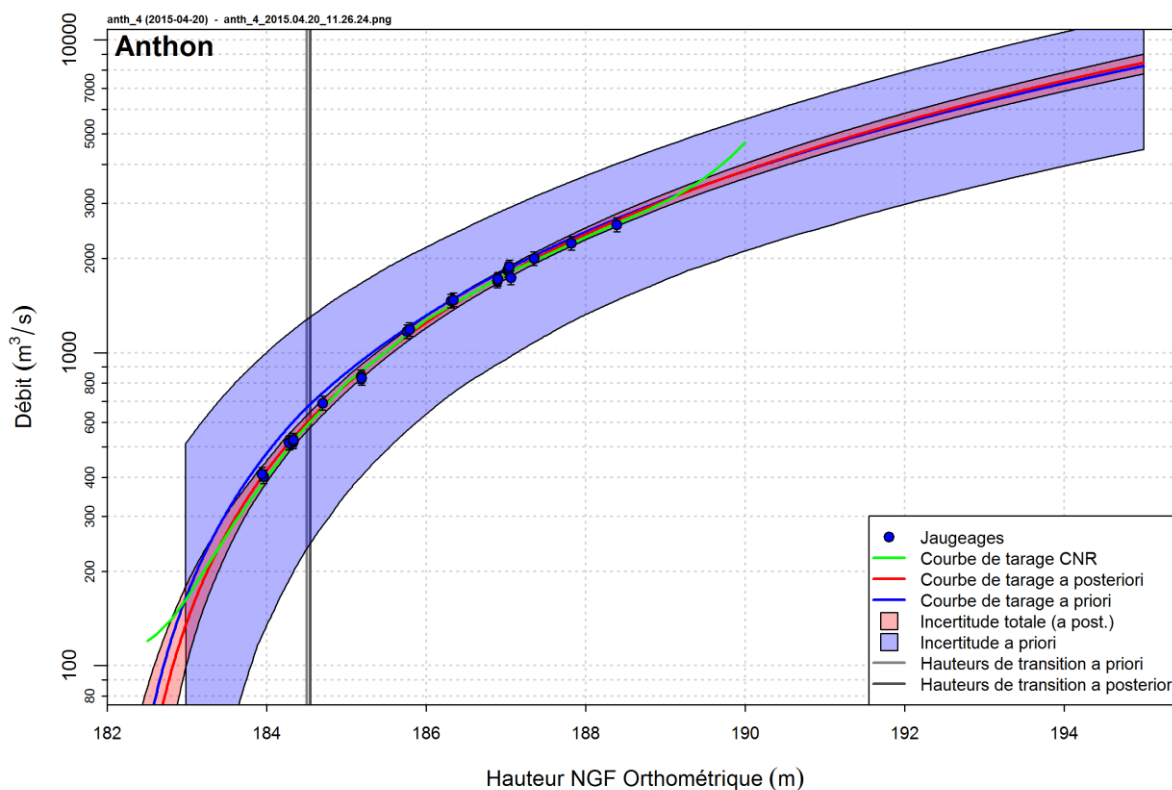


Figure 13: Courbe de tarage d'Anthon et enveloppes d'incertitude associées

La courbe de tarage issue de BaRatin est très similaire à celle de la CNR actuellement en vigueur dans la gamme de hauteur jaugée (voir Figure 13). Cependant les extrapolations (à haut et bas débits) sont assez différentes. Il est possible qu'à bas débit un contrôle supplémentaire ait été pris en compte par la CNR. De même, à haut débit, le débordement sur le lit majeur pourrait expliquer le choix de la CNR concernant la forme de la courbe de tarage.

Les paramètres *a posteriori* sont très proches de ceux définis *a priori*. Les incertitudes associées sont beaucoup plus resserrées comme en témoignent les distributions des paramètres et les intervalles d'incertitude à 95% (Figure 14 et Tableau 4). Cependant, on constate, que la hauteur de transition est aussi incertaine *a posteriori* qu'*a priori*. Au vu de la courbe de tarage (Figure 13), il est probable que des jaugeages supplémentaires pour des hauteurs inférieures à 184m seraient utiles pour préciser la hauteur de transition. Le paramètre b_2 est trouvé vers 181.8m ce qui est réaliste comme niveau moyen du chenal du lit mineur.

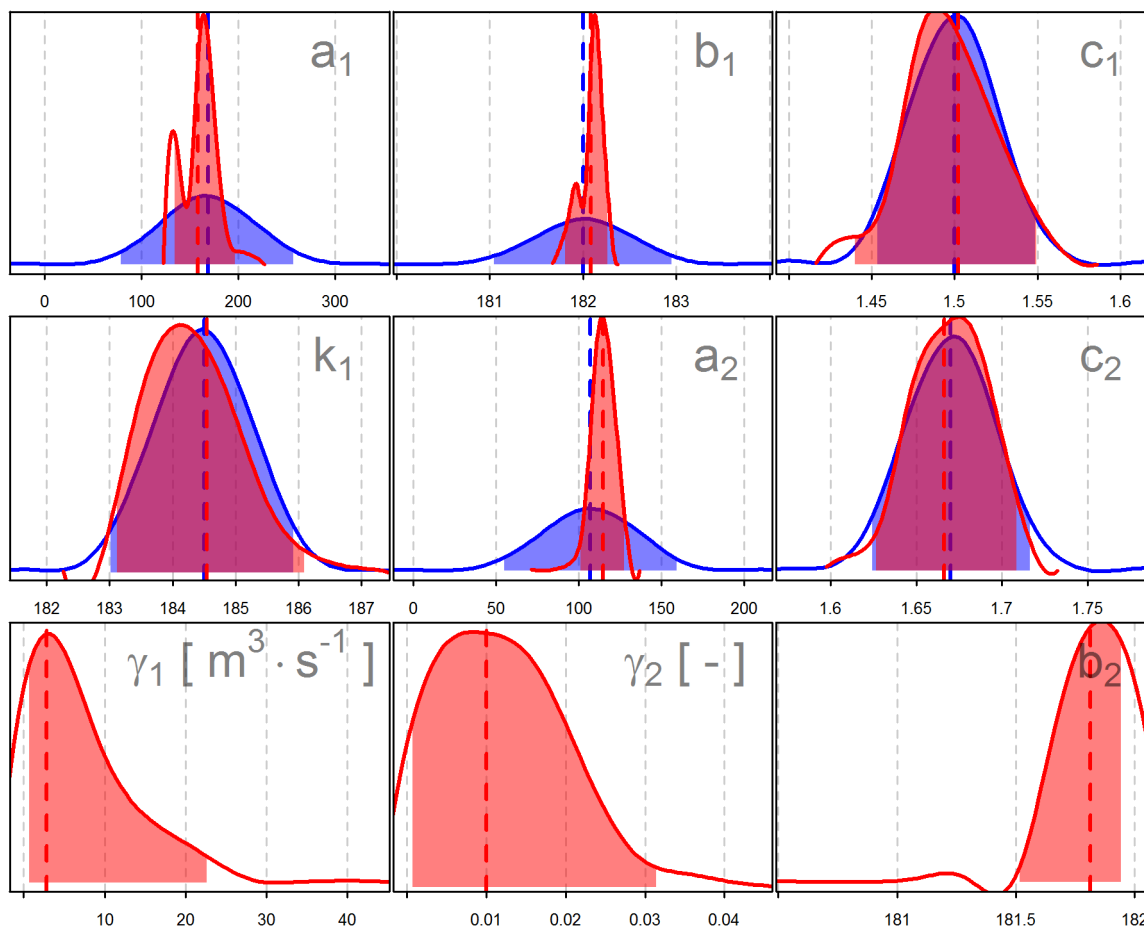


Figure 14: Distributions des paramètres *a priori* (bleu) et *a posteriori* (rouge) pour la station d'Anthon, les traits verticaux correspondent aux valeurs moyennes *a priori* (bleu) et *MaxPost* (rouge).

L'incertitude structurelle est assez importante : la part incompressible est comprise entre 0 et 22m³/s et la part relative entre 0.1% et 3% du débit estimé. Ces résultats, sans remettre en cause la validité de cette analyse BaRatin, suggèrent qu'une analyse hydraulique plus précise, notamment à bas débit, serait utile afin de vérifier qu'aucun contrôle non négligeable n'ait été omis.

Tableau 4: Valeurs des paramètres (et quantiles 2.5% et 97.5%) *a priori* et *a posteriori* pour la station d'Anthon.

	<i>a priori</i>		<i>a posteriori</i>	
	moyenne	[2.5% , 97.5%]	<i>MaxPost</i>	[2.5% , 97.5%]
a ₁	169	[77 , 261]	158.598	[133.247 , 196.507]
b ₁	182	[181 , 183]	182.085	[181.799 , 182.267]
c ₁	1.5	[1.45 , 1.55]	1.502	[1.44 , 1.55]
k ₁	184.5	[183 , 186]	184.544	[183.131 , 186.117]
a ₂	107	[52 , 162]	114.948	[100.741 , 127.812]
c ₂	1.67	[1.62 , 1.72]	1.666	[1.627 , 1.709]
γ ₁	Uniforme	[0 , 1000]	2.852	[0.17 , 22.88]
γ ₂	Uniforme	[0 , 1000]	0.01	[0.001 , 0.032]
b ₂	-	-	181.814	[181.52 , 181.959]

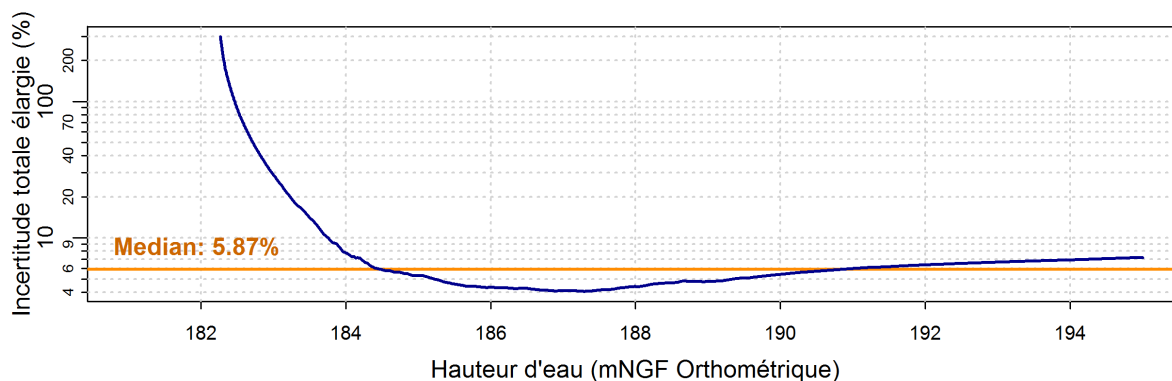


Figure 15: Demi-longueur de l'intervalle d'incertitude à 95% en pourcentage de la *MaxPost* (soit, sous hypothèse Gaussienne, l'incertitude totale élargie) associée à la courbe de tarage d'Anthon.

L'incertitude totale élargie estimée par BaRatin a une valeur médiane de +/- 6% (Figure 15). Pour les hauteurs inférieures à 184m elle est (bien) supérieure à +/- 6% alors qu'elle n'est que de +/- 4% pour la gamme de débit jaugée. A haut débit, même dans la partie extrapolée (attention, un contrôle par le lit majeur est sans doute à prendre en compte !), cette incertitude ne dépasse pas les +/- 10%.

L'équation de la courbe de tarage a posteriori est:

$$\text{si } h \leq 184.544: Q(h) = 158.598(h - 182.085)^{1.502}$$

$$\text{sinon } Q(h) = 114.948(h - 181.814)^{1.666}$$

où h est la hauteur d'eau (en mNGF ortho) et Q le débit (en m^3/s).

4.3.4. Propagation des incertitudes aux hydrogrammes

L'estimation des incertitudes associées aux mesures des hauteurs d'eau en continu a été faite à dire d'expert, d'après la connaissance du site par les gestionnaire de la station :

- pour les erreurs non-systématique (bruit de mesure et vaguelettes), une incertitude-type élargie de +/- 2cm a été estimée
- pour les erreurs systématiques (calage et dérive du calage), une incertitude-type élargie de +/- 6cm a été estimé. La station d'Anthon étant de moindre importance pour la CNR, elle est moins suivie. En effet, les visite et recalage du capteur ont lieu en moyenne tous les deux mois et les écarts constatés sont facilement de l'ordre de +/- 5cm d'où l'incertitude de +/-6cm liée aux erreurs systématiques. Un ré-échantillonnage de cette erreur a été fait en moyenne tous les 60 jours.

Les résultats sont présentés dans deux figures ci-dessous :

- L'hydrogramme *MaxPost*, sur une courte période, associé de son incertitude totale et de chaque incertitude prise individuellement : Figure 6.
- Les demi longueurs des intervalles de confiance à 95% de l'incertitude totale (en pourcentage de la *MaxPost*) sur une année civile à pas de temps horaire, journalier, hebdomadaire, mensuel et annuel : Figure 7.

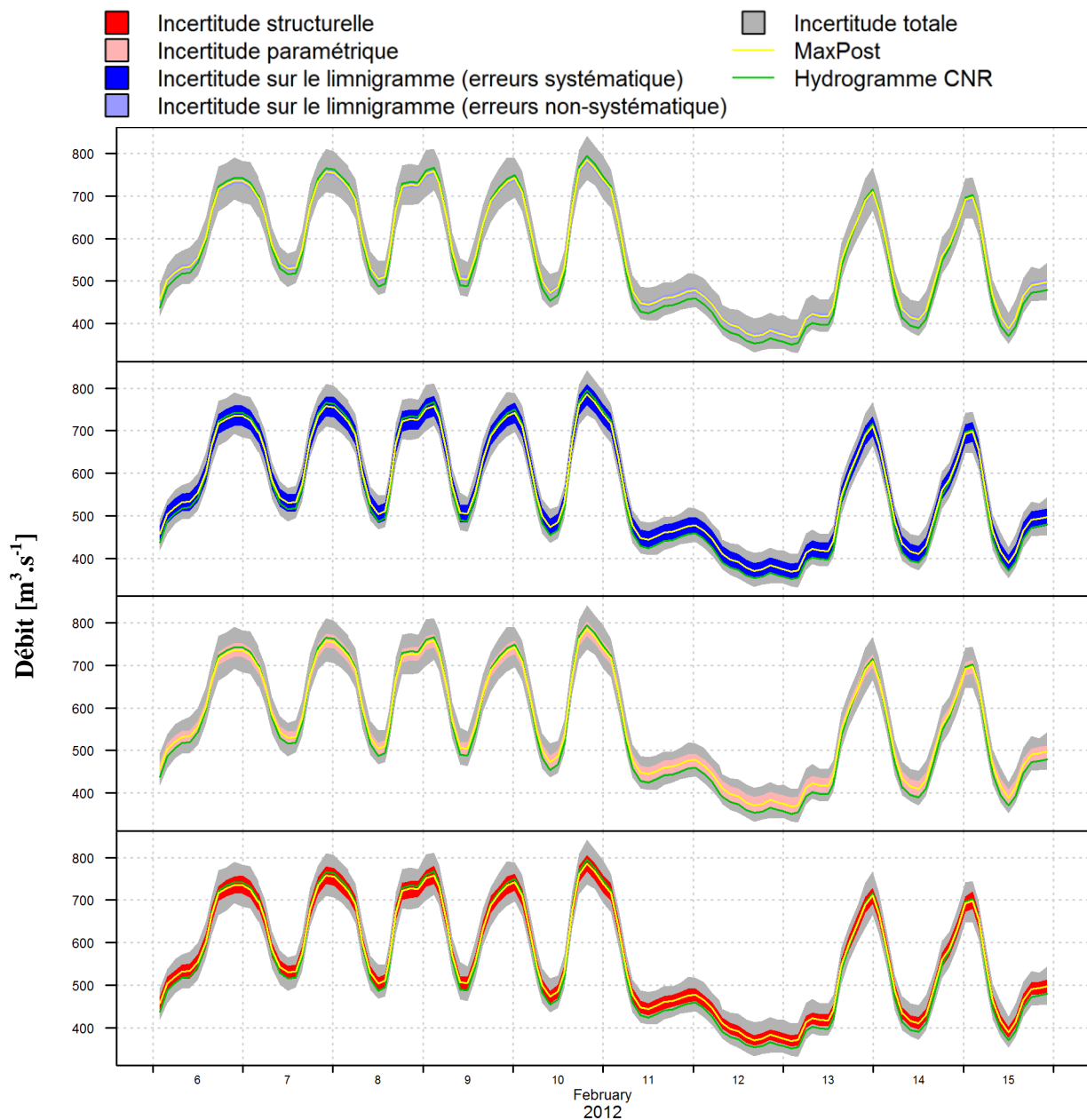


Figure 16: Hydrogrammes *MaxPost* d'Anthon et enveloppes d'incertitudes associées. Du graphique du bas à celui du haut sont respectivement présentées : l'incertitude structurelle, l'incertitude paramétrique, l'incertitude sur le limnigramme liée aux erreurs systématiques, l'incertitude sur le limnigramme liée aux erreurs non-systématiques.

La Figure 16 indique une très forte contribution des erreurs structurelles et paramétriques ainsi que des erreurs systématiques associées aux mesures des hauteurs d'eau. Les erreurs non-systématiques associées aux mesures des hauteurs d'eau sont quant à elles très faibles.

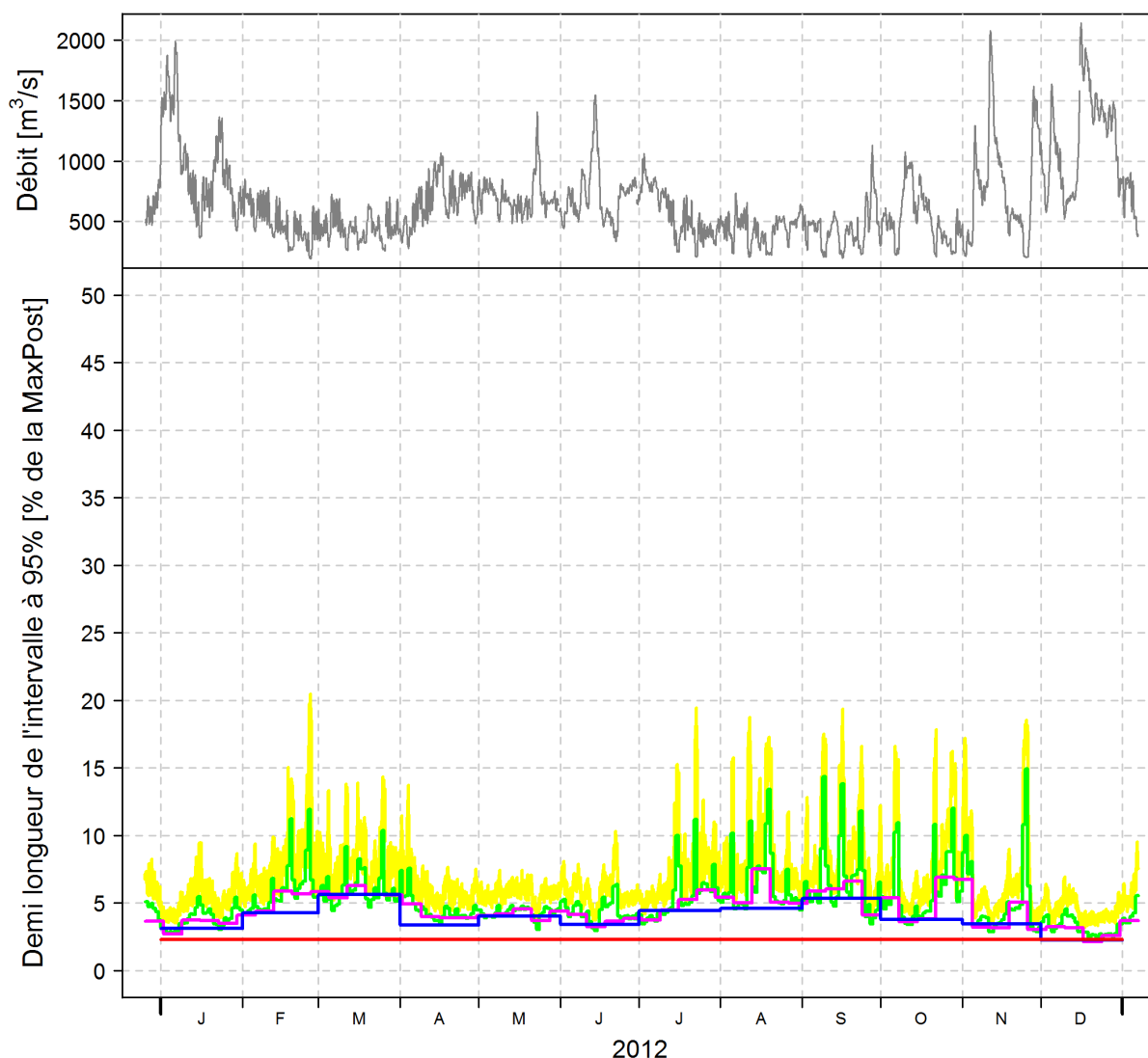


Figure 17: Demis longueurs des intervalles de confiance à 95% pour la station d'Anthon à différents pas de temps : horaire (jaune), journalier (vert), hebdomadaire (violet), mensuel (bleu) et annuel (rouge). En haut, l'hydrogramme *MaxPost* d'Anthon à pas de temps horaire est également présenté.

La Figure 17 permet, pour chaque pas de temps considéré, de lire l'ordre de grandeur de l'incertitude :

- à pas de temps horaire : incertitude comprise entre +/-3% et +/-20%
- à pas de temps journalier : incertitude comprise entre +/-3% et +/-15% (on note des pics les week-ends qui coïncident avec des débits faibles du Rhône.)
- à pas de temps hebdomadaire : incertitude comprise entre +/-2.5% et +/-7.5%.
- à pas de temps mensuel : incertitude comprise entre +/-2.5% et +/-6%
- à pas de temps annuel : incertitude de l'ordre de +/-2.5%

On observe une diminution de l'incertitude totale avec l'agrégation temporelle liée au « lissage » des erreurs à caractère non-systématique.

4.4. L'Ain à Port Galland

Nom :	Port Galland	Aménagement aval :	-
Rivière / Bassin :	Ain	N° Hydromet :	1050
PK :	(~4.2)	N° GMAO :	SB-PRSB-S18
Taille BV (km ²):	-	N° OASIS	10-0315
		Banque Hydro :	-



4.4.1. Analyse hydraulique du site

Contrôles hydrauliques en jeu

Aucune influence aval n'a été considérée pour cette station. Les photos du site, prises de la station, permettent d'identifier un contrôle par un radier à bas débit. Cependant, pour les plus faibles débits, il semblerait que l'eau, au niveau du capteur, soit presque stagnante, l'essentiel de l'écoulement étant en rive droite. A haut débit, le radier est noyé et on passe à un contrôle par le chenal.

Deux gammes distinctes de hauteur d'eau sont donc distinguées :

- Gamme 1 (bas débits) : contrôle par un radier que l'on peut approcher par un seuil rectangulaire à crête horizontale d'une largeur très incertaine.
- Gamme 2 (hauts débits) : contrôle par le chenal que l'on peut assimiler à un chenal rectangulaire, uniforme et de largeur constante et large.

La matrice des contrôles correspondante est donc :

	Seuil	Chenal
1 ^{ère} gamme de hauteur	1	0
2 ^{ème} gamme de hauteur	0	1

Formulation des a priori pour BaRatin

Contrôle n° 1

- D'après les photos prises sur le site et les mesures faites sur Géoportail (IGN, Photographies Aériennes 2000-2005) la largeur de la section de contrôle peut-être comprise entre 30m et 100m (il est cependant probable qu'elle soit plus proche de 30m que de 100m au vu des écoulements visibles sur les photos prises à bas débits).
- Le coefficient de débit peut être pris aux alentours de 0.4.
- Le minimum du limnigramme (de janvier 2012 à aujourd'hui) se situe autour de 189.7m. Le point le plus bas du profil bathymétrique immédiatement en aval de la station (relevés topographiques du modèle OSR) a un point bas à 186.27m, bien inférieur au minimum du limnigramme. On laisse donc la crête du seuil équivalent très incertaine, entre 186.3m et 189.7m.

Cela conduit aux *a priori* suivants pour le contrôle par le radier à bas débit :

Paramètre	Valeur centrale	Incertitude élargie (95%)
Largeur (m)	65	+/- 35
Coefficient de débit	0.4	+/- 0.05
Crête du seuil / b_1 (m)	188	+/- 1.7

Contrôle n°2

- La hauteur de transition peut être grossièrement estimée entre 190m et 192m.
- Les mesures faites sur Géoportail donnent des largeurs du chenal très variables, entre 65m et 130m.
- La pente moyenne du fond de la rivière, estimée à partir des points bas des relevés topographiques faits en aval de la station, est de l'ordre de 0.1% (+/- 0.08%).
- Le lit du cours d'eau est assez large mais sinueux. La rugosité peut grossièrement être estimée vers $25\text{m}^{1/3} \cdot \text{s}^{-1}$ (+/- $5\text{m}^{1/3} \cdot \text{s}^{-1}$).

Les *a priori* retenus pour le second contrôle sont donc :

Paramètre	Valeur centrale	Incertitude élargie (95%)
Hauteur de transition (m)	191	+/- 1
Largeur (m)	95	+/- 30
Pente	0.001	+/- 0.0008
Rugosité ($\text{m}^{1/3} \cdot \text{s}^{-1}$)	25	+/- 5

Paramètres pour BaRatin :

Paramètre	Valeur centrale	Incertitude élargie (95%)
a_1	115	+/- 64
b_1	188	+/- 1.7
c_1	1.5	+/- 0.05
h_1	191	+/- 1
a_2	75	+/- 41
c_2	1.67	+/- 0.05

4.4.2. Les jaugeages

Une rapide analyse des jaugeages au cours du temps montre que la station est sujette à de nombreux détarages à bas débits (pour les hauteurs d'eau inférieures à 192m). De ce fait, tous les jaugeages faits pour des hauteurs supérieures ou égales à 192m ont été conservés alors que pour les hauteurs inférieures seulement les jaugeages faits après l'année 2011 ont été conservés, aucun détarage n'ayant été détecté après cette date.

15 jaugeages ont donc été retenus pour l'étude. Une incertitude élargie de +/-5% a été attribué à chaque jaugeage (la plupart des jaugeages ayant été faits par ADCP).

4.4.3. Résultats BaRatin

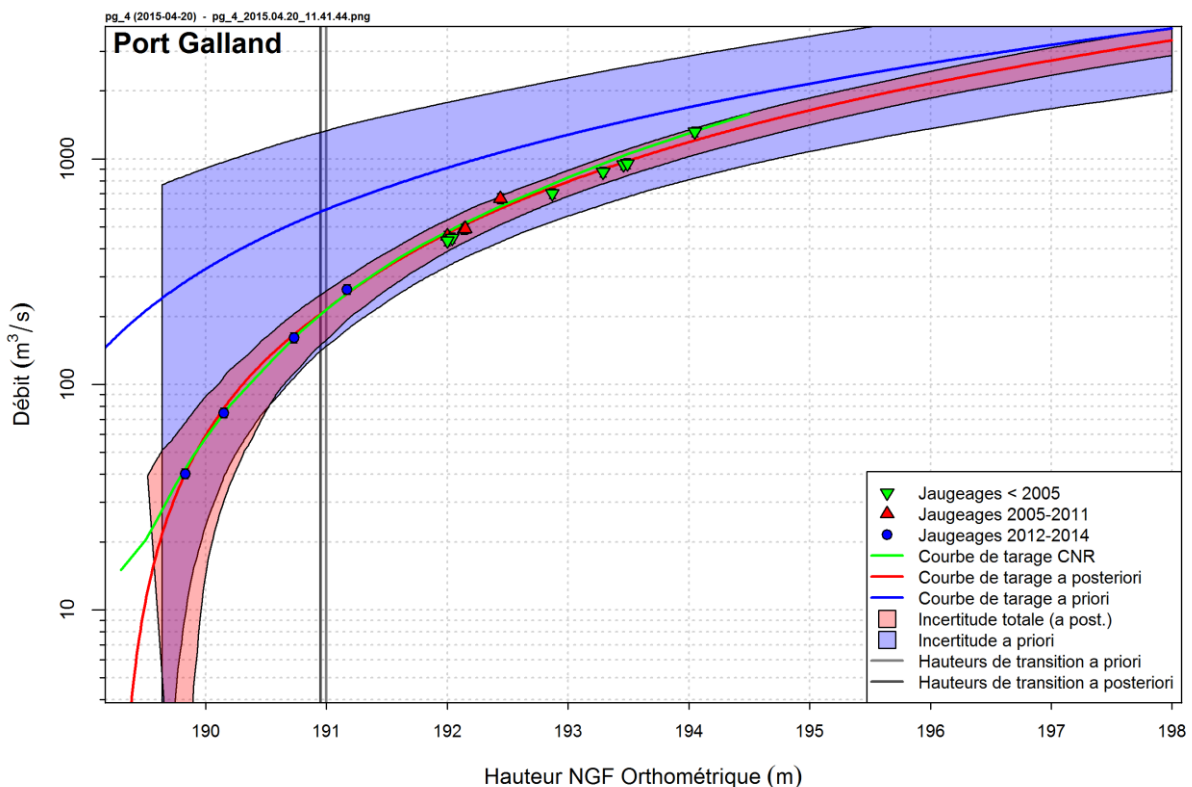


Figure 18: Courbe de tarage de la station de Port Galland et enveloppes d'incertitude associées

Dans la gamme de hauteurs d'eau jaugées, la courbe de tarage issue de BaRatin est très proche de celle de la CNR (voir Figure 18). Toutefois, on observe une légère surestimation du débit de la courbe de tarage BaRatin (pour une hauteur d'eau donnée) pour les hauteurs inférieures à la hauteur de transition entre les deux contrôles, et une légère sous-estimation sinon. Cette tendance se retrouve accentuée dans la partie extrapolée de la courbe de tarage pour les hauts débits. Par ailleurs, pour les très bas débits, les deux courbes de tarage sont assez différentes avec une très nette sous-estimation des débits par la courbe de tarage BaRatin par rapport à la courbe CNR. Un contrôle à bas débit, non pris en compte ici, justifie peut-être ce choix de la CNR ; une analyse plus fine des contrôles à bas débit serait nécessaire.

L'incertitude totale élargie associée à cette courbe de tarage est assez importante (de l'ordre de +/- 14%, Figure 19) et reflète le faible nombre de jaugeages à bas débit et la dispersion importante de ceux faits pour les plus fort débits.

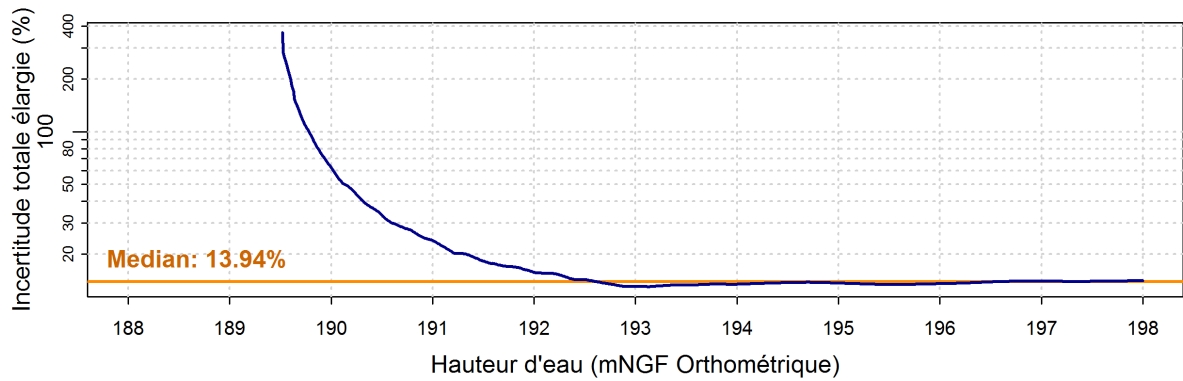


Figure 19: Demi-longueur de l'intervalle d'incertitude à 95% en pourcentage de la *MaxPost* (soit, sous hypothèse Gaussienne, l'incertitude totale élargie) associée à la courbe de tarage de Port Galland

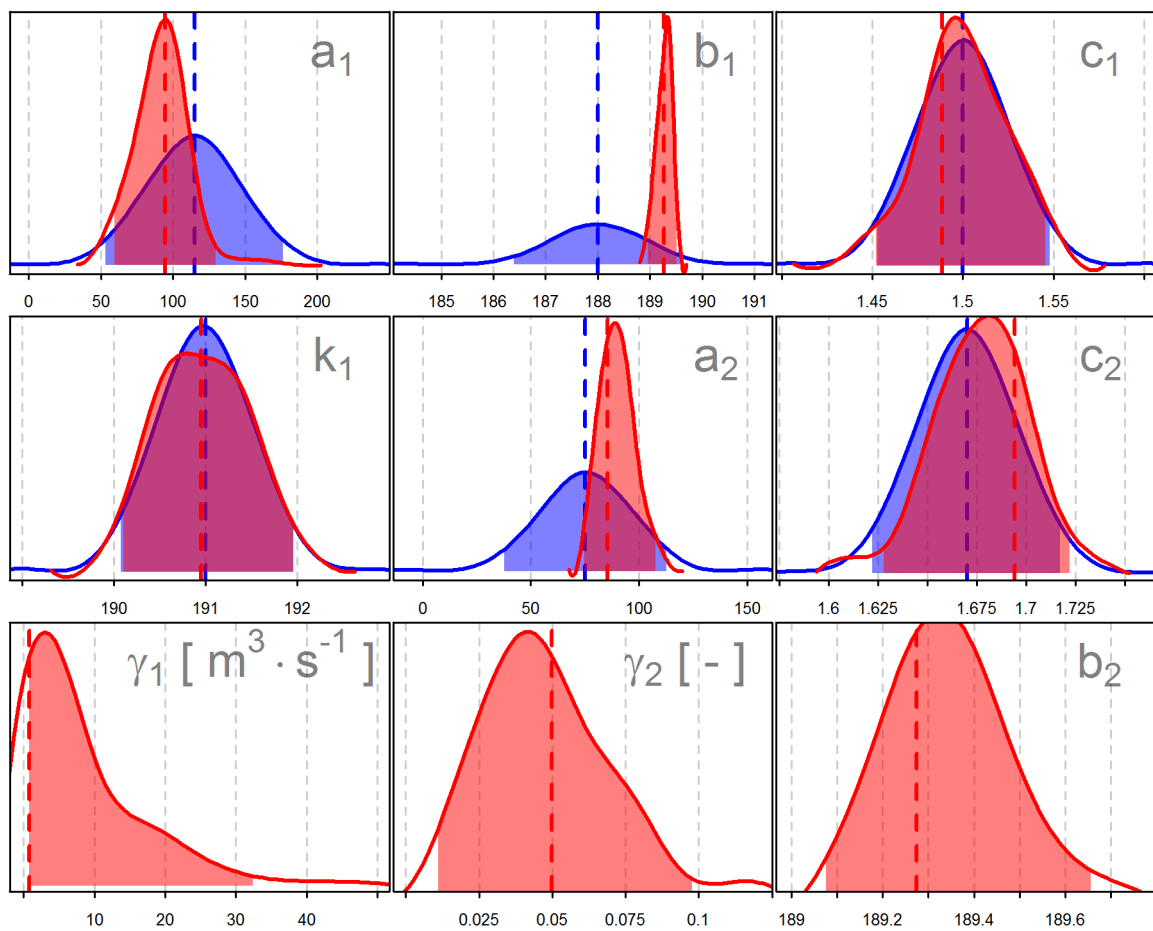


Figure 20: Distributions des paramètres *a priori* (bleu) et *a posteriori* (rouge) pour la station de Port Galland, les traits verticaux correspondent aux valeurs moyennes *a priori* (bleu) et *MaxPost* (rouge).

Les paramètres BaRatin *a posteriori* sont tous en accords avec les paramètres (et leurs incertitudes respectives) définis *a priori* (voir la Figure 20 et le Tableau 5). Une des plus grosses différences est observée pour le paramètre a_1 , où la valeur *a posteriori* est plus faible ; la largeur du seuil équivalent est trouvée plus proche de 50-55m que de 65m. La hauteur de la crête du seuil équivalent au radier est trouvée vers 189.3m ; valeur proche mais inférieure au minimum du limnigramme ce qui est réaliste. On note également que la hauteur de transition est toute aussi incertaine *a posteriori* qu'*a priori* ; plus de jaugeages pour les faibles et moyens débits seraient nécessaires (et/ou la définition d'un *a priori*

plus précis). Le paramètre b_2 , calculé par continuité de l'équation de la courbe de tarage est de 189.3m, est tout à fait en accord avec le niveau moyen du fond du chenal du lit auquel on pouvait s'attendre.

On note une incertitude structurelle assez importante pour cette station (paramètres γ_1 et γ_2 , Figure 20) du fait du peu de jaugeages à bas débit et de la dispersion relativement importante des jaugeages à haut débit (voir la Figure 18). En effet, la part non compressible de l'incertitude structurelle est entre 0.2 et 32m³/s, et la part relative au débit estimé est entre 1% et 9%. Toutefois, l'incertitude structurelle serait probablement réduite en considérant une incertitude plus importante associée aux jaugeages. Ce choix se justifierait bien dans la mesure où ces derniers sont réalisés dans des conditions non idéales.

Tableau 5: Valeurs des paramètres (et quantiles 2.5% et 97.5%) *a priori* et *a posteriori* pour la station de Port Galland.

	<i>a priori</i>		<i>a posteriori</i>	
	moyenne	[2.5% , 97.5%]	MaxPost	[2.5% , 97.5%]
a_1	115	[51 , 179]	94.384	[57.817 , 130.179]
b_1	188	[186.3 , 189.7]	189.267	[188.949 , 189.515]
c_1	1.5	[1.45 , 1.55]	1.488	[1.452 , 1.548]
k_1	191	[190 , 192]	190.952	[190.088 , 191.97]
a_2	75	[34 , 116]	85.413	[74.726 , 107.581]
c_2	1.67	[1.62 , 1.72]	1.694	[1.627 , 1.723]
γ_1	Uniforme	[0 , 1000]	0.787	[0.27 , 32.304]
γ_2	Uniforme	[0 , 1000]	0.05	[0.011 , 0.096]
b_2	-	-	189.274	[189.066 , 189.66]

L'équation de la courbe de tarage est :

$$\text{si } h \leq 190.952 \quad Q(h) = 94.384(h - 189.267)^{1.488}$$

$$\text{sinon} \quad Q(h) = 85.413(h - 189.274)^{1.694}$$

où h est la hauteur d'eau (en mNGF ortho) et Q le débit (en m³/s).

4.4.4. Propagation des incertitudes aux hydrogrammes

L'estimation des incertitudes associées aux mesures des hauteurs d'eau en continu a été faite à dire d'expert, d'après la connaissance du site par les gestionnaire de la station. La station de Port Galland est une station secondaire de la CNR. En effet, pour le suivi des débits de l'Ain, la station de Pont de Chazey, située quelques kilomètres en amont est la principale station de mesures suivie par la CNR :

- pour les erreurs non-systématique (bruit de mesure et vaguelettes), une incertitude-type élargie de +/- 5cm a été estimée
- pour les erreurs systématiques (calage et dérive du calage), une incertitude-type élargie de +/- 5cm a été estimé. Les écarts entre échelle et capteur à cette station sont typiquement compris entre +/- 3cm et +/-5cm. La valeur la plus défavorable est retenue ici. Un ré-échantillonnage de l'erreur a été fait tous les 60 jours en moyenne.

Les résultats sont présentés dans deux figures ci-dessous :

- L'hydrogramme *MaxPost*, sur une courte période, associé de son incertitude totale et de chaque incertitude prise individuellement : Figure 21.

- Les demi longueurs des intervalles de confiance à 95% de l'incertitude totale (en pourcentage de la *MaxPost*) sur une année civile à pas de temps horaire, journalier, hebdomadaire, mensuel et annuel : Figure 22.

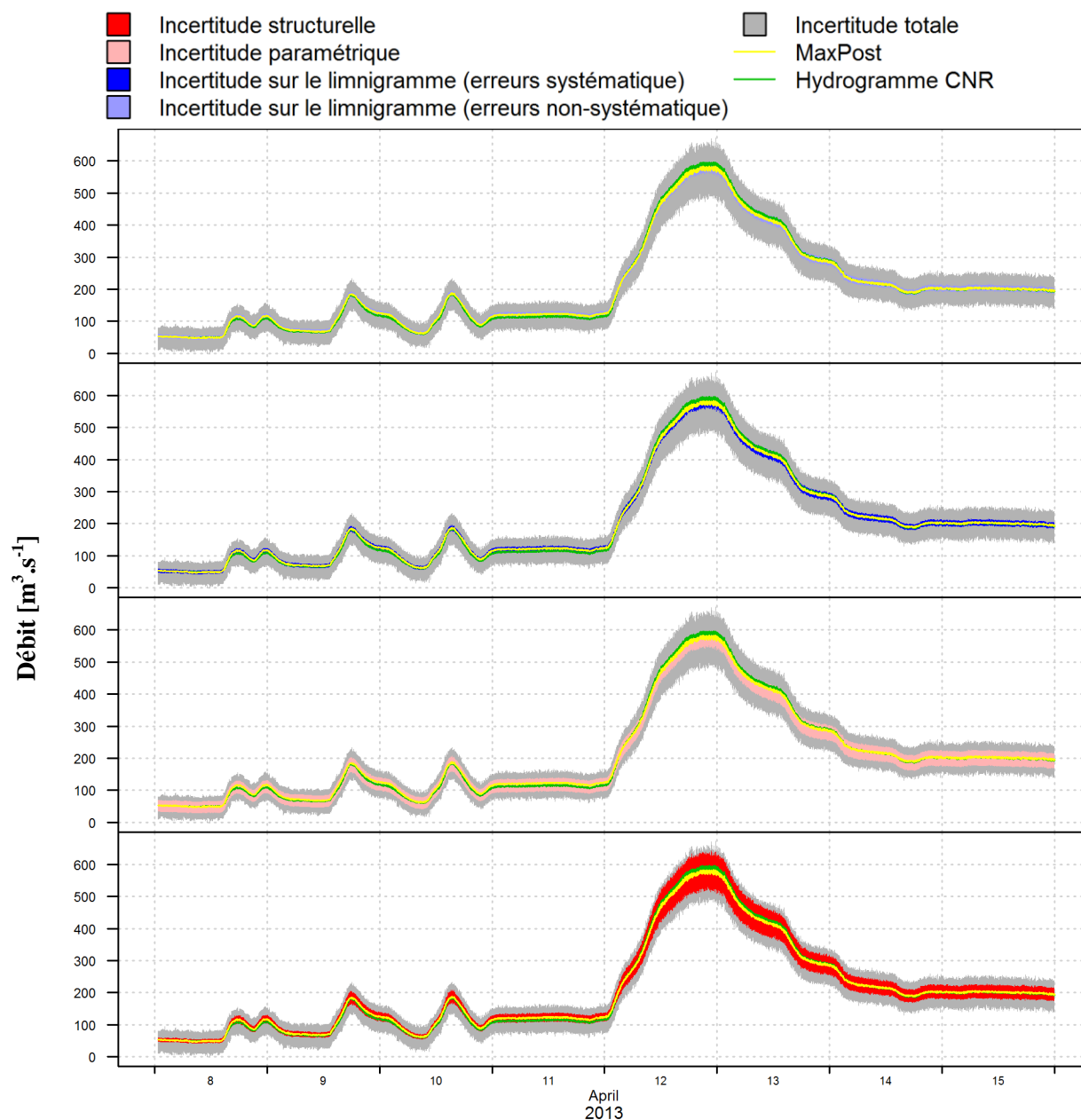


Figure 21: Hydrogrammes *MaxPost* de Port Galland et enveloppes d'incertitudes associées. Du graphique du bas à celui du haut sont respectivement présentées : l'incertitude structurelle, l'incertitude paramétrique, l'incertitude sur le limnigramme liée aux erreurs systématiques, l'incertitude sur le limnigramme liée aux erreurs non-systématiques.

La Figure 21 indique une très forte contribution des erreurs provenant de la courbe de tarage : erreurs structurelles et paramétriques. On note tout de même une contribution non négligeable des erreurs systématiques liées aux mesures des hauteurs d'eau.

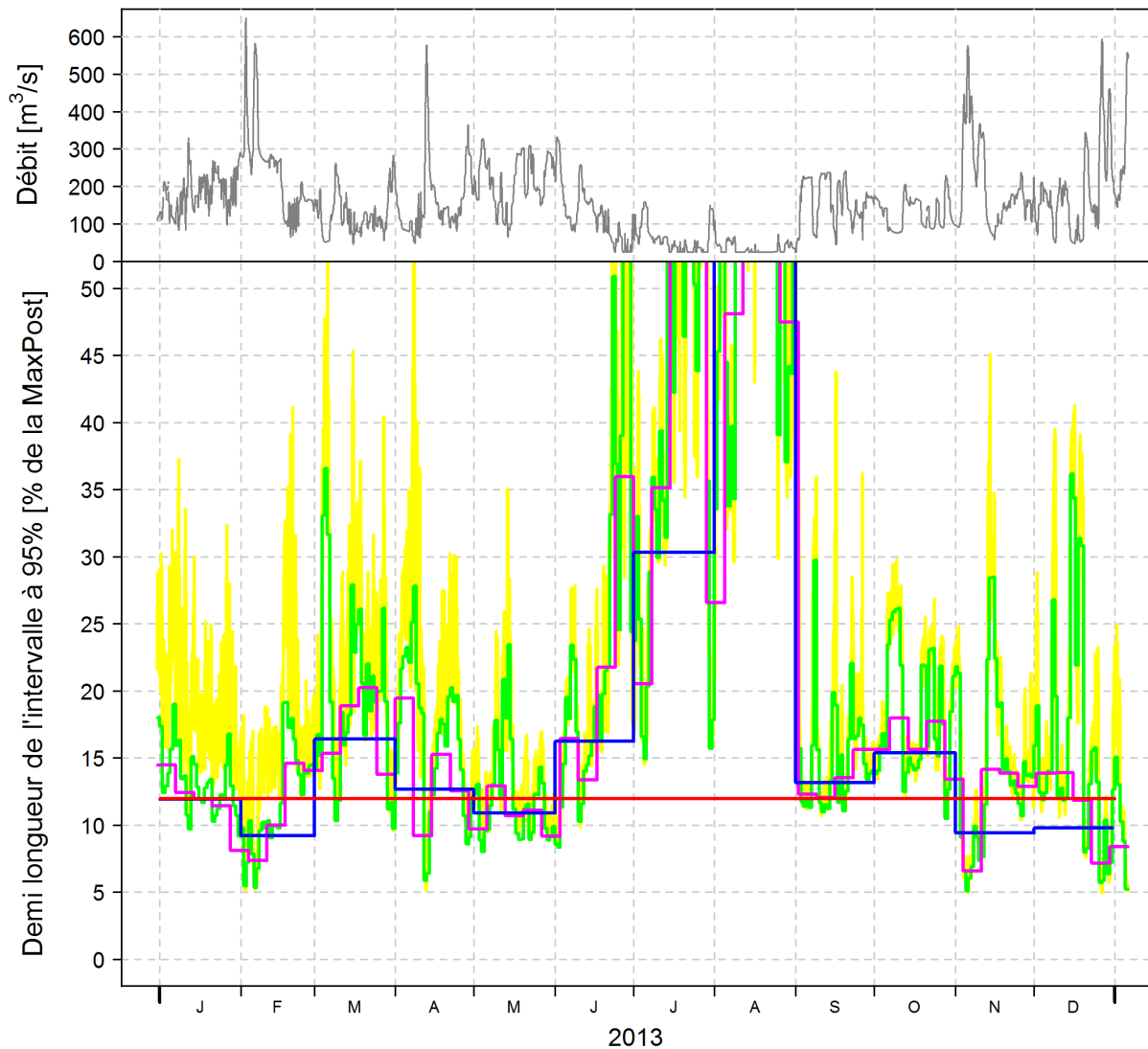


Figure 22: Demis longueurs des intervalles de confiance à 95% pour la station de Port Galland à différent pas de temps : horaire (jaune), journalier (vert), hebdomadaire (violet), mensuel (bleu) et annuel (rouge). En haut, l'hydrogramme *MaxPost* de Port Galland à pas de temps horaire est également présenté.

La Figure 22 montre une incertitude totale très importante (en comparaison aux autres stations traitées jusque-là) quel que soit le pas de temps considéré. Cela est en partie dus aux débits beaucoup plus faibles de l'Ain (compris entre $0\text{m}^3.\text{s}^{-1}$ et $600\text{m}^3.\text{s}^{-1}$ sur l'année 2013 et nuls ou très faibles en juin, juillet et août 2013). On n'observe également que très peu de diminution de l'incertitude avec l'agrégation temporelle :

- à pas de temps horaire : incertitude le plus souvent supérieure à +/-10% et pouvant être supérieure à +/-30% voire +/- 50% pour les débits les plus faibles.
- à pas de temps journalier : incertitude souvent supérieure à +/-10% et parfois supérieure à +/-50%.
- à pas de temps hebdomadaire : incertitude globalement comprise entre +/-7% et +/-20% sauf pour les périodes d'étiage (supérieurs à +/- 50%).
- à pas de temps mensuel : incertitude comprise entre +/-8% et +/-17% (sauf pendant la période d'étiage).
- à pas de temps annuel : incertitude de l'ordre de +/-12%.

4.5. L'Ardèche à Sauze

Nom :	Sauze	Aménagement aval :	Caderousse (CA)
Rivière / Bassin :	Ardèche	N° Hydromet :	612
PK :		N° GMAO :	CA-PRCA-S13
Taille BV (km ²):	2 240	N° OASIS	10-1090
		Banque Hydro :	V5064010



4.5.1. Analyse hydraulique du site

L'Ardèche à Sauze ne subit aucune influence aval. Pour les plus bas débits, un radier (en rive droite, à côté du parking) contrôle probablement la relation hauteur-débit. Ensuite, une fois le radier noyé, on peut supposer qu'on a un contrôle par le chenal. Il est également possible qu'un deuxième contrôle de type seuil opère une fois le premier radier noyé avec une largeur déversante plus grande (contrôle par le parking lui-même jouant le rôle de seuil ou bien contrôle par le seuil artificiel situé à environ 2.3km à l'aval de la station). Le modèle hydraulique de l'Ardèche d'IRSTEA confirmait plutôt la première hypothèse (Le Coz *et al.*, 2014) ; c'est celle-ci qui fut retenue dans la présente analyse BaRatin.

Deux gammes de hauteur d'eau sont distinguées :

- Gamme 1 (bas débits) : contrôle par un radier naturel que l'on approche par un seuil rectangulaire à crête horizontale.
- Gamme 2 (hauts débits) : contrôle par le chenal que l'on peut assimiler à un chenal rectangulaire, uniforme et de largeur constante.

La matrice des contrôles correspondante est :

	Seuil	Chenal
1 ^{ère} gamme de hauteur	1	0
2 ^{ème} gamme de hauteur	0	1

Formulation des a priori pour BaRatin

Contrôle n° 1 : Seuil rectangulaire équivalent

- D'après les mesures faites sur Géoportail (IGN, Photographies Aériennes 2000-2005), la largeur de la section de contrôle est comprise entre 20m et 60m.
- Le coefficient de débit peut être pris aux alentours de 0.4.
- Le minimum du limnigramme, depuis 2011, se situe autour de 45.4m. On peut estimer grossièrement la hauteur minimum vers 44.5m (+/- 1m).

Cela conduit aux *a priori* suivants pour le contrôle par le radier à bas débit :

Paramètre	Valeur centrale	Incertitude élargie (95%)
Largeur (m)	40	+/- 20
Coefficient de débit	0.4	+/- 0.05
Crête du seuil / b_1 (m)	44.5	+/- 1

Contrôle n°2 : chenal du lit mineur

- La hauteur de transition peut être très grossièrement estimée entre 46m et 50m, soit 48m (+/-2m).
- Les mesures faites sur Géoportail donnent des largeurs du chenal comprises entre 65m et 120m.
- La pente moyenne du fond de la rivière, estimée à partir des points bas des relevés topographiques faits à quelques kilomètres en aval de la station, est de l'ordre de 0.13% (+/- 0.08%).
- Le lit du cours d'eau est assez large et un très peu sinueux. La rugosité peut grossièrement être estimée vers $30\text{m}^{1/3} \cdot \text{s}^{-1}$ (+/- $5\text{m}^{1/3} \cdot \text{s}^{-1}$).

Les *a priori* retenus pour le second contrôle sont :

Paramètre	Valeur centrale	Incertitude élargie (95%)
Hauteur de transition (m)	48	+/- 2
Largeur (m)	92	+/- 30
Pente	0.0013	+/- 0.0008
Rugosité ($\text{m}^{1/3} \cdot \text{s}^{-1}$)	30	+/- 5

Paramètres pour BaRatin :

Paramètre	Valeur centrale	Incertitude élargie (95%)
a_1	71	+/- 37
b_1	44.5	+/- 1
c_1	1.5	+/- 0.05
h_1	48	+/- 2
a_2	100	+/- 48
c_2	1.67	+/- 0.05

4.5.2. Les jaugeages

Entre la base de donnée CNR et la base de donnée du service de prévision des crues Grand Delta (SPC GD), 339 jaugeages étaient disponibles. Uniquement les jaugeages « valide » ont été conservés, soit 331 jaugeages (95 de la BD CNR et 235 de la BD SPC GD).

Une analyse rapide des jaugeages (selon leurs dates) montre un détarage progressif pour les bas et moyens débits (hauteurs inférieures à 48m), comme on peut le voir sur la Figure 23. En regardant avec attention les hauteurs inférieures à 48m sur différentes périodes de temps, il fut supposé que le dernier

détarage significatif en date avait eu lieu fin 2008 – début 2009 (voir Figure 24). Pour tous les jaugeages faits après le 20 janvier 2009, aucun détarage n'apparaît évident.

Cette analyse a donc conduit à conserver tous les jaugeages faits à des hauteurs d'eau supérieures à 48m et pour les hauteurs d'eau inférieures, tous les jaugeages ultérieurs au 20 janvier 2009

Sur les 108 jaugeages ainsi sélectionnés, il a été décidé d'utiliser ceux venant directement de la CNR (soit 40 jaugeages) pour appliquer BaRatin et d'utiliser les autres (les 68 restant venant des données du SPC GD) pour valider visuellement le résultat fourni par BaRatin (voir la Figure 25).

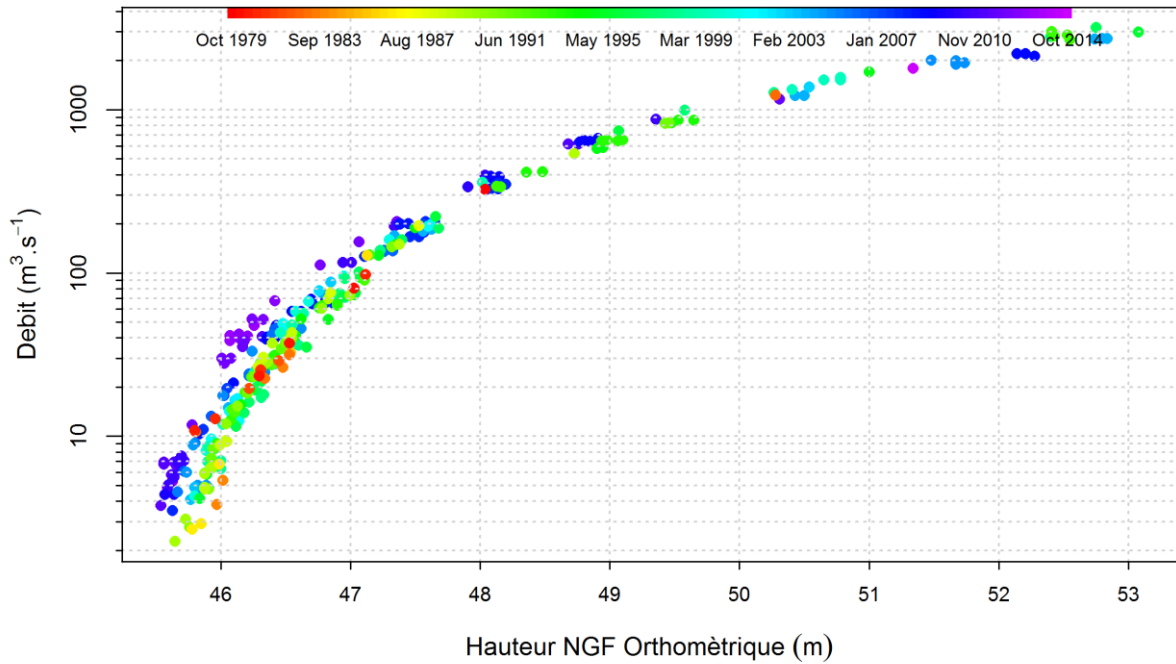


Figure 23: Jaugeages de la CNR et du SPC GD sur l'Ardèche à Sauze depuis la mise en service de la station (en 1979) jusqu'à l'automne 2014.

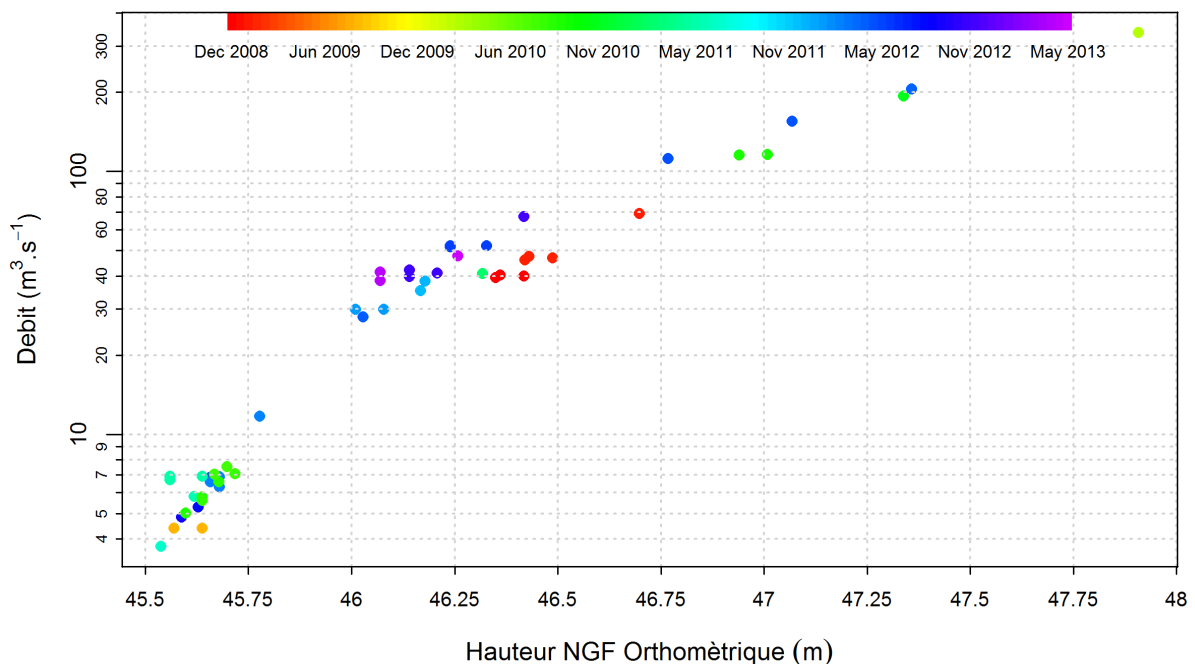


Figure 24: Jaugeages (CNR et SPC GD) sur l'Ardèche à Sauze entre décembre 2008 et mai 2013 pour des hauteurs d'eau inférieures à 48m

4.5.3. Résultats BaRatin

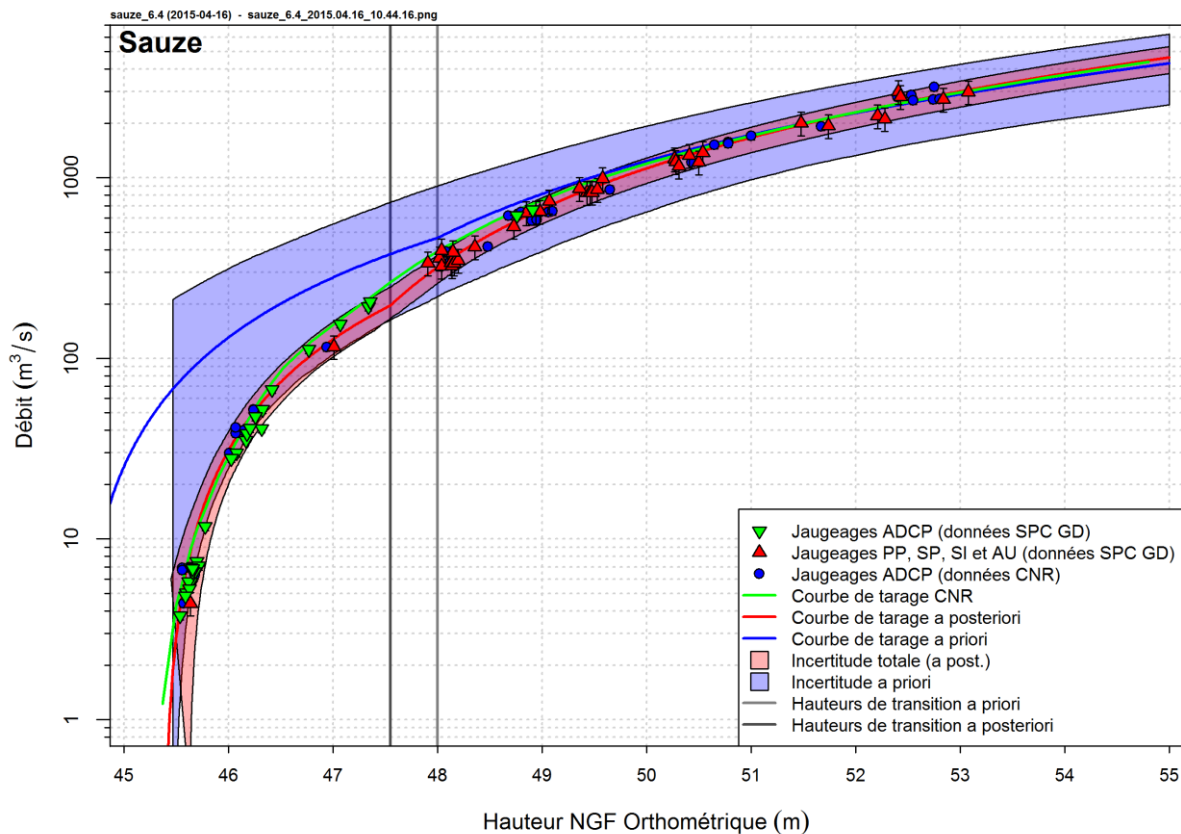


Figure 25: Courbe de tarage de la station de Sauze et enveloppes d'incertitude associées. Seuls les jaugeages CNR ont été utilisés l'analyse BaRatin. Les jaugeages PP, SP et SI correspondent à des jaugeages par exploration du champ de vitesse faits à la perche ou par intégration. Les jaugeages notés AU sont non documentés.

Les deux courbes de tarage (BaRatin et CNR) sont très semblables sauf pour la gamme de hauteur allant de 46.25m à 50m où l'on observe une forte sous-estimation des débits de la courbe de tarage BaRatin par rapport à celle de la CNR (voir Figure 25). La plus forte sous-estimation correspond à la hauteur de transition qui coïncide avec une gamme de hauteur non-jaugée (absence de jaugeages depuis le 20 janvier 2009 pour ces hauteurs d'eau). On note tout de même que la courbe de tarage CNR est comprise, presque pour toutes les hauteurs d'eau, dans l'enveloppe d'incertitude totale issue de BaRatin. Malgré la dispersion des jaugeages (surtout à haut débit) ceux-ci restent tous bien en accord avec la courbe de tarage BaRatin. De plus, la Figure 25 permet de voir que tous les jaugeages non-utilisés pour cette station (les triangles vert et rouges en plus des ronds bleus) sont compris dans l'enveloppe d'incertitude BaRatin.

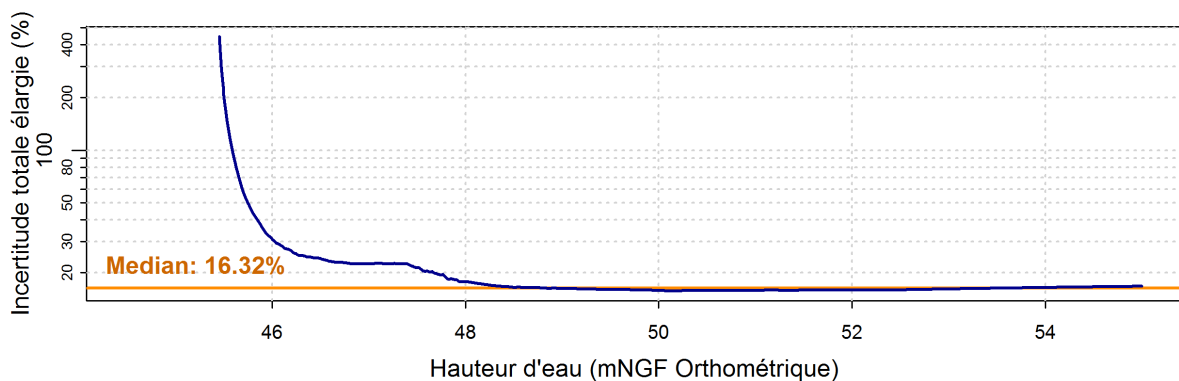


Figure 26: Demi-longueur de l'intervalle d'incertitude à 95% en pourcentage de la *MaxPost* (soit, sous hypothèse Gaussienne, l'incertitude totale élargie) associée à la courbe de tarage de Sauze.

L'incertitude totale élargie associée à la courbe de tarage issue de BaRatin est de l'ordre de +/-16% (médiane) et de +/- 25% pour les faibles hauteurs (inférieures à 47.55m, la hauteur de transition *a posteriori*) ; l'incertitude totale est très grande et reflète la dispersion assez importante des jaugeages utilisés (Figure 26).

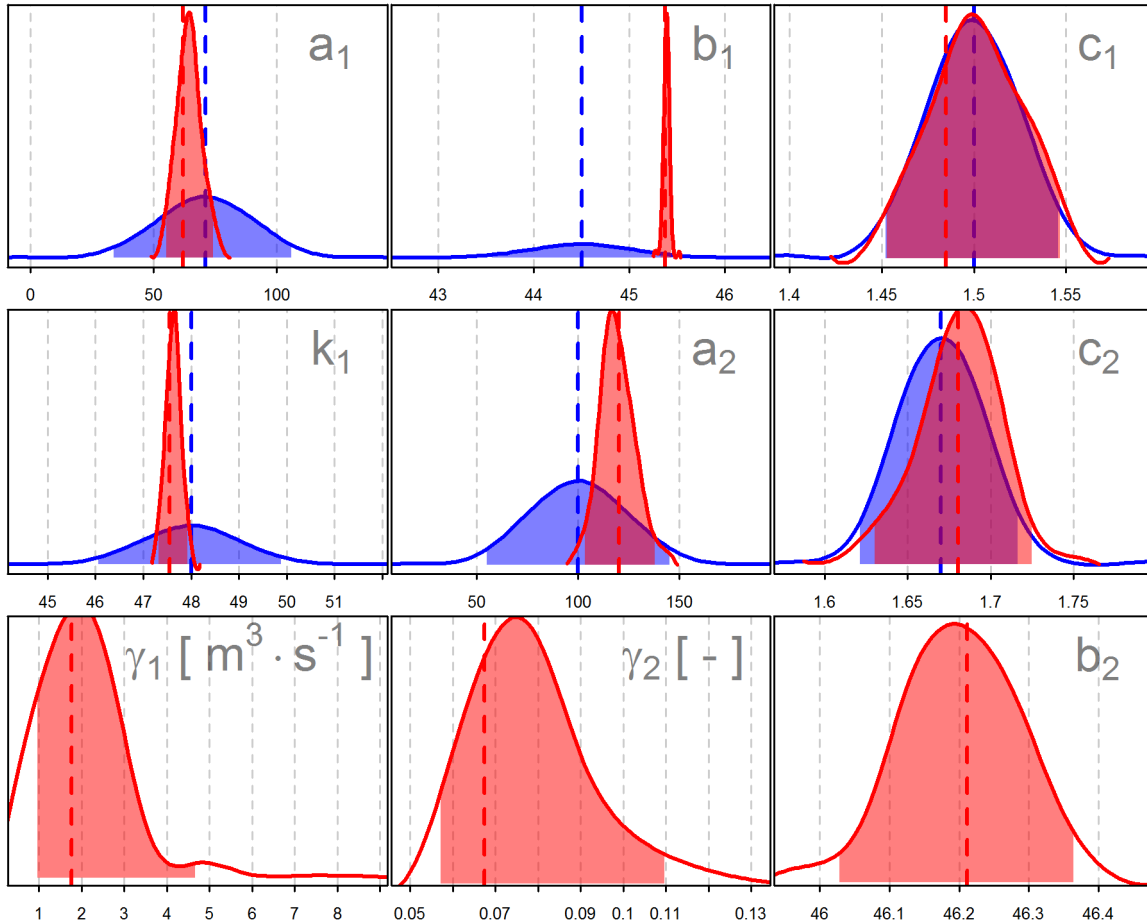


Figure 27: Distributions des paramètres *a priori* (bleu) et *a posteriori* (rouge) pour la station de Sauze, les traits verticaux correspondent aux valeurs moyennes *a priori* (bleu) et *MaxPost* (rouge).

Les paramètres *a posteriori*, plus précis, sont proches de ceux donnés *a priori* (voir la Figure 27 et le Tableau 6). On note toutefois que la hauteur de la crête du seuil était fortement sous-estimée *a priori*. *A posteriori* elle se situe à 45.37m soit à 10cm en dessous du minimum du limnigramme. Cela reste donc réaliste, l'écoulement étant très faible lors des étiages. Le paramètre b_2 est trouvé vers 46.2m, ce qui paraît un peu élevé comme niveau moyen du fond du chenal mais reste tout de même acceptable.

On note une incertitude structurelle importante pour cette station (paramètres γ_1 et γ_2 , Figure 20). En effet, la part non compressible de l'incertitude structurelle est entre 1 et 5m³/s, et la part relative au débit estimé est entre 6% et 11%.

Afin de prendre en compte les nombreux détarages qui ont lieu à cette station et tous les jaugeages qui ont été faits, la version BaRatin pour détarage en développement (thèse de V. Mansanarez) serait beaucoup plus adaptée.

Tableau 6: valeurs des paramètres (et quantiles 2.5% et 97.5%) *a priori* et *a posteriori* pour la station de Sauze

	<i>a priori</i>		<i>a posteriori</i>	
	moyenne	[2.5% , 97.5%]	MaxPost	[2.5% , 97.5%]
a ₁	71	[34 , 108]	61.982	[54.942 , 74.201]
b ₁	44.5	[43.5 , 45.5]	45.374	[45.331 , 45.444]
c ₁	1.5	[1.45 , 1.55]	1.485	[1.453 , 1.548]
k ₁	48	[46 , 50]	47.552	[47.315 , 47.928]
a ₂	100	[52 , 148]	120.268	[103.18 , 138.473]
c ₂	1.67	[1.62 , 1.72]	1.68	[1.63 , 1.725]
γ ₁	Uniforme	[0 , 1000]	1.763	[0.956 , 4.692]
γ ₂	Uniforme	[0 , 1000]	0.067	[0.057 , 0.11]
b ₂	-	-	46.211	[46.028 , 46.366]

L'équation de la courbe de tarage est :

$$\text{si } h \leq 47.552 \quad Q(h) = 61.982(h - 45.374)^{1.485}$$

$$\text{sinon} \quad Q(h) = 120.268(h - 46.211)^{1.68}$$

où h est la hauteur d'eau (en mNGF ortho) et Q le débit (en m³/s).

4.5.4. Propagation des incertitudes aux hydrogrammes

D'après les questionnaires de la station, les erreurs non-systématiques (bruit de mesure et vaguelettes) associées aux mesures des hauteurs d'eau pour cette station sont très différentes entre les bas/moyens débits et les hauts débits variant d'environ +/- 1cm à +/- 10cm en crue. A ce titre, il serait intéressant de prendre en compte la dépendance de l'écart-type aux hauteurs d'eau pour cette station, possibilité implémenté dans BaRatin (voir la section 2.3). Cependant, en première approximation, cela a été ignoré. Ainsi :

- pour les erreurs non-systématique (bruit de mesure et vaguelettes), une incertitude-type élargie de +/- 2cm a été retenue.
- pour les erreurs systématiques (calage et dérive du calage), une incertitude-type élargie de +/- 3cm a été estimée. Les vérifications du calage sont assez fréquentes (toutes les deux semaines en moyenne), ce qui a conduit à un ré-échantillonnage environ tous les 15 jours de cette erreur.

Les résultats sont présentés dans deux figures ci-dessous :

- L'hydrogramme *MaxPost*, sur une courte période, associé de son incertitude totale et de chaque incertitude prise individuellement : Figure 6.
- Les demi longueurs des intervalles de confiance à 95% de l'incertitude totale (en pourcentage de la *MaxPost*) sur une année civile à pas de temps horaire, journalier, hebdomadaire, mensuel et annuel : Figure 7.

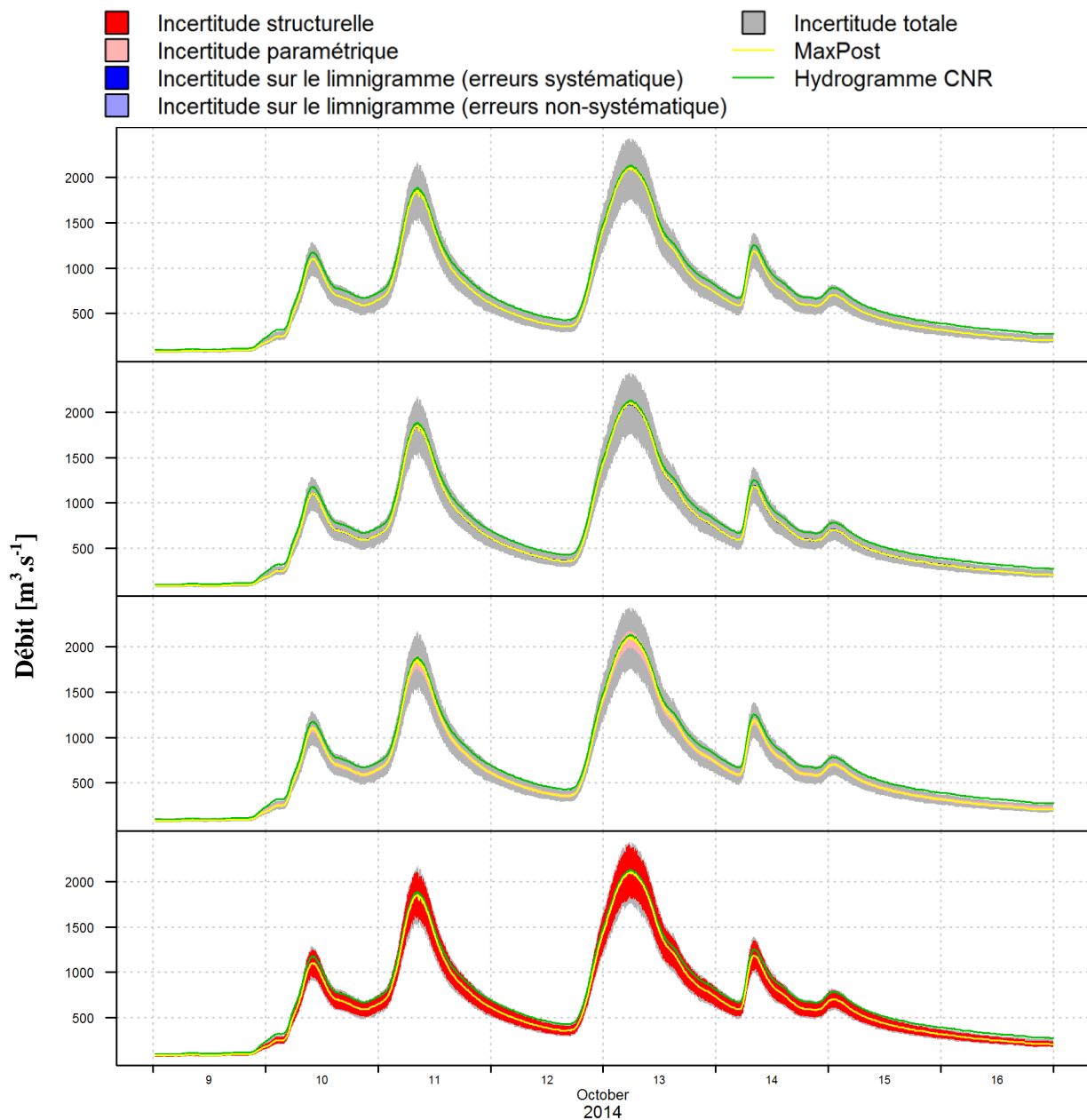


Figure 28: Hydrogrammes *MaxPost* de Sauze et enveloppes d'incertitudes associées. Du graphique du bas à celui du haut sont respectivement présentées : l'incertitude structurelle, l'incertitude paramétrique, l'incertitude sur le limnigramme (erreurs systématique), l'incertitude sur le limnigramme liée aux erreurs non-systématiques.

La Figure 28 montre, tout comme pour la station de Port Galland sur l'Ain, une incertitude associée à la chronique de débit provenant presque exclusivement de la courbe de tarage (incertitude médiane assez importante de +/- 16%, Figure 26) avec une contribution provenant essentiellement des erreurs structurelles. Les incertitudes liées aux erreurs de mesures des hauteurs d'eau sont négligeable à pas de temps variable.

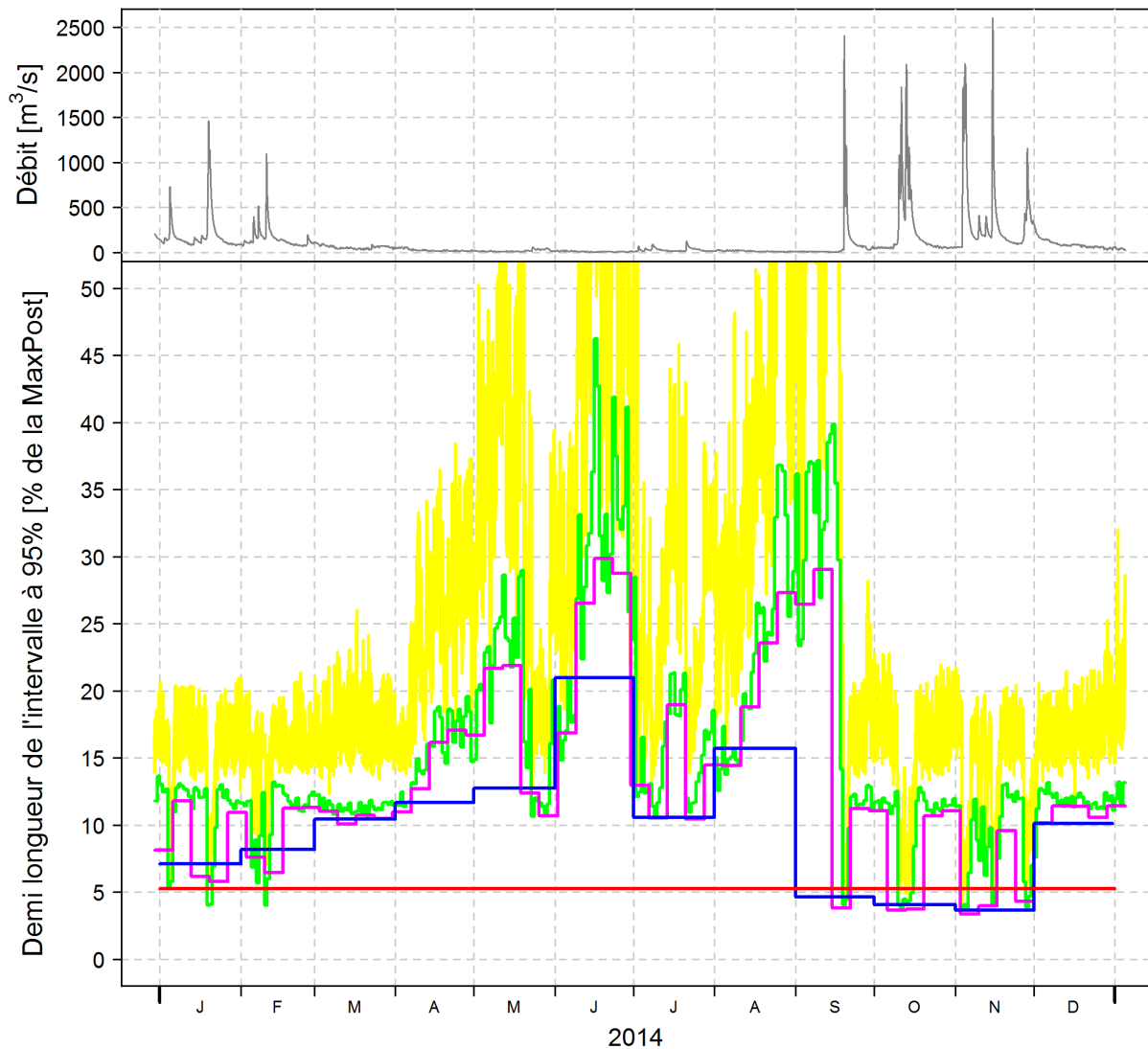


Figure 29: Demis longueurs des intervalles de confiance à 95% pour la station de Sauze à différent pas de temps : horaire (jaune), journalier (vert), hebdomadaire (violet), mensuel (bleu) et annuel (rouge). En haut, l'hydrogramme *MaxPost* de Sauze à pas de temps horaire est également présenté.

Tout comme pour la station de Port Galland, la Figure 29 montre que l'incertitude totale relative devient très importante pendant les périodes de plus fort étiage. On observe :

- à pas de temps horaire : incertitude le plus souvent comprise entre +/-13% et +/-25%.
- à pas de temps journalier : incertitude le plus souvent comprise entre +/-10% et +/-15% pouvant descendre jusqu'à +/-4% en crue.
- à pas de temps hebdomadaire : incertitude oscillant entre +/-7% pour les plus forts débits, +/-20-25% pour les débits moyens et atteignant plus de +/-50% en période d'étiage.
- à pas de temps mensuel : incertitude allant de +/-4% en automne à +/-30% en été.
- à pas de temps annuel : incertitude de l'ordre de +/-5%

On observe une légère diminution de l'incertitude totale avec l'agrégation temporelle.

4.6. Le Rhône à Valence

Nom :	Valence	Aménagement aval :	BE
Rivière / Bassin :	Rhône	N° Hydromet :	386
PK :	109.700	N° GMAO :	BE-PRBE-S01
Taille BV (km ²):	66 450	N° OASIS	10-0750
X Lambert IIe:	801 171.258	Banque Hydro :	-
Y Lambert IIe:	1 995 602.575		

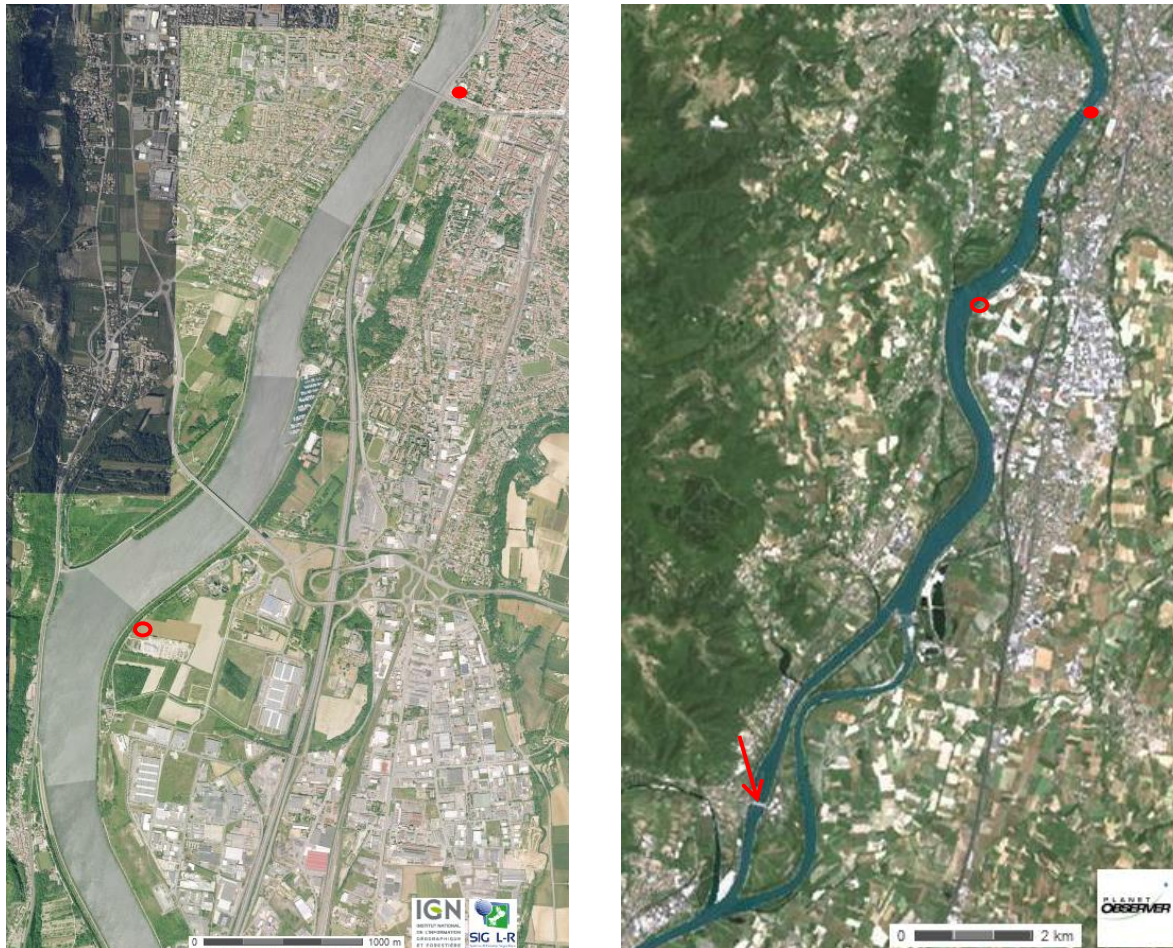


Figure 30: Photos aérienne du site de la station de Valence sur le Rhône. Le rond rouge plein identifie l'emplacement de la station de mesure principale de Valence, le rond rouge creux l'emplacement de la station aval secondaire et la flèche rouge le Barrage de Beauchastel.

4.6.1. Présentation de la station

La station de Valence sur le Rhône (PK 109.700) est située environs 14.7km en amont du barrage hydroélectrique de Beauchastel (PK 124.400). La présence du barrage induit une influence aval non négligeable lorsque le niveau d'eau augmente suffisamment à l'amont du barrage. Pour l'établissement d'une courbe de tarage dans ce contexte, il convient de prendre en compte la pente d'énergie du cours d'eau, approché par la pente de la ligne d'eau. De ce fait, la méthode BaRatin-SFD (Stage-Fall-Discharge) développée par V. Mansanarez a été appliquée à la station de Valence, avec, pour station aval (permettant le calcul de la pente) le point de réglage PR1 (PK 113.6) (voir la Figure 30).

4.6.2. Analyse hydraulique du site

L'analyse hydraulique du site de Valence a conduit à considérer deux contrôles distincts :

- Le contrôle de type Manning-Strickler par le chenal du cours d'eau sans aucune influence du barrage de Beauchastel.
- Un contrôle de type chenal également mais avec influence aval variable.

On se place dans la configuration décrite dans la section méthodologique en 2.2. L'équation (1) est donc utilisée, nécessitant la définition des *a priori* pour 8 paramètres à fournir à BaRatin. La définition des *a priori* s'appuie sur les caractéristiques physiques du site. Toutes les hauteurs mentionnées ici sont en mètres échelle (le zéro échelle étant à 160mNGF Orthométrique).

En absence l'influence aval, le chenal aux alentours du site est considéré. Celui-ci est approché par une loi de Manning-Strickler pour un chenal rectangulaire, homogène et de largeur constante, ayant les caractéristiques suivantes :

- La largeur moyenne, déduite des relevés topographiques et des mesures de distance faites sur Géoportail, est estimée vers $B' = 180\text{m}$ (+/- 20m).
- Un coefficient de rugosité (Strickler) estimé à partir du calage du modèle hydraulique du Rhône est définie vers $K'_S = 30\text{m}^{1/3} \cdot \text{s}^{-1}$ (+/- $5\text{m}^{1/3} \cdot \text{s}^{-1}$).
- Le niveau moyen du fond du lit, assez inconnu, se situe probablement vers $h'_0 = -3\text{m}$ (+/-2m), d'après les relevés topographiques faits aux abords de la station.
- Les relevés topographiques aux alentours du site indique une pente du lit positive et ne permet donc pas une estimation de la pente de la ligne d'eau. Une pente très incertaine de $J' = 0.001$ (+/- 0.001) a donc été retenue.

Pour le contrôle où l'influence aval variable doit être prise en compte, l'ensemble du chenal entre les deux stations (station principale de Valence et station aval secondaire) est considéré pour l'estimation *a priori* des paramètres de l'équation :

- La largeur moyenne est légèrement supérieure du fait de l'élargissement du cours d'eau à l'aval de la station de Valence, aux abords de la station secondaire. Une largeur $B = 200\text{m}$ (+/- 100m) est retenue dans l'analyse BaRatin.
- Le même coefficient de Strickler ($K_S = 30\text{m}^{1/3} \cdot \text{s}^{-1}$ (+/- $5\text{m}^{1/3} \cdot \text{s}^{-1}$)) est retenu.
- Le niveau moyen du fond du cours d'eau est également pris assez incertain autour de la même valeur : $h_0 = -3\text{m}$ (+/-2m).
- La longueur séparant les deux stations, étant également nécessaire, est estimée vers $L = 3900\text{m}$ (+/- 200m)
- Enfin, la différence de niveau entre les zéros des deux échelles (échelles des stations amont et aval) doit également être considérée. Celle-ci est considérée précise dans le cas de Valence (d'après les questionnaires de la station) et est estimée vers : $\delta_h = 0\text{m}$ (+/- 0.05m).

Les paramètres *a priori* suivants sont donc estimés pour la mise en œuvre de BaRatin :

Paramètre	Valeur centrale	Incertitude élargie (95%)
$K_S B$	6000	+/- 3162
h_0	-3	+/- 2
M (exposant)	1.67	+/- 0.05
L	3900	+/- 200
δ_h	0	+/- 0.05
$K'_S B' \sqrt{J}$	171	+/- 92
h'_0	-3	+/- 2
M' (exposant)	1.67	+/- 0.05

4.6.3. Jaugeages

Tous les jaugeages valides ont été conservés pour l'analyse BaRatin. La grande majorité des jaugeages ayant été réalisée par ADCP, une incertitude de +/- 5% a été attribuée pour tous les jaugeages.

C'est également à partir des jaugeages que sont déterminées les valeurs de h_2 (hauteur d'eau de la station aval) pour lesquelles les calculs de débit seront faits par BaRatin (voir la courbe de tarage estimée par BaRatin, Figure 31). En effet, pour certaines valeurs de h_2 , plusieurs jaugeages ont été effectués conduisant à retenir ces valeurs, à savoir : 1.34m, 1.93m, 2.4m, 2.76m et 3.04m. Les deux dernières hauteurs n'ont aucun jaugeage associé mais ont tout de même été retenues afin de présenter les courbes de tarage simulées pour les hauteurs h_2 les plus élevées.

4.6.4. Résultats de BaRatin

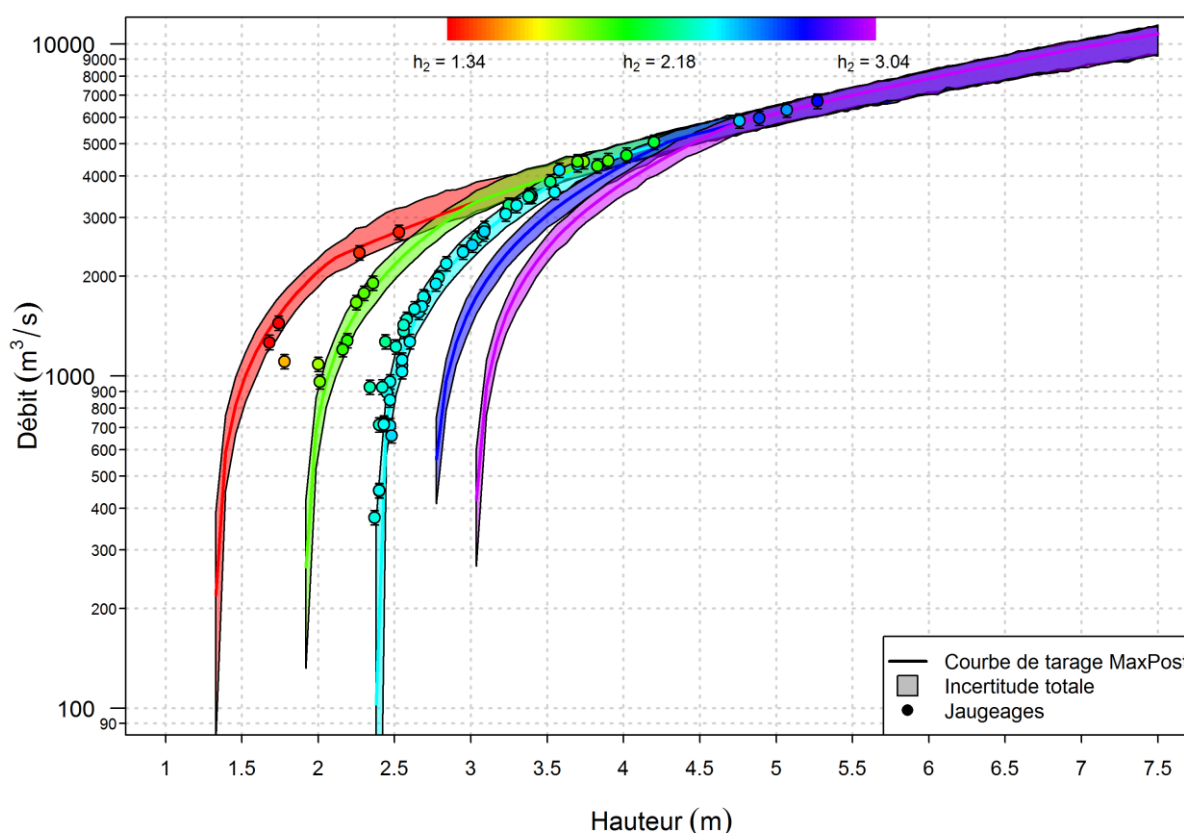


Figure 31: Courbes de tarage et incertitudes associées estimées par BaRatin pour la station de Valence. Le gradient de couleur indique la valeur de h_2 pour les jaugeages et les différentes courbes de tarage tracées. Du rouge au violet, les cinq courbes de tarage tracées sont respectivement pour des hauteurs de h_2 de 1.34m, 1.93m, 2.4m, 2.76m et 3.04m.

La Figure 31, présentant les courbes de tarage et incertitudes associées estimées par BaRatin montre une très bonne cohérence avec les jaugeages. De plus, on constate, avec la Figure 32 (et le Tableau 7), que les valeurs des paramètres *a posteriori* sont pour la plupart en accords avec les valeurs et incertitudes définies *a priori*. Cependant, le niveau d'eau h'_0 et le paramètre « a_2 » ou $K'_S B' \sqrt{J}$ ont des valeurs *a posteriori* aux limites des intervalles définies *a priori*. La valeur *MaxPost* de h'_0 suggère un niveau moyen du chenal élevé par rapport à ce qu'indique la topographie. La *MaxPost* du paramètre $K'_S B' \sqrt{J}$ suggère une pente très importante, de l'ordre de 0.002 (soit 0.2%) ce qui paraît anormalement

élevé. Il est possible que cela soit dû à des *a priori* un peu trop laxistes sur ces deux paramètres. Cela ne permet pourtant pas la remise en cause l'analyse BaRatin étant donnée les simplifications induites par le modèle mathématique choisi pour représenter la relation hauteur-débit-débit et l'importante corrélation des deux paramètres cités.

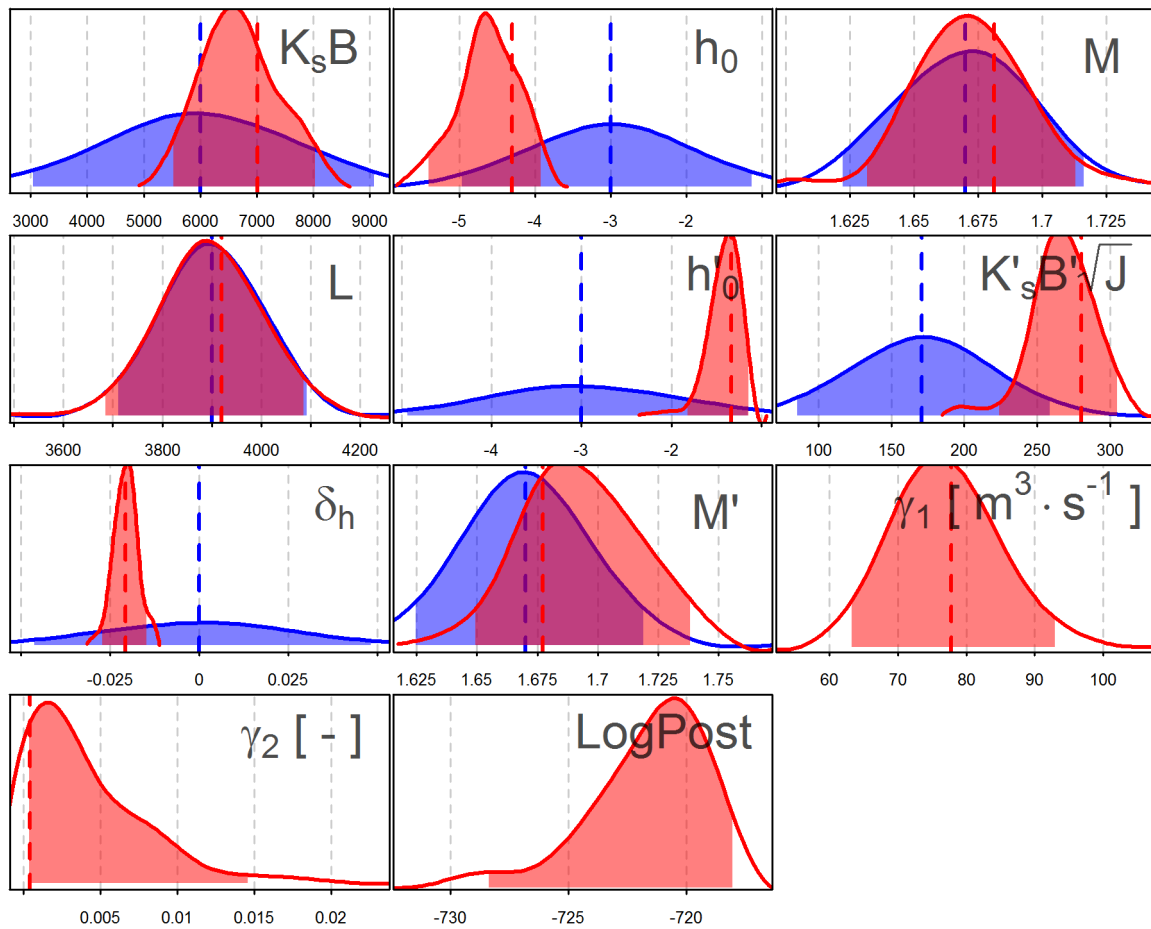


Figure 32: Distributions des paramètres *a priori* (bleu) et *a posteriori* (rouge) pour la station de Valence sur le Rhône, les traits verticaux correspondent aux valeurs moyennes *a priori* (bleu) et *MaxPost* (rouge).

Tableau 7: valeurs des paramètres (et quantiles 2.5% et 97.5%) *a priori* et *a posteriori* pour la station de Valence sur le Rhône.

	<i>a priori</i>		<i>a posteriori</i>	
	moyenne	[2.5% , 97.5%]	<i>MaxPost</i>	[2.5% , 97.5%]
$K_s B$	6000	[2838 , 9162]	7017.7	[5516.6 , 8060.4]
h_0	-3	[-5 , -1]	-4.31	[-5.42 , -3.89]
M	1.67	[1.62 , 1.72]	1.681	[1.63 , 1.713]
L	3900	[3700 , 4100]	3920.4	[3682.3 , 4089.5]
δ_h	0	[-0.05 , 0.05]	-0.021	[-0.027 , -0.015]
$K'_s B' \sqrt{J}$	171	[79 , 263]	280.2	[223.2 , 306.5]
h'_0	-3	[-5 , -1]	-1.33	[-1.83 , -1.13]
M'	1.67	[1.62 , 1.72]	1.677	[1.648 , 1.74]
γ_1	Uniforme	[0 , 100000]	77.8	[63.2 , 93.4]
γ_2	Uniforme	[0 , 100000]	0.0004	[0.00016 , 0.0147]

4.6.5. Propagation des incertitudes aux hydrogrammes

La propagation des incertitudes à l'hydrogramme doit prendre en compte les erreurs affectant les deux limnigrammes : amont et aval. Les erreurs sont considérées par rapport aux zéros des deux échelles respectives. Notez que le paramètre δ_h rend compte de l'incertitude sur le nivellement des deux échelles. De même que pour les courbes de tarage simple niveau, deux types d'erreurs sont considérées : les erreurs systématiques et les erreurs non systématiques :

- Pour les erreurs systématiques : écart-type de 0.015m
- Pour les erreurs non-systématiques : écart-type de 0.01m

Un recalage du capteur mesurant les hauteurs d'eau a été considéré toutes les deux semaines pour les deux stations (amont et aval). Les résultats sont présentés par la Figure 33 et la Figure 34.

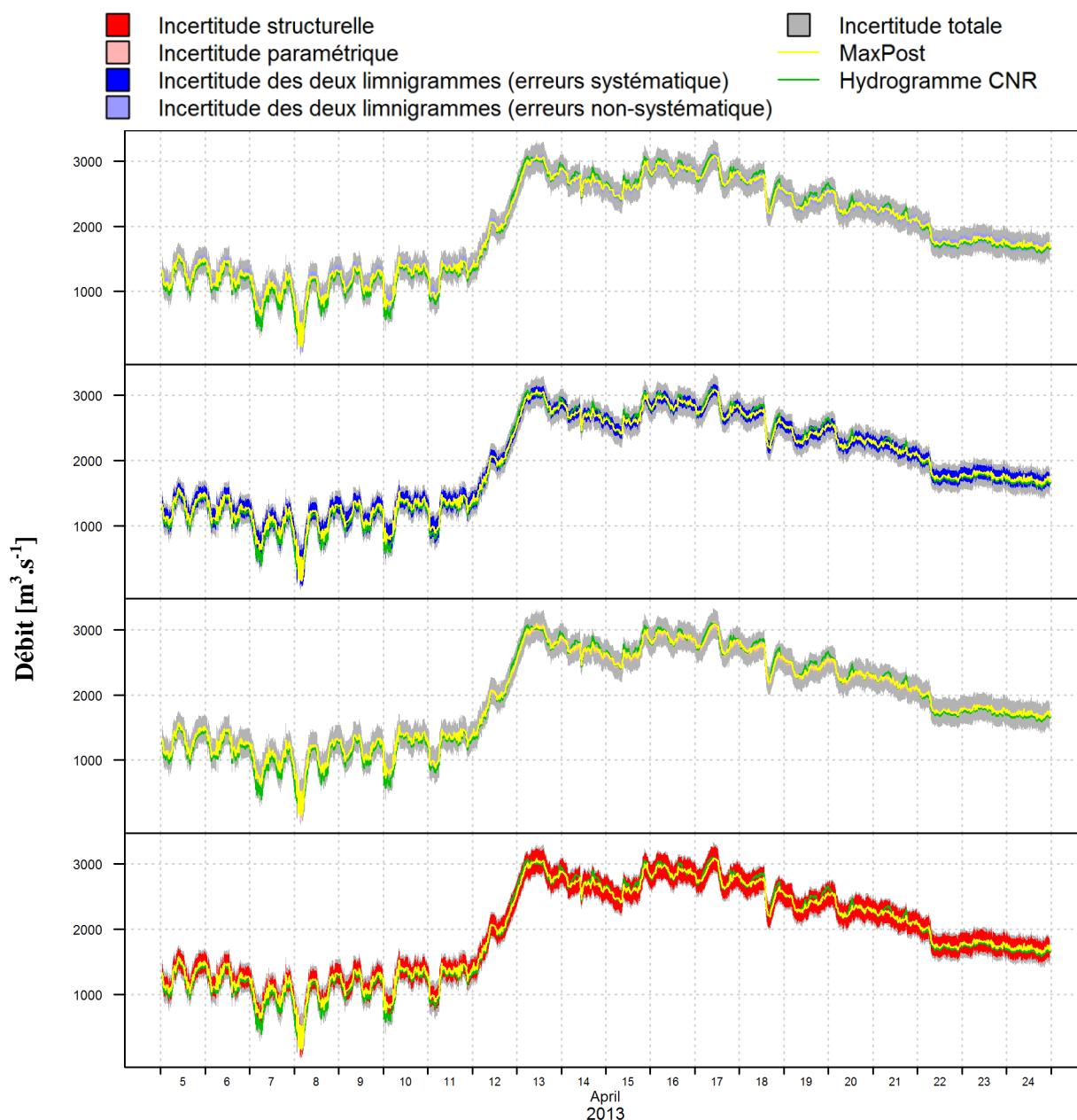


Figure 33: Hydrogrammes *MaxPost* de Valence et enveloppes d'incertitudes associées. Du graphique du bas à celui du haut sont respectivement présentées : l'incertitude structurelle, l'incertitude paramétrique, l'incertitude sur le limnigramme liée aux erreurs systématiques, l'incertitude sur le limnigramme liée aux erreurs non-systématiques.

La Figure 33 montre que l'incertitude structurelle est prédominante à pas de temps variable. Les incertitudes associées aux mesures des hauteurs d'eau présentent des contributions également assez importantes. L'incertitude paramétrique est ici assez faible. Toutefois, sa contribution à l'incertitude totale est susceptible d'être bien plus importante après agrégation à pas de temps annuel, mensuel ou même hebdomadaire.

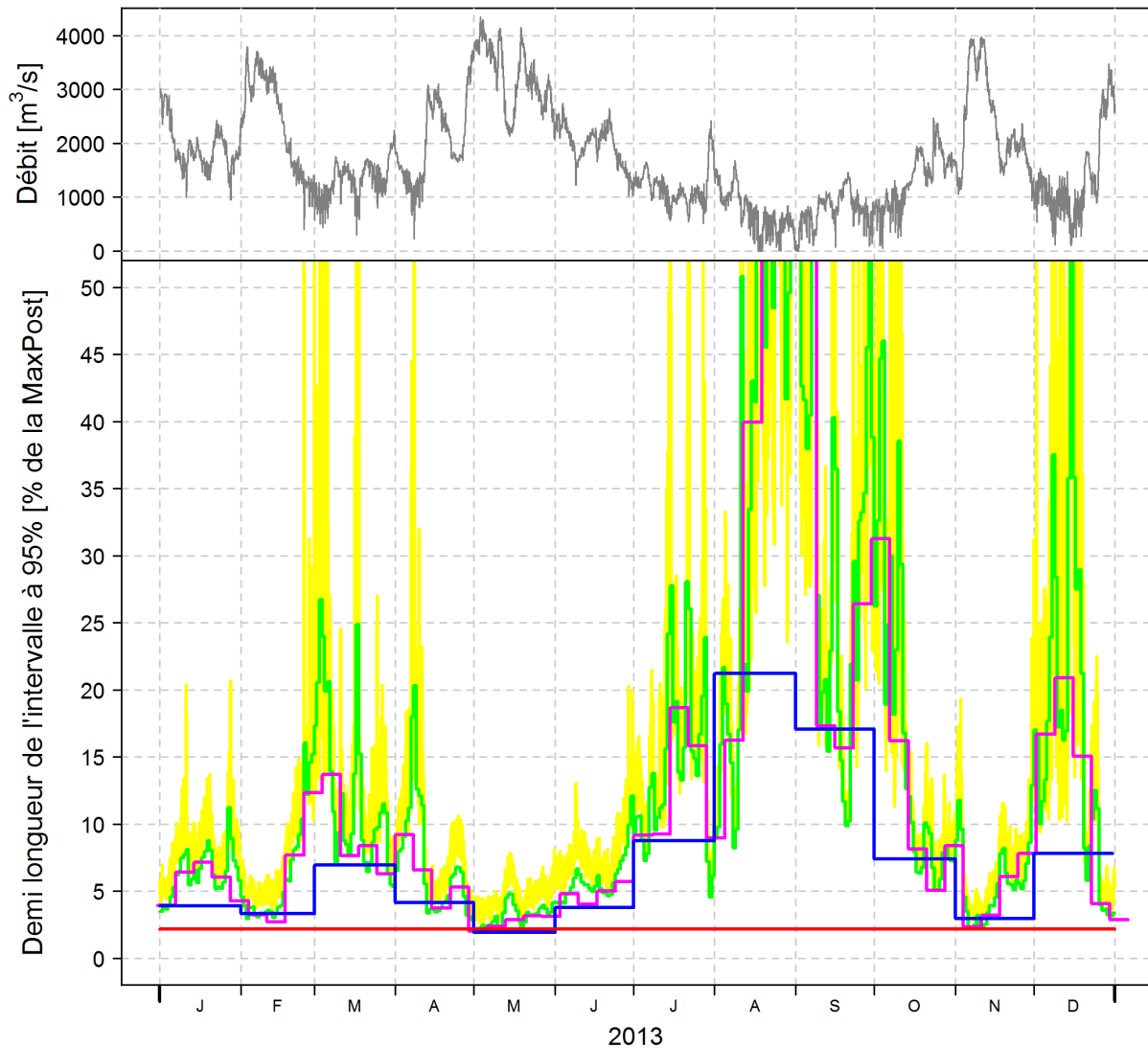


Figure 34: Demi-longueurs des intervalles de confiance à 95% pour la station de Valence à différent pas de temps : horaire (jaune), journalier (vert), hebdomadaire (violet), mensuel (bleu) et annuel (rouge). En haut, l'hydrogramme *MaxPost* de Valence à pas de temps horaire est également montré.

La Figure 34 indique des incertitudes très variables à pas de temps horaire, journalier et hebdomadaire, oscillant entre $\pm 2.5\%$ et $\pm 7.5\%$ à haut débit (supérieur à $3000\text{m}^3/\text{s}$) et supérieurs à $\pm 50\%$ pour les faibles débits. On note toutefois une diminution de ces variations selon le débit avec le degré d'agrégation temporelle. A pas de temps mensuel, les incertitudes oscillent entre $\pm 2.5\%$ (mois à forts débits) et $\pm 22\%$ pour les mois présentant les débits les plus faibles. A pas de temps annuel, une incertitude de l'ordre de $\pm 2.5\%$ est calculée.

4.7. La Saône à Couzon

Nom :	Couzon	Aménagement aval :	PB
Rivière / Bassin :	Saône	N° Hydromet :	286
PK :	-	N° GMAO :	PB-PRPB-S16
Taille BV (km ²):	29 908	N° OASIS	10-0385
X Lambert IIe:	794 007.345	Banque Hydro :	-
Y Lambert IIe:	2 096 898.324	Zéro échelle (mNGF Ortho) :	160

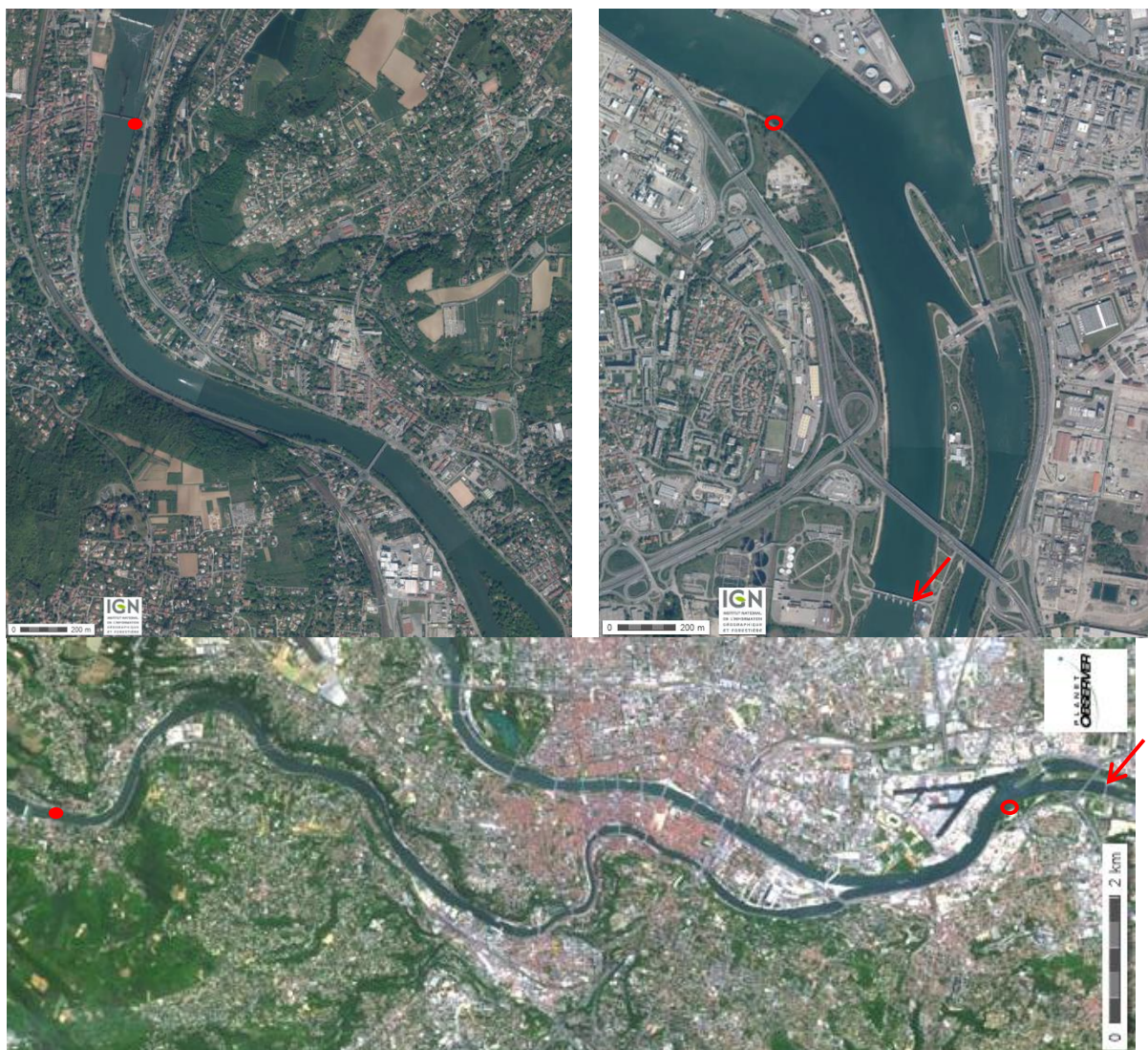


Figure 35: Photos aériennes du site de la station de Couzon sur la Saône. Le rond rouge plein identifie l'emplacement de la station de mesure principale de Couzon, le rond rouge creux l'emplacement de la station aval secondaire (PB PR PK3.0) et la flèche rouge le Barrage de Pierre-Bénite.

4.7.1. Présentation de la station

La station de Couzon sur la Saône est située en amont de Lyon à 18km environ de la confluence avec le Rhône. La Saône est un affluent majeur du Rhône représentant environs 45% de la surface totale du bassin versant du Rhône. Le suivi des débits de cet affluent constitue un enjeu majeur pour la CNR. La station est sujette à une influence aval variable causée par la confluence avec le Rhône (et le barrage de Pierre-Bénite, situé à quelques kilomètres en aval de la confluence Saône-Rhône). Il est donc nécessaire d'utiliser une relation hauteur-dénivelée-débit pour l'estimation des débits. La station

secondaire, permettant d'approcher de la pente d'énergie, se situe à environ 20km à l'aval de la station de contrôle, sur le Rhône : il s'agit de point de réglage PK3.0.

4.7.2. Analyse hydraulique du site

Deux contrôles sont distingués :

- Le contrôle de type Manning-Strickler par le chenal du cours d'eau sans aucune influence aval.
- Un contrôle de type chenal également mais avec influence aval variable.

On se place dans la configuration décrite dans la section méthodologique en 2.2. L'équation (1) est donc utilisée, nécessitant la définition des *a priori* pour 8 paramètres à fournir à BaRatin. Toutes les hauteurs mentionnées ici sont en mètres échelles (le zéro échelle étant à 160mNGF Orthométrique).

En absence d'influence aval, le chenal aux alentours du site est considéré :

- La largeur moyenne, estimée via Géoportail se situe vers $B' = 140\text{m}$ (+/- 30m)
- Un coefficient de rugosité (Strickler) est estimé grossièrement vers $K'_S = 30\text{m}^{1/3} \cdot \text{s}^{-1}$ (+/- $5\text{m}^{1/3} \cdot \text{s}^{-1}$).
- Le niveau moyen du fond du chenal est définie (à partir des relevés topographiques du modèle OSR) de façon assez incertain (vers : $h'_0 = -3\text{m}$ (+/-2m).
- Laurent Astrade et Jean-Paul Bravard (1998) estimaient une pente moyenne de 0.00021 dans la partie aval de la Saône. Les relevés topographiques du modèle OSR indiquent une pente comprise entre 0.0015 et 0.00067. Cela a conduit à estimer une pente vers 0.0005 +/- 0.0004.

Pour l'influence aval variable, l'ensemble du chenal entre les deux stations (station principale de Couzon et station aval secondaire, PR PK3.0) est considéré pour l'estimation *a priori* :

- La largeur moyenne du chenal est estimée à partir d'un ensemble de mesures faite sur Géoportail. Les largeurs sont assez variables le long du linéaire séparant les deux stations, étant parfois supérieures à 200m de large et parfois proche de 70m de large (partie traversant Lyon). Une largeur $B = 130\text{m}$ (+/- 50m) est retenue dans l'analyse BaRatin.
- Le même coefficient de Strickler ($K_S = 30\text{m}^{1/3} \cdot \text{s}^{-1}$ (+/- $5\text{m}^{1/3} \cdot \text{s}^{-1}$)) est définie *a priori*.
- Le niveau moyen du fond du chenal est difficile à approcher. Le minimum de la section topographique de la station secondaire se situant vers -13m et h'_0 (niveau moyen du chenal aux alentours de la station principale) ayant été estimé vers -3m, une hauteur $h_0 = -6\text{m}$ (+/-3.5m) paraît être une approximation raisonnable.
- La longueur séparant les deux stations est estimé vers $L = 20000\text{m}$ (+/- 500m)
- Enfin, la différence de niveau entre les zéro des deux échelles (échelles des stations amont et aval) est estimée vers : $\delta_h = 0\text{m}$ (+/- 0.05m).

Les paramètres *a priori* suivants sont donc estimés pour la mise en œuvre de BaRatin-SFD :

Paramètre	Valeur centrale	Incertitude élargie (95%)
$K_S B$	3900	+/- 1630
h_0	-6	+/- 3.5
M	1.67	+/- 0.05
L	20 000	+/- 500
δ_h	0	+/- 0.05
$K'_S B' \sqrt{J}$	94	+/- 45
h'_0	-3	+/- 2
M'	1.67	+/- 0.05

4.7.3. Jaugeages

Tous les jaugeages valides ont été conservés pour l'analyse BaRatin. La grande majorité des jaugeages ayant été réalisée par ADCP, une incertitude de +/- 5% a été attribuée pour tous les jaugeages.

4.7.4. Résultats de BaRatin

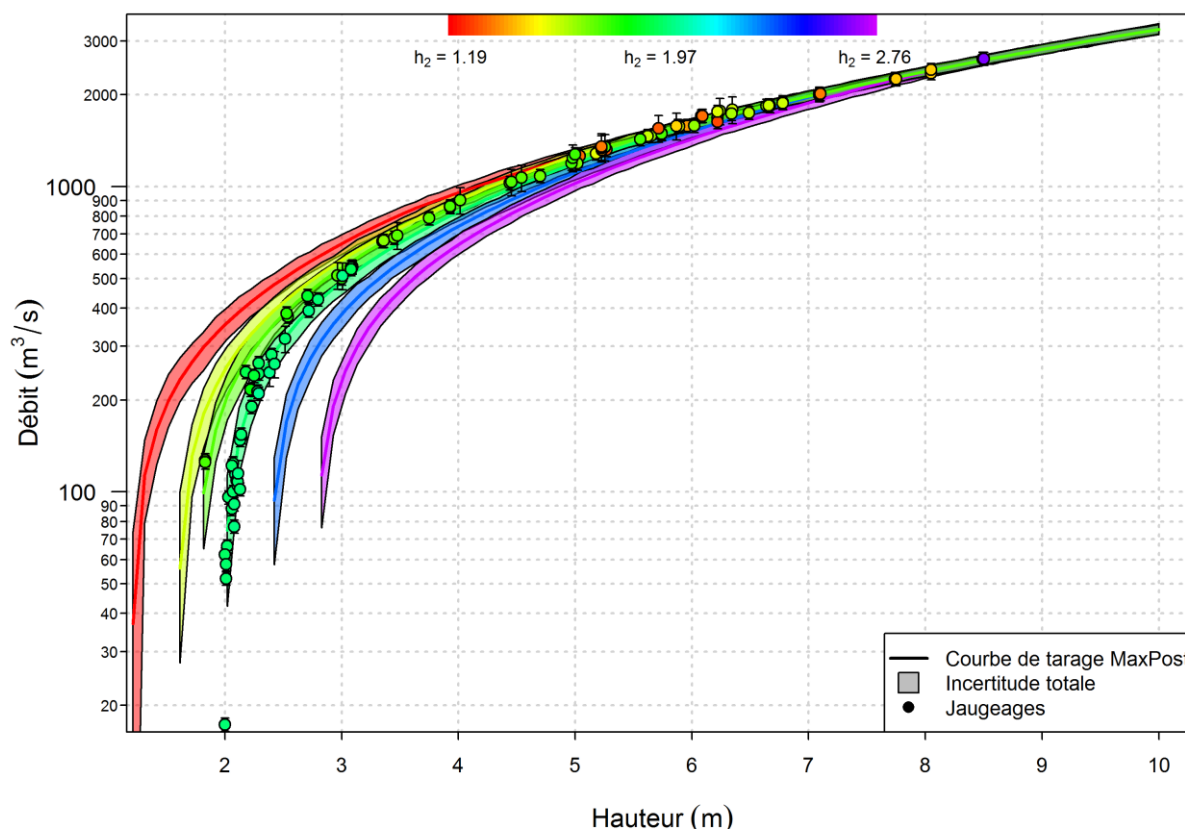


Figure 36: Courbes de tarage et incertitudes associées estimées par BaRatin pour la station de Couzon sur la Saône. Le gradient de couleur indique la valeur de h_2 pour les jaugeages et les différentes courbes de tarage tracées. Du rouge au violet, les cinq courbes de tarage tracées sont respectivement pour des hauteurs de h_2 de 1.19m, 1.58m, 1.74m, 1.98m, 2.37m et 2.76m.

Les résultats de BaRatin sont tout à fait en accord avec les jaugeages (voir la Figure 36). La plupart des jaugeages faits pour des faibles hauteurs de h_1 ont été faits pour des valeurs de h_2 proches de 1.98m. Très peu de jaugeages permettent de voir la cohérence des autres courbes tracées sur la Figure 36, estimées pour d'autres valeurs de h_2 . On constate tout de même un très bon accord entre le jaugeage fait pour une valeur de h_2 proche de 1.74m.

Les paramètres de l'équation de la courbe de tarage (Figure 37 et Tableau 8) estimés par BaRatin (valeur *MaxPost a posteriori*) sont tous en accords avec les intervalles d'incertitudes définies *a priori* à l'exception du paramètre K_5B pour lequel la valeur *a posteriori* est très basse. En effet, pour ce paramètre, la valeur estimée *a posteriori* suggère une rugosité faible (proche de 25) et une largeur très faible (environ 75 m). Ce résultat reste tout de même physiquement cohérent dans la mesure où le chenal, entre les deux stations, se rétrécit beaucoup au niveau de la traversée de Lyon.

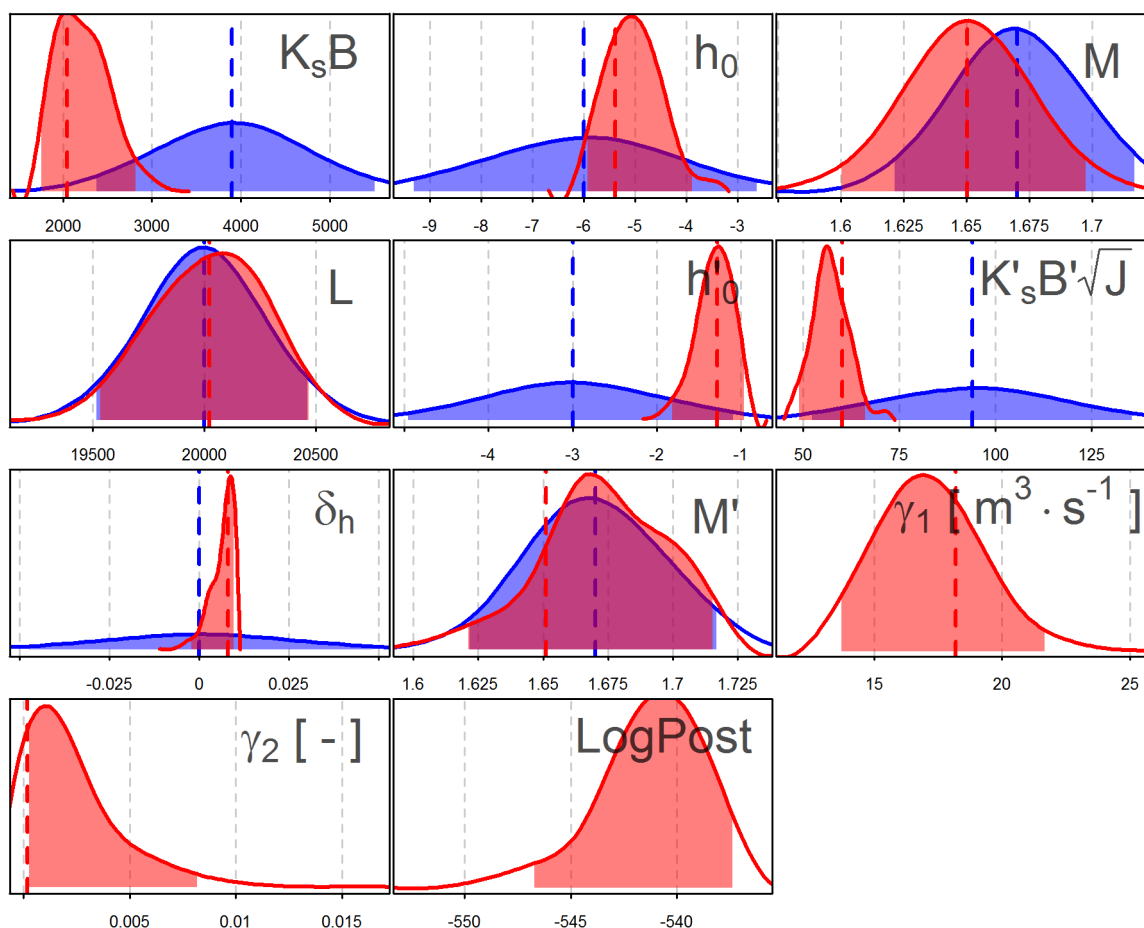


Figure 37: Distributions des paramètres *a priori* (bleu) et *a posteriori* (rouge) pour la station de Couzon sur la Saône, les traits verticaux correspondent aux valeurs moyennes *a priori* (bleu) et *MaxPost* (rouge).

Tableau 8: valeurs des paramètres (et quantiles 2.5% et 97.5%) *a priori* et *a posteriori* pour la station de Couzon sur la Saône.

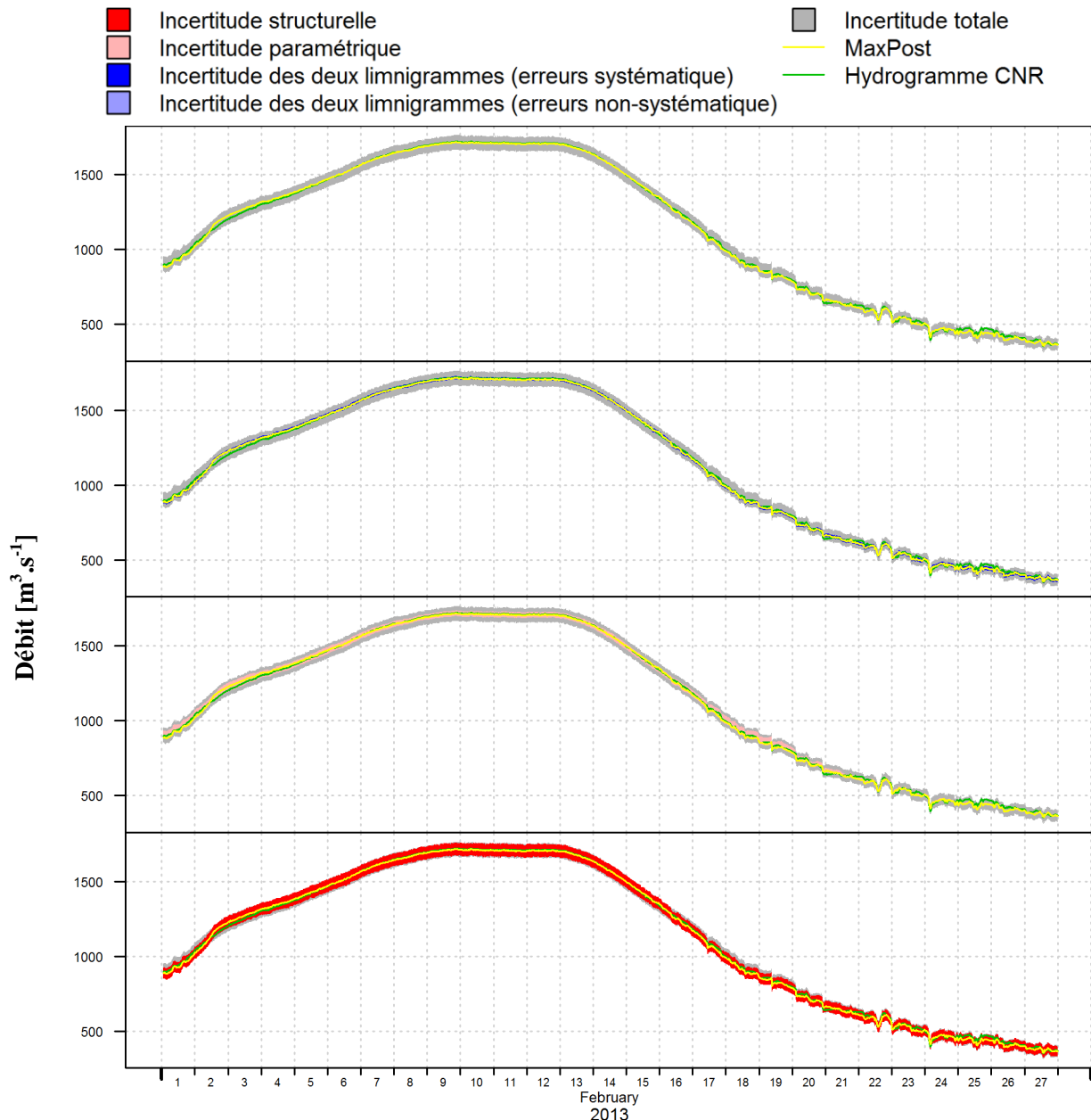
	<i>a priori</i>		<i>a posteriori</i>	
	moyenne	[2.5% , 97.5%]	<i>MaxPost</i>	[2.5% , 97.5%]
$K_s B$	3900	[1970 , 5230]	2043	[1758.3 , 2838.6]
h_0	-6	[-9.5 , -2.5]	-5.4	[-5.95 , -3.87]
M	1.67	[1.62 , 1.72]	1.65	[1.60 , 1.699]
L	20 000	[19 500 , 20 500]	20 023.2	[19 534 , 20 488]
δ_h	0	[-0.05 , 0.05]	0.008	[-0.022 , 0.0098]
$K'_s B' \sqrt{J}$	94	[49 , 139]	60.13	[48.81 , 66.25]
h'_0	-3	[-5 , -1]	-1.287	[-1.83 , -0.95]
M'	1.67	[1.62 , 1.72]	1.651	[1.62 , 1.717]
γ_1	Uniforme	[0 , 100000]	18.18	[13.6 , 21.7]
γ_2	Uniforme	[0 , 100000]	0.00016	[0.00007 , 0.0083]

4.7.5. Propagation des incertitudes aux hydrogrammes

Pour les deux limnigrammes, les valeurs d'incertitude-type suivantes ont été retenues :

- Pour les erreurs systématiques : écart-type de 0.015m
- Pour les erreurs non-systématiques : écart-type de 0.01m

Un recalage du capteur mesurant les hauteurs d'eau a été considéré toutes les deux semaines pour les deux stations (amont et aval) d'où un ré-échantillonnage de l'erreur systématique fait en moyenne tous les 15 jours. Les résultats sont présentés par la Figure 38 et la Figure 39 (hydrogrammes respectivement à haut et bas débit) et par la Figure 40 (demi-longueurs des intervalles de confiance à 95% de l'incertitude totale à différent pas de temps).



La Figure 38, présentant l'hydrogramme estimé pour un mois à fort débit, montre que les incertitudes structurelles sont prédominantes à pas de temps variable. L'incertitude paramétrique contribue également à l'incertitude totale alors que les incertitudes associées aux mesures des hauteurs d'eau paraissent négligeables.

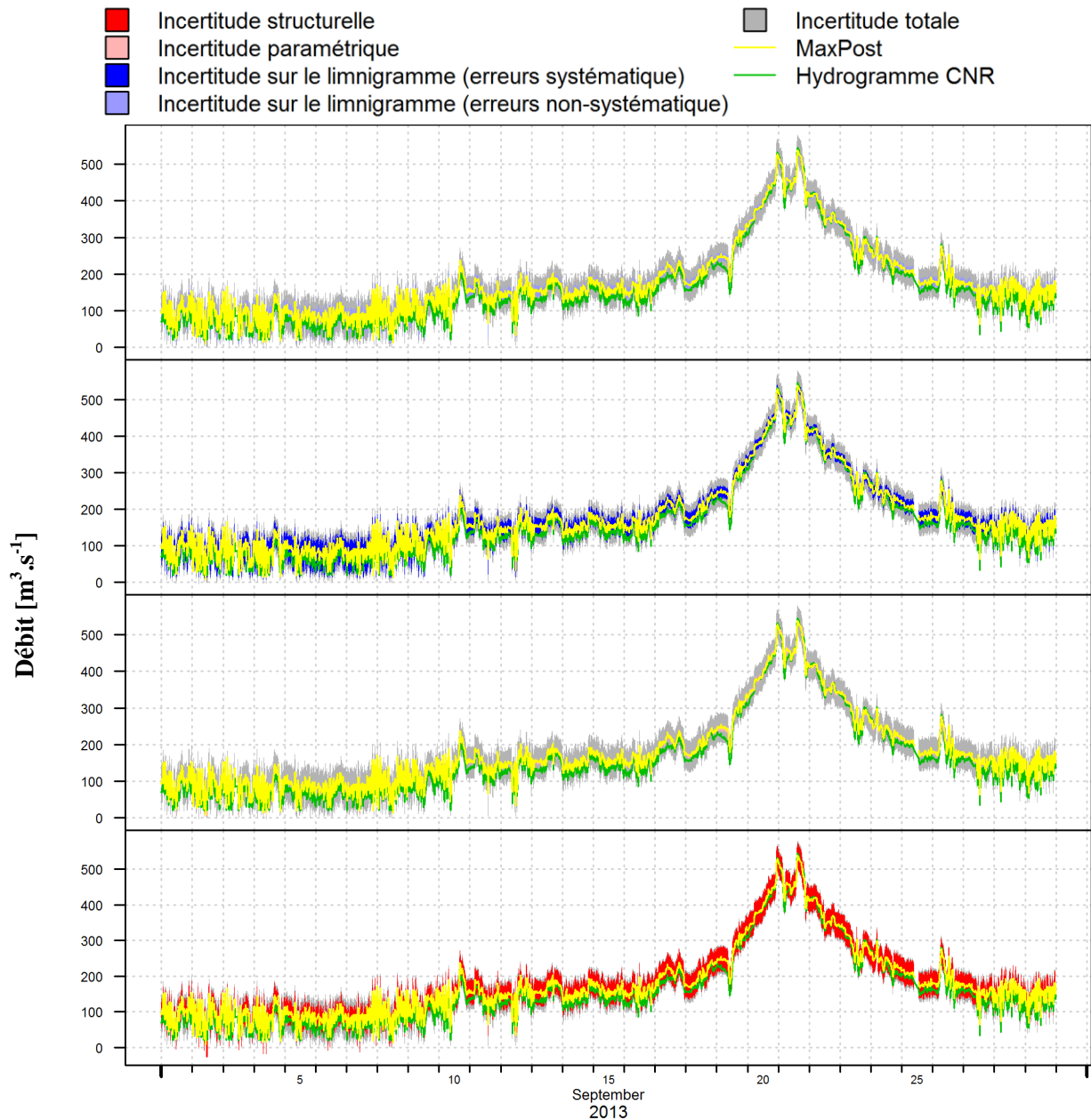


Figure 39: Hydrogrammes *MaxPost* de Couzon et enveloppes d'incertitudes associées (choix d'un mois à bas débits).. Du graphique du bas à celui du haut sont respectivement présentées : l'incertitude structurelle, l'incertitude paramétrique, l'incertitude sur le limnigramme liée aux erreurs systématiques, l'incertitude sur le limnigramme liée aux erreurs non-systématiques.

Pour les bas débits (Figure 39), l'incertitude structurelle est toujours prédominante. Cependant on constate que les incertitudes associées aux limnigrammes ne sont plus négligeables, surtout la part provenant des erreurs systématiques. L'incertitude paramétrique, quant à elle, paraît négligeable.

La Figure 38 permet de constater un très bon accord entre la chronique de débit *MaxPost* estimés par BaRatin et celle de la CNR. Cependant, pour les débits plus faibles (Figure 39), on constate une surestimation systématique de la chronique BaRatin par rapport à celle de la CNR.

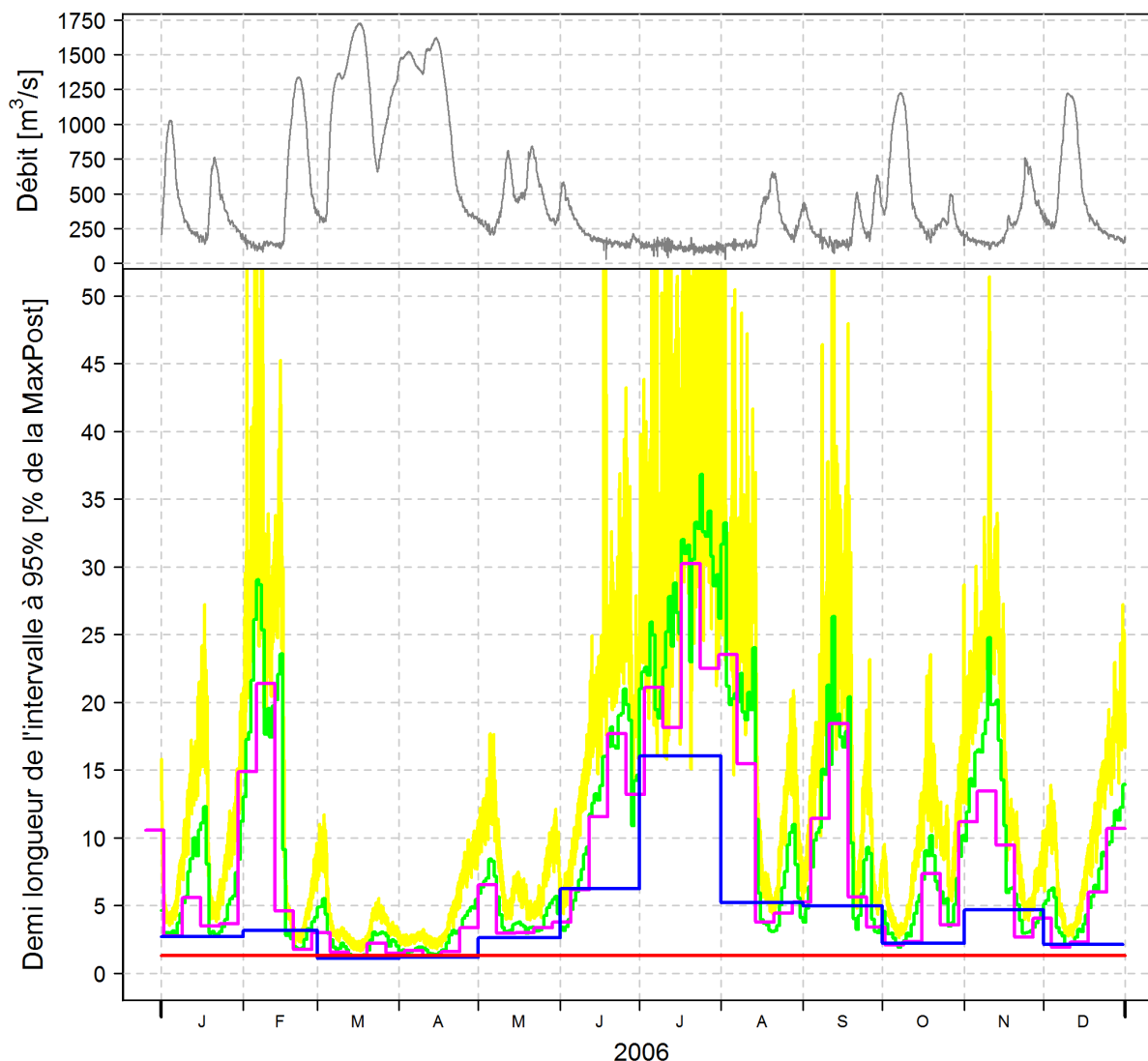


Figure 40: Demis longueurs des intervalles de confiance à 95% pour la station de Couzon à différent pas de temps: horaire (jaune), journalier (vert), hebdomadaire (violet), mensuel (bleu) et annuel (rouge). En haut, l'hydrogramme *MaxPost* de Couzon à pas de temps horaire est également montré.

La Figure 40 montre que l'incertitude totale relative au débit *MaxPost* est très variable selon la gamme de débit. On observe :

- à pas de temps horaire : incertitude allant de +/-2.5% à plus de +/-50%.
- à pas de temps journalier : incertitude légèrement plus faible allant de +/-2.5% à +/-35%
- à pas de temps hebdomadaire : incertitude également légèrement plus faible, de +/-2.5% pour les plus forts débits et atteignant +/-30% pour la semaine la plus sèche.
- à pas de temps mensuel : incertitude allant de +/-1.5% à +/-16%.
- à pas de temps annuel : incertitude de l'ordre de +/-1.5%

On observe également une importante diminution de l'incertitude totale avec l'agrégation temporelle.

5. Conclusions et perspectives

Après une courte introduction et quelques rappels sur les principes de la méthode BaRatin (section 2.1), une présentation de la méthode BaRatin pour les courbes doubles niveaux (modèle SFD, section 2.2) ainsi qu'une description détaillée de la méthode de propagation des incertitudes aux hydrogrammes ont été faites (section 2.3). Le résumé et les principaux résultats de l'article scientifique présentant les travaux d'évaluation de la méthode font l'objet de la section 3. Enfin, les analyses des courbes de tarages et la mise en œuvre de la propagation des incertitudes aux hydrogrammes sur 7 stations ont été décrites (section 4).

Des incertitudes totales des courbes de tarage simple niveau inférieures à $\pm 6\%$ pour les stations du Rhône ont été estimées. Celles-ci étaient de l'ordre de $\pm 15\%$ pour les affluents du Rhône considérés (l'Ain à Port Galland et l'Ardèche à Sauze). Cette différence est essentiellement une conséquence des gammes de débit très différentes entre le Rhône et ces cours d'eau. D'autres différences d'incertitude entre les courbes de tarage des stations situées sur le Rhône mettaient en évidence l'influence du nombre de jaugeages : les stations les mieux jaugeées présentaient des incertitudes totales médianes plus faibles proche de $\pm 3\%$.

La propagation des incertitudes aux hydrogrammes a montré que la contribution de l'incertitude provenant de la courbe de tarage était, dans la plupart des cas, prédominante. Cependant, il a aussi été mis en évidence que l'incertitude provenant des limnigrammes n'était souvent pas négligeable.

A pas de temps variable, les incertitudes structurelles étaient prédominantes dans la plupart des cas, surtout pour les stations peu jaugeées ou présentant une forte dispersion des jaugeages. L'incertitude structurelle des courbes double niveau s'est également révélée très importante.

A pas de temps horaire, journalier et même hebdomadaire, de fortes disparités de l'incertitude totale ont été trouvées. Celles-ci étaient essentiellement dues aux gammes de débit très différentes d'un pas de temps à un autre (l'incertitude relative étant beaucoup plus importante pour les faibles débits). Sur le Rhône, des incertitudes de $\pm 1.5\%$ à $\pm 20\%$ ont été estimées. Pour les débits mensuels et annuels des incertitudes respectivement de l'ordre de $\pm 1.5\%$ à $\pm 6\%$ et de $\pm 1\%$ à $\pm 2.5\%$ ont été estimées. Pour les plus petit cours d'eau, des incertitudes de $\pm 4\%$ à $\pm 20\%$ et de $\pm 5\%$ à $\pm 12\%$ ont été estimées respectivement pour les débits mensuels et annuels. Une diminution des incertitudes avec l'agrégation temporelle a également été mise en évidence pour certaines stations. Ce résultat, attendu, s'explique bien par le lissage des erreurs non-systématisées lors de l'agrégation temporelle, les erreurs systématiques restant inchangées.

Ces applications de la méthode BaRatin ont permis de mettre en évidence la relative simplicité de la mise en œuvre de la méthode à partir d'un minimum d'information sur les stations. Des analyses plus fines d'une part de l'hydraulique des stations pour la définition des *a priori* et d'autre part des erreurs liées aux mesures des hauteurs, surtout pour l'estimation des erreurs systématiques, seraient nécessaires pour valider les résultats d'incertitude présentés dans ce document.

Au terme de cette étude un certain nombre de travaux utilisant les développements méthodologiques faits sont envisageable. Voici une liste non exhaustive des utilisations futures possibles :

- Propagation des incertitudes à d'autres signatures hydrologiques
- Etude de l'importance du ré-échantillonnage des erreurs systématiques liée au limnigramme.
- Inclusion d'une erreur systématique dans les jaugeages.
- Etude de l'importance de la dépendance des incertitudes (provenant des erreurs non-systématisées) à la hauteur d'eau. Des développements seraient également utiles pour prendre en compte la dépendance à la hauteur d'eau de l'incertitude liée aux erreurs systématiques sur les mesures des hauteurs d'eau.
- Propagation des incertitudes à l'estimation de statistiques hydrologiques (crue centennale, étiage quinquennal, etc..).
- Utilisation pour le calage et la validation de modèles hydrologiques et hydrauliques.

6. Bibliographie

Astrade, L. et Bravard, J. (1999). Energy gradient and geomorphological processes along a river influenced by neotectonics (the Saône river, France). *Geodinamica Acta*, 12, 1, pp. 1-10.

Horner, I. (2014). Quantification des incertitudes hydrométriques et impact sur les bilans hydrologiques - Application au bassin versant de l'Yzeron (ouest Lyonnais). *Mémoire de fin d'étude*.

Le Coz, J., Camenen, B., Dramais, G., Ribot-Bruno, J., Ferry, M., & Rosique, J. L. (2011). Contrôle des débits réglementaires.

Le Coz, J., Renard, B., Bonnifait, L., Branger, F., Le Boursicaud, R. (2014). Combining hydraulic knowledge and uncertain gaugings in the estimation of hydrometric rating curves: A Bayesian approach. *Journal of Hydrology*, 509, pp. 573-587.

Mansanarez, V., Le Coz, J., Renard, B., Vauchel, P., Pobanz, K., Pierrefeu, G., Lang, M. (en préparation). Bayesian analysis of stage-fall-discharge rating curves and their uncertainties.

Pobanz, K., Le Coz, J., Pierrefeu, G. (2011). Intercomparison of ADCPs on the Rhone downstream of Genissiat Dam. *Groupe Doppler France, Intercomparison ADCP*, 2