



HAL
open science

Estimation des incertitudes sur les hydrogrammes avec BaRatin

I. Horner, Jérôme Le Coz, Benjamin Renard

► **To cite this version:**

I. Horner, Jérôme Le Coz, Benjamin Renard. Estimation des incertitudes sur les hydrogrammes avec BaRatin. [Rapport de recherche] irstea. 2015, pp.64. hal-02603516

HAL Id: hal-02603516

<https://hal.inrae.fr/hal-02603516v1>

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.

Estimation des incertitudes sur les hydrogrammes avec BaRatin

Ivan HORNER
Jérôme LE COZ
Benjamin RENARD

Erratum :

Modification le 22 juillet 2016.

Correction des figures 6, 12, 18, 25, 31, 38 et des valeurs d'incertitudes reportées dans le texte

PROGRAMME MEDDE (DGPR / SRNH) - IRSTEA 2015
Connaissance et prévention des risques naturels et hydrauliques

*Ces travaux bénéficient du soutien du Ministère chargé de l'Ecologie
par décision de subvention n°2101527675*



Estimation des incertitudes sur les hydrogrammes avec BaRatin

NOVEMBRE 2015

VERSION DEFINITIVE DU 18 AOUT 2016

Ivan HORNER
Jérôme LE COZ
Benjamin RENARD

Irstea, Unité de recherche « HYDROLOGIE
HYDRAULIQUE » (hhly)

5 rue de la Doua CS 70077
69626 VILLEURBANNE Cedex, France

www.irstea.fr



Table des matières :

1.	Présentation de l'étude – Introduction	1
1.1.	Contexte, enjeux et objectifs	1
1.2.	Livrables et contenu du rapport d'étude	1
2.	Présentation de BaRatin	2
2.1.	Analyse des courbes de tarage	2
2.2.	Propagation des incertitudes aux hydrogrammes	3
2.2.1.	Origines des erreurs affectant les mesures de hauteurs d'eau	3
2.2.2.	Du limnigramme à l'hydrogramme	4
2.2.3.	Quantification des erreurs de mesures des hauteurs d'eau	5
3.	Evaluation de la méthode de propagation des incertitudes	6
4.	Application de BaRatin sur 6 stations de la banque hydro	7
4.1.	L'Ardèche à Vallon Pont d'Arc	8
4.1.1.	Analyse hydraulique du site	8
4.1.2.	Les jaugeages	10
4.1.3.	Résultats BaRatin	10
4.1.4.	Propagation des incertitudes aux hydrogrammes	11
4.2.	La Volane à Vals-les-Bain	16
4.2.1.	Analyse hydraulique du site	16
4.2.2.	Les jaugeages	17
4.2.3.	Résultats BaRatin	17
4.2.4.	Propagation des incertitudes aux hydrogrammes	20
4.3.	L'Yzeron à Taffignon	24
4.3.1.	Analyse hydraulique du site	24
4.3.2.	Les jaugeages	26
4.3.3.	Résultats BaRatin	27
4.3.4.	Propagation des incertitudes aux hydrogrammes	28
4.4.	L'Yzeron à Craponne	32
4.4.1.	Analyse hydraulique du site	32
4.4.2.	Les jaugeages	35
4.4.3.	Résultats BaRatin	35
4.4.4.	Propagation des incertitudes aux hydrogrammes	39
4.5.	La Blies à Bliesbruck	42
4.5.1.	Analyse hydraulique du site	42
4.5.2.	Les jaugeages	43
4.5.3.	Résultats BaRatin	44
4.5.4.	Propagation des incertitudes aux hydrogrammes	46
4.6.	Le Bévinco à Lancone	50
4.6.1.	Analyse hydraulique du site	50

4.6.2.	Les jaugeages -----	52
4.6.3.	Résultats BaRatin -----	53
4.6.4.	Propagation des incertitudes aux hydrogrammes -----	56
5.	Conclusions et perspectives -----	59
6.	Bibliographie -----	60

1. Présentation de l'étude – Introduction

1.1. Contexte, enjeux et objectifs

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). 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), co-financés 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, aux 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 aléatoires 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. Livrables et contenu du rapport d'étude

Les livrables fournis par Irstea au SCHAPI sont :

- le présent rapport 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.

Le présent rapport d'étude est segmenté en trois parties. Une première partie présentera la méthode BaRatin et particulièrement les récents développements concernant la propagation des incertitudes aux hydrogrammes (section 2). Cette partie est suivie par un exposé rapide des principaux résultats des travaux d'évaluation menés (section 3). Dans un second temps, une présentation, station par station, des applications opérationnelles de la méthode sera faite (section 4). Enfin, le rapport se terminera par une conclusion générale (section 5) mettant en avant les principaux résultats, les développements récents ainsi que les perspectives en termes de développement méthodologique et d'application.

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

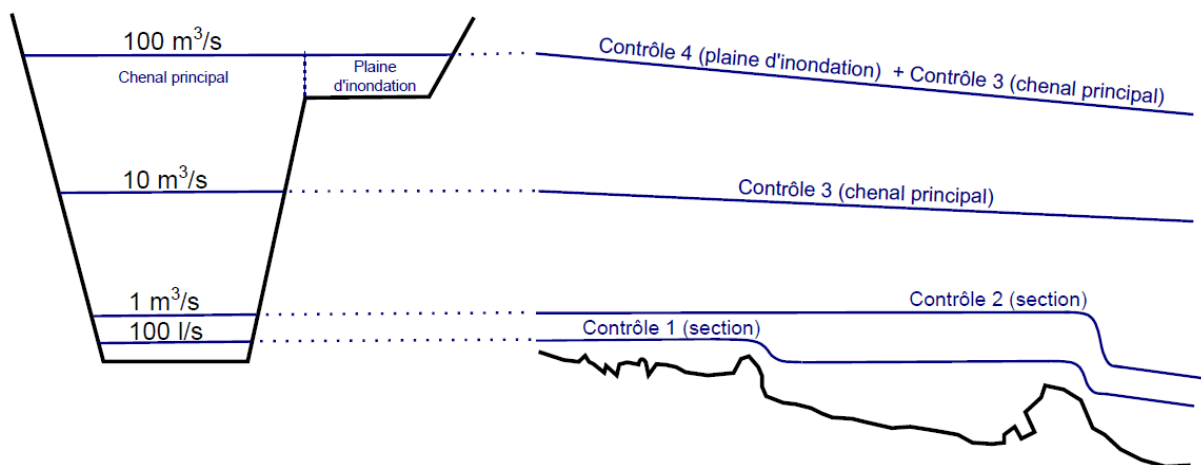


Figure 1: Succession de contrôles par sections et chenaux pour une station hydrométrique classique sans contrôles artificiels. Le fond du cours d'eau et les lignes d'eau pour différents débits sont représentés sur une section (à gauche) et sur un profil en long du cours d'eau (à droite). (D'après Le 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 prenant en compte l'information apportée d'une part les jaugeages et d'autre part, 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 probabilité

jointe. 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 tout autre enveloppe d'incertitude en adaptant les quantiles souhaités.

Notez que deux incertitudes distinctes affectent la courbe de tarage : l'incertitude paramétrique (liée aux 500 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. 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.

2.2.1. 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 plate. Les conditions d'écoulement ainsi que d'autres variables environnementales tel 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

limnimétrie : 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 toutes les périodes identifiées) suit une distribution gaussienne centrée sur zéro.

(4) Erreurs dues à la dérive du calage :

S'il 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.

2.2.2. Du limnigramme à l'hydrogramme

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 auto-corrélées 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 .

Ainsi BaRatin, à partir ...

- des 500 échantillons de courbes de tarage estimées par BaRatin précédemment (voir en 2)
- 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, limnimétrie systématique, limnimétrie 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.

2.2.3. 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 :

(1) 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 faite avec l'écart-type d'une série de mesures successives, directement dans le cours d'eau, dans des conditions 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.

(2) Les erreurs systématiques (σ_B^h) :

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

- Cette 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 re-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.

3. Evaluation de la méthode de propagation des incertitudes

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, VCN_{30} , 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 les deux stations de l'Ardèche 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, VCN_{30} , etc... La considération d'erreurs uniquement non-systématiques entrainerait 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 sur 6 stations de la banque hydro

La méthode BaRatin a été mise en œuvre sur une sélection de six stations faisant partie de la banque hydro. Les six stations sélectionnées sont :

- L'Ardèche à Vallon Pont d'Arc
- La Volane à Vals les Bains
- L'Yzeron à Taffignon
- L'Yzeron à Craponne
- La Blies à Bliesbruck
- Le Bévinco (ou Bévincu) à Lancone

Ce choix s'est essentiellement basé sur la connaissance que l'on avait des stations et la volonté de balayer des stations variées en termes de contrôles hydrauliques (notamment le type et la sensibilité des contrôles) et de régimes hydrologiques.

Pour chacune des stations traitées dans ce rapport, la présentation de l'application de la méthode est 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 résultats de BaRatin : courbe de tarage et hydrogramme.

De précédentes études BaRatin sur certaines stations ont été utilisées pour la détermination des *a priori* hydrauliques. D'autres informations ont été tirées de diverses sources, et essentiellement à partir :

- 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>).
- des photos prises directement sur les différents sites.

Notez que, dans le présent rapport, toutes les hauteurs sont indiquées en hauteur échelle, sauf indication contraire.

En absence d'information concernant les erreurs affectant les mesures des hauteurs d'eau (limnigramme), des incertitudes typiques jugées raisonnables ont été utilisées pour définir les deux écarts-types :

- Pour les erreurs non-systématiques : +/- 2cm (soit un écart-type de 0.01m)
- Pour les erreurs systématiques : +/- 2cm (soit un écart-type de 0.01m). Le ré-échantillonnage de l'erreur a été fait tous les mois en moyenne (valeur jugée représentatives de la périodicité des recalages des capteurs).

Ces valeurs par défaut, bien que raisonnables, sont à considérer avec prudence. Pour les erreurs non-systématiques, il est fort probable que les incertitudes soient très diverses selon les stations, allant de quelques millimètres (pour les cours d'eau les plus calmes et les stations équipées d'un puits de tranquillisation parfait) à plusieurs centimètres (voire dizaine de centimètres en crue) pour les sites les plus chahutés. Quant aux erreurs systématiques, un écart-type de 1cm paraît réaliste au vue des résolutions des échelles limnimétriques (typiquement de 1cm). Il est cependant probable qu'il soit sous-estimé pour certains cas où, par exemple, des dérives importantes du capteur sont fréquemment constatées. Le recalage du capteur tous les mois peut être optimiste pour certaines stations pour lesquelles une valeur plus grande serait sans doute plus adaptée. Rappelons que l'idéal est un ré-échantillonnage de l'erreur aux dates exactes où un recalage du capteur a effectivement eu lieu.

4.1. L'Ardèche à Vallon Pont d'Arc

Nom :	Vallon Pont d'Arc	Code hydro :	V5054010
Rivière / Bassin :	Ardèche	Zéro NGF de l'échelle (m) :	78.69
Taille BV (km²):	1931	X lambert IIe (m):	763 279
		Y lambert IIe (m):	1 935 260

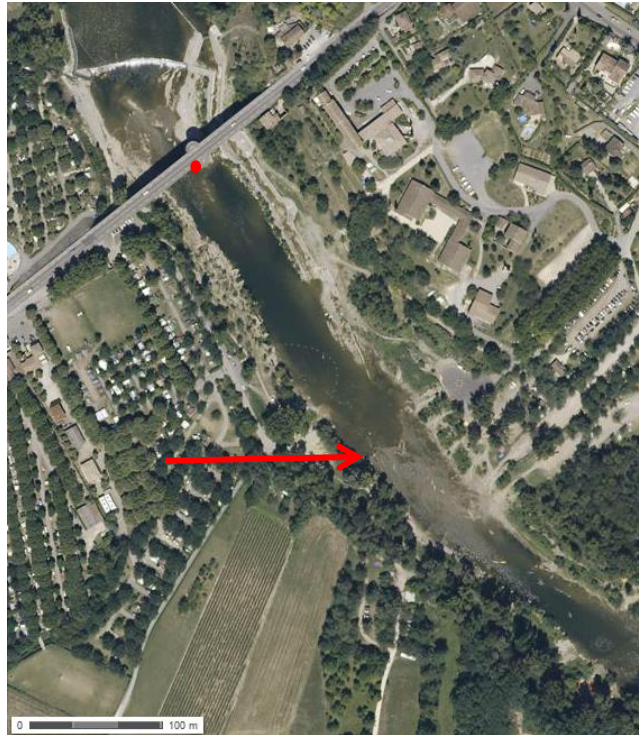


Figure 2: Photo aérienne de la station hydrométrique de Vallon Pont d'Arc. Le point rouge indique la position du capteur et la flèche rouge la position probable d'un radier contrôlant la relation hauteur-débit pour les bas et moyens débits. (Source: Géoportail)

4.1.1. Analyse hydraulique du site

(1) Contrôles hydrauliques en jeu :

La photo aérienne (Figure 2) suggère la présence d'un contrôle par radier (flèche rouge) à bas et moyen débit. 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 approché par un seuil rectangulaire à crête horizontale.
- Gamme 2 (haut débits) : A partir d'une certaine hauteur, le radier étant noyé, on suppose un contrôle par le chenal que l'on assimile à un chenal rectangulaire et homogène.

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

Il est possible qu'un deuxième chenal à haut débit soit à considérer pour prendre en compte le lit majeur de l'Ardèche aux abords de la station. Dans cette étude, nous nous limitons aux deux premiers contrôles.

(2) Formulation des a priori hydrauliques pour BaRatin

Contrôle n°1 : seuil rectangulaire à crête horizontale

- La largeur de ce seuil est assez incertaine : d'après les mesures faites sur Géoportail, la largeur devrait être comprise entre 30m et 70m.
- 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 sans doute pas négligeable.
- D'après la topographie du modèle hydraulique de l'Ardèche (Adamovic, 2014), à l'aval immédiat du pont de Salavas (emplacement du limnigraphe), le point bas se situe vers 77.5m (NGF IGN69), soit vers -1.19m (hauteur échelle). Par ailleurs, le minimum du limnigramme se situe vers -0.97m (hauteur échelle). La crête du seuil devrait donc se trouver entre ces deux limites : -1m (+/- 0.2m)

Cela conduit aux *a priori* suivants :

Paramètre	Valeur centrale	Incertitude élargie (95%)
Largeur (m)	50	+/- 20
Coefficient de débit	0.45	+/- 0.1
Crête du seuil / b_1 (m)	-1	+/- 0.2

Contrôle n°2 : chenal rectangulaire

- La hauteur de transition est très incertaine. Elle ne peut qu'être très approximativement estimée entre 0.5m et 2m au dessus de la crête du seuil équivalent du contrôle n°1. On l'estime donc vers 0.25m +/- 0.75m.
- Des mesures faites sur Géoportail donnent une largeur moyenne du chenal aux alentours de la station de l'ordre de 60 m (+/- 15 m).
- D'après les minimums des 7 profils topographiques directement en aval du Pont de Salavas (modèle hydraulique de l'Ardèche, Adamovic, 2014), la pente du chenal est très faible, de l'ordre de 0.03% (+/- 0.02%).
- La rugosité du lit mineur est sans doute assez faible (peu de sinuosités et lit large) mais reste assez incertaine. On l'estime vers $30 \text{ m}^{1/3} \cdot \text{s}^{-1}$ (+/- $10 \text{ m}^{1/3} \cdot \text{s}^{-1}$).

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

Paramètre	Valeur centrale	Incertitude élargie (95%)
Hauteur de transition (m)	0.25	+/- 0.75
Largeur (m)	60	+/- 15
Pente	0.0003	+/- 0.0002
Rugosité ($\text{m}^{1/3} \cdot \text{s}^{-1}$)	30	+/- 10

(3) Paramètres pour BaRatin :

Paramètre	Valeur centrale	Incertitude élargie (95%)
a_1	100	+/- 46
b_1	-1	+/- 0.2
c_1	1.5	+/- 0.05
k_1	0.25	+/- 0.75
a_2	31.2	+/- 16.7
c_2	1.67	+/- 0.05

4.1.2. Les jaugeages

55 jaugeages ont été utilisés pour l'étude dont 6 jaugeages SVR (Surface Velocity Radar) réalisé par Irstea en 2013 et 2014 et 49 réalisés par le SPC GD (Service de Prévision des Crues Grand Delta) entre juin 2004 et février 2013. La plupart des jaugeages récents du SPC GD sont réalisés par ADCP sauf le jaugeage du 4 novembre 2011 réalisé au saumon par intégration (SI) et celui du 10 juin 2009, réalisé à la perche (PP). Tous les jaugeages faits avant 2009 n'ont pas de métadonnée permettant d'identifier la technique de jaugeage utilisée. Par ailleurs, tout jaugeage indiqué comme non valide a été écarté de l'étude.

Tous les jaugeages par ADCP ont été affectés d'une incertitude de +/- 5%. Le jaugeage fait à la perche a été affecté d'une incertitude de +/- 10%. Tous les autres jaugeages (technique inconnue, SVR et saumon par intégration) ont été affectés d'une incertitude de +/- 15%.

4.1.3. Résultats BaRatin

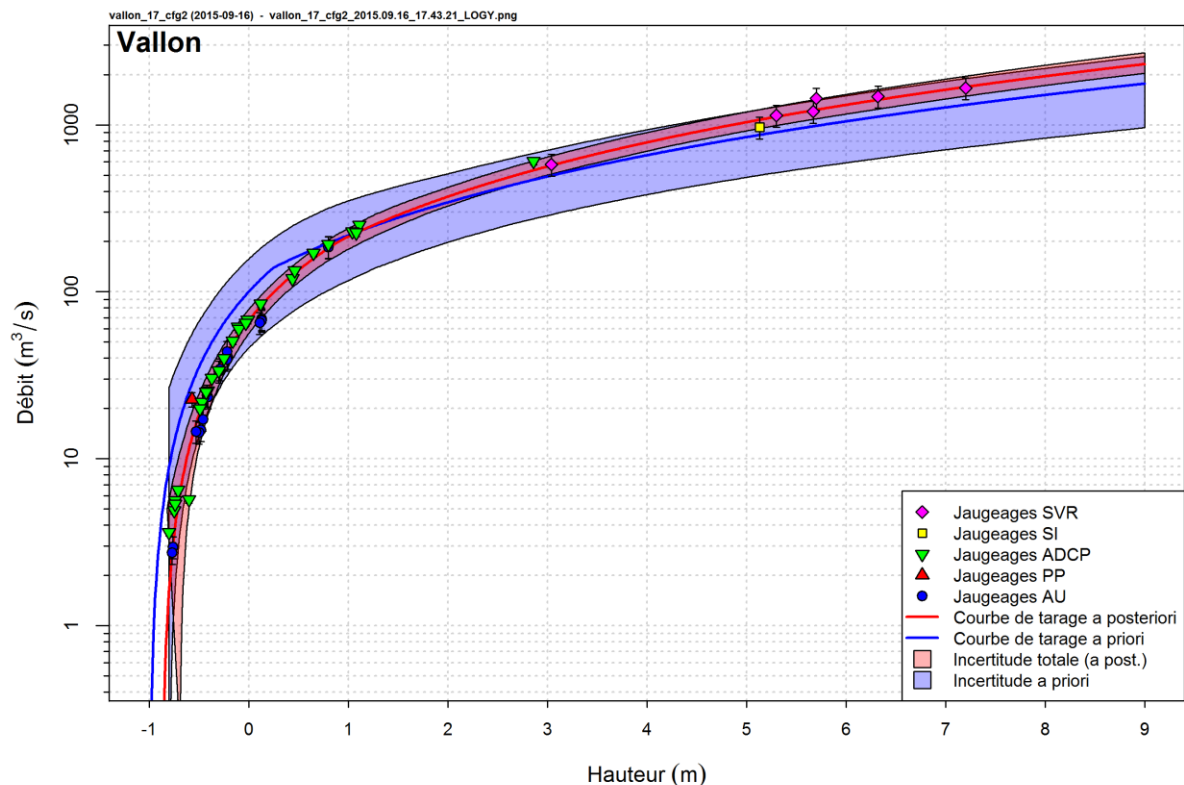


Figure 3: Courbe de tarage de la station de Vallon Pont d'Arc et enveloppes d'incertitude associées. Les jaugeages SVR, au Saumon par Intégration (SI), ADCP, à la perche point par point (PP) et inconnus (AU) sont également affichés.

La courbe résultante (Figure 3) est bien en accord avec les jaugeages. Les paramètres de la courbe de tarage BaRatin *a posteriori* sont tous compris dans les intervalles de confiance fournis *a priori* (voir la Figure 4 et le Tableau 2). On note tout de même un écart important entre la valeur *a priori* et *a posteriori* pour les paramètres k_1 et a_2 . Cependant les valeurs calculées par BaRatin restent plausibles d'un point de vue hydraulique.

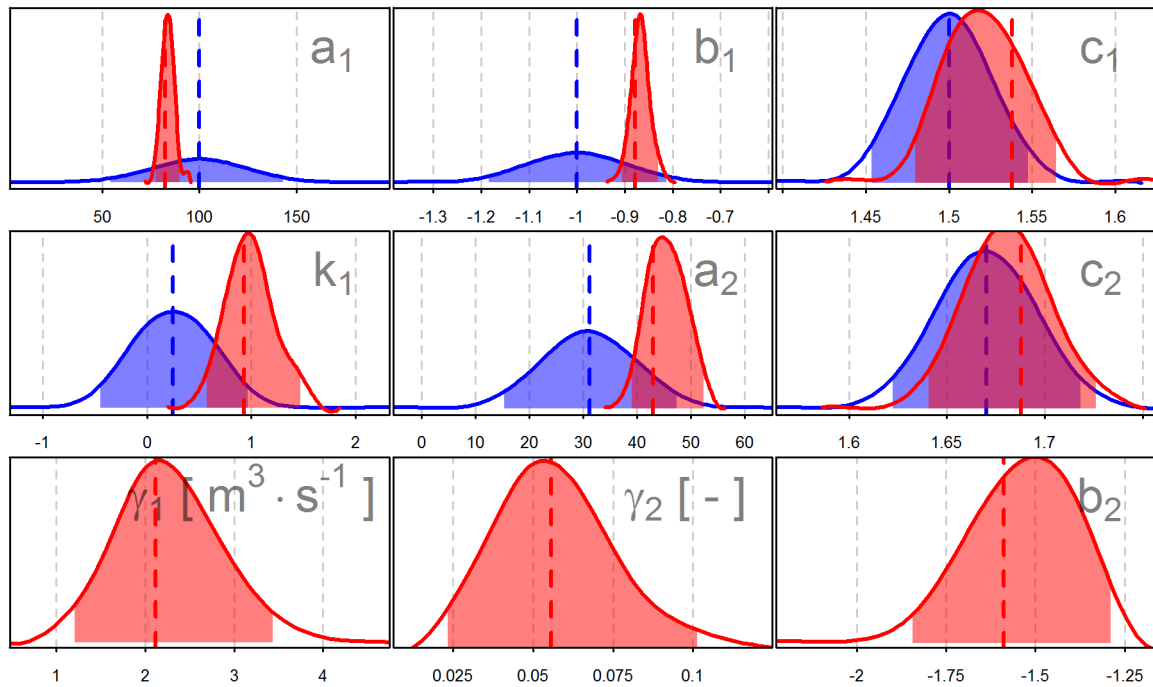


Figure 4: Distributions des paramètres *a priori* (bleu) et *a posteriori* (rouge) pour la station de Vallon Pont d'Arc, les traits verticaux correspondent aux valeurs *a priori* (bleu) et *a posteriori* (rouge).

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%]
a₁	100	[54 , 146]	82.305	[77.318 , 89.998]
b₁	-1	[-1.2 , -0.8]	-0.878	[-0.905 , -0.83]
c₁	1.5	[1.45 , 1.55]	1.538	[1.478 , 1.565]
k₁	0.25	[-0.5 , 1]	0.928	[0.558 , 1.486]
a₂	31.2	[14.5 , 47.9]	43.043	[38.95 , 52.412]
c₂	1.67	[1.62 , 1.72]	1.688	[1.64 , 1.727]
γ₁	Uniforme	[0 , 1000]	2.114	[1.194 , 3.49]
γ₂	Uniforme	[0 , 1000]	0.056	[0.023 , 0.102]
b₂	-	-	-1.588	[-1.836 , -1.289]

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

$$\begin{aligned} \text{si } h \leq 0.928m: & \quad Q(h) = 88.305(h + 0.878)^{1.538} \\ \text{si } h > 0.928m: & \quad Q(h) = 43.043(h + 1.588)^{1.688} \end{aligned}$$

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

4.1.4. Propagation des incertitudes aux hydrogrammes

La détermination des incertitudes associées aux mesures en continu des hauteurs d'eau est décrite au début de la section 4. Les résultats sont présentés par la Figure 5 et Figure 6. La Figure 5 est une vue d'ensemble de l'hydrogramme à différent pas de temps sur l'année 2013.

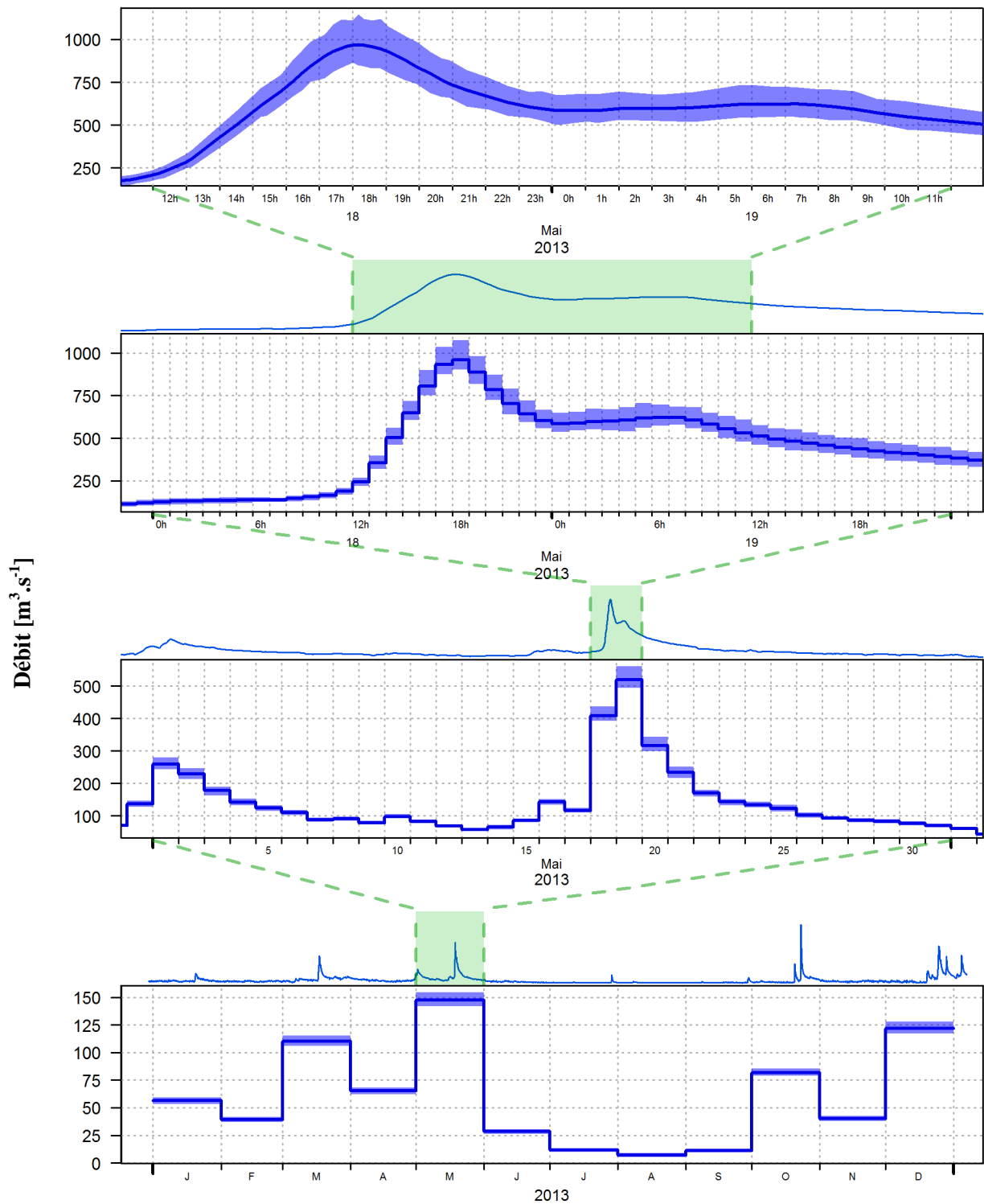


Figure 5: Hydrogramme (*MaxPost*, trait bleu, et incertitude totale associée, enveloppe bleu clair) estimé par BaRatin pour la station de Vallon Pont d'Arc sur l'Ardèche. De haut en bas, l'hydrogramme est présenté à pas de temps variable (résultat brute de BaRatin), horaire, journalier et mensuel.

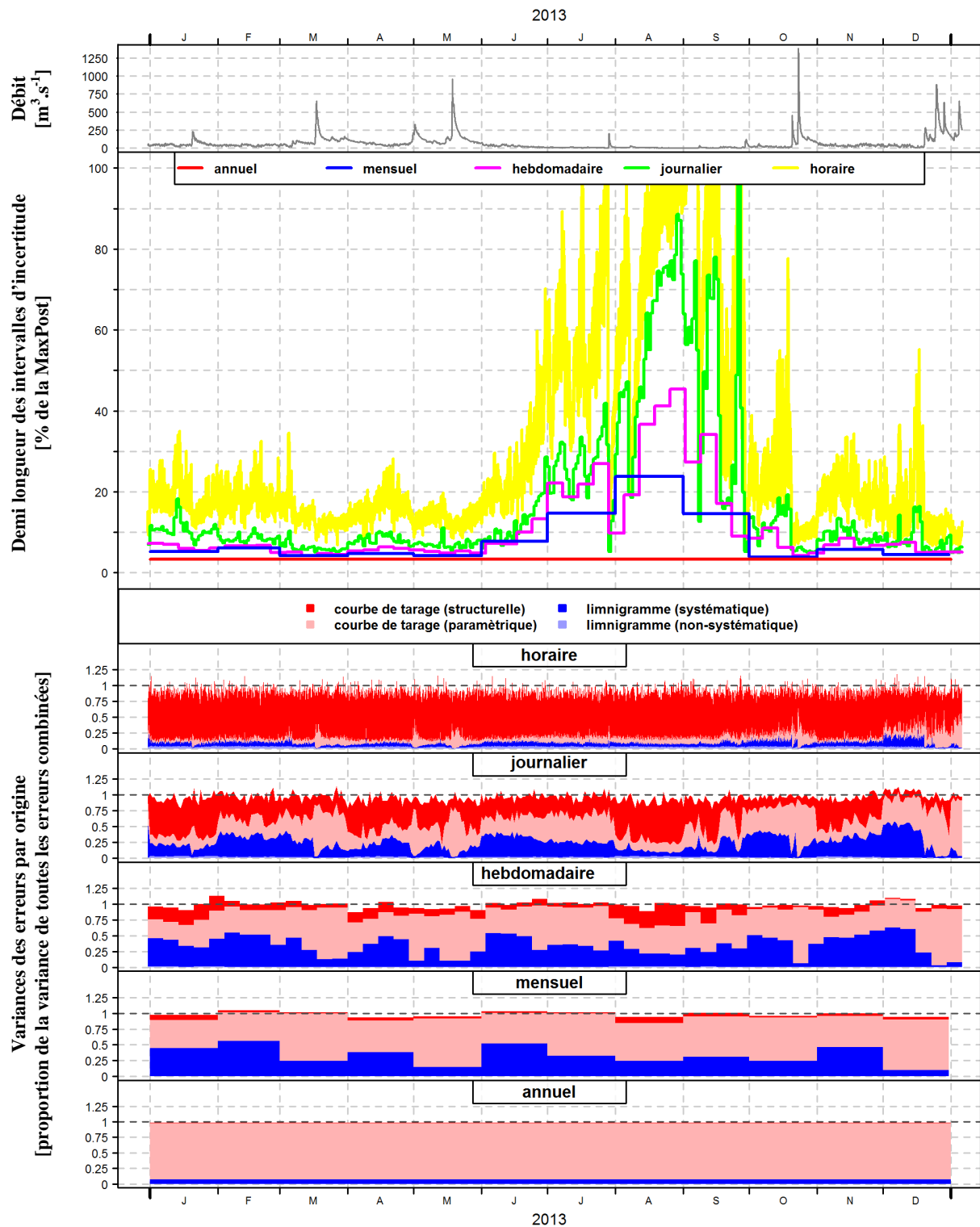


Figure 6: Estimation des incertitudes associées aux hydrogrammes pour la station de Vallon Pont d'Arc sur l'Ardèche. De haut en bas, l'hydrogramme à pas de temps horaire, les demi-longueurs des intervalles de confiance à 95% de l'incertitude totale à différent pas de temps, puis les variances des erreurs affectant l'hydrogramme à pas de temps horaire, journalier, hebdomadaire, mensuel et annuel selon leurs origines, en proportion de la variance de toutes les erreurs combinées (incertitude totale).

La Figure 6 présente les résultats de façon synthétique sur l'ensemble de l'année 2013. On note une importante disparité de la taille des demi-longueurs des intervalles à 95% de l'incertitude totale (en pourcentage de la *MaxPost*) selon la gamme de débit concernée. Pour les différents degrés d'agrégation temporelle, les médianes des demi-longueurs des intervalles de confiance à 95% sont reportées ci-dessous :

Horaire	Journalier	Hebdomadaire	Mensuel	Annuel
+/- 18.6%	+/- 9.30%	+/- 6.67%	+/- 5.21%	+/- 3.29%

Plus précisément, la Figure 6 permet les observations suivantes :

- à pas de temps horaire : incertitudes grossièrement comprises entre +/-15% et +/-30% sauf en crue (inférieurs à +/- 10%) et durant les périodes de forts étiages (supérieure à +/-100%).
- à pas de temps journalier : incertitudes globalement plus faibles et comprises entre +/-7.5% et +/-15% avec des valeurs proches de +/-5% pour les épisodes de crues.
- à pas de temps hebdomadaire : on trouve des incertitudes le plus souvent comprises entre +/-5% et +/-10% sauf pour les périodes de basses eaux où les incertitudes atteignent des valeurs pouvant aller jusqu'à +/-45%.
- à pas de temps mensuel : incertitudes globalement de l'ordre de +/-5% mais pouvant atteindre +/-25% pour les mois les plus secs.
- pour la moyenne annuelle : on trouve une incertitude supérieure à +/-3%.

Les variances des erreurs, selon leurs origines et en proportion de la variance de l'ensemble des erreurs combinées sont également présentées par la Figure 6. Cette représentation graphique permet mettre en avant les principales sources d'incertitudes sur toute une année et pour différent pas de temps. On observe une contribution plus forte des erreurs paramétriques pour les pics des crues à pas de temps horaire et journalier. De façon générale, on peut noter une forte dépendance entre la gamme de débit et l'origine des erreurs. Les contributions des différentes erreurs sont synthétisées dans le Tableau 3.

Tableau 3: Moyennes des proportions de variance (variance partielle / variance totale) pour les différentes sources d'erreurs (lignes) et les différents degrés d'agrégation temporelle (colonnes). L'intensité de la couleur rouge rend compte de l'importance de la contribution d'une erreur par rapport aux autres pour un degré d'agrégation temporelle.

	Horaire	Journalier	Hebdomadaire	Mensuel	Annuel
Limnigramme (non-systématique)	0.03	0.02	0.00	0.00	0.00
Limnigramme (systématique)	0.06	0.23	0.34	0.33	0.07
Courbe de tarage (paramétrique)	0.10	0.34	0.51	0.61	0.90
Courbe de tarage (structurelle)	0.71	0.37	0.12	0.04	0.01

Le Tableau 3 met clairement en évidence la prédominance des erreurs provenant de la courbe de tarage. Les erreurs structurelles très importantes à pas de temps horaire et journalier sont très faibles voire négligeables pour les pas de temps plus agrégés. En revanche, les erreurs paramétriques, très faibles à pas de temps horaire, deviennent importantes à pas de temps journalier, hebdomadaire et mensuel et largement prédominantes sur la moyenne annuelle. Les erreurs provenant du limnigramme sont très faibles quel que soit le degré d'agrégation temporelle, à l'exception des erreurs systématiques qui contribuent beaucoup à pas de temps journalier, hebdomadaire et mensuel.

Le Tableau 3 est également une bonne illustration de l'effet de l'agrégation temporelle sur les différents types d'erreurs :

- les erreurs à caractère non-systématique (lignes 1 et 4, Tableau 3) tendent à disparaître avec l'agrégation temporelle qui provoque un « lissage » de ces erreurs.
- les erreurs à caractère systématique (lignes 2 et 3, Tableau 3) deviennent de plus en plus importantes avec l'agrégation temporelle car elles ne sont affectées par aucun « lissage ». Notez également la diminution de la contribution des erreurs systématiques liées aux mesures des

hauteurs d'eau entre les moyennes mensuelles et la moyenne annuelle qui est due aux ré-échantillonnages de l'erreur, faits en moyenne tous les 30 jours. Cela provoque, tout comme pour les erreurs non-systématiques, son « lissage » avec l'agrégation temporelle.

Les incertitudes de la station de Vallon Pont d'Arc sur l'Ardèche sont relativement faibles par rapport aux autres stations traitées dans ce rapport. La diminution de l'incertitude avec l'agrégation est bien visible, surtout entre les moyennes horaires et les moyennes journalières. Les incertitudes proviennent essentiellement de la courbe de tarage avec toutefois, des contributions non-négligeables du limnigramme (erreurs systématiques) sur les moyennes journalières, hebdomadaires et mensuelles.

4.2. La Volane à Vals-les-Bain

Nom :	Vals-les-Bain	Code hydro :	V5015210
Rivière / Bassin :	Volane	Zéro NGF de l'échelle (m) :	243.15
Taille BV (km²):	109	X lambert IIe (m):	761 125
		Y lambert IIe (m):	1 964 170



Figure 7: Photo aérienne de la station hydrométrique de Vals-les-Bains. Le point rouge indique la position du capteur et la flèche rouge la position du seuil en béton. (Source: Géoportail)

4.2.1. Analyse hydraulique du site

(1) Contrôles hydrauliques en jeu :

Un seuil en béton placé de façon oblique par rapport à l'axe de la rivière, contrôle la relation hauteur-débit (voir Figure 7). Il n'est probablement jamais noyé étant donnée la hauteur de chute très importante. Cependant, pour les plus faibles débits, le seuil n'étant pas parfaitement horizontal (visible sur la photo, Figure 7, prise à bas débit, où seule une partie du seuil est mouillée), la largeur déversante est beaucoup plus faible. Celle-ci augmente probablement assez vite dès que le niveau d'eau augmente. Dès une hauteur d'environ 10cm-20cm, l'écoulement a lieu sur l'intégralité du seuil. Pour les débits les plus forts, il est possible que la largeur de la section de contrôle diminue, celle-ci tendant à être perpendiculaire à l'axe de l'écoulement. Dans le cadre de cette étude, nous avons choisi de considérer deux gammes de hauteur d'eau distinctes :

- Gamme 1 (bas débits) : Un seuil rectangulaire horizontal dont la largeur correspond à la largeur déversante moyenne à très bas débit.
- Gamme 2 (haut débits) : Un seuil rectangulaire horizontal est choisi pour approcher le seuil réel. Sa largeur reste incertaine du fait que la largeur déversante est susceptible de diminuer à fort débit.

La matrice des contrôles correspondante est :

	Seuil partiel	Seuil en entier
1 ^{ère} gamme de hauteur	1	0
2 ^{ème} gamme de hauteur	0	1

(2) Formulation des a priori hydrauliques pour BaRatin

Contrôle n°1 : seuil rectangulaire à crête horizontale

- La largeur du seuil est comprise entre 5m et 25m d'après les mesures de distances faites sur Géoportail ainsi que les photos prises sur le site à bas débit.
- Le coefficient de débit peut être pris aux alentours de 0.4 (+/- 0.05).
- Le minimum du limnigramme est proche de 0m. Il est raisonnable de penser que cette cote correspond à la crête du seuil. On l'estime donc assez précisément autour de 0m (+/- 0.05m).

Cela conduit aux a priori suivants :

Paramètre	Valeur centrale	Incertitude élargie (95%)
Largeur (m)	27	+/- 18
Coefficient de débit	0.4	+/- 0.05
Crête du seuil / b_1 (m)	0	+/- 0.05

Contrôle n°2 : seuil rectangulaire à crête horizontale

- La hauteur de transition se situe probablement assez basse, entre 0.05m et 0.25m.
- D'après les mesures faites sur Géoportail, la largeur du seuil doit se situer entre 55m et 65m soit vers 60m (+/- 5m). Cependant, étant donné que la section de contrôle à haut débit tend à être perpendiculaire à l'axe du cours d'eau, on peut envisager des largeurs plus faibles, de l'ordre 45-50m. On choisit donc une largeur de 55m (+/- 10m).

Les a priori retenus pour le second contrôle sont :

Paramètre	Valeur centrale	Incertitude élargie (95%)
Hauteur de transition (m)	0.15	+/- 0.10
Largeur (m)	110	+/- 24

(3) Paramètres pour BaRatin :

Paramètre	Valeur centrale	Incertitude élargie (95%)
a_1	27	+/- 18
b_1	0	+/- 0.05
c_1	1.5	+/- 0.05
k_1	0.15	+/- 0.1
a_2	110	+/- 24
c_2	1.5	+/- 0.05

4.2.2. Les jaugeages

Les jaugeages utilisés sont ceux du SPC GD ainsi que les jaugeages sans-contacts (SVR et LSPIV (Large-Scale Particle Image Velocimetry)) faits par Irstea. Au total, 29 jaugeages traditionnels (PP, SI et ADCP) et 41 jaugeages sans contacts. Des incertitudes de +/-5% ont été affectées aux jaugeages faits par ADCP, de +/-10% pour les jaugeages faits au courantomètre (PP), et de +/-15% pour les jaugeages faits au saumon par intégration (SI), SVR et LSPIV.

4.2.3. Résultats BaRatin

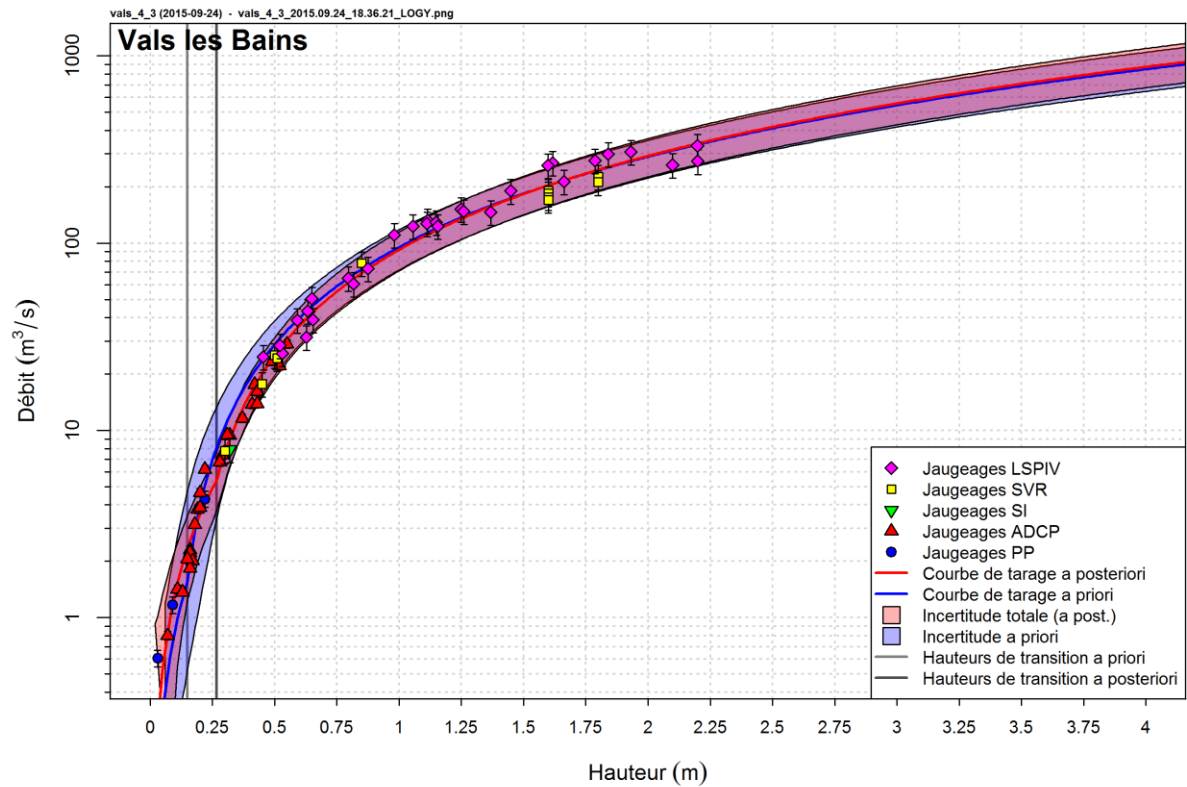


Figure 8: Courbe de tarage de la station de Vals-les-Bains et enveloppes d'incertitude associées. Les jaugeages SVR, LSPIV, au Saumon par Intégration (SI), ADCP, à la perche point par point (PP) sont également affichés.

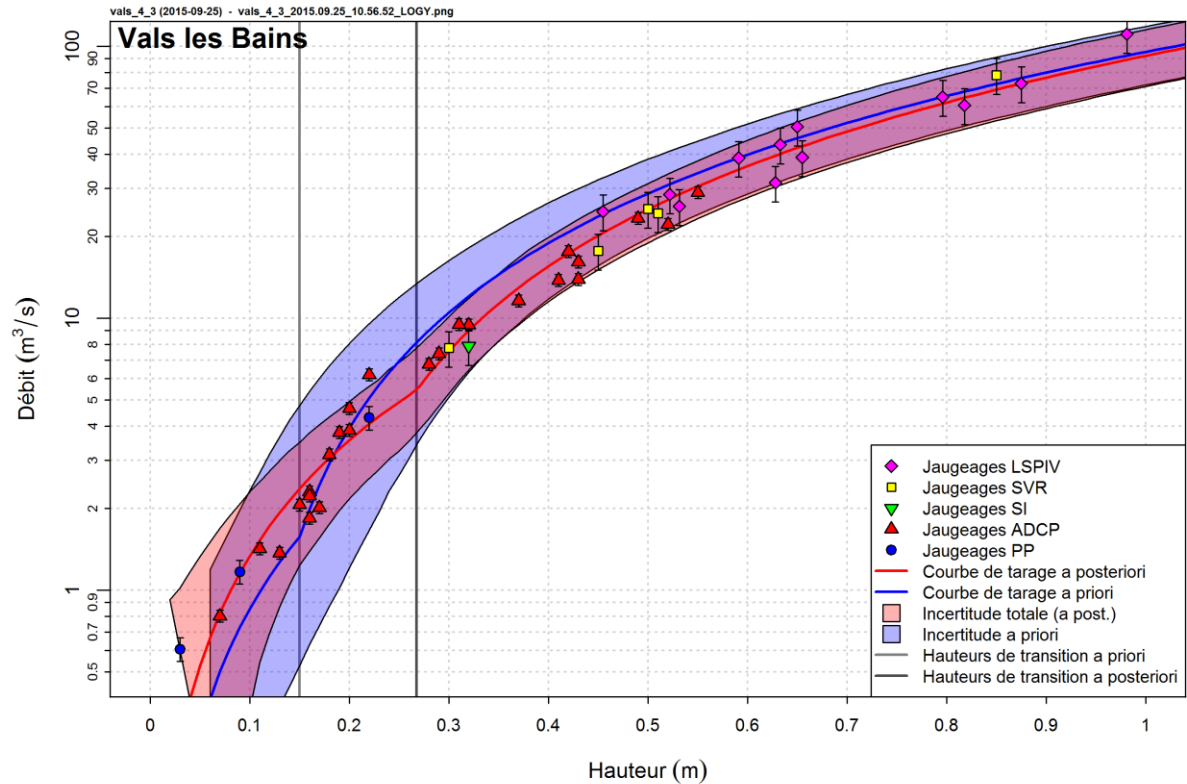


Figure 9: Courbe de tarage et enveloppe d'incertitude de la station de Vals-les-Bains. Zoom sur les hauteurs d'eau inférieures à 1m.

Les courbes de tarage *a priori* et *a posteriori* sont très proches mais on constate tout de même que l'information apportée par les jaugeages a permis un ajustement précis de la courbe à bas débit (voir les Figure 8 et Figure 9). On constate également que l'enveloppe d'incertitude pour les moyens et forts débits n'est pas du tout réduite *a posteriori*. Cela est dû à des *a priori* assez précis et l'importante dispersion des jaugeages au-delà de 1m de hauteur d'eau qui tend à augmenter l'incertitude structurelle (incertitude liée à l'imperfection de l'équation choisie pour représenter la relation hauteur-débit). Ici, γ_2 est compris entre 0.08 et 0.16 (Figure 10), soit une incertitude structurelle d'environ +/- 12% du débit estimé, ce qui impactera fortement les forts débits.

On note tout de même une nette diminution des incertitudes associées aux paramètres des deux contrôles (Figure 10). Les valeurs des paramètres *a posteriori* sont en accords avec les intervalles de confiance définies *a priori* sauf pour la hauteur de transition (paramètre k_1) qui est trouvée entre 25cm et 30cm au-dessus de la crête du seuil. Cette valeur paraît trop haute car le seuil est probablement activé sur toute sa longueur bien avant d'atteindre une hauteur d'eau de 25cm. Cette valeur est par ailleurs bien en accord avec les jaugeages, comme on peut le voir sur la Figure 9, où une « cassure » dans la tendance des jaugeages est bien visible vers 0.25m. Pour des hauteurs inférieures à 0.25m, une analyse plus fine des jaugeages ADCP serait utile afin d'investiguer la tendance tout de même étrange que l'on observe sur la Figure 9. D'autres jaugeages entre 0.20m et 0.30m seraient très utile pour préciser cette hauteur de transition. La valeur du paramètre b_2 , calculée par continuité de la relation, paraît un peu trop élevée également. En effet une hauteur proche de b_1 aurait été attendue alors que celle trouvée suggère une hauteur moyenne de la crête à plus de 10cm. Une topographie précise du seuil serait très utile afin de valider ou non le réalisme d'une telle valeur.

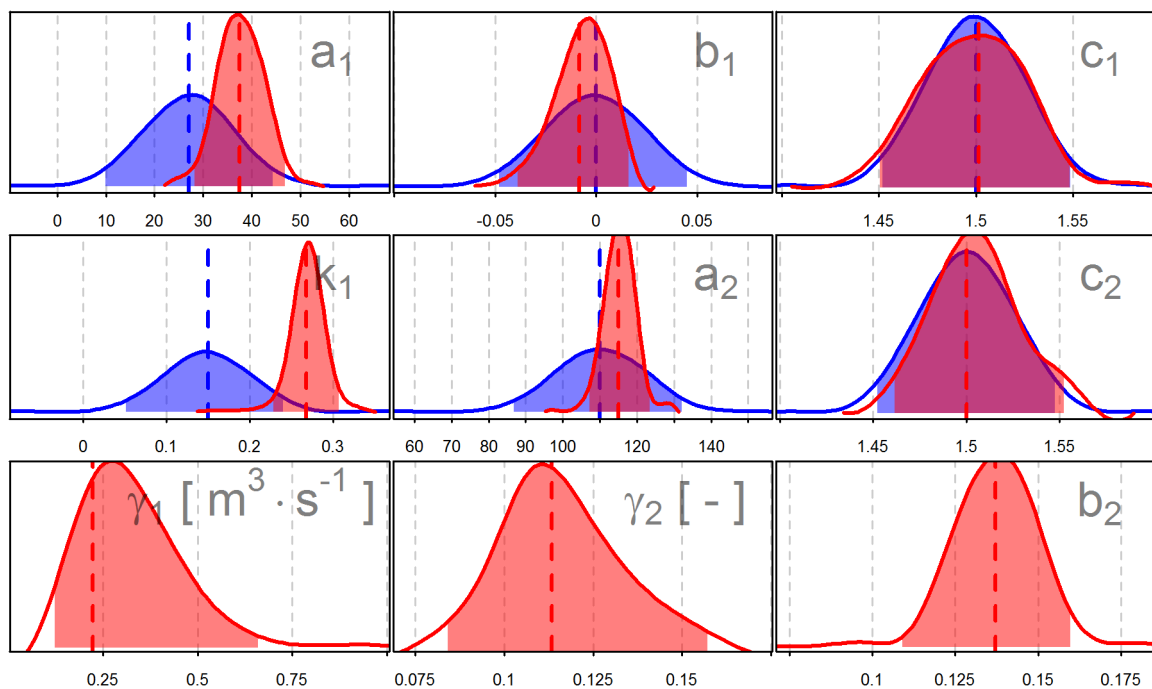


Figure 10: Distributions des paramètres *a priori* (bleu) et *a posteriori* (rouge) pour la station de Vals-les-Bains, les traits verticaux correspondent aux valeurs *a priori* (bleu) et *a posteriori* (rouge).

En conclusion, l'analyse hydraulique du site amène évidemment à considérer le seuil comme seul contrôle de la relation hauteur-débit. Mais il est cependant possible que les vitesses, à partir d'une hauteur de 20-30cm soit si importantes que la pente de la ligne d'eau entre le capteur et le seuil conduise plutôt à considérer un contrôle de type chenal pour les forts débits. Les résultats de BaRatin présentés ici sont tout de même raisonnables, rien ne permettant de façon certaine de les invalider.

Tableau 4: Valeurs des paramètres (et quantiles 2.5% et 97.5%) *a priori* et *a posteriori* pour la station de Vals-les-Bains.

	<i>a priori</i>		<i>a posteriori</i>	
	moyenne	[2.5% , 97.5%]	MaxPost	[2.5% , 97.5%]
a₁	27	[9 , 45]	37.48	[28.221 , 46.977]
b₁	0	[-0.05 , 0.05]	0.008	[-0.039 , 0.017]
c₁	1.5	[1.45 , 1.55]	1.501	[1.45 , 1.55]
k₁	0.15	[0.05 , 0.25]	0.268	[0.228 , 0.31]
a₂	110	[86 , 134]	115.041	[106.91 , 123.544]
c₂	1.5	[1.45 , 1.55]	1.5	[1.462 , 1.553]
γ₁	Uniforme	[0 , 1000]	0.222	[0.117 , 0.659]
γ₂	Uniforme	[0 , 1000]	0.113	[0.084 , 0.157]
b₂	-	-	0.137	[0.109 , 0.161]

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

$$\begin{aligned} \text{si } h \leq 0.268m: & \quad Q(h) = 37.48(h - 0.008)^{1.501} \\ \text{si } h > 0.268m: & \quad Q(h) = 115.041(h - 0.137)^{1.5} \end{aligned}$$

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

4.2.4. Propagation des incertitudes aux hydrogrammes

La détermination des incertitudes associées aux mesures en continu des hauteurs d'eau est décrite au début de la section 4.

La Figure 11 illustre les résultats de la méthode de propagation de BaRatin. La crue du 14 et 15 novembre 2014 à pas de temps variable (hydrogramme du haut dans la Figure 11) est le résultat direct de la propagation des incertitudes. L'hydrogramme est ensuite présenté à différent pas de temps, toujours associé de son incertitude totale. La Figure 12 permet de visualiser l'importance de l'incertitude totale à différents pas de temps sur l'année 2014 ainsi que les contributions des différentes sources d'erreurs, également à différents pas de temps. Pour les différents degrés d'agrégation temporelle, les médianes des demi-longueurs des intervalles de confiance à 95% sont reportées ci-dessous :

Horaire	Journalier	Hebdomadaire	Mensuel	Annuel
+/- 52.3%	+/- 39.6%	+/- 28.6%	+/- 17.9%	+/- 5.12%

Selon que l'on se situe pendant une période d'étiage ou lors d'une crue, des incertitudes très diverses peuvent être observées sur la Figure 12 :

- moyennes horaires et journalières : incertitudes de +/-5% à +/-20% en crue, souvent supérieures à +/-30% et de +/- 60% à plus de +/-100% en période d'étiage.
- moyennes hebdomadaires : incertitudes allant, dans l'ensemble, de +/-5% à +/-25% mais supérieures à +/-100% pour les semaines les plus sèches.
- moyennes mensuelles : selon le régime d'écoulement, on observe des incertitudes de l'ordre de +/-5% à +/-35%.
- moyenne annuelle : incertitude de l'ordre de +/-5%.

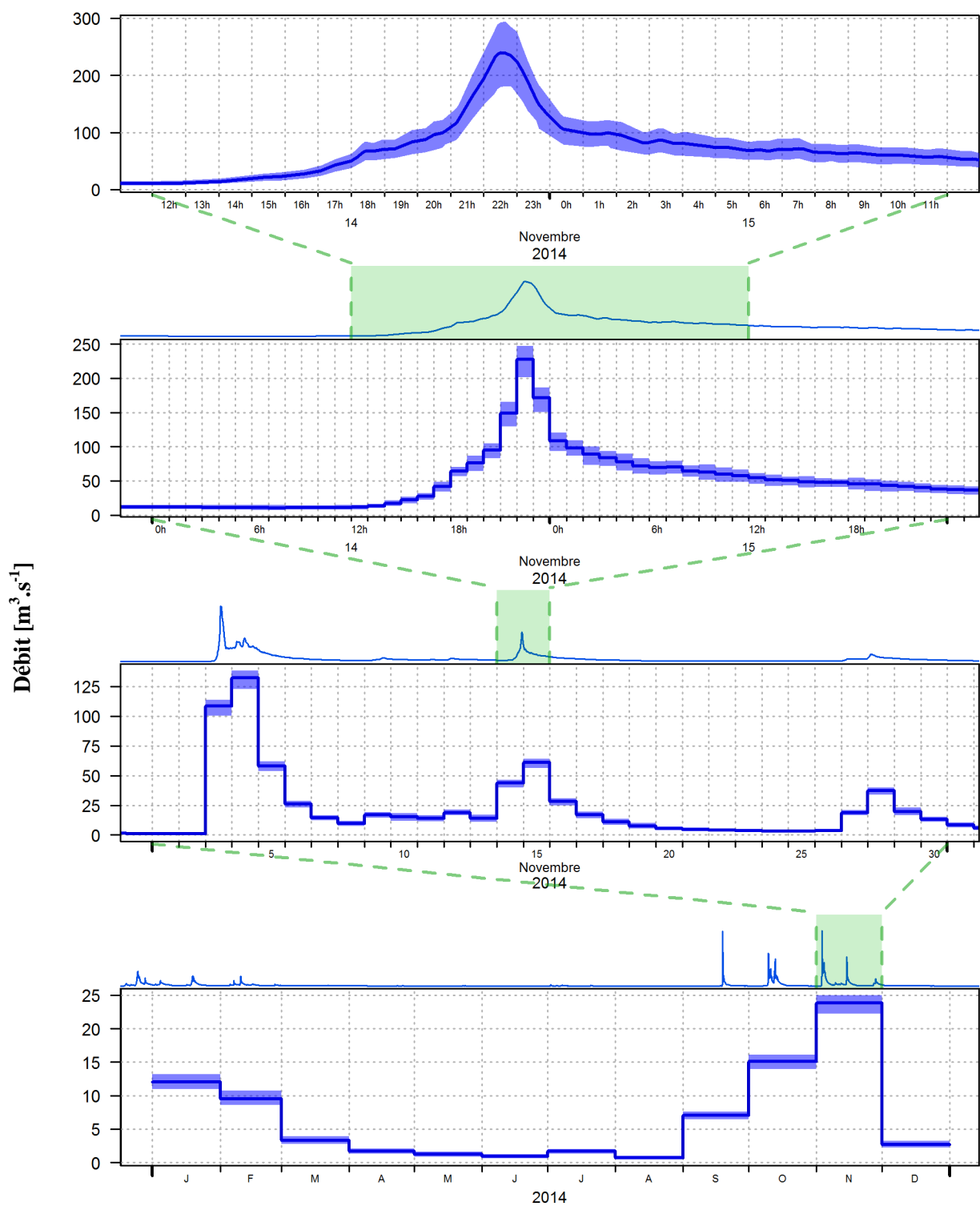


Figure 11: Hydrogramme (*MaxPost*, trait bleu, et incertitude totale associée, enveloppe bleu clair) estimé par BaRatin pour la station de Vals-les-Bains sur la Volane. De haut en bas, l'hydrogramme est présenté à pas de temps variable (résultat brute de BaRatin), horaire, journalier et mensuel.

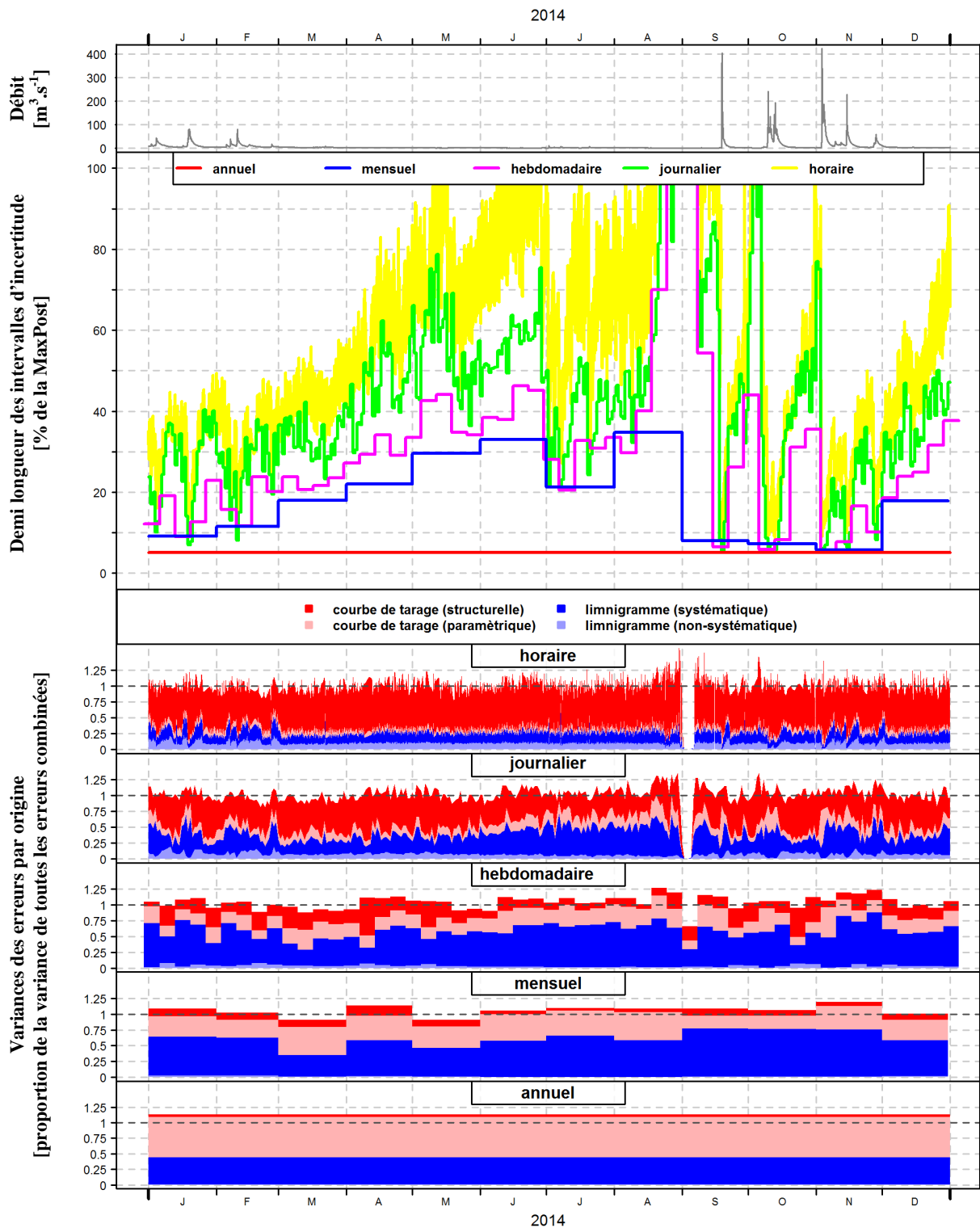


Figure 12: Estimation des incertitudes associées aux hydrogrammes pour la station de Vals-les-Bain sur la Volane. De haut en bas, l'hydrogramme à pas de temps horaire, les demi-longueurs des intervalles de confiance à 95% de l'incertitude totale à différent pas de temps, puis les variances des erreurs affectant l'hydrogramme à pas de temps horaire, journalier, hebdomadaire, mensuel et annuel selon leurs origines, en proportion de la variance de toutes les erreurs combinées (incertitude totale).

Les 5 graphiques du bas dans la Figure 12 présentent les contributions des différentes sources d'erreurs pour différents degrés d'agrégation temporelle sur l'ensemble de l'année 2014. Ces graphiques sont également synthétisés par le Tableau 5. Le « trou » observable début septembre est lié à des débits nuls (hauteurs d'eau inférieures à la crête du seuil (paramètre b_l dans le Tableau 4)). En dehors de cette anomalie, on observe les contributions suivantes :

- erreurs structurelles : elles apportent une contribution majeure à pas de temps horaire. La contribution diminue avec l'agrégation temporelle jusqu'à devenir presque négligeable sur la moyenne annuelle
- erreurs paramétriques : elles n'ont qu'une contribution faible à pas de temps horaire et journalier, puis une contribution de plus en plus importante pour les moyennes hebdomadaires et mensuelles jusqu'à une contribution prédominante sur la moyenne annuelle.
- Erreurs systématiques associées au limnigramme : elles ont une contribution faible à pas de temps horaire qui augmente avec l'agrégation temporelle et est prédominante à pas de temps hebdomadaire et mensuel. On note une contribution plus faible sur la moyenne annuelle causée par les ré-échantillonnages de l'erreur tous les 30 jours en moyenne.
- Erreurs non-systématiques associées au limnigramme : elles apportent une contribution faible mais non négligeable à pas de temps horaire et journalier. Pour les autres pas de temps, cette contribution apparaît négligeable.

Tableau 5: Moyennes des proportions de variance (variance partielle / variance totale) pour les différentes sources d'erreurs (lignes) et les différents degrés d'agrégation temporelle (colonnes). L'intensité de la couleur rouge rend compte de l'importance de la contribution d'une erreur par rapport aux autres pour un degré d'agrégation temporelle.

	Horaire	Journalier	Hebdomadaire	Mensuel	Annuel
Limnigramme (non-systématique)	0.10	0.07	0.03	0.01	0.01
Limnigramme (systématique)	0.16	0.32	0.55	0.60	0.43
Courbe de tarage (paramétrique)	0.07	0.15	0.24	0.34	0.65
Courbe de tarage (structurelle)	0.67	0.47	0.21	0.09	0.04

La Figure 12 et le Tableau 5 permettent clairement de voir l'importance des erreurs de nature systématique pour les pas de temps fortement agrégés pour lesquels les erreurs non-systématiques ne contribuent presque plus.

On observe, pour la station de Vals-les-Bains sur la Volane, des incertitudes assez importantes qui diminuent fortement avec l'agrégation temporelle. Le limnigramme et la courbe de tarage contribuent de façon assez équilibré aux incertitudes totales sauf à pas de temps horaires où la courbe de tarage apparaît comme la principale source d'incertitude.

4.3. L'Yzeron à Taffignon

Nom :	Francheville [Taffignon]	Code hydro :	V3015020
Rivière / Bassin :	Yzeron	Zéro NGF de l'échelle (m) :	-
Taille BV (km²):	129	X lambert IIe (m):	789 533
		Y lambert IIe (m):	2 084 480



Figure 13: Photo de la station hydrométrique de Taffignon à Francheville (source : IRSTEA).

4.3.1. Analyse hydraulique du site

Le seuil en béton (photo, Figure 13), situé juste à l'aval du limnigraphe, contrôle la relation hauteur-débit des plus faibles débits aux plus forts débits. En effet, la chute d'eau induite par le seuil assez importante ainsi qu'une vidéo de la DREAL RA enregistrée lors de la crue d'avril 2005 (qui permet de voir une section critique au niveau du seuil à une hauteur d'environ 1m75 soit après débordement sur le chemin en rive gauche) suggère que le seuil n'est jamais noyé. Dans l'analyse hydraulique du site, il convient aussi de considérer le débordement en rive gauche sur le chemin où un écoulement non négligeable a lieu après débordement.

Il est également important de noter que la DREAL RA a opéré un changement de courbe de tarage en 2005, suite à un nouveau jaugeage fait en crue le 17 avril, qui prenait effet dès le 24 octobre 1993, date d'une crue importante. Cependant, aucun indice n'a permis de suspecter le moindre changement de contrôle hydraulique à cette date. De ce fait, dans la présente étude, la courbe de tarage établie est supposée être valide depuis la mise en service de la station.

(1) Contrôles hydrauliques en jeu :

L'analyse hydraulique a conduit à considérer un premier contrôle par le seuil en béton auquel s'ajoute un contrôle par le chemin situé en rive gauche (Figure 14) à partir d'une certaine hauteur d'eau supérieure au débordement de la rivière.

- Gamme 1 (bas et moyen débits) : contrôle par le seuil en béton approché par un seuil rectangulaire à crête horizontale.
- Gamme 2 (haut débits) : Après débordement, le contrôle par seuil s'exerce toujours mais on suppose un contrôle de type chenal qui s'ajoute. Ce contrôle est assimilé à un chenal rectangulaire (de la largeur du chemin) et homogène.

La matrice des contrôles correspondante qui en découle est :

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

(2) Formulation des a priori hydrauliques pour BaRatin

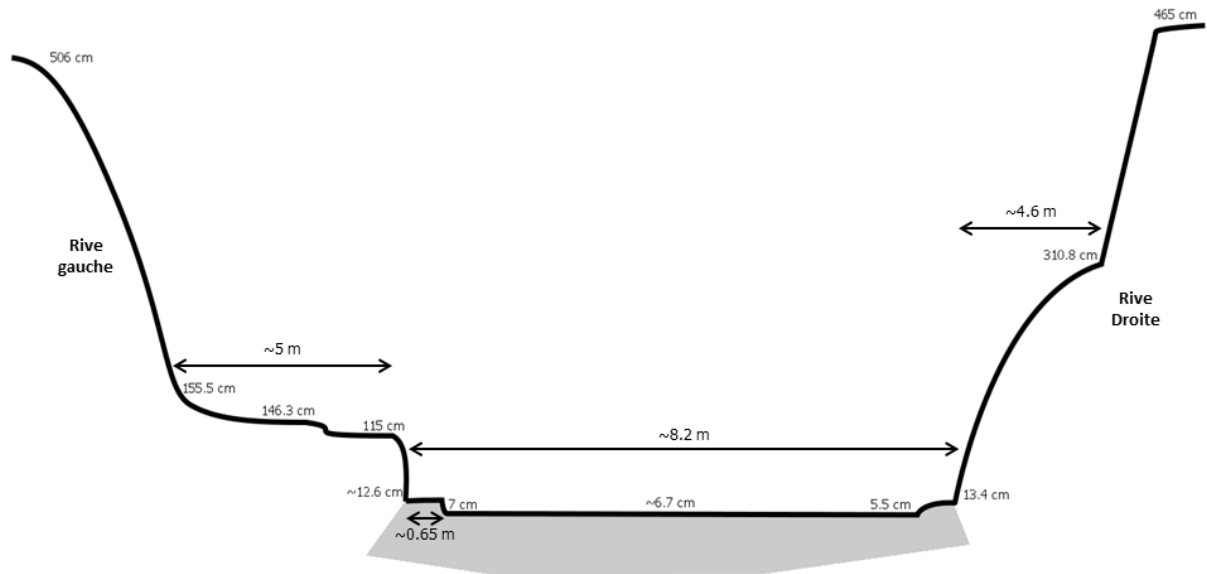


Figure 14: Schéma de la section de contrôle de la station hydrométrique de Taffignon construit à partir des relevés topographiques faits par IRSTEA le 23 avril 2014. Les hauteurs sont indiquées en centimètre par rapport au zéro de l'échelle limnimétrique.

Contrôle n°1 : seuil rectangulaire à crête horizontale

- La largeur de ce seuil peut être estimée grâce aux relevés topographiques (voir Figure 14). Les imprécisions proviennent de l'irrégularité du seuil. Une largeur de 8.25m (+/- 0.5m) a été retenue.
- Le coefficient de débit peut être pris aux alentours de 0.4 (+/- 0.05).
- La hauteur de la crête du seuil, également estimée à partir des relevés topographiques (Figure 14), fut estimée précisément entre 0.075m (+/- 0.025m).

Les a priori retenus sont donc :

Paramètre	Valeur centrale	Incertitude élargie (95%)
Largeur (m)	8.25	+/- 0.5
Coefficient de débit	0.4	+/- 0.05
Crête du seuil / b_1 (m)	0.075	+/- 0.025

Contrôle n°2 : chenal rectangulaire (chemin en rive gauche)

- La hauteur de transition correspond à la hauteur de débordement. Celle-ci peut être déduite de la topographie (Figure 14). Cependant une hauteur assez incertaine a été retenue pour prendre en compte les irrégularités de la rive et le fait que l'écoulement devient effectif à partir d'une certaine hauteur d'eau au-dessus du chemin. Elle est estimée entre 1.10m et 1.50m, soit à 1.30m (+/- 0.2m).
- On estime grossièrement la largeur du chenal équivalent (à partir des photos et de la topographie) à environ 6m (+/- 2m)

- Aucune information ne permet d'approcher la valeur de la pente. Une estimation très grossière est faite entre une pente presque nulle et une pente de 1%, soit une pente de 0.005 (+/- 0.005).
- La rugosité du lit mineur est estimée vers $25 \text{ m}^{1/3} \cdot \text{s}^{-1}$ (+/- $7 \text{ m}^{1/3} \cdot \text{s}^{-1}$).

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

Paramètre	Valeur centrale	Incertitude élargie (95%)
Hauteur de transition (m)	1.30	+/- 0.0
Largeur (m)	6	+/- 2
Pente	0.005	+/- 0.005
Rugosité ($\text{m}^{1/3} \cdot \text{s}^{-1}$)	25	+/- 7

(3) Paramètres pour BaRatin :

Paramètre	Valeur centrale	Incertitude élargie (95%)
a₁	14.6	+/- 2
b₁	0.075	+/- 0.025
c₁	1.5	+/- 0.05
k₁	1.3	+/- 0.2
a₂	10.6	+/- 7
c₂	1.67	+/- 0.05

4.3.2. Les jaugeages

Tous les jaugeages valides faits entre le septembre 1988 et mars 2014, à l'exception de trois jaugeages au saumon par intégration (SI) faits en avril 1989, ont été retenus. 70 jaugeages ont donc été utilisés. Les trois jaugeages écartés, car leurs valeurs étaient anormalement éloignées de la tendance générale des jaugeages, ne sont également pas pris en compte pour la courbe de tarage actuellement en vigueur. Cependant, aucune information dans les métadonnées (incomplètes) ne permet de les remettre en cause.

Les incertitudes associées aux jaugeages faits au courantomètre (perche point par point, PP) ont été estimées par la méthode ISO748 (ISO, 2007) à partir des données de dépouillement disponibles dans la base Barème. Les jaugeages faits par ADCP et Saumon par Intégration (SI) ont respectivement été affectés d'une incertitude de +/-5% et +/-15% (valeurs recommandées par Le Coz *et al.* 2011).

4.3.3. Résultats BaRatin

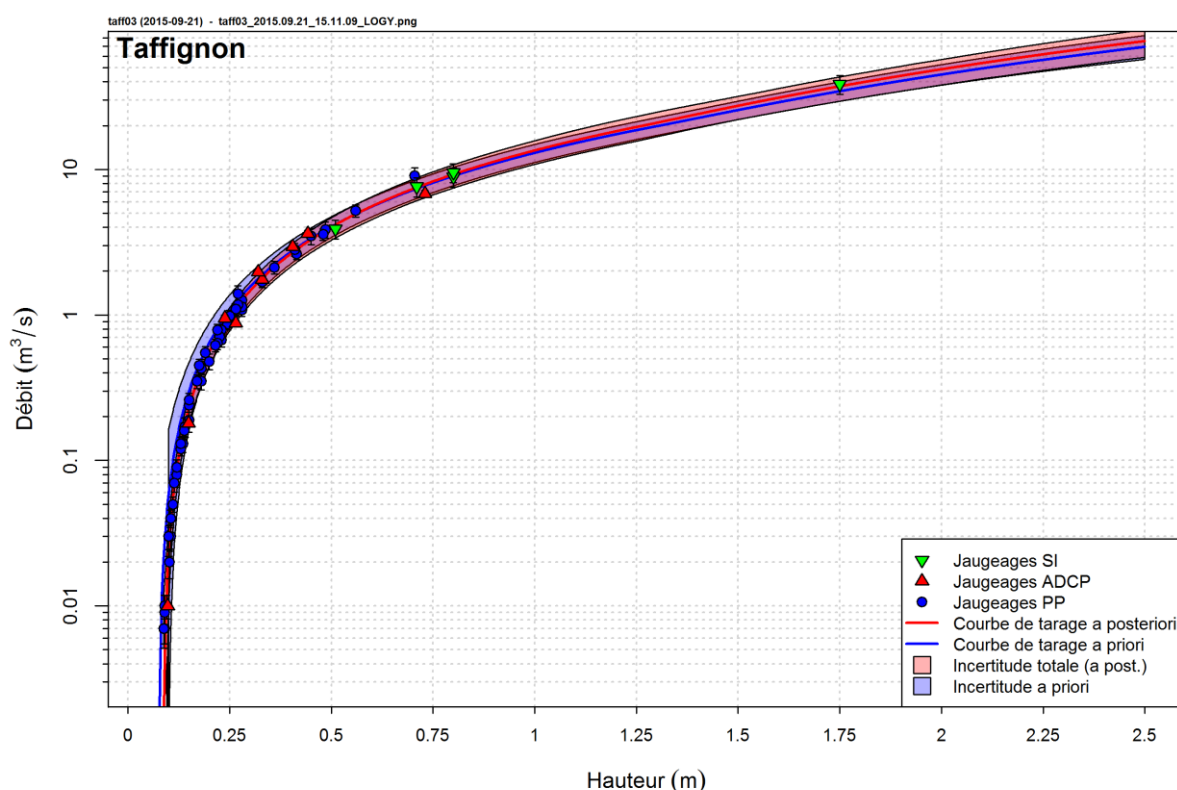


Figure 15: Courbe de tarage de la station de Taffignon et enveloppes d'incertitude associées. Les jaugages au Saumon par Intégration (SI), ADCP et à la perche point par point (PP) sont également affichés.

Les paramètres *a posteriori* sont en accord avec les valeurs et incertitudes estimées *a priori* (Figure 16 et Tableau 6). On constate aussi que la courbe de tarage estimé *a priori* est très proche de celle obtenue *a posteriori*. Cela est dû aux informations déjà précises *a priori* grâce à la présence du seuil et aux relevés topographiques.

Il est intéressant de noter que les incertitudes associées aux paramètres du premier contrôle (a_1 , b_1 et c_1) sont considérablement réduites à l'inverse des paramètres correspondant au second contrôle (a_2 et c_2). Un seul jaugage est disponible pour les hauteurs d'eau supérieures à k_1 (hauteur de transition), donc pour les hauteurs qui concernent le second contrôle. Beaucoup d'information serait apportée par des jaugages faits pour des hauteurs d'eau supérieures à 1.25m (hauteur de transition *a posteriori*).

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

	<i>a priori</i>		<i>a posteriori</i>	
	moyenne	[2.5% , 97.5%]	MaxPost	[2.5% , 97.5%]
a_1	14.6	[12.6 , 16.6]	15.487	[14.526 , 16.187]
b_1	0.075	[0.05 , 0.1]	0.086	[0.083 , 0.088]
c_1	1.5	[1.45 , 1.55]	1.533	[1.505 , 1.573]
k_1	1.3	[1.1 , 1.5]	1.262	[1.094 , 1.485]
a_2	10.6	[3.6 , 17.6]	11.381	[3.956 , 16.897]
c_2	1.67	[1.62 , 1.72]	1.684	[1.62 , 1.721]
γ_1	Uniforme	[0 , 1000]	0.004	[0.003 , 0.008]
γ_2	Uniforme	[0 , 1000]	0.086	[0.068 , 0.115]
b_2	-	-	1.262	[1.094 , 1.485]

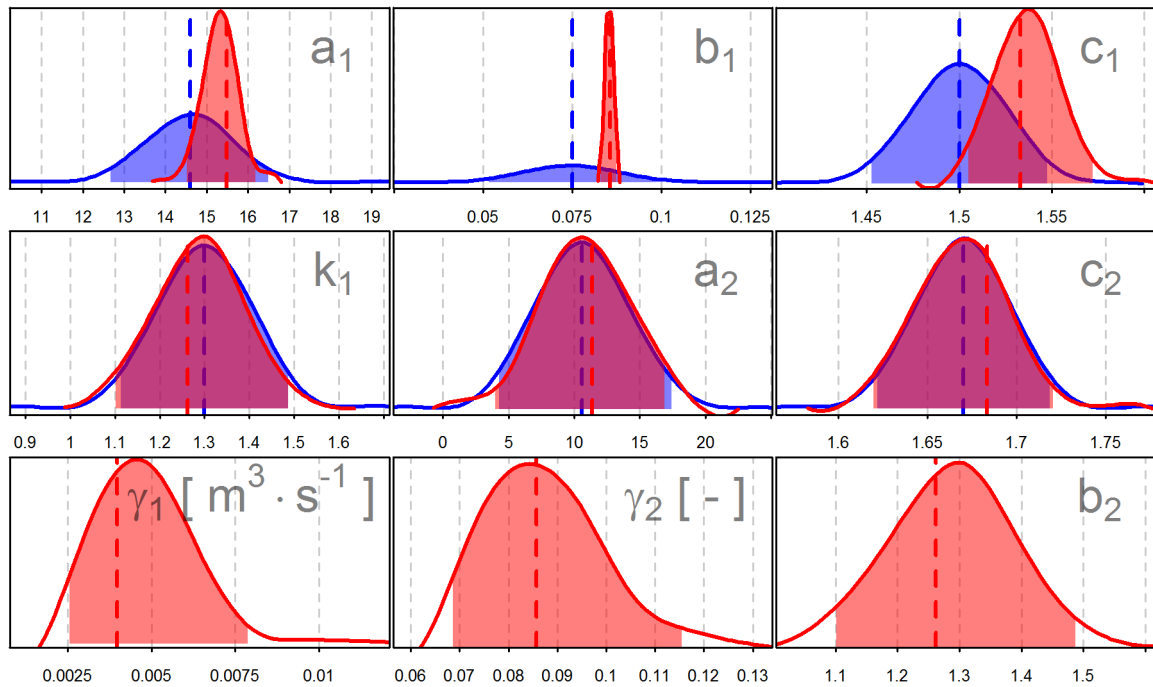


Figure 16: Distributions des paramètres *a priori* (bleu) et *a posteriori* (rouge) pour la station de Taffignon, les traits verticaux correspondent aux valeurs *a priori* (bleu) et *a posteriori* (rouge).

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

$$\text{si } h \leq 1.262m: Q(h) = 15.487(h - 0.086)^{1.533}$$

$$\text{sinon } Q(h) = 15.487(h - 0.086)^{1.533} + 11.381(h - 1.262)^{1.684}$$

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

4.3.4. Propagation des incertitudes aux hydrogrammes

La détermination des incertitudes associées aux mesures en continu des hauteurs d'eau est décrite au début de la section 4. Les résultats sont présentés par la Figure 17 et la Figure 18.

La Figure 17 illustre les résultats de la méthode de propagation de BaRatin. La crue du 4 et 5 novembre 2014 à pas de temps variable (hydrogramme du haut dans la Figure 17) est le résultat direct de la propagation des incertitudes. L'hydrogramme est ensuite présenté à différent pas de temps, toujours associé de son incertitude. La Figure 18 présente les résultats de BaRatin de façon synthétique. On peut y lire, sur l'ensemble de l'année 2014, d'une part l'importance de l'incertitude totale à différents pas de temps (demi-longueurs des intervalles à 95% de l'incertitude totale en pourcentage de la *MaxPost*) et d'autre part, les contributions des différentes sources.

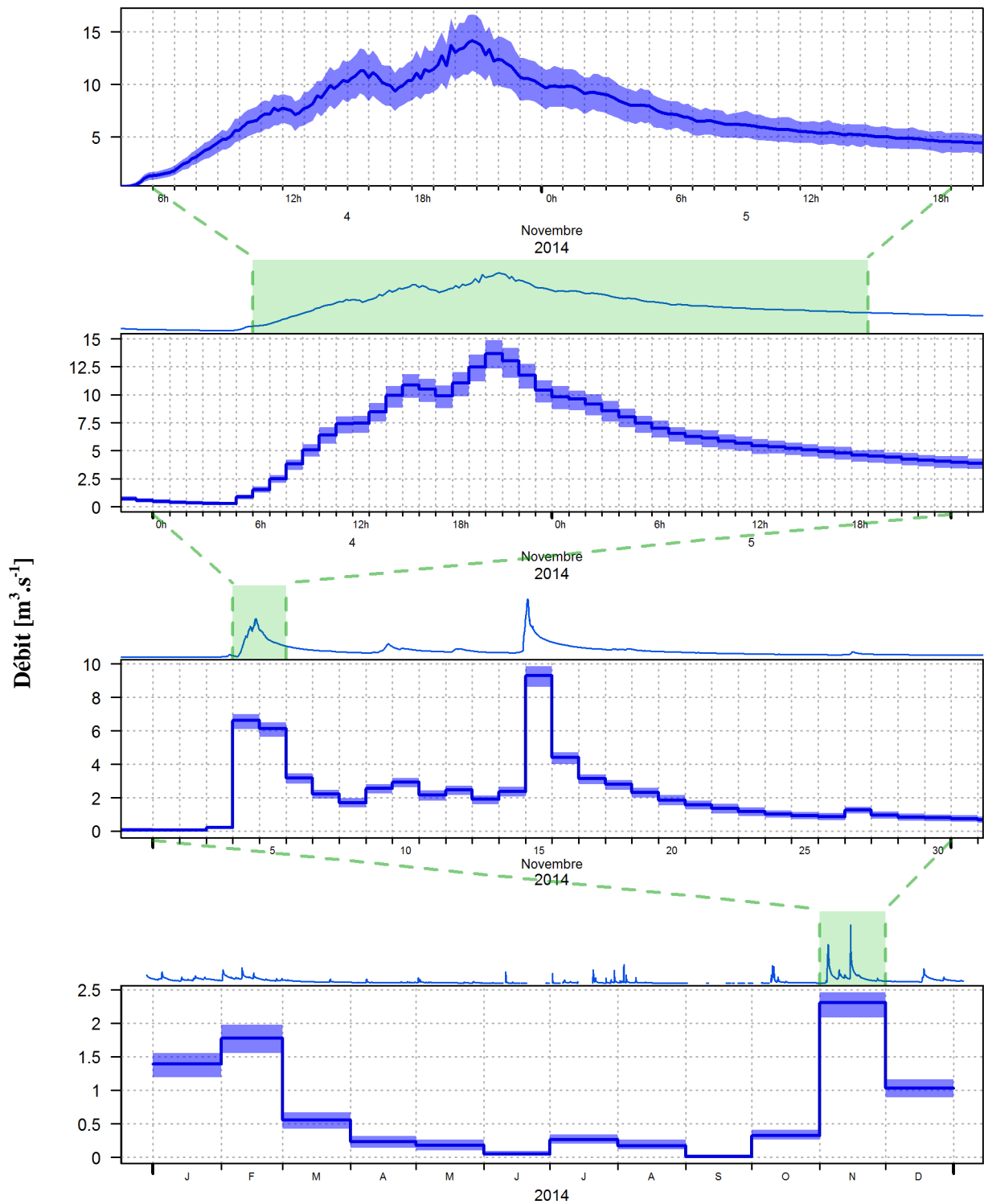


Figure 17: Hydrogramme (*MaxPost*, trait bleu, et incertitude totale associée, enveloppe bleu clair) estimé par BaRatin pour la station de Taffignon sur l'Yzeron. De haut en bas, l'hydrogramme est présenté à pas de temps variable (résultat brute de BaRatin), horaire, journalier et mensuel.

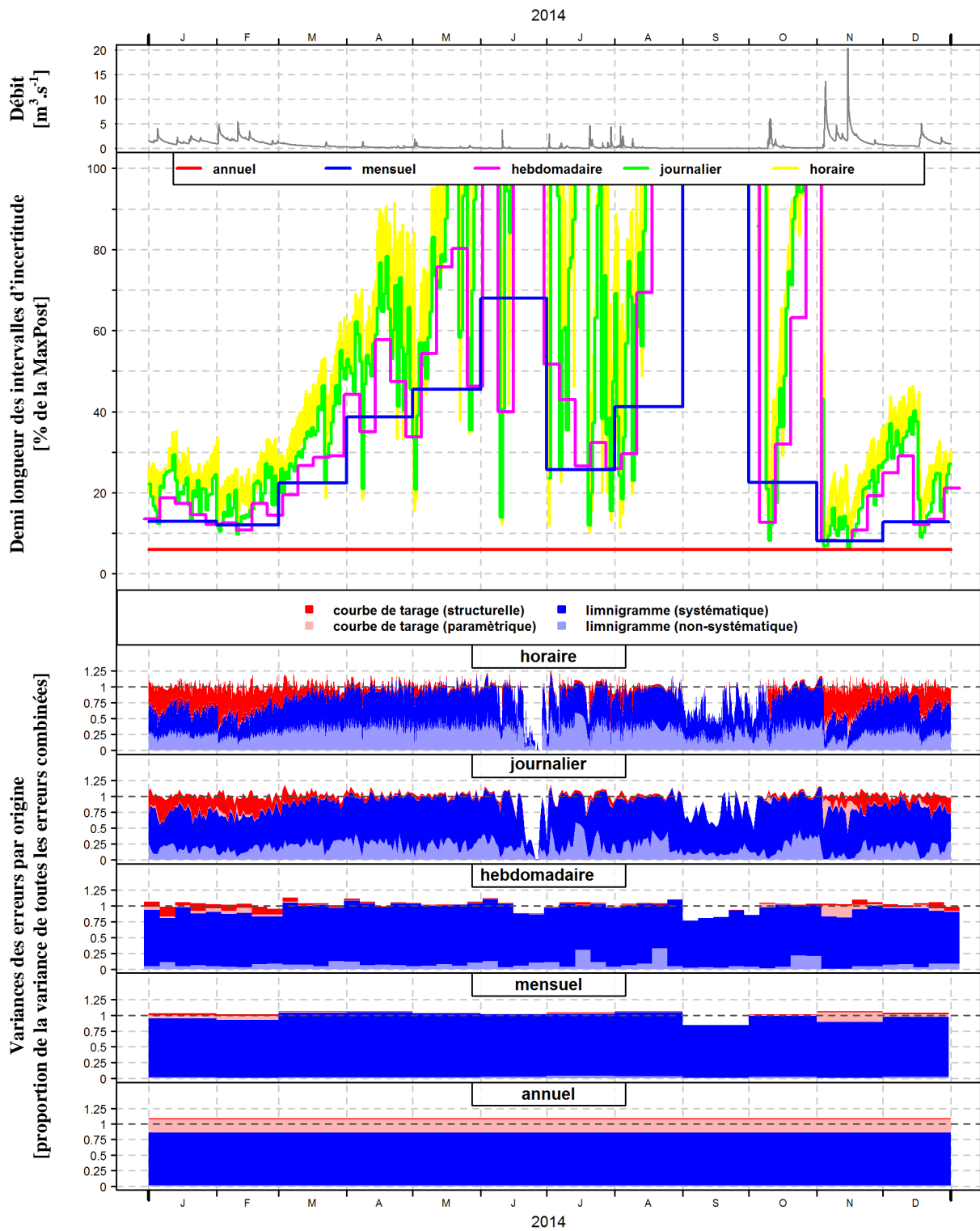


Figure 18: Estimation des incertitudes associées aux hydrogrammes pour la station de Taffignon sur l'Yzeron. De haut en bas, l'hydrogramme à pas de temps horaire, les demi-longueurs des intervalles de confiance à 95% de l'incertitude totale à différent pas de temps, puis les variances des erreurs affectant l'hydrogramme à pas de temps horaire, journalier, hebdomadaire, mensuel et annuel selon leurs origines, en proportion de la variance de toutes les erreurs combinées (incertitude totale).

Les médianes des demi-longueurs des intervalles d'incertitudes (Figure 18) pour les chroniques à pas de temps horaire, journalier, hebdomadaire, mensuel et annuel sont présentées ci-dessous :

Horaire	Journalier	Hebdomadaire	Mensuel	Annuel
+/- 52.3%	+/- 47.6%	+/- 30.8%	+/- 22.6%	+/- 6.01%

Selon le pas de temps considéré et la gamme de débit de la période considérée, on observe des incertitudes totales très diverses :

- à pas de temps horaire : incertitudes de l'ordre de +/-15% à +/-40% à l'exception des épisodes de crue (+/-10%) et des périodes d'étiage (incertitudes supérieures à +/- 100%).
- à pas de temps journalier : incertitudes allant de +/-7% (en crue) à plus de +/-100% (périodes d'étiage) mais le plus souvent comprises entre +/-10% et +/-40%.
- à pas de temps hebdomadaire : incertitudes supérieures à +/-80% voire +/-100% en étiage et qui oscillent entre +/-10% et +/-50% sinon.
- à pas de temps mensuel : en dehors des périodes d'étiage, les incertitudes oscillent entre +/-8% et +/-40%. Celles-ci atteignent des valeurs supérieures à +/-45% et +/-100% pour les mois les plus secs.
- pour la moyenne annuelle : une incertitude de +/-6% est estimée.

Tableau 7: Moyennes des proportions de variance (variance partielle / variance totale) pour les différentes sources d'erreurs (lignes) et les différents degrés d'agrégation temporelle (colonnes). L'intensité de la couleur rouge rend compte de l'importance de la contribution d'une erreur par rapport aux autres pour un degré d'agrégation temporelle.

	Horaire	Journalier	Hebdomadaire	Mensuel	Annuel
Limnigramme (non-systématique)	0.31	0.20	0.07	0.02	0.02
Limnigramme (systématique)	0.48	0.66	0.88	0.96	0.84
Courbe de tarage (paramétrique)	0.01	0.02	0.02	0.03	0.22
Courbe de tarage (structurelle)	0.16	0.09	0.03	0.01	0.01

Les graphiques présentant les contributions des différentes erreurs (les 5 graphiques du bas dans la Figure 18) ainsi que le tableau synthétique résumant ces graphiques (Tableau 7) mettent en évidence une nette dominance des erreurs provenant des mesures en continu des hauteurs d'eau. On note tout de même une contribution des erreurs structurelles non négligeable à pas de temps horaire, journalier et hebdomadaire, qui touche essentiellement les périodes où des débits importants sont enregistrés. Une contribution des erreurs paramétriques est également observée sur la moyenne annuelle.

Tout comme les deux stations précédemment traitées (voir en 4.1 et 4.2 de la section 4), on observe une importante diminution des contributions des erreurs non-systématiques avec l'agrégation temporelle au profit des erreurs systématiques. Une diminution de la contribution des erreurs systématiques liées aux mesures des hauteurs d'eau (causée par ses ré-échantillonnages périodiques) est également observée entre les moyennes mensuelles et la moyenne annuelles.

L'Yzeron à Taffignon présente des incertitudes assez importantes et très variables (selon le débit) qui proviennent principalement du limnigramme. Une nette diminution des incertitudes est observée pour la moyenne annuelle essentiellement liée aux ré-échantillonnages de l'erreur systématique affectant les mesures des hauteurs d'eau.

4.4. L'Yzeron à Craponne

Nom :	Craponne	Code hydro :	V3015010
Rivière / Bassin :	Yzéron	Zéro NGF de l'échelle (m) :	-
Taille BV (km²):	47	X lambert IIe (m):	785 470
		Y lambert IIe (m):	2 084 490



Figure 19: Photo de la section de contrôle de la station hydrométrique de Craponne. La flèche rouge indique l'emplacement de l'ancienne souche. (source : IRSTEA).

4.4.1. Analyse hydraulique du site

La DREAL RA a établi quatre courbes de tarage depuis la mise en service de la station. Cependant, une rapide analyse historique de la station a révélé que uniquement le changement du 16 juillet 1998 correspondait à un changement de contrôle hydraulique de la station (suppression de la souche sur le seuil en béton, voir la photo, Figure 19). Pour l'application de la méthode BaRatin, il convient donc de considérer deux périodes distinctes. Dans le cadre de cette étude, nous nous limitons à la période allant du 16 juillet 1998 à aujourd'hui.

Les contrôles hydrauliques identifiés pour cette station sont le seuil en béton pour les bas et moyen débits et le pont, qui induit un rétrécissement du cours d'eau à moyen et haut débit et qui est susceptible d'entrer en charge pour les plus forts débits (Figure 19 et Figure 20).

(1) Contrôles hydrauliques en jeu :

L'analyse hydraulique du site n'est pas évidente étant donnée la complexité de la section de contrôle et l'influence complexe du pont. De nombreuses hypothèses sur les contrôles ont été testées sur cette station. Celle retenue identifie trois gammes de hauteurs :

- Gamme 1 (bas débits) : le seuil en béton est légèrement triangulaire. Bien que l'angle d'ouverture soit trop large pour l'application d'une loi de seuil triangulaire, cette dernière a été choisie, étant, pour les bas débits, la meilleure approximation possible. Ce contrôle inclut également l'emplacement creux de la souche déracinée en rive droite à partir de 44cm hauteur échelle (Figure 20).

- Gamme 2 (moyen débits) : à partir d'une hauteur de 70cm environ, l'ensemble du seuil en béton contribue à l'écoulement et peut être approché par un seuil rectangulaire idéal. Les débordements sur les deux rives surviennent pour des hauteurs à peine supérieures et peuvent également être représentés par un contrôle de type seuil. En effet, l'eau sur les rives étant bloquée par les piles du pont, se déverse sous ce dernier impliquant une chute d'eau non négligeable. De plus, pour des hauteurs plus importantes, le pont, du fait du rétrécissement qu'il induit, se « combine » au seuil en béton et contrôle la relation hauteur-débit. La vidéo de la crue d'avril 2005 a permis de clairement identifier une section critique en arc de cercle directement à l'amont du pont. Un tel contrôle peut, encore une fois, être approché par un seuil rectangulaire à largeur déversante équivalente. Les largeurs déversantes étant assez proches pour les différents contrôles décrits dans ce paragraphe, un unique contrôle par seuil à largeur assez incertaine a été choisi pour représenter toute la gamme de hauteur concernée.
- Gamme 3 (haut débits) : Pour les plus hautes hauteurs d'eau (au minimum au-dessus de 1m70), le pont entre progressivement en charge. Les phénomènes hydrauliques alors en jeu sont très complexes étant donné l'importante vitesse d'approche, les remous, les influences aval, etc... De plus, aucun jaugeage n'est disponible pour cette gamme de hauteur, suggérant de ne pas être trop confiant dans les *a priori* fournis à BaRatin. Il a été choisi d'approcher ce contrôle par un orifice dénoyé dont la surface est très incertaine.

La matrice des contrôles correspondante qui découle de cette analyse hydraulique se caractérise par trois substitutions de contrôle selon la gamme de hauteur :

	Seuil « triangulaire »	Seuil « rectangulaire »	Orifice du pont
1 ^{ère} gamme de hauteur	1	0	0
2 ^{ème} gamme de hauteur	0	1	0
3 ^{ème} gamme de hauteur	0	0	1

(2) Formulation des *a priori* hydrauliques pour BaRatin

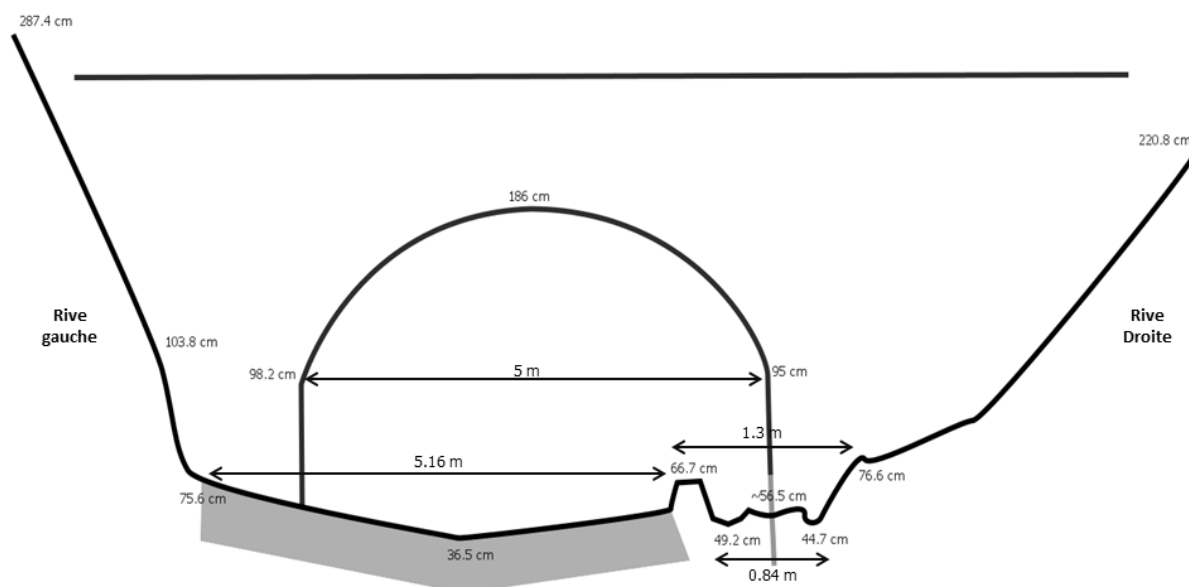


Figure 20: Schéma de la section de contrôle de la station hydrométrique de Craponne construit à partir des relevés topographiques faits par IRSTEA le 23 avril 2014. Les hauteurs sont indiquées en centimètre par rapport au zéro de l'échelle limnimétrique.

Contrôle n°1 : seuil triangulaire :

- La hauteur de la pointe du seuil triangulaire (le point bas du triangle) est estimée à partir des relevés topographiques (Figure 20) vers 0.37m (+/- 0.05m).
- L'angle, également estimé à partir de la topographie est environ de 167° (+/- 10°).
- Le coefficient de débit est pris aux alentours de 0.31 (+/- 0.05).
- Pour un contrôle par seuil triangulaire, l'exposant de la loi puissante est 2.5.

Cela conduit aux *a priori* suivants :

Paramètre	Valeur centrale	Incertitude élargie (95%)
Angle (°)	167	+/- 10
Coefficient de débit	0.31	+/- 0.05
Crête du seuil / b_1 (m)	0.37	+/- 0.05
Exposant	2.5	+/- 0.05

Contrôle n°2 : seuil rectangulaire équivalent :

- La hauteur de transition, assez incertaine devrait se situer entre 55cm (hauteur à partir de laquelle, la forme triangulaire du seuil commence à atteindre ses limites) et 85cm (hauteur où l'eau a commencé à déborder sur les rives). Cet intervalle est déduit de la topographie (Figure 20).
- On estime très grossièrement la largeur du seuil équivalent entre 4m et 10m.
- Le coefficient de débit est pris aux alentours de 0.45 (+/- 0.05) pour prendre en compte la vitesse d'approche de l'eau sans doute non négligeable pour la gamme de hauteur d'eau concerné par ce contrôle.

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

Paramètre	Valeur centrale	Incertitude élargie (95%)
Hauteur de transition (m)	0.7	+/- 0.15
Largeur (m)	7	+/- 3
Coefficient de débit	0.45	+/- 0.05

Contrôle n°3 : orifice du pont :

- La hauteur de transition est grossièrement estimée entre 1.65m et 2.05m, juste au-dessus du haut de l'arche qui forme la partie haute de l'orifice du pont.
- La surface est également grossièrement estimée à partir des relevés topographiques faits sur le pont. Une surface comprise entre 5m² et 15m² est estimée.
- Le coefficient de débit est pris aux alentours de 0.65 (+/- 0.05).
- Pour un contrôle de type orifice, l'exposant de la loi puissance est 0.5.

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

Paramètre	Valeur centrale	Incertitude élargie (95%)
Hauteur de transition (m)	1.85	+/- 0.2
Surface (m ²)	10	+/- 5
Coefficient de débit	0.65	+/- 0.05
Exposant	0.5	+/- 0.05

(3) Paramètres pour BaRatin :

Paramètre	Valeur centrale	Incertitude élargie (95%)
a_1	12.1	+/- 3.8
b_1	0.37	+/- 0.05
c_1	2.5	+/- 0.05
k_1	0.7	+/- 0.15
a_2	14	+/- 6.2
c_2	1.5	+/- 0.05
k_2	1.85	+/- 0.2
a_3	28.8	+/- 14.6
c_3	0.5	+/- 0.05

4.4.2. Les jaugeages

Du fait du changement de contrôle identifié le 16 juillet 1998, uniquement les jaugeages faits après cette date ont été conservés pour l'étude. Sur les 86 jaugeages restant, uniquement les jaugeages jugés valides ont été conservés, soit 80 jaugeages allant de 0.5l/s à 6.43m³/s. Des incertitudes de référence ont été attribuées à chaque jaugeage selon la méthode de jaugeages utilisé : +/-5% pour les jaugeages volumétriques (QD), +/-5% pour les jaugeages ADCP, +/-10% pour les jaugeages au courantomètre (PP) et +/-15% pour les jaugeages au saumon par intégration (SI).

4.4.3. Résultats BaRatin

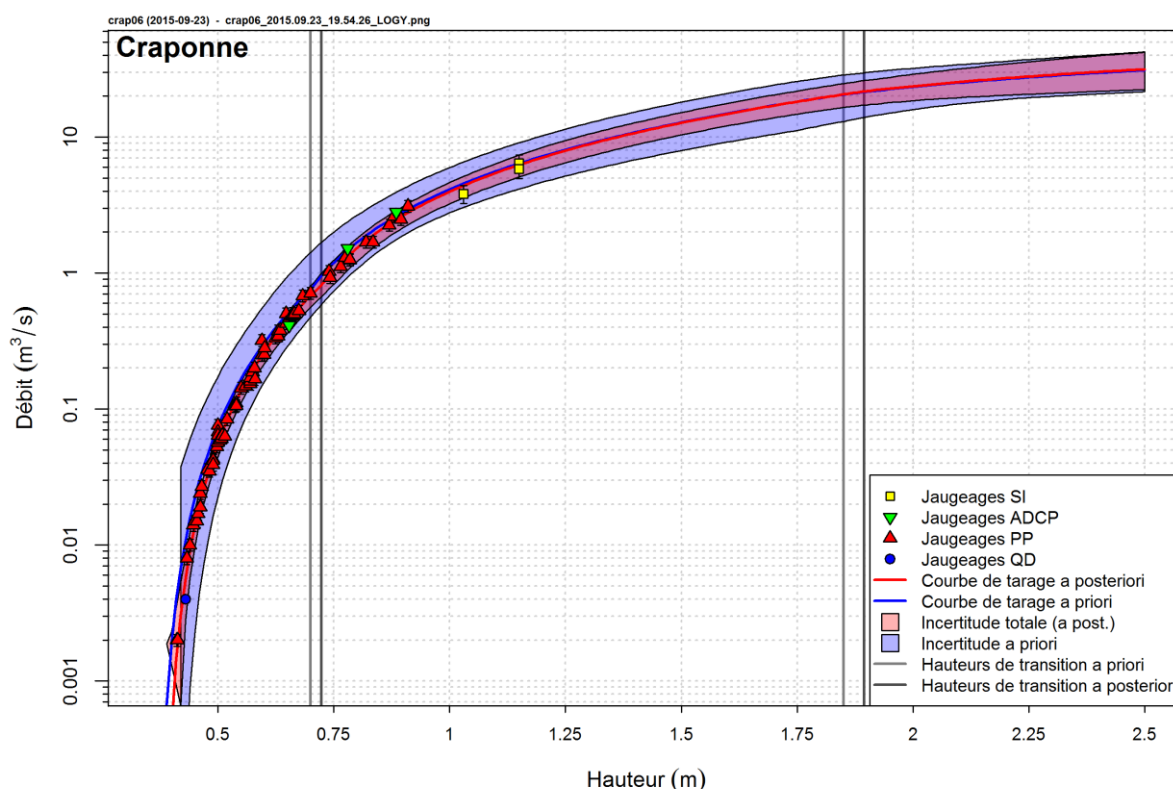


Figure 21: Courbe de tarage de la station de Craponne et enveloppes d'incertitude associées. Les jaugeages volumétriques (QD, au Saumont par Intégration (SI), ADCP et à la perche point par point (PP) sont également affichés.

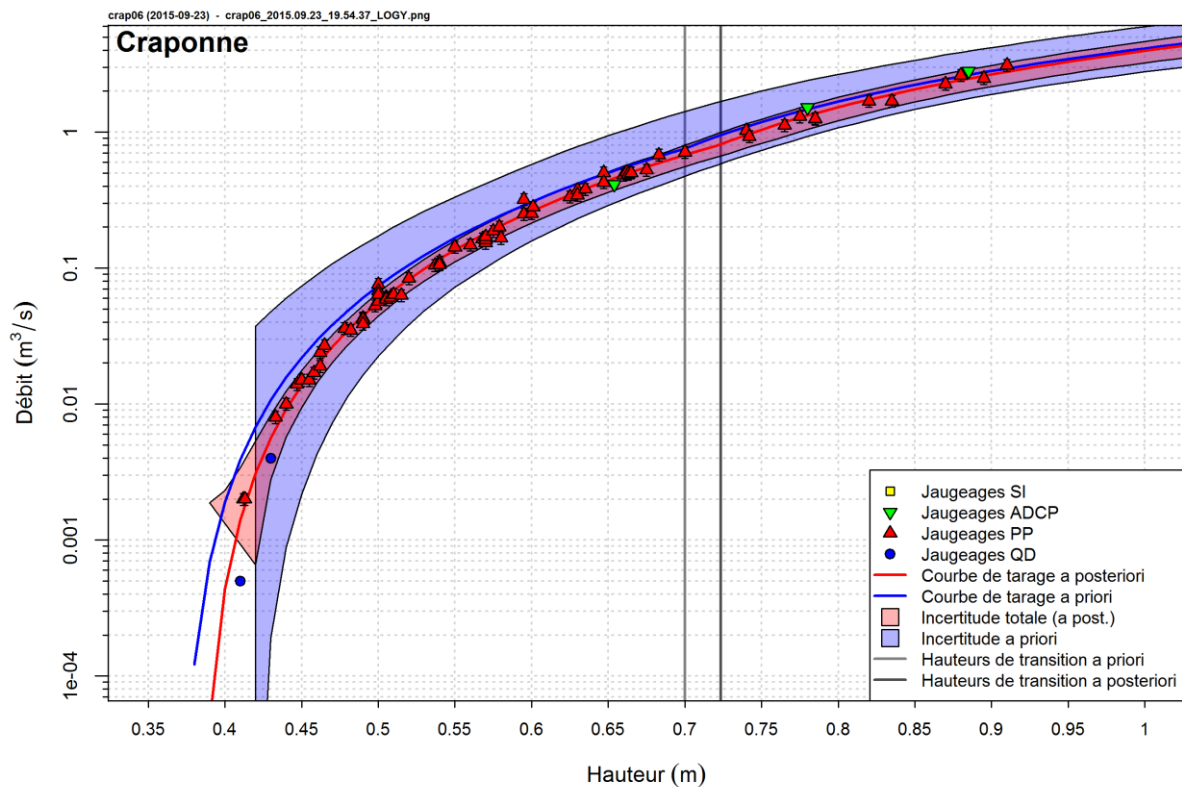


Figure 22: Courbe de tarage et enveloppes d'incertitudes associées de la station de Craponne. Zoom sur les hauteurs d'eau inférieures à 1m.

La courbe de tarage et l'incertitude associée estimées par BaRatin sont bien en accord avec l'ensemble des jaugeages (Figure 21 et Figure 22). De même, on constate que toutes les valeurs des paramètres *a posteriori* sont comprises dans les incertitudes définies *a priori* (voir Figure 23). Il est tout de même important de noter qu'uniquement les incertitudes associées aux paramètres a_1 , b_1 , k_1 et a_2 se trouvent diminuées *a posteriori* grâce à l'information apportée par les jaugeages (les incertitudes associées aux exposants, étant déjà faibles *a priori*, sont rarement réduites *a posteriori*). Les incertitudes associées aux paramètres qui concernent le dernier contrôle se trouvent inchangées *a posteriori* du fait de l'absence de jaugeages pour cette gamme de hauteur d'eau. Ceci justifie l'emploi d'*a priori* très incertains pour ne pas sous-estimer l'incertitude de la relation hauteur-débit dans cette gamme où l'écoulement reste très mal connu. On note tout de même le paramètre b_3 correspondant au centre de l'orifice, fixé par continuité de la relation, dont la valeur *MaxPost* se situe vers 1m34, soit une hauteur tout à fait réaliste ; l'enveloppe d'incertitude associée reste néanmoins très large (Figure 23 et Tableau 8). Enfin, on peut noter que la valeur du paramètre b_2 est fixée, par continuité de la relation, vers 0.58m. Cette hauteur, qui correspond à la crête du seuil équivalent du contrôle n°2, est parfaitement cohérente. En conclusion, l'ensemble des résultats offre une bonne cohérence qui permet d'être confiant quant à la qualité de la relation hauteur-débit ainsi estimée par BaRatin.

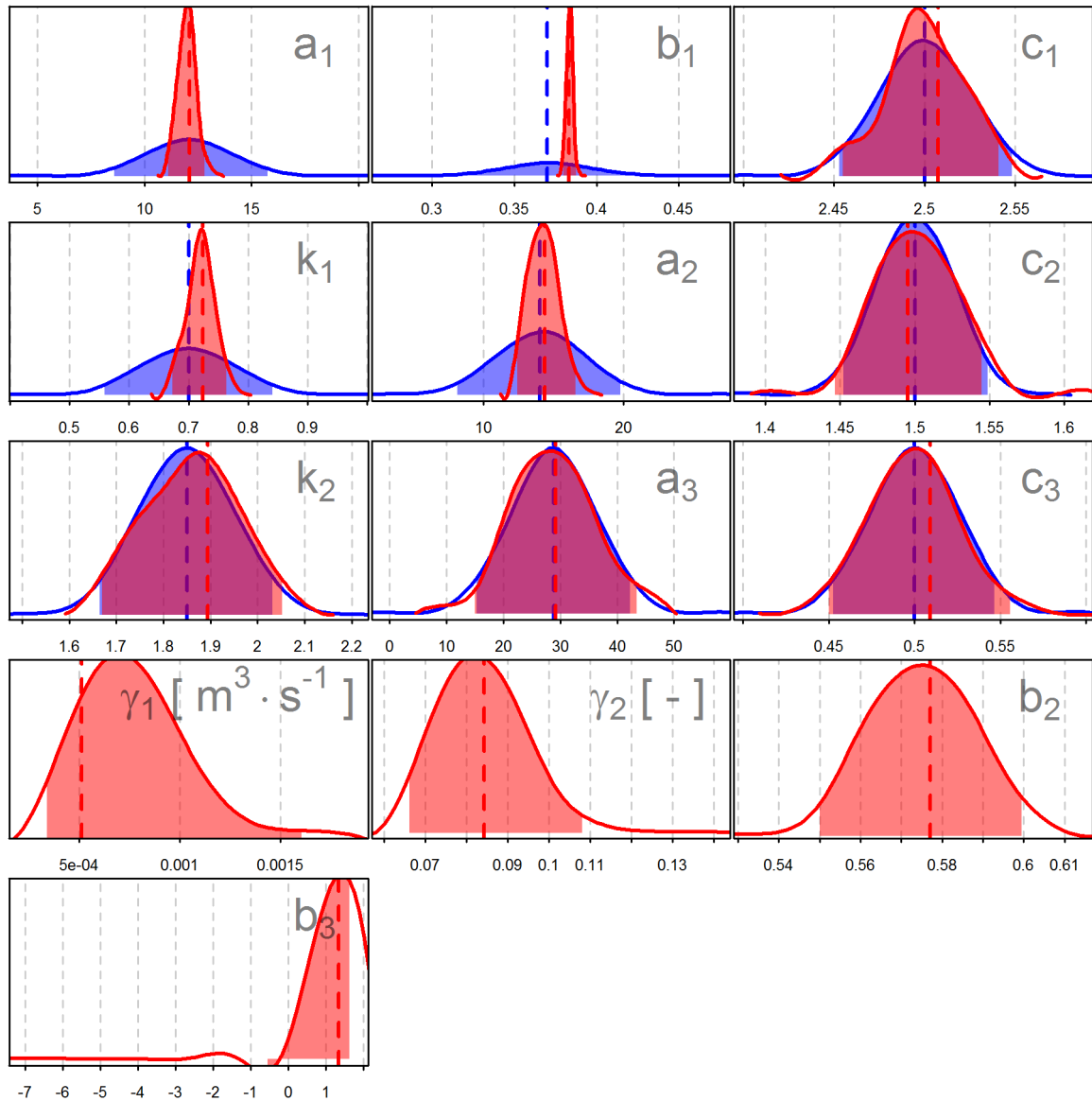


Figure 23: Distributions des paramètres *a priori* (bleu) et *a posteriori* (rouge) pour la station de Craponne, les traits verticaux correspondent aux valeurs *a priori* (bleu) *a posteriori* (rouge).

Tableau 8: Valeurs des paramètres (et quantiles 2.5% et 97.5%) *a priori* et *a posteriori* pour la station de Taffignon.

	<i>a priori</i>		<i>a posteriori</i>	
	moyenne	[2.5% , 97.5%]	MaxPost	[2.5% , 97.5%]
a₁	12.1	[8.3 , 15.9]	12.109	[11.108 , 12.839]
b₁	0.37	[0.32 , 0.42]	0.383	[0.38 , 0.388]
c₁	2.5	[2.45 , 2.55]	2.508	[2.454 , 2.541]
k₁	0.7	[0.55 , 0.85]	0.723	[0.672 , 0.765]
a₂	14	[7.8 , 20.2]	14.361	[12.338 , 16.591]
c₂	1.5	[1.45 , 1.55]	1.495	[1.444 , 1.547]
k₂	1.85	[1.65 , 2.05]	1.894	[1.667 , 2.054]
a₃	28.8	[14.2 , 43.4]	29.19	[14.759 , 43.473]
c₃	0.5	[0.45 , 0.55]	0.509	[0.45 , 0.555]
γ₁	Uniforme	[0 , 1000]	0.001	[0 , 0.002]
γ₂	Uniforme	[0 , 1000]	0.084	[0.066 , 0.109]
b₂	-	-	0.577	[0.549 , 0.6]
b₃	-	-	1.337	[-0.539 , 1.644]

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

$$\begin{aligned}
 \text{si } h \leq 0.723m: & \quad Q(h) = 12.109(h - 0.383)^{2.508} \\
 \text{si } 0.723m < h \leq 1.894m: & \quad Q(h) = 14.361(h - 0.577)^{1.495} \\
 \text{si } h > 1.894m: & \quad Q(h) = 29.19(h - 1.337)^{0.509}
 \end{aligned}$$

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

4.4.4. Propagation des incertitudes aux hydrogrammes

La détermination des incertitudes associées aux mesures en continu des hauteurs d'eau est décrite au début de la section 4. Les résultats sont présentés par la Figure 24 et la Figure 25.

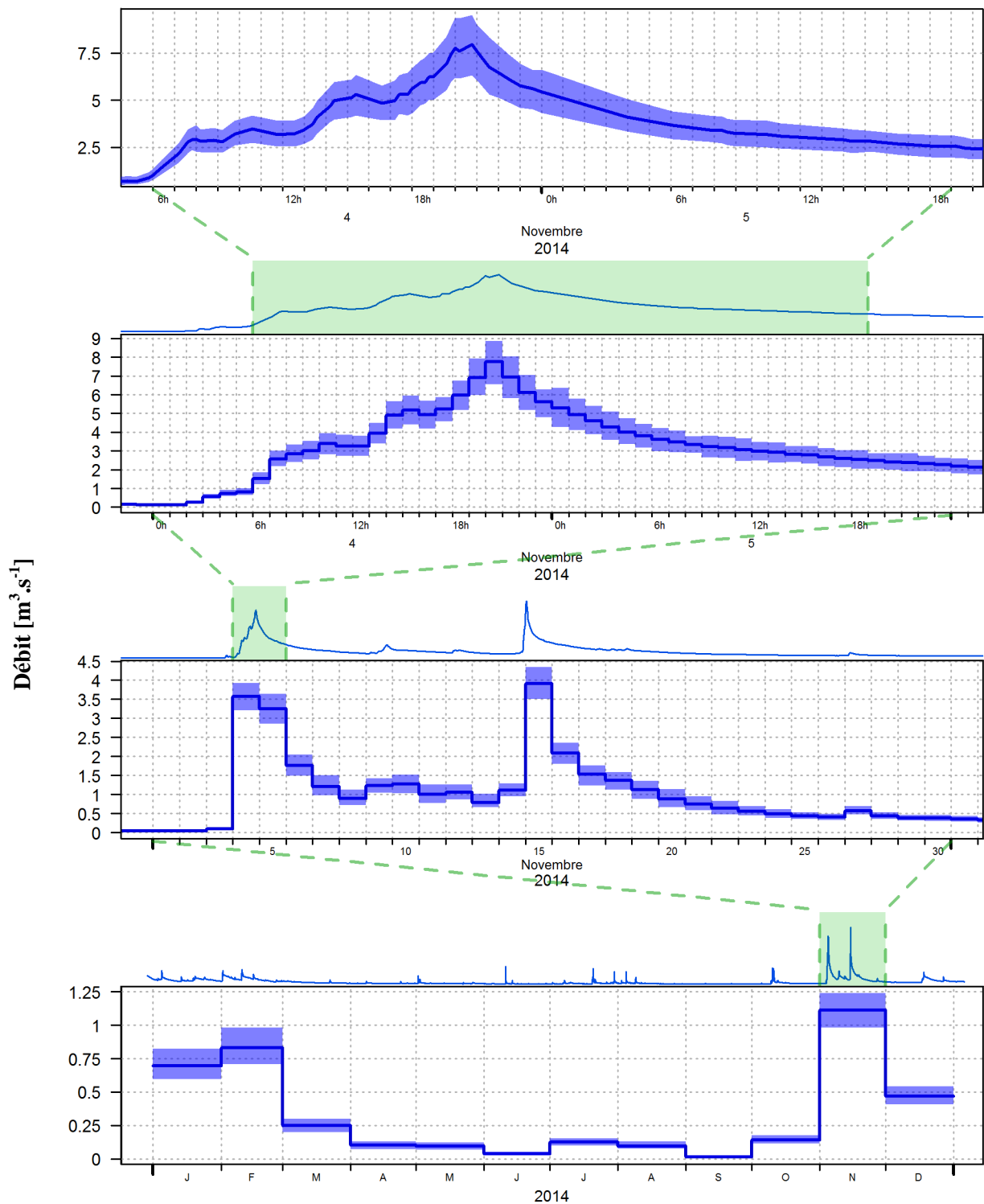


Figure 24: Hydrogramme (*MaxPost*, trait bleu, et incertitude totale associée, enveloppe bleu clair) estimé par BaRatin pour la station de Craponne sur l'Yzeron. De haut en bas, l'hydrogramme est présenté à pas de temps variable (résultat brute de BaRatin), horaire, journalier et mensuel.

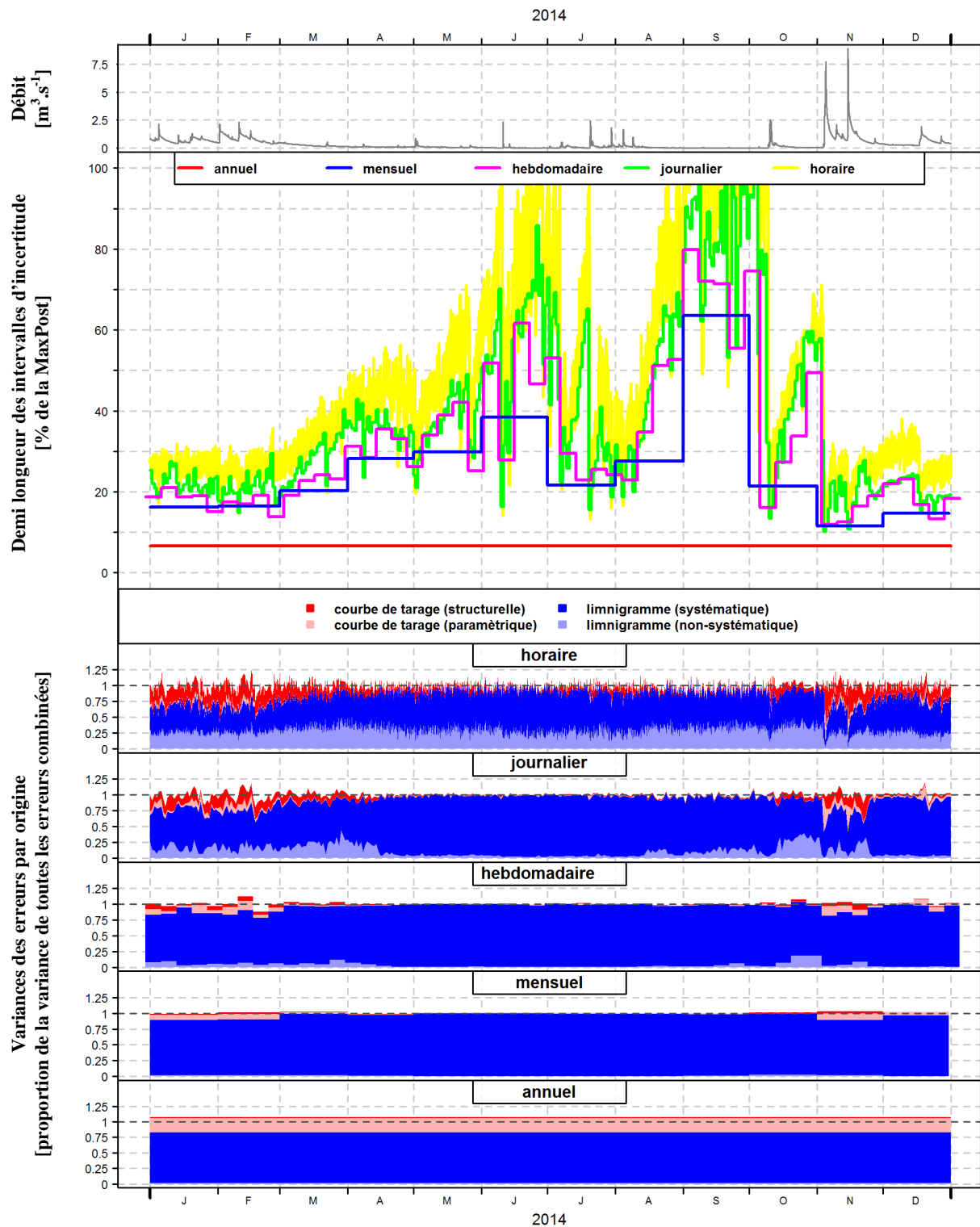


Figure 25: Estimation des incertitudes associées aux hydrogrammes pour la station de Craponne sur l'Yzeron. De haut en bas, l'hydrogramme à pas de temps horaire, les demi-longueurs des intervalles de confiance à 95% de l'incertitude totale à différent pas de temps, puis les variances des erreurs affectant l'hydrogramme à pas de temps horaire, journalier, hebdomadaire, mensuel et annuel selon leurs origines, en proportion de la variance de toutes les erreurs combinées (incertitude totale).

Les incertitudes présentées par la Figure 25 sont résumées ci-dessous :

Horaire	Journalier	Hebdomadaire	Mensuel	Annuel
+/- 39.2%	+/- 31.9%	+/- 24.7%	+/- 21.4%	+/- 6.67%

Selon le degré d'agrégation temporelle et selon que l'on se situe pendant une période d'étiage ou lors d'une crue, des incertitudes très diverses sont observées (Figure 25) :

- moyennes horaires : incertitudes le plus souvent comprises entre +/-20% et +/-50%, dépassant +/-100% en période de basses eaux et de l'ordre de +/-10% en crue.
- moyennes journalières : incertitudes allant de +/-10% en crue à plus de +/-90% en étiage et comprises entre +/-15% et +/-40% sinon.
- moyennes hebdomadaires : incertitudes le plus souvent comprises entre +/-10% et +/-40% et entre +/-60% et +/-80% en période d'étiage.
- moyennes mensuelles : incertitudes comprises entre +/-10% et +/-30% selon le régime d'écoulement et atteignant plus de +/-60% pour le mois le plus sec (septembre).
- moyenne annuelle : incertitude de l'ordre de +/-7%.

Tableau 9: Moyennes des proportions de variance (variance partielle / variance totale) pour les différentes sources d'erreurs (lignes) et les différents degrés d'agrégation temporelle (colonnes). L'intensité de la couleur rouge rend compte de l'importance de la contribution d'une erreur par rapport aux autres pour un degré d'agrégation temporelle.

	Horaire	Journalier	Hebdomadaire	Mensuel	Annuel
Limnigramme (non-systématique)	0.29	0.11	0.03	0.01	0.01
Limnigramme (systématique)	0.54	0.80	0.92	0.95	0.82
Courbe de tarage (paramétrique)	0.02	0.03	0.03	0.04	0.23
Courbe de tarage (structurale)	0.13	0.06	0.02	0.01	0.01

Les 5 graphiques du bas de la Figure 25 présentent les contributions des différentes sources d'erreurs. Une vision synthétique de ces figures est proposée par le Tableau 9. Ils permettent les observations suivantes :

- erreurs structurelles : une contribution faible mais non négligeable à pas de temps horaire et journalier est observée. Cette contribution concerne les périodes où les débits sont les plus importants. La contribution de ces erreurs est négligeable pour les autres pas de temps.
- erreurs paramétriques : elles apportent une contribution presque négligeable quel que soit le pas de temps considéré à l'exception de la moyenne annuelle.
- Erreurs systématiques associées au limnigramme : contribution très importante à pas de temps horaire et une contribution largement prédominante pour tous autres pas de temps. On note toutefois une légère diminution de la contribution pour la moyenne annuelle.
- Erreurs non-systématiques associées au limnigramme : contribution importante à pas de temps horaire et journalier. A pas de temps journalier, son importance est surtout pour les journées aux débits intermédiaires. Pour les autres pas de temps, la contribution de ces erreurs est négligeable.

Les incertitudes pour la station de Craponne sur l'Yzeron sont assez importantes et ne diminuent que très peu avec l'agrégation temporelle, à l'exception de la moyenne annuelle pour laquelle on note une incertitude beaucoup plus faible. Les incertitudes proviennent essentiellement du limnigramme et surtout des erreurs systématiques affectant ce dernier.

4.5. La Blies à Bliesbruck

Nom :	Bliesbruck	Code hydro :	A9372050 (A9425050)
Rivière / Bassin :	Blies	Zéro NGF de l'échelle (m) :	202.567
Taille BV (km²):	1815	X lambert IIe (m):	953 444
Date d'installation	01/01/2007	Y lambert IIe (m):	2 468 475



Figure 26: Photo aérienne de la station de Bliesbruck sur la Blies (pont rouge) permettant de voir le radier naturel (la section de contrôle à bas débit, flèche rouge) (source : Géoportail).

La station de Bliesbruck a déjà fait le sujet d'une étude BaRatin réalisée par Irstea en 2012 (Le Boursicaud *et al.* 2012). L'analyse hydraulique, qui s'était en partie appuyée sur un modèle hydraulique est reprise ici. BaRatin a de nouveau été mis en œuvre sur cette station afin de pouvoir y appliquer la propagation des incertitudes aux hydrogrammes.

4.5.1. Analyse hydraulique du site

(1) Contrôles hydrauliques en jeu :

L'analyse hydraulique de 2012 a permis de mettre en évidence une influence d'un radier naturel (indiqué par une flèche rouge sur la photo aérienne, Figure 26) situé à quelques mètres à l'aval de la station. Ce dernier contrôle la relation hauteur-débit à bas débit. A moyen débit, le chenal formé par le cours d'eau contrôle la relation hauteur-débit. La cassure importante visible dans les jaugeages s'explique par la réduction de section importante du passage du contrôle par le radier au contrôle par le chenal. Enfin, à haut débit, le contrôle est exercé par le lit majeur, fortement boisée par endroit. Trois gammes de hauteur d'eau sont ainsi identifiées :

- Gamme 1 (bas débits) : le contrôle est réalisé par le radier naturel que l'on approche par un seuil horizontal et rectangulaire équivalent.
- Gamme 2 (moyen débits) : A partir d'une certaine hauteur d'eau, très approximativement estimée à 1m au-dessus de la crête du seuil équivalent au radier, le contrôle est alors entièrement exercé par le chenal, modélisé par une équation de Manning Strickler simplifiée pour un chenal rectangulaire, homogène et de largeur constante.
- Gamme 3 (haut débits) : Enfin, à partir d'une hauteur assez incertaine, un contrôle par le lit majeur vient s'ajouter au contrôle par le lit mineur (également approché par une équation de Manning-Strickler simplifiée).

La matrice des contrôles correspondante qui découle de cette analyse hydraulique est :

	Seuil	Lit mineur	Lit majeur
1 ^{ère} gamme de hauteur	1	0	0
2 ^{ème} gamme de hauteur	0	1	0
3 ^{ème} gamme de hauteur	0	1	1

(2) Formulation des a priori hydrauliques pour BaRatin

Contrôle n°1 : radier naturel

- La largeur du seuil équivalent, estimée par Le Boursicaud *et al.* (2012) est de 40m (+/- 3m).
- Le coefficient de débit est pris aux alentours de 0.4 (+/- 0.1).
- Le minimum du limnigramme se situe vers -0.1m. Le Boursicaud *et al.* (2012) estimaient cette hauteur assez incertaine vers -0.5m (+/- 0.4m).

Les a priori suivants sont donc retenus :

Paramètre	Valeur centrale	Incertitude élargie (95%)
Largeur (m)	71	+/- 19
Coefficient de débit	0.4	+/- 0.1
Crête du seuil / b_1 (m)	-0.5	+/- 0.4

Contrôle n°2 : chenal du lit mineur :

- La hauteur de transition est assez incertaine. Elle est estimée grossièrement à partir des résultats de la modélisation hydraulique (Le Boursicaud *et al.*, 2012). Elle se situe environs vers 0.5m (+/- 0.5m).
- Le paramètre a_2 est estimé à partir de la modélisation hydraulique faite par Le Boursicaud *et al.* (2012). Une valeur de 13 (+/- 5) a été retenue.

Contrôle n°3 : chenal du lit majeur :

- La hauteur de transition, estimée à partir des résultats de la modélisation hydraulique, est trouvée vers 3.25m (+/- 0.5m).
- De même que pour le contrôle par le lit mineur, la modélisation hydraulique a permis d'approcher directement la valeur du paramètre a_3 . Une valeur de 70 (+/- 30) a été retenue.

(3) Paramètres pour BaRatin :

Paramètre	Valeur centrale	Incertitude élargie (95%)
a_1	71	+/- 19
b_1	-0.5	+/- 0.4
c_1	1.5	+/- 0.05
k_1	0.5	+/- 0.5
a_2	13	+/- 5
c_2	1.67	+/- 0.05
k_2	3.25	+/- 0.5
a_3	70	+/- 30
c_3	1.67	+/- 0.05

4.5.2. Les jaugeages

Les données de jaugeages montrent une dispersion importante quelle que soit la gamme de hauteur considérée (voir la Figure 27). Le Boursicaud *et al.* (2012) ont conduit une rapide analyse des jaugeages (limitée par l'absence de métadonnées sur les jaugeages faits à haut débit) les ayant conduit à :

- retirer tous les jaugeages faits avant 2006 pour les bas débits.
- retirer tous les jaugeages faits pour des hauteurs supérieures à 0.5m faits durant l'hiver de 1998-1999 (identifiés en jaune sur la Figure 27).

Nous suivons ici la sélection faite par Le Boursicaud *et al.* (2012) et conservons ainsi, uniquement 26 jaugeages. La même incertitude, de +/- 7%, a été attribué pour chaque jaugeage.

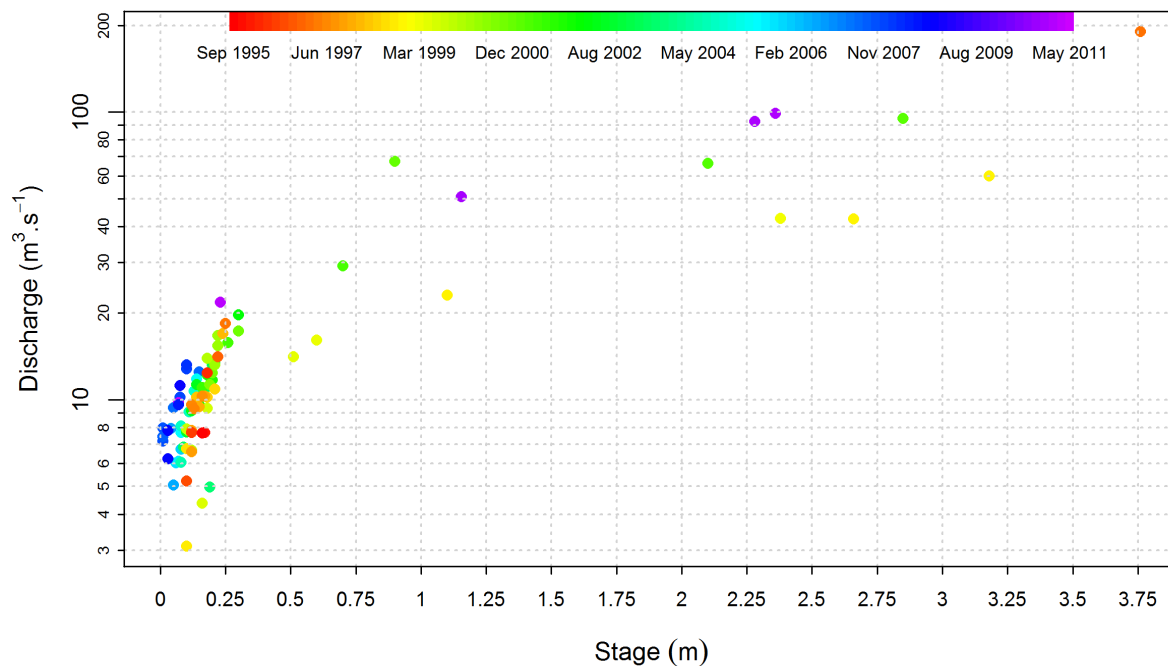


Figure 27: Jaugeages disponibles pour la station de Bliesbruck sur la Blies. Les couleurs permettent de mettre en évidence les dates auxquelles ont été faits les jaugeages.

4.5.3. Résultats BaRatin

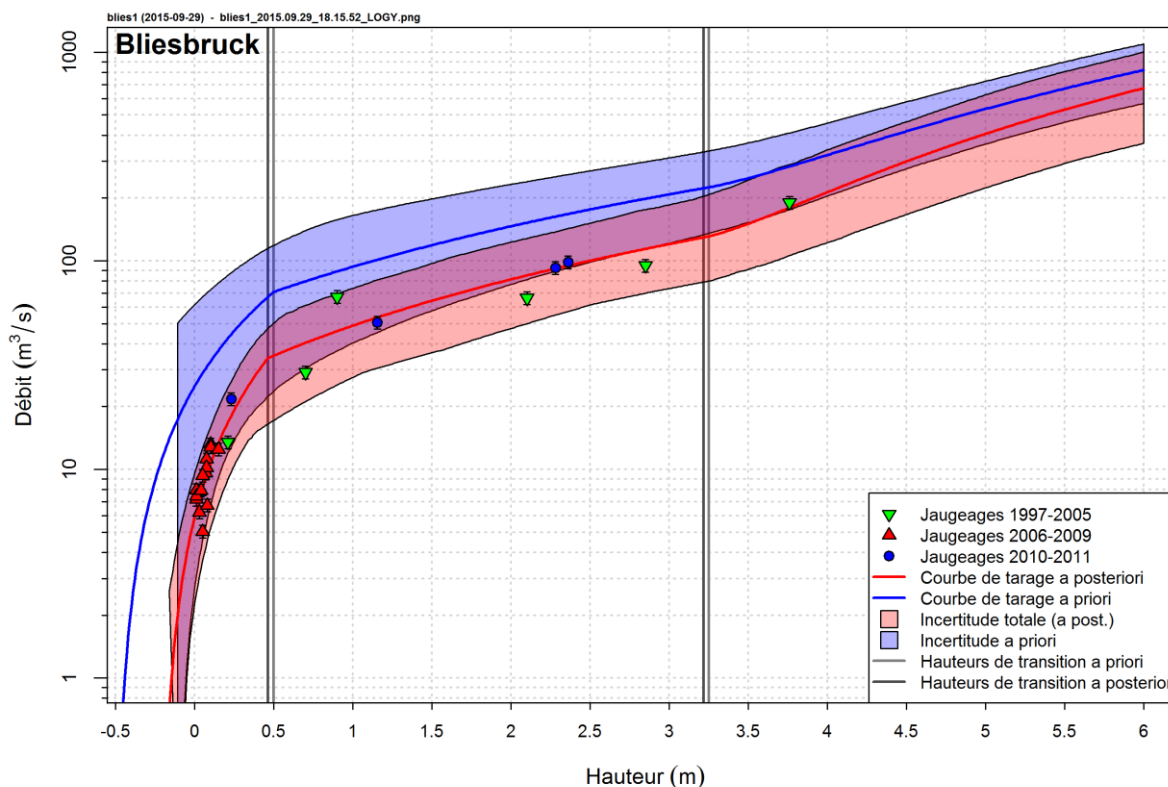


Figure 28: Courbe de tarage de la station de Bliesbruck et enveloppes d'incertitude associées. Les jaugeages sélectionnés sont identifiés selon la période où ils ont été faits.

La courbe de tarage (Figure 28) estimée par BaRatin suit bien la tendance visible dans les jaugeages. Une incertitude assez importante pour les moyens et hauts débits est clairement visible. Celle-ci est due à l'importante dispersion des jaugeages à moyen et haut débit. On note que l'importante dispersion concerne surtout les jaugeages faits avant 2006 ; une incertitude plus grande pourrait être attribuée à ces jaugeages. La répartition assez inégale du nombre de jaugeages entre les bas débits et les hauts débits contribue également à l'incertitude importante estimée par BaRatin pour le haut de la courbe. L'incertitude *a posteriori* des paramètres (Figure 29) n'est réduite (par rapport aux *a priori*) que pour les paramètres b_1 et k_1 (le paramètre a_1 était déjà assez précis *a priori*) donc uniquement les paramètres du contrôle n°1 pour lequel on dispose d'un nombre important de jaugeages.

Tous les paramètres *a posteriori* sont cohérents avec les *a priori* ce qui permet d'être confiant quant à la validité de la courbe de tarage estimée par BaRatin. On note tout de même la valeur *a posteriori* très basse du paramètre b_2 (estimé par continuité de la relation) correspondant au niveau moyen du chenal de contrôle par le lit mineur. Toutefois, cette valeur reste possible.

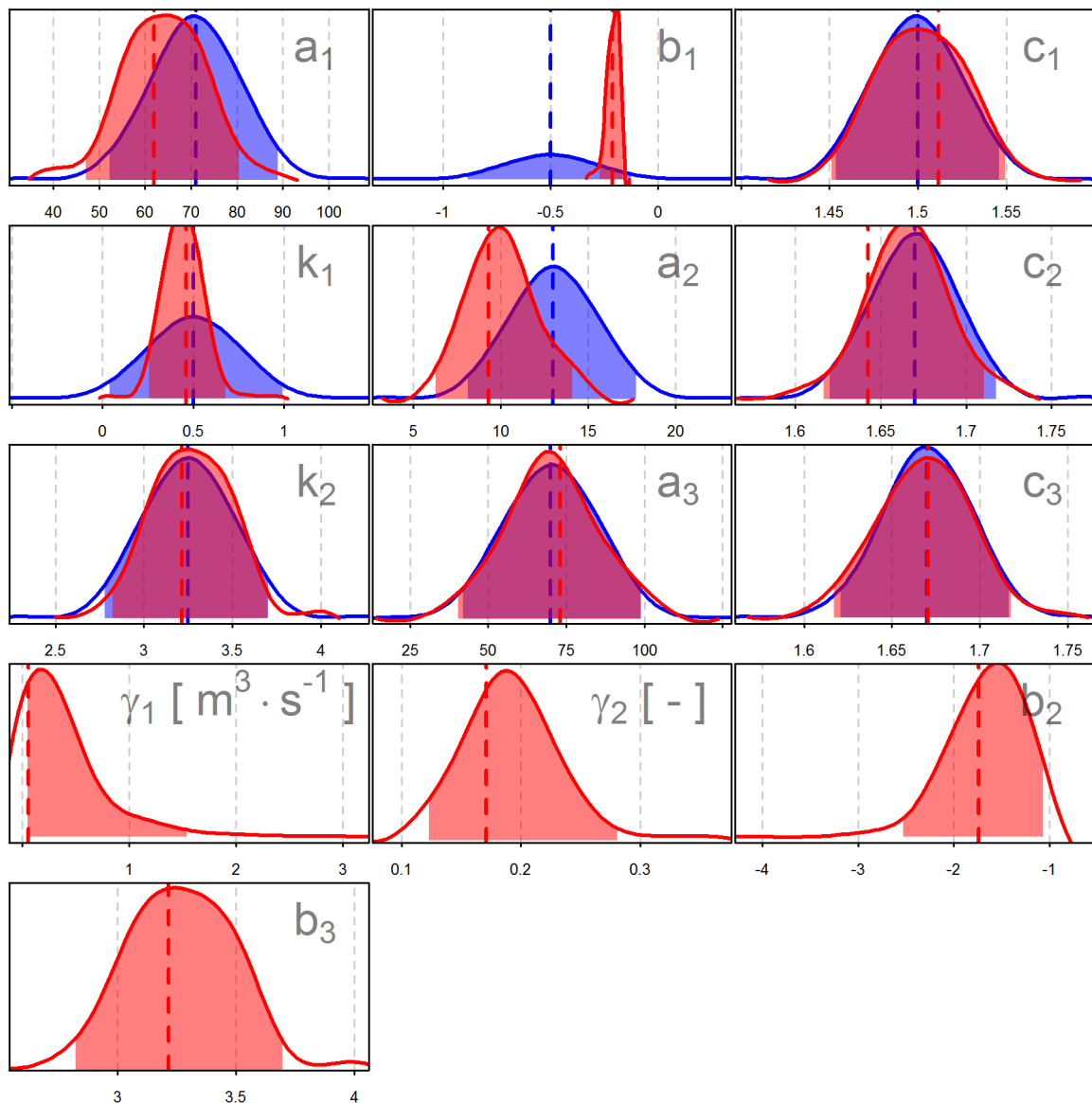


Figure 29: Distributions des paramètres *a priori* (bleu) et *a posteriori* (rouge) pour la station de Bliesbruck, les traits verticaux correspondent aux valeurs *a priori* (bleu) et *a posteriori* (rouge).

Tableau 10: Valeurs des paramètres (et quantiles 2.5% et 97.5%) *a priori* et *a posteriori* pour la station de Bliesbruck.

	<i>a priori</i>		<i>a posteriori</i>	
	moyenne	[2.5% , 97.5%]	MaxPost	[2.5% , 97.5%]
a₁	71	[52 , 90]	61.97	[46.595 , 80.522]
b₁	-0.5	[-0.9 , -0.1]	-0.212	[-0.275 , -0.164]
c₁	1.5	[1.45 , 1.55]	1.512	[1.451 , 1.55]
k₁	0.5	[0 , 1]	0.463	[0.257 , 0.671]
a₂	13	[8 , 18]	9.329	[6.264 , 14.238]
c₂	1.67	[1.62 , 1.72]	1.642	[1.615 , 1.712]
k₂	3.25	[2.75 , 3.75]	3.216	[2.821 , 3.699]
a₃	70	[40 , 100]	73.019	[39.173 , 99.23]
c₃	1.67	[1.62 , 1.72]	1.67	[1.615 , 1.719]
γ₁	Uniforme	[0 , 1000]	0.058	[0.013 , 1.512]
γ₂	Uniforme	[0 , 1000]	0.171	[0.12 , 0.281]
b₂	-	-	-1.743	[-2.562 , -1.047]
b₃	-	-	3.216	[2.821 , 3.699]

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

$$\begin{aligned}
 \text{si } h \leq 0.463m: & \quad Q(h) = 61.97(h + 0.212)^{1.512} \\
 \text{si } 0.463m < h \leq 3.216m: & \quad Q(h) = 9.329(h + 1.743)^{1.642} \\
 \text{si } h > 3.216m: & \quad Q(h) = 9.329(h + 1.743)^{1.642} \\
 & \quad \quad \quad + 73.019(h - 3.216)^{1.67}
 \end{aligned}$$

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

4.5.4. Propagation des incertitudes aux hydrogrammes

La détermination des incertitudes associées aux mesures en continu des hauteurs d'eau est décrite au début de la section 4. Les résultats sont présentés par la Figure 30 et la Figure 31.

La Figure 31 présente l'hydrogramme *MaxPost* et l'enveloppe de l'incertitude totale estimées par BaRatin, à pas de temps variables (résultat direct de BaRatin) et après agrégation à différent pas de temps. On observe sur le pic de crue à pas de temps variable, une incertitude de l'ordre de +/-40%.

Les incertitudes totales (demi-longueurs des intervalles d'incertitudes à 95%), pour différents pas de temps, sont présentées par la Figure 31 et résumées ci-dessous par les médianes :

Horaire	Journalier	Hebdomadaire	Mensuel	Annuel
+/- 37.4%	+/- 23.5%	+/- 15.9%	+/- 13.4%	+/- 10.5%

Plus précisément, la Figure 31 permet les observations suivantes :

- à pas de temps horaire : de +/-20% en crue à plus de +/-50% en période de basses eaux, l'incertitude totale est le plus souvent comprise entre +/-30% et +/-45%.
- à pas de temps journalier : incertitudes comprises entre +/-15% et +/-30% et supérieures à +/-40% pour les débits les plus faibles.
- à pas de temps hebdomadaire : incertitudes le plus souvent comprises entre +/-15% et +/-20% et de l'ordre de +/-12% pour les semaines à fort débit et de +/-27% pour les semaines à faible débit.
- à pas de temps mensuel : incertitudes comprises entre +/-11% et +/-17%.
- à pas de temps annuel : incertitude de l'ordre de +/-10%.

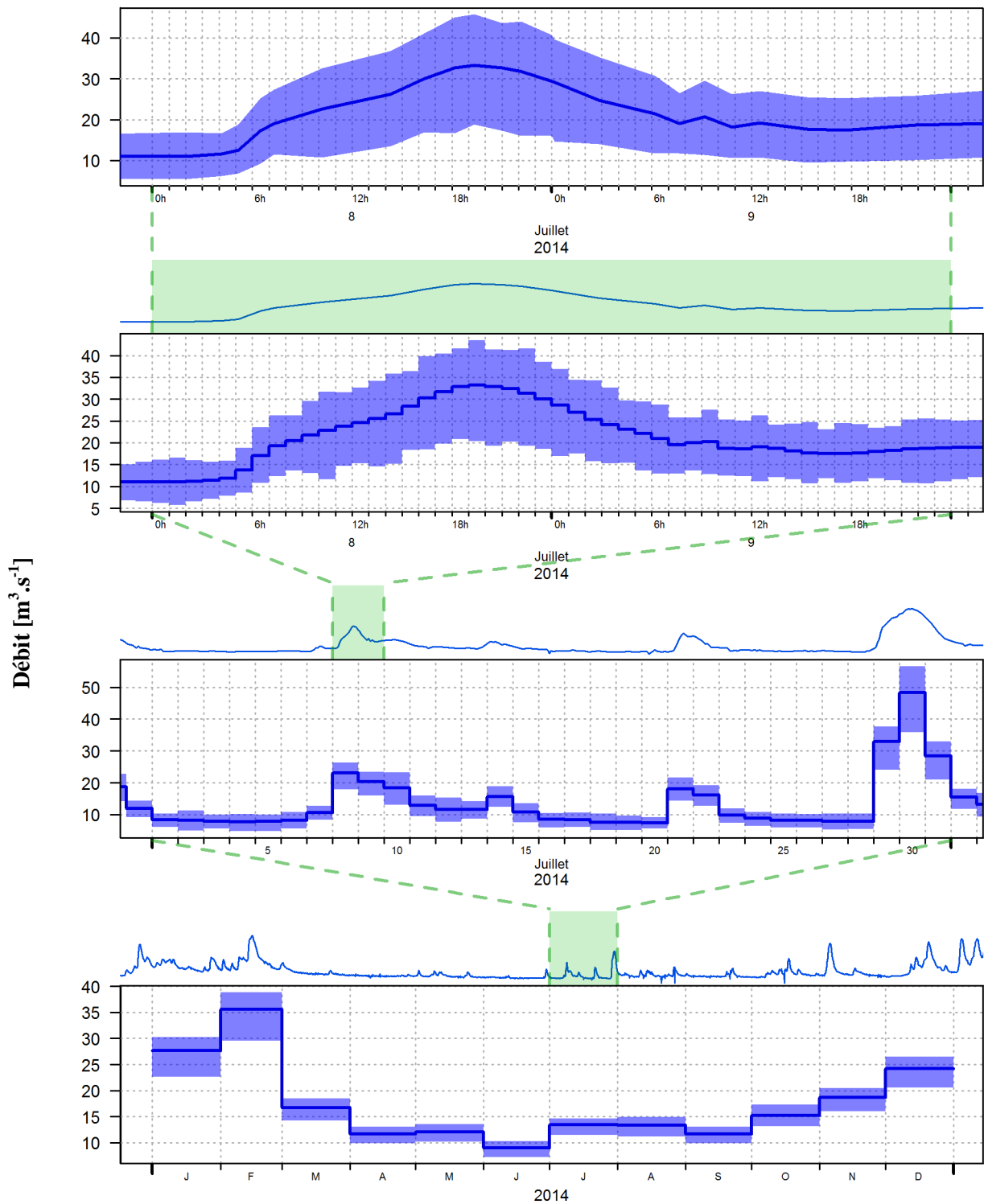


Figure 30: Hydrogramme (*MaxPost*, trait bleu, et incertitude totale associée, enveloppe bleu clair) estimé par BaRatin pour la station de Bliesbruck sur la Blies. De haut en bas, l'hydrogramme est présenté à pas de temps variable (résultat brute de BaRatin), horaire, journalier et mensuel.

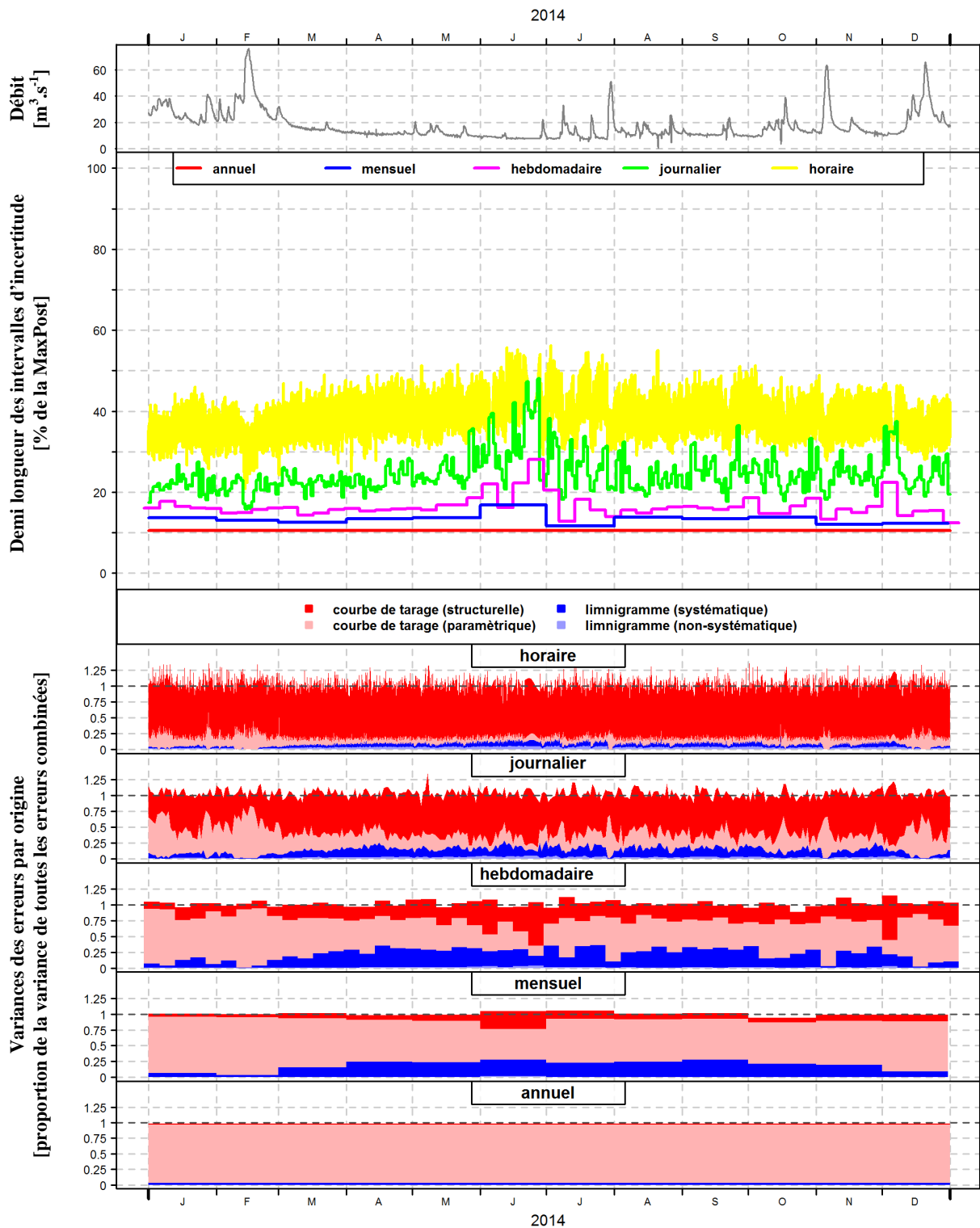


Figure 31: Estimation des incertitudes associées aux hydrogrammes pour la station de Bliesbruck sur la Blies. De haut en bas, l'hydrogramme à pas de temps horaire, les demi-longueurs des intervalles de confiance à 95% de l'incertitude totale à différent pas de temps, puis les variances des erreurs affectant l'hydrogramme à pas de temps horaire, journalier, hebdomadaire, mensuel et annuel selon leurs origines, en proportion de la variance de toutes les erreurs combinées (incertitude totale).

Tableau 11: Moyennes des proportions de variance (variance partielle / variance totale) pour les différentes sources d'erreurs (lignes) et les différents degrés d'agrégation temporelle (colonnes). L'intensité de la couleur rouge rend compte de l'importance de la contribution d'une erreur par rapport aux autres pour un degré d'agrégation temporelle.

	Horaire	Journalier	Hebdomadaire	Mensuel	Annuel
Limnigramme (non-systématique)	0.03	0.02	0.01	0.00	0.00
Limnigramme (systématique)	0.05	0.11	0.21	0.18	0.03
Courbe de tarage (paramétrique)	0.12	0.28	0.54	0.71	0.94
Courbe de tarage (structurale)	0.86	0.62	0.26	0.10	0.01

Le Tableau 11 résume la présentation des contributions des différentes erreurs (pour différent degré d'agrégation temporelle) faite par la Figure 31. Le Tableau 11 montre clairement la prédominance des erreurs provenant des courbes de tarage (erreurs structurales pour les pas de temps fin, et erreurs paramétriques pour les pas de temps les plus agrégés). Une contribution importante des erreurs systématiques affectant le limnigramme est tout de même visible à pas de temps journalier, hebdomadaire et mensuel.

La Figure 31 permet de voir la répartition des sources d'erreurs selon le débit. Les erreurs provenant de la courbe de tarage contribuent presque exclusivement pour les débits moyens et élevés alors que pour les débits les plus faibles, les erreurs provenant du limnigramme contribuent également de façon non négligeable.

Pour la Blies à Bliesbruck., on note des incertitudes totales assez importantes, diminuant fortement avec l'agrégation temporelle, qui proviennent essentiellement de la courbe de tarage et non du limnigramme. Il est probable que des incertitudes plus importantes pour les anciens jaugeages utilisés ici ainsi que de nouveaux jaugeages à fort débit contribue à réduire significativement les incertitudes provenant de la courbe de tarage.

4.6. Le Bévinco à Lancone

Nom :	Lancone	Code hydro :	Y7315010
Rivière / Bassin :	Bevinco	Zéro NGF de l'échelle (m) :	208.4
Taille BV (km²):	53.6	X lambert IIe (m):	-
Date d'installation	01/01/1979	Y lambert IIe (m):	-

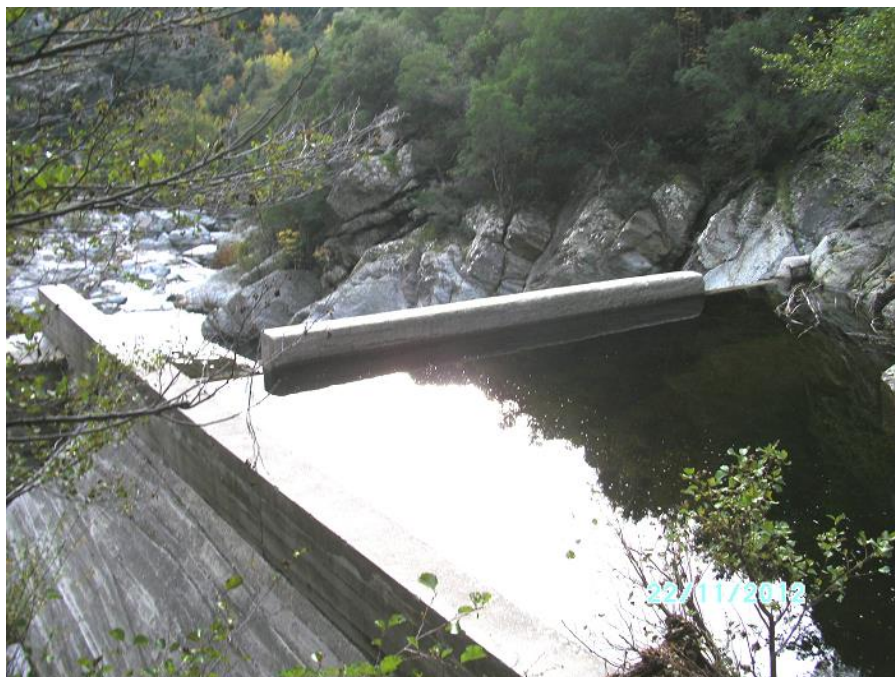


Figure 32: Photo de l'extrémité des déversoirs de la station de Lancone sur le Bevinco prise depuis l'amont en rive gauche (source : Bonnifait *et al.* 2012).

La station de Lancone, original par ses contrôles hydrauliques, a déjà fait l'objet d'une analyse BaRatin dans le cadre d'une étude conduite par le CEREMA réalisée par Bonnifait et Dussuchale (2012). L'analyse hydraulique qu'ils ont faite est reprise ici.

4.6.1. Analyse hydraulique du site

(1) Contrôles hydrauliques en jeu :

La station est localisée directement à l'amont d'un système de déversoirs artificiels. Quatre déversoirs s'activent les uns après les autres, sans jamais se désactiver (jamais noyé). Puis, à partir d'une certaine hauteur, un débordement en rive gauche provoque un contournement des déversoirs, contrôle qui s'ajoute à l'ensemble du système de déversoirs. Ce dernier contrôle est constitué de gros blocs rocheux pouvant être approché par un seuil horizontal rectangulaire équivalent dont la crête et la largeur sont assez incertaines. L'ensemble des contrôles hydrauliques peut être résumé par la matrice des contrôles suivante :

	Seuil 1	Seuil 2	Seuil 3	Seuil 4	Débordement
1^{ère} gamme de hauteur	1	0	0	0	0
2^{ème} gamme de hauteur	1	1	0	0	0
3^{ème} gamme de hauteur	1	1	1	0	0
4^{ème} gamme de hauteur	1	1	1	1	0
5^{ème} gamme de hauteur	1	1	1	1	1

Les valeurs des *a priori* et les incertitudes associées (à quelques modifications mineures près) sont reprises de l'analyse faite par Bonnifait et Dussuchale (2012).

(2) Formulation des a priori hydrauliques pour BaRatin

Contrôle n°1 : seuil n°1

- La largeur du seuil est estimée à 1.9m (+/- 0.5m)
- Le coefficient de débit est pris aux alentours de 0.4 (+/- 0.05).
- La hauteur de la crête du seuil est estimée vers 0.2m (+/- 0.1m)

Contrôle n°2 : seuil n°2

- La hauteur de transition se situe au niveau de la crête du seuil n°2, vers 0.6m (+/- 0.1m).
- La largeur du seuil est estimée à 3m (+/- 0.3m)
- Le coefficient de débit est pris aux alentours de 0.4 (+/- 0.05).
- La hauteur de la crête du seuil est estimée vers 0.6m (+/- 0.1m)

Contrôle n°3 : seuil n°3

- La hauteur de transition se situe au niveau de la crête du seuil n°3, vers 1.1m (+/- 0.1m).
- La largeur du seuil est estimée à 11m (+/- 3m)
- Le coefficient de débit est pris aux alentours de 0.4 (+/- 0.05).
- La hauteur de la crête du seuil est estimée vers 1.1m (+/- 0.1m)

Contrôle n°4 : seuil n°4

- La hauteur de transition se situe au niveau de la crête du seuil n°4, vers 1.3m (+/- 0.1m).
- La largeur du seuil est estimée à 11m (+/- 3m)
- Le coefficient de débit est pris aux alentours de 0.4 (+/- 0.05).
- La hauteur de la crête du seuil est estimée vers 0.6m (+/- 0.1m)

Contrôle n°5 : contournement, seuil équivalent

- La hauteur de transition est assez incertaine. Elle est estimée grossièrement vers 1.6m (+/- 0.25m).
- La largeur du seuil est estimée à 4m (+/- 0.5m)
- Le coefficient de débit est pris aux alentours de 0.4 (+/- 0.1).
- La hauteur de la crête du seuil est estimée vers 1.6m (+/- 0.25m)

(3) Paramètres pour BaRatin :

Paramètre	Valeur centrale	Incertitude élargie (95%)
a₁	3.4	+/- 1
b₁	0.2	+/- 0.1
c₁	1.5	+/- 0.05
k₁	0.6	+/- 0.1
a₂	5.3	+/- 0.9
c₂	1.5	+/- 0.05
k₂	1.1	+/- 0.1
a₃	19.5	+/- 5.8
c₃	1.5	+/- 0.05
k₃	1.3	+/- 0.1
a₄	19.5	+/- 5.8
c₄	1.5	+/- 0.05
k₄	1.6	+/- 0.25
a₅	7.1	+/- 2.5
c₅	1.5	+/- 0.05

4.6.2. Les jaugeages

Une rapide analyse des jaugeages (Figure 33 et Figure 34) a conduit aux conclusions suivantes :

- Les jaugeages dits par dilution à débit constant (DC dans la nomenclature SANDRE) sont anormalement écartés de la tendance générale (Figure 33) et sont donc supprimés de l'analyse BaRatin.
- Une dérive des jaugeages aux cours du temps pour les bas débits est clairement identifiée (Figure 34). Celle-ci est sans doute liée aux nombreux changements d'échelle mentionnés par Bonnifait et Dussuchale (2012) et a conduit à ne retenir que les jaugeages postérieurs au 1^{er} janvier 1995 pour les hauteurs d'eau inférieures à 0.7m.

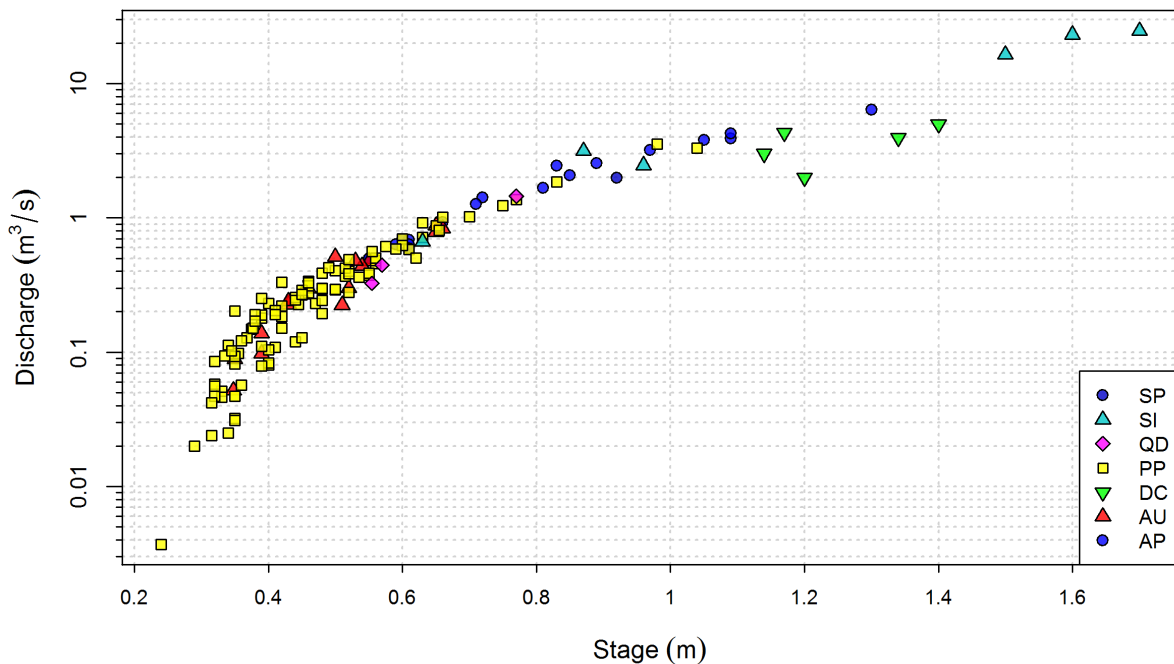


Figure 33: Jaugeages disponibles pour la station de Lancone sur le Bevinco identifiées selon le mode de jaugeage.

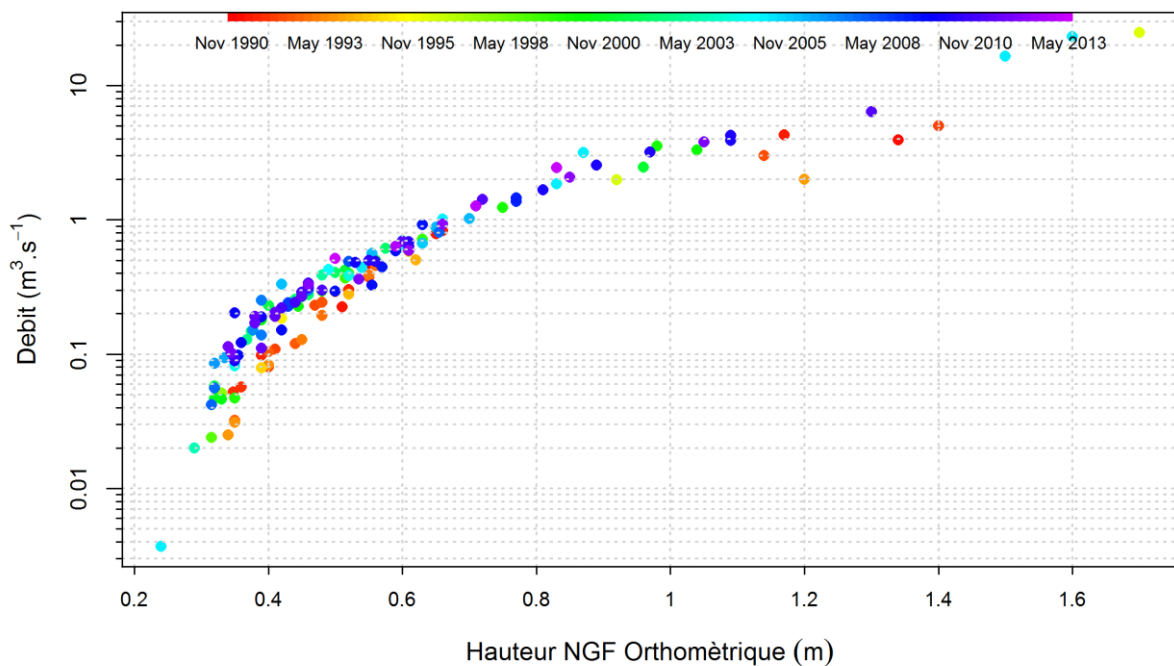


Figure 34: Jaugeages disponibles pour la station de Lancone sur le Bevinco. Les couleurs permettent de mettre en évidence les dates auxquelles ont été faits les jaugeages.

Aux 120 jaugeages retenus ont été attribués des incertitudes typiques: +/-5% pour les jaugeages ADCP, +/-5% pour les jaugeages volumétriques (mesure directe), +/-10% pour les jaugeages par exploration du champ de vitesse, +/-15% pour les jaugeages faits par intégration et les jaugeages dont la méthode est inconnue. Certains commentaires indiquant des conditions non optimales de jaugeage ont conduit à augmenter l'incertitude jusqu'à +/-15% pour les jaugeages ADCP et +/-30% pour les jaugeages par intégration.

4.6.3. Résultats BaRatin

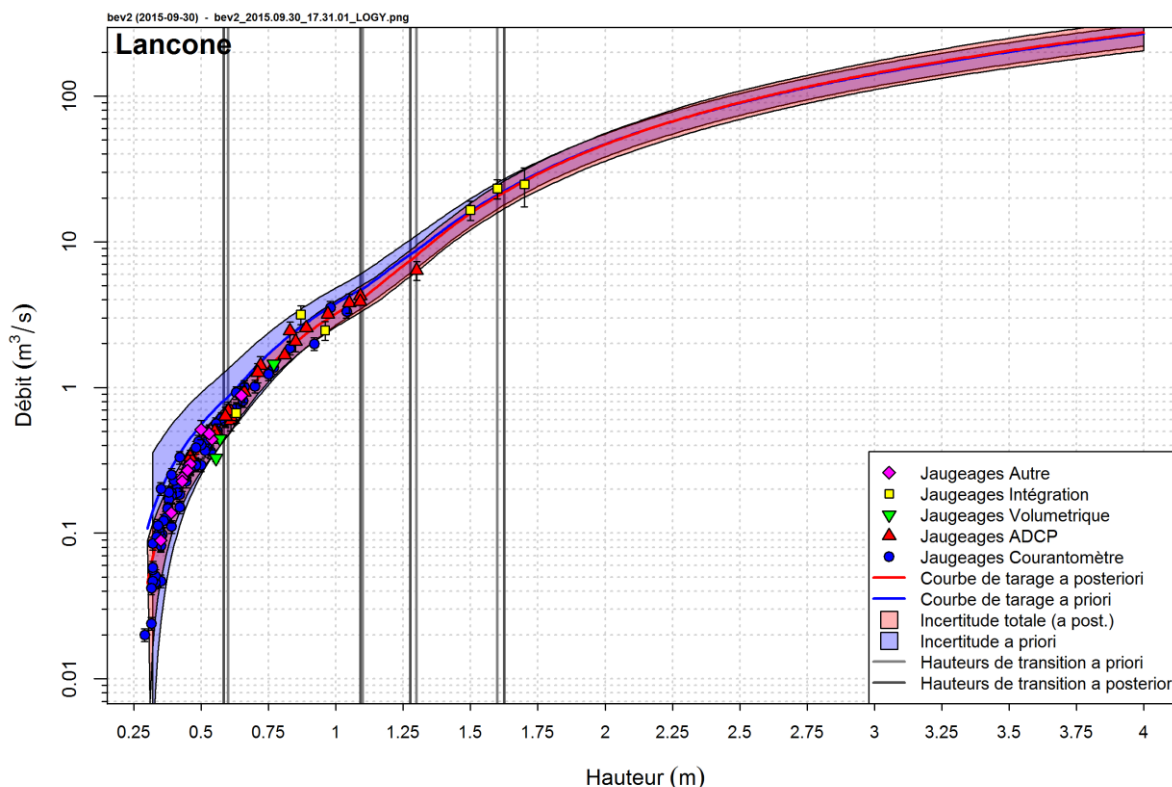


Figure 35: Courbe de tarage de la station de Lancone et enveloppes d'incertitude associées. Les jaugeages sélectionnés sont identifiés selon la méthode de jaugeage.

La courbe de tarage et les incertitudes associées estimées par BaRatin sont tout à fait en accord avec les jaugeages. L'incertitude reste importante à haut débit du fait du faible nombre de jaugeages (Figure 35). Les jaugeages, très nombreux pour les contrôles n°1 et n°2, ont fortement contribué à réduire l'incertitude associée aux paramètres pour ces deux contrôles (Figure 36). L'incertitude n'est que très peu réduite pour les autres contrôles.

Comme Bonnifait et Dussuchale (2012) le mentionnent, une topographie précise des différents seuils ainsi que des blocs rocheux où a lieu l'écoulement à haut débit permettrait de préciser les *a priori* pour les contrôles dans les gammes de hauteurs d'eau peu jaugeées et ainsi d'améliorer les résultats de BaRatin.

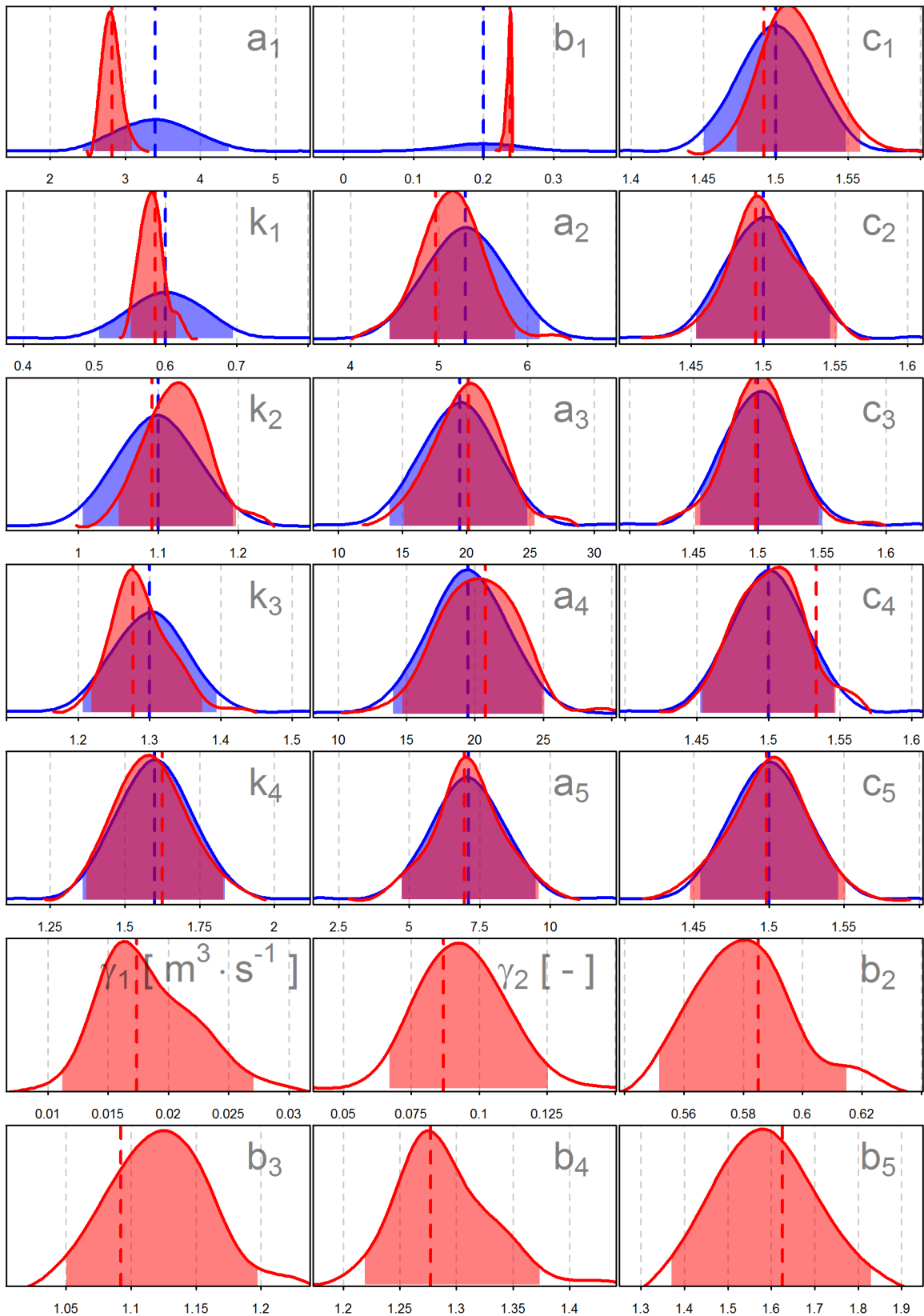


Figure 36: Distributions des paramètres *a priori* (bleu) et *a posteriori* (rouge) pour la station de Lancone, les traits verticaux correspondent aux valeurs *a priori* (bleu) et *a posteriori* (rouge).

Tableau 12: Valeurs des paramètres (et quantiles 2.5% et 97.5%) *a priori* et *a posteriori* pour la station de Bliesbruck.

	<i>a priori</i>		<i>a posteriori</i>	
	moyenne	[2.5% , 97.5%]	MaxPost	[2.5% , 97.5%]
a₁	3.4	[2.4 , 4.4]	2.822	[2.603 , 3.087]
b₁	0.2	[0.1 , 0.3]	0.237	[0.226 , 0.24]
c₁	1.5	[1.45 , 1.55]	1.492	[1.472 , 1.559]
k₁	0.6	[0.5 , 0.7]	0.585	[0.55 , 0.615]
a₂	5.3	[4.4 , 6.2]	4.963	[4.45 , 5.841]
c₂	1.5	[1.45 , 1.55]	1.495	[1.452 , 1.552]
k₂	1.1	[1 , 1.2]	1.092	[1.049 , 1.199]
a₃	19.5	[13.7 , 25.3]	20.183	[14.993 , 25.349]
c₃	1.5	[1.45 , 1.55]	1.498	[1.45 , 1.547]
k₃	1.3	[1.2 , 1.4]	1.277	[1.218 , 1.375]
a₄	19.5	[13.7 , 25.3]	20.76	[14.557 , 25.302]
c₄	1.5	[1.45 , 1.55]	1.533	[1.453 , 1.549]
k₄	1.6	[1.35 , 1.85]	1.626	[1.366 , 1.835]
a₅	7.1	[4.6 , 9.6]	6.954	[4.697 , 9.621]
c₅	1.5	[1.45 , 1.55]	1.498	[1.446 , 1.55]
γ₁	Uniforme	[0 , 1000]	0.017	[0.011 , 0.027]
γ₂	Uniforme	[0 , 1000]	0.087	[0.066 , 0.125]
b₂	-	-	0.585	[0.55 , 0.615]
b₃	-	-	1.092	[1.049 , 1.199]
b₄	-	-	1.277	[1.218 , 1.375]
b₅	-	-	1.626	[1.366 , 1.835]

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

$$\begin{aligned}
 \text{si } h \leq 0.585m: & \quad Q(h) = 2.822(h - 0.237)^{1.492} \\
 \text{si } 0.585m < h \leq 1.092m: & \quad Q(h) = 2.822(h - 0.237)^{1.492} \\
 & \quad + 4.963(h - 0.585)^{1.495} \\
 \text{si } 1.092m < h \leq 1.277m & \quad Q(h) = 2.822(h - 0.237)^{1.492} \\
 & \quad + 4.963(h - 0.585)^{1.495} \\
 & \quad + 20.183(h - 1.092)^{1.498} \\
 \text{si } 1.277m < h \leq 1.626m & \quad Q(h) = 2.822(h - 0.237)^{1.492} \\
 & \quad + 4.963(h - 0.585)^{1.495} \\
 & \quad + 20.183(h - 1.092)^{1.498} \\
 & \quad + 20.76(h - 1.277)^{1.533} \\
 \text{si } h > 1.626m: & \quad Q(h) = 2.822(h - 0.237)^{1.492} \\
 & \quad + 4.963(h - 0.585)^{1.495} \\
 & \quad + 20.183(h - 1.092)^{1.498} \\
 & \quad + 20.76(h - 1.277)^{1.533} \\
 & \quad + 6.954(h - 1.626)^{1.498}
 \end{aligned}$$

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

4.6.4. Propagation des incertitudes aux hydrogrammes

La détermination des incertitudes associées aux mesures en continu des hauteurs d'eau est décrite au début de la section 4. Les résultats sont présentés par la Figure 37 et la Figure 38.

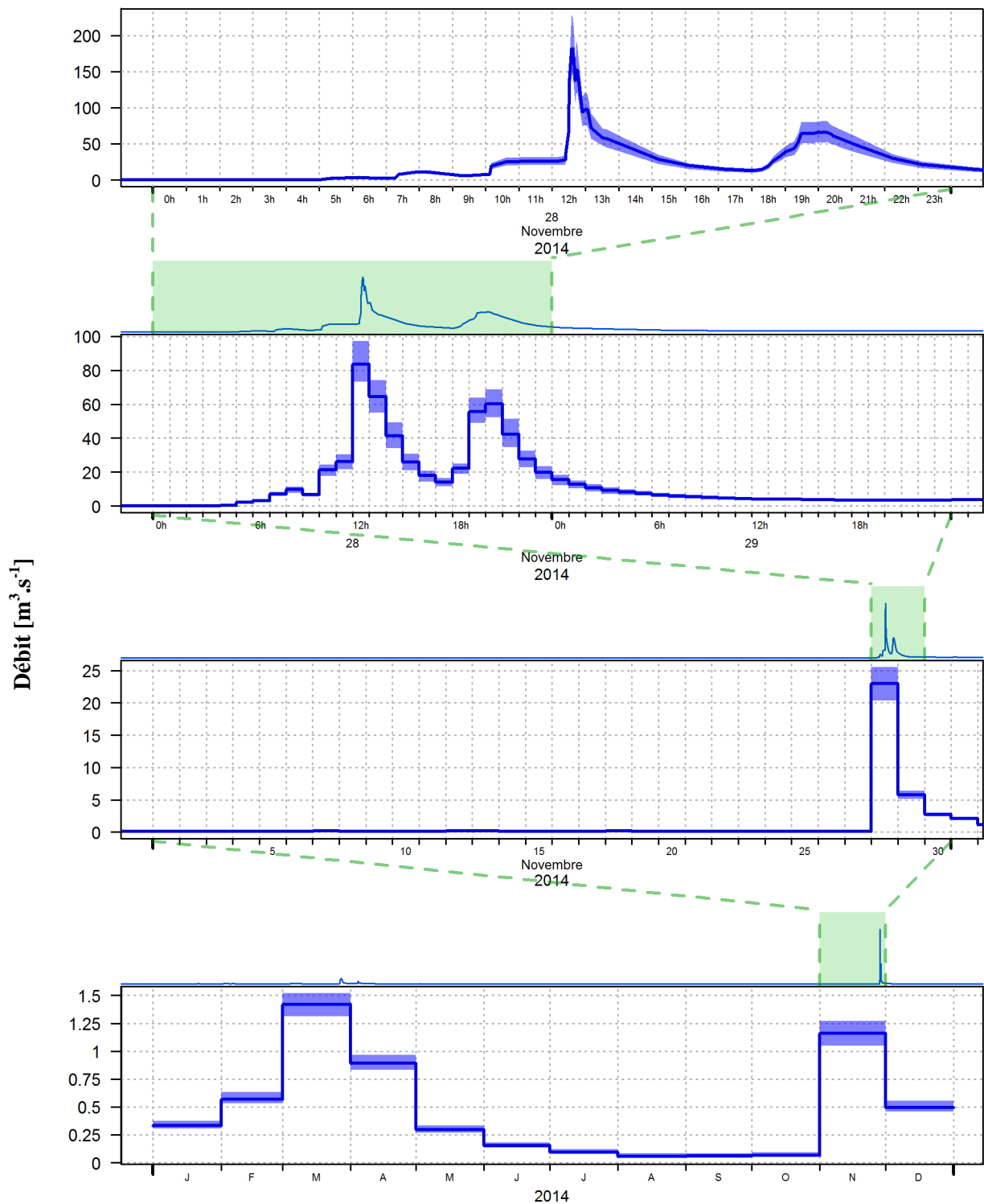


Figure 37: Hydrogramme (*MaxPost*, trait bleu, et incertitude totale associée, enveloppe bleu clair) estimé par BaRatin pour la station de Lancone sur le Bévinco. De haut en bas, l'hydrogramme est présenté à pas de temps variable (résultat brute de BaRatin), horaire, journalier et mensuel.

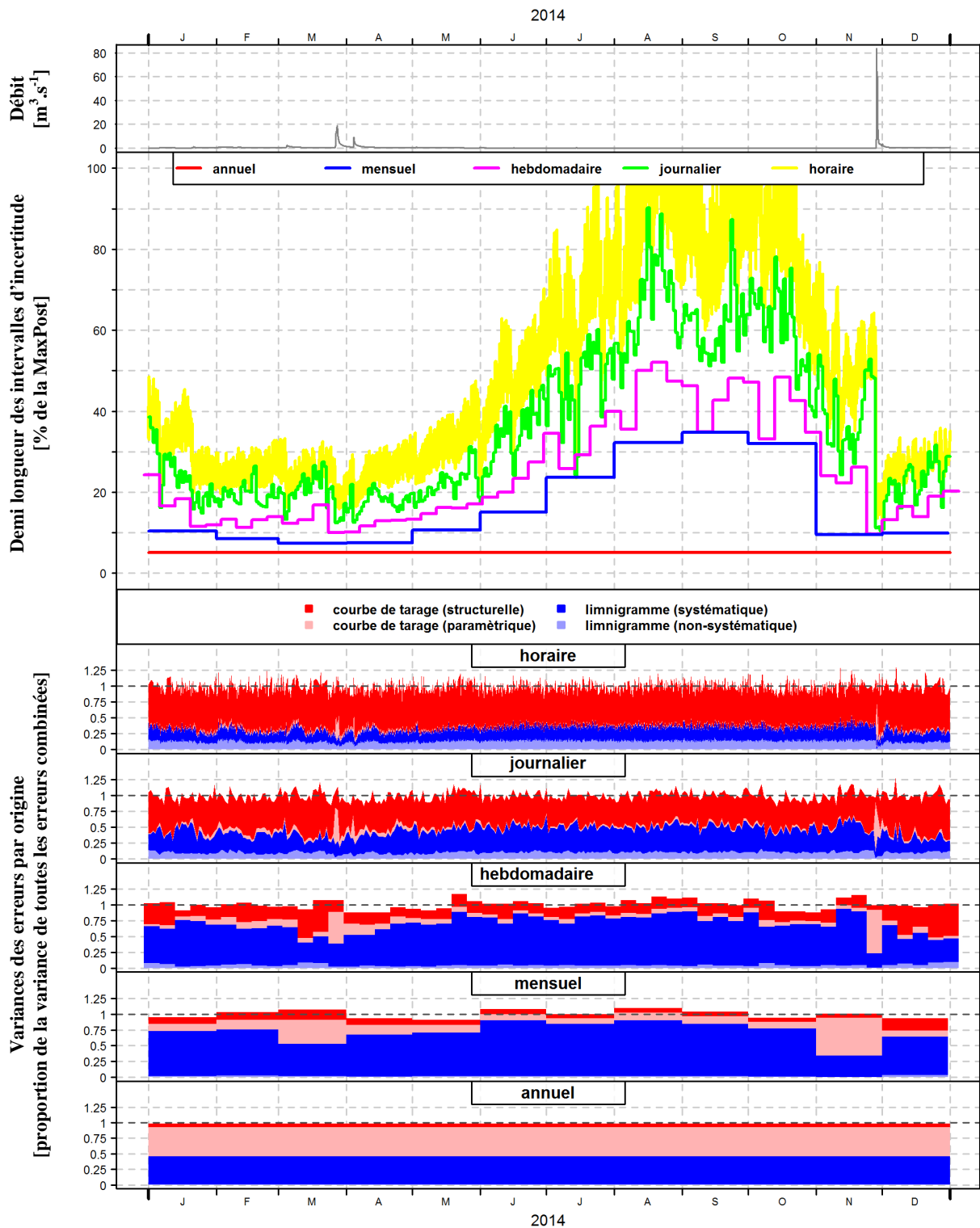


Figure 38: Estimation des incertitudes associées aux hydrogrammes pour la station de Lancone sur le Bévinco. De haut en bas, l'hydrogramme à pas de temps horaire, les demi-longueurs des intervalles de confiance à 95% de l'incertitude totale à différent pas de temps, puis les variances des erreurs affectant l'hydrogramme à pas de temps horaire, journalier, hebdomadaire, mensuel et annuel selon leurs origines, en proportion de la variance de toutes les erreurs combinées (incertitude totale).

Les incertitudes totales (demi-longueurs des intervalles d'incertitudes à 95%), pour différents pas de temps, sont présentées par la Figure 38 et résumé ci-dessous :

Horaire	Journalier	Hebdomadaire	Mensuel	Annuel
+/- 37.4%	+/- 28.8%	+/- 19.5%	+/- 10.4%	+/- 5.04%

On observe des incertitudes très variables selon la période de l'année :

- à pas de temps horaire : incertitudes allant de +/-12% (en crue) à plus de +/-100% (en étiage) et le plus souvent comprises entre +/-20% et +/-40%.
- à pas de temps journalier : incertitudes légèrement plus faibles, allant de +/-10% (en crue) à plus de +/-80% (en étiage) et le plus souvent comprises entre +/-15% et +/-30%.
- à pas de temps hebdomadaire : incertitudes légèrement plus faibles, le plus souvent comprises entre +/-10% et +/-25% et allant de +/-30% à +/-52% en période d'étiage.
- à pas de temps mensuel : incertitudes comprises entre +/-8% et +/-15% sauf en période d'étiage où elles atteignent des valeurs avoisinant les +/-25%, +/-35%.
- à pas de temps annuel : incertitude de l'ordre de +/-5%.

Tableau 13: Moyennes des proportions de variance (variance partielle / variance totale) pour les différentes sources d'erreurs (lignes) et les différents degrés d'agrégation temporelle (colonnes). L'intensité de la couleur rouge rend compte de l'importance de la contribution d'une erreur par rapport aux autres pour un degré d'agrégation temporelle

	Horaire	Journalier	Hebdomadaire	Mensuel	Annuel
Limnigramme (non-systématique)	0.13	0.10	0.04	0.02	0.01
Limnigramme (systématique)	0.20	0.34	0.65	0.70	0.45
Courbe de tarage (paramétrique)	0.03	0.05	0.09	0.18	0.46
Courbe de tarage (structurale)	0.64	0.50	0.22	0.10	0.06

Les contributions des différentes erreurs, pour différents degrés d'agrégation temporelle, sont également présentées par la Figure 38 et résumées par le Tableau 13. Les erreurs structurales qui apportent une contribution très importante à pas de temps horaire et journalier sont négligeables pour les autres pas de temps. On note la tendance inverse pour la contribution des erreurs systématiques liées au limnigramme. Celles-ci contribuent faiblement à pas de temps horaire et très fortement à pas de temps mensuel. Une diminution est observée entre les moyennes mensuelles et la moyenne annuel due aux ré-échantillonnages de l'erreur. Les erreurs paramétriques contribuent faiblement sauf pour la moyenne annuelle. La Figure 38 permet également de constater que ces erreurs apportent une contribution très importante pour les pas de temps où de forts débits sont enregistrés (voir les deux crues de l'année 2014, fin mars et fin novembre sur la Figure 37 et la Figure 38).

Pour le Bévinco à Lancone, l'incertitude totale est très variée selon le régime d'écoulement et diminue fortement avec le degré d'agrégation temporelle. Les incertitudes proviennent de la courbe de tarage, surtout pour les pas de temps les plus fins et du limnigramme (erreurs systématiques essentiellement), surtout pour les pas de temps les plus agrégés.

5. Conclusions et perspectives

Après une introduction définissant le contexte et les objectifs (section 1), une présentation détaillée de la méthode de propagation des incertitudes de BaRatin (section 2) et un rapide exposé des travaux d'évaluation réalisés (section 3), l'application de la méthode fut détaillée pour 6 stations hydrométriques aux caractéristiques variées sélectionnées dans la banque hydro (section 4).

Les travaux d'évaluation de la méthode qui ont donné lieu à la préparation d'un article scientifique ont montré de très bons résultats sur les deux cas d'étude traités. Ils ont mis en avant l'importance de considérer les erreurs provenant des mesures en continu des hauteurs d'eau ainsi que des erreurs à caractère systématique dès lors que les chroniques de débit sont agrégées temporellement. L'intérêt de l'approche « spaghetti » de la méthode BaRatin qui permet une représentation et une propagation simple de l'incertitude dans différents calculs a également été souligné. Ces travaux ont également soulevé certaines limites actuelles de la méthode et des perspectives d'amélioration et de développement : la prise en compte d'une composante systématique des erreurs structurelles et la prise en compte de la dépendance des erreurs de certains jaugeages.

La sélection de stations traitées dans le cadre de cette étude a offert un panel diversifié de situation en termes de contrôles hydrauliques, de tailles et de régimes hydrologiques des bassins versants. Les incertitudes estimées sur les chroniques de débit se sont révélées très différentes selon le degré d'agrégation temporelle, les gammes de débit et selon les stations. Des incertitudes médianes (pour différents pas de temps) allant de +/-18% à +/-57% (horaire), de +/-9% à +/-48% (journalier), de +/-6% à +/-31% (hebdomadaire), de +/-5% à +/-23% (mensuel) et de +/-3% à +/-11% (annuel) ont été calculées. Ces résultats sont proposés à titre d'illustration. Des études plus précises tant sur les analyses hydrauliques des stations que sur les estimations des incertitudes limnimétriques seraient nécessaires pour valider de tels résultats. Néanmoins, ces applications ont montré d'une part, l'importance de considérer toutes les sources d'incertitude et d'autre part, la relative simplicité de la mise en œuvre de la méthode à partir d'un minimum d'informations.

De plus, ces exemples d'applications de la méthode BaRatin montrent une forte sensibilité aux spécificités de chaque site. Il est possible de déduire ou au moins de suspecter un certain nombre de facteurs déterminants qui mériteraient une attention particulière :

- Les stations de Vallon Pont d'Arc et de Bliesbruck montrent des incertitudes essentiellement dues aux courbes de tarage du fait de l'occurrence assez rare des hauteurs d'eau faibles contrairement aux stations de Taffignon et Vals-les-Bains, par exemple, pour lesquelles les erreurs provenant des limnigrammes contribuent fortement aux incertitudes totales.
- Les stations de Taffignon et Craponne, toutes deux sur l'Yzeron, se distinguent par des incertitudes plus fortes à Taffignon qu'à Craponne en partie dues à une contribution des erreurs limnimétriques plus importante à Taffignon. Une cause possible est la différence de sensibilité des contrôles des deux stations. En effet, le seuil de Craponne, légèrement triangulaire est plus sensible que celui de Taffignon.
- Enfin, d'autres facteurs tels que le nombre de jaugeages, le type de contrôles hydrauliques, le régime hydrologique, sont susceptibles d'impacter significativement les résultats d'estimation des incertitudes.

La méthode de propagation des incertitudes aux hydrogrammes de BaRatin, récent développement testé avec succès sur plusieurs stations, offre de nombreuses perspectives. Notamment :

- Propagation des incertitudes à une grande variété d'indicateurs hydrologiques
- Propagation des incertitudes à l'estimation de statistiques hydrologiques (crue centennale, étiage quinquennal, etc..).
- Utilisation des chroniques de débits incertaines pour le calage et la validation de modèles hydrologiques et hydrauliques
- Application de la propagation des incertitudes avec des modèles de courbes de tarage plus complexes (influence aval variable, hystérésis, influence de la végétation saisonnière, détarages progressif, etc... développement en cours dans le cadre de la thèse de V. Mansanarez, 2013-2016).

6. Bibliographie

Adamovic, M. (2014). Development of a data-driven distributed hydrological model for regional scale catchments prone to Mediterranean flash floods. Application to the Ardèche catchment, France. *Thèse*.

Bonnifait, L. et Dussuchale, A. (2015). Courbes de tarage Corse – Analyse BaRatin. *CEREMA*, rapport d'étude.

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*.

ISO (2007). ISO 748 : hydrométrie – mesurage du débit des liquides dans les canaux découverts au moyen de moulinets et de flotteurs. *ISO*.

Le Boursicaud, R., Bonnifait, L., Le Coz, J., Renard, B. (2012). Analyse des courbes de tarage de 5 stations hydrométriques pour le SPC Rhin-Sarre, *Irstea*, rapport d'étude.

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

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.