



HAL
open science

Débits et incertitudes issus d'enregistrements de niveau et de vitesse par radar sur des cours d'eau de montagne à lit instable

E. Jacob

► **To cite this version:**

E. Jacob. Débits et incertitudes issus d'enregistrements de niveau et de vitesse par radar sur des cours d'eau de montagne à lit instable. Sciences de l'environnement. 2014. hal-02600280

HAL Id: hal-02600280

<https://hal.inrae.fr/hal-02600280>

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.



Université Claude Bernard



Lyon 1



ÉCOLE
CENTRALE LYON



Rapport de stage Master MEGA M2 Spécialité Recherche Mécanique des fluides

Débits et incertitudes issus d'enregistrements de niveau et de vitesse par radar sur des cours d'eau de montagne à lit instable

Etude de la station hydrométrique sur l'Arvan à Saint-Jean de Maurienne

Auteur : Elise Jacob

*Stage réalisé dans l'Unité de Recherche Hydrologie-Hydraulique à Irstea,
Centre de Lyon Villeurbanne*

Encadrants :

Fabien THOLLET, Irstea
Jérôme LE COZ, Irstea
Benoît CAMENEN, Irstea

Jury :

Lionel LE PENVEN, LMFA
Bernard CLEMENT, ENTPE
Richard PERKINS, LMFA
Nicolas RIVIERE, LMFA
Fabien THOLLET, Irstea

Année Universitaire 2013-2014

Résumé

Ce stage s'inscrit dans le cadre des recherches scientifiques sur les flux sédimentaires menées sur le site atelier Arc-Isère de la Zone Atelier Bassin du Rhône. Il porte sur le calcul de débit de la station hydrométrique sur l'Arvan, affluent de l'Arc, à Saint-Jean de Maurienne est équipée d'un radar mesurant en continu la hauteur et la vitesse. La station est particulièrement sensible aux détarages du fait des forts débits en période de crues d'orage, de fonte nivale et événements pluvieux automnaux.

Nous avons étudié les détarages grâce aux enregistrements de niveau et de vitesse par radar et identifié des plages de stabilité. Nous avons calculé des débits à l'aide d'une courbe de tarage issue de la méthode BaRatin et en utilisant la méthode de la vitesse témoin. Selon cette méthode, la courbe de tarage classique est remplacée par le produit vitesse par section mouillée. Nous avons comparé les résultats des débits obtenus, et discuté leurs incertitudes. L'acquisition d'une vitesse d'écoulement a également permis d'établir de nouvelles méthodes de détection des détarages par l'analyse des variations de vitesses et de débits.

Abstract

This work is related to scientific research on sediment transport, morphological changes and impact of hydroelectric facilities on the Arc-Isère experimental site. This study deals with the computation of the discharge at a hydrometric station. The hydrometric station is located on the river Arvan in Saint-Jean de Maurienne. The Arvan is a mountain stream, tributary to the Arc River, with active sediment transport. A stage and velocity radar is installed at the station. First of all, the stage, the cross section, geometry and gauging data were collected. The past and present stage-discharge rating curves were updated. Next, we calculate the discharges with two methods: in the first one we used the conventional rating curve simulated by the method using Bayesian inference and named BaRatin and in the second one we used the index velocity method, we compare the discharges and discuss the related uncertainties. Then, the shifts in the rating were detected with the stage and velocity records of the radar in order to determine stable periods of hydraulic control, we test several methods.

Remerciements

Je tiens à remercier toutes les personnes qui m'ont aidée durant mon Travail de Fin d'Etude. Je remercie l'ensemble de l'unité de recherche Hydrologie-Hydraulique (UR-HHLY) pour son accueil chaleureux.

Je souhaiterais tout particulièrement remercier Fabien THOLLET pour son soutien et son accompagnement tout au long de mon travail de fin d'étude, Jérôme Le COZ, Benoît CAMENEN et Valentin MANSANAREZ pour leur apport dans notre réflexion, et également André PAQUIER, Guillaume DRAMAIS, Benjamin RENARD, Jean-Baptiste FAURE, Flora BRANGER, Chloé Le BESCOND, Ivan HORNER, le service informatique qui m'ont aidé dans des tâches diverses. Je remercie Anne EICHOLZ, et le service des ressources humaines pour la gestion des aspects administratifs de mon stage.

Je remercie Bernard CLEMENT de l'ENTPE et Alain GAUTHERON de la DREAL Rhône-Alpes qui ont assisté à ma soutenance de TFE, d'avoir participé à l'amélioration de mon travail en vue de ce Master.

Table des matières

Index des illustrations	7
Index des Tableaux	7
Introduction.....	9
1 Contexte et problématique	10
2 Matériels et méthodes	12
2.1 Base physique des relations hauteur-débit simples.....	12
2.2 Méthode de la vitesse témoin.....	13
2.2.1 Principe.....	13
2.2.2 Méthodologie	14
2.3 Incertitudes	15
2.4 Outil BaRatin.....	15
2.5 Détarage et méthode de détection.....	17
2.5.1 Détarage et lit instable	17
2.5.2 Méthodes de détection des détarages	18
3 Site d'étude	22
3.1 Description du site.....	22
3.1.1 Le bassin versant de l'Arvan	22
3.1.2 Présentation de la station hydrométrique de Saint Jean-de-Maurienne	24
3.2 Le radar Sommer	24
3.3 Historique de la station et données disponibles	26
3.4 Bilan hydrologique sommaire	27
3.5 Les contrôles hydrauliques de la station	28
3.6 Evolution de la bathymétrie	30
4 Analyse hydraulique du site	32
4.1 Relation surface mouillée-hauteur.....	32
4.2 Répartition de la vitesse	32
4.3 Relation vitesse débitante –vitesse mesurée.....	33
4.4 Calcul de débit et incertitude sur une période stable.....	34
4.4.1 Méthode par une relation de tarage issue de BaRatin	35
4.4.2 Méthode de la vitesse témoin.....	37
4.4.3 Approximation de l'incertitude associée au débit issu de la méthode témoin	38
4.4.4 Sensibilité au détarage du calcul de débit.....	42
5 Détection des détarages	43

5.1.1	Méthode V(t) à H fixé	44
5.1.2	Méthode de variation du débit (Méthode ΔQ)	45
5.1.3	Méthode de la relation hauteur vitesse	46
5.1.4	Discussion	48
6	Perspectives	50
	Conclusion	51
	Références bibliographiques	52
	Liste des acronymes	54
	Liste des notations	55
	Annexes	57
	Annexe A : Chronologie des mesures sur la station de l'Arvan de 2009 à 2014 : jaugeages, topographies, radar	57
	Annexe B : Incertitudes : méthode de la norme ISO 748 et Q+	58
	Annexe C : Liste des jaugeages	59
	Annexe D: Jaugeage au radar mobile de vitesse de surface	60

Index des illustrations

Figure 1 Schéma d'un contrôle par chenal [Le Coz et al. 2013]	12
Figure 2 Schéma d'un contrôle par seuil [Le Coz et al. 2013]	12
Figure 3 : Principe de la méthode BaRatin [Mansanarez, 2014]	17
Figure 4 : Carte du bassin versant de l'Arc présentant les stations hydrométriques et turbimétriques (Base de données BDOH)	22
Figure 5 : Carte du bassin versant de l'Arvan représentant les affluents de l'Arvan [Fougerit, 2011] .	23
Figure 6 : Présentation de la station en photo	24
Figure 7 : Schéma de fonctionnement du radar RQ-24 (source: Product sheet RQ-24).....	25
Figure 8 : Histogramme des occurrences des hauteurs et vitesses sur 4 années complètes de données	27
Figure 9 : Diagramme des hauteurs mensuelles à la station de Saint-Jean de Maurienne	28
Figure 10 : Profil en long du tronçon de l'Arvan au niveau de la station hydrométrique de Saint-Jean de Maurienne.	29
Figure 11 : Schéma de la station vue en plan.....	30
Figure 12 : Profil (abscisse-côte) des sections de référence dans le plan projeté	31
Figure 13 : Comparaison des surfaces mouillées en fonction de la hauteur d'eau.	32
Figure 14 : Répartition de la vitesse de surface sur la section de jaugeage.....	33
Figure 15 : Vitesse débitante en fonction de la vitesse mesurée et régressions linéaires par gamme de hauteur	34
Figure 16 : Courbe de tarage en échelle logarithmique résultant de la méthode BaRatin sur la période du 01/09/2011 au 01/04/2014.	37
Figure 17 : Chronique de hauteur et hydrogramme d'août à décembre 2012.....	38
Figure 18 : Courbe de tarage et faisceau d'incertitude d'août 2012 à décembre 2012.	40
Figure 19 : Répartition des incertitudes par paramètre sur les 3 gammes de hauteurs.	41
Figure 20 : Chroniques de débit et relations de tarage pour la première semaine d'octobre.	42
Figure 21 : Relation hauteur-vitesse du mois de mars au mois de juin 2013	43
Figure 22 : Détection de détarage par la méthode de $V(t)$ à H fixé du 1 ^{er} mars au 1 ^{er} juillet 2013	44
Figure 23 : Détection de détarage par la méthode ΔQ du 1 ^{er} mars au 1 ^{er} juillet 2013, chronique de hauteurs et de résidus.....	45
Figure 24 : Relation hauteur vitesse sur la période du 1 ^{er} mars au 20 avril 2013 en échelle logarithmique issue de BaRatin.....	46
Figure 25 : Détection de détarage par le signe des résidus de vitesse sur la période du 1 ^{er} mars 2013 au 1 ^{er} juillet 2013.....	47
Figure 26 : Détection de détarage par le faisceau à 95% issu de BaRatin du 1 ^{er} mars 2013 au 1 ^{er} juillet 2013.....	48

Index des Tableaux

Tableau 1 : Coefficients de la relation $V(vmes)$ pour les trois gammes de hauteur.	34
Tableau 2 : Matrice des contrôles de la station	36
Tableau 3 : Tableau des paramètres de contrôle de la simulation de BaRatin.....	36
Tableau 4 : Incertitude du paramètre ki pour les trois contrôles.	39
Tableau 5 : Comparaison des méthodes de détection de détarage	49

Introduction

J'ai réalisé mon stage de master 2 recherche au sein de l'équipe métrologie de l'unité de recherche hydrologie-hydraulique de Irstea Lyon Villeurbanne. Irstea est l'Institut national de Recherche en Sciences et Technologies pour l'Environnement et l'Agriculture, c'est un établissement public à caractère scientifique et technologique. Il entretient un partenariat étroit entre les acteurs publics et les acteurs économiques dans l'expérimentation, la recherche de modèle théorique et d'innovation technologique. Ce stage s'inscrit dans le cadre des recherches scientifiques sur les flux sédimentaires menées par le site atelier Arc-Isère de la Zone Atelier Bassin du Rhône (ZABR). Les objectifs des équipes de recherche de l'unité sont de mieux connaître les dynamiques sédimentaires et les impacts des usines hydroélectriques. La connaissance du débit des cours d'eau est un paramètre fondamental en hydrologie. Cependant, il reste difficile à mesurer en continu avec des incertitudes maîtrisées et quantifiées.

Mon travail a pour but d'établir la chronique de débit d'une station hydrométrique de torrent de montagne à lit instable équipée d'un radar hauteur vitesse aérien. La station hydrométrique choisie est la station de Saint Jean de Maurienne sur l'Arvan, affluent de l'Arc. Les particularités de la station sont que les eaux sont très chargées en sédiments et le lit du torrent semble très mobile, cette station présente des détarages fréquents ce qui rend difficile la mesure de débit par les méthodes classiques. Elle est exploitée par Irstea en partenariat avec EDF depuis 2009 et a fait l'objet d'un premier travail sur le fonctionnement hydrosédimentaire en 2011 [Fougerit , 2011].

Mon stage présente les objectifs suivants :

- Comprendre et quantifier les non-stationnarités de la courbe de tarage causées par l'évolution du lit du cours d'eau
- Etablir les chroniques de débit et améliorer le dispositif de mesure
- Evaluer les incertitudes sur les périodes stationnaires
- Elaborer des méthodes de détection des détarages

Un rapport de TFE a précédé ce rapport. Un premier calcul de débit par la méthode de la vitesse témoin ainsi qu'un calcul d'incertitudes sur le débit issu d'une courbe de tarage ont été réalisés. Ce premier rapport a permis de poser les jalons pour l'élaboration des méthodes de détection et de calcul d'incertitude sur le débit calculé par la méthode de la vitesse témoin.

1 Contexte et problématique

L'hydrologie possède la particularité qu'une de ses principales variables – le débit – ne peut pas être mesurée en continu. Les chroniques de débit utilisées par les hydrologues résultent de la transformation de mesures continues de hauteur d'eau via une relation hauteur-débit, appelée courbe de tarage. Cette courbe de tarage doit être estimée à chaque station hydrométrique, à partir de mesures ponctuelles hauteur-débit (appelées jaugeages), et de considérations sur les lois hydrauliques qui gouvernent la relation hauteur-débit. Le calcul de débit par une courbe de tarage nécessite une période de validité pour laquelle chaque hauteur correspond à un débit unique. En basses eaux, les incertitudes associées à la hauteur d'eau vont se propager dans l'incertitude du débit. L'instabilité de la hauteur d'eau peut être due à des changements morphologiques, même modérés comme des dépôts de sédiment fin, à des perturbations par la végétation ou encore des embâcles. Les jaugeages à très bas débit peuvent également être entachés d'une incertitude relative très importante. En hautes eaux, les jaugeages sont généralement peu nombreux et sont associées d'incertitude plus importante que celle rencontrée pour les débits courants, bien au-delà de la gamme usuelle de 5-10%. Des phénomènes hydrauliques complexes (débordement en lit moyen, hystérésis hydraulique, embâcles, remous hydraulique, etc.) peuvent venir compliquer la situation pour une crue donnée. Au final, il est donc possible d'atteindre des incertitudes de l'ordre de 100% voire plus.

Une source d'incertitude qui reste aujourd'hui encore mal identifiée est celle liée aux possibles non-stationnarités affectant la courbe de tarage. La relation hauteur-débit s'éloigne, temporairement ou définitivement, de la courbe de tarage en cours de validité: on parle alors de « détarage ». Plusieurs phénomènes peuvent être à l'origine de ces détarages, par exemple un changement de la géométrie du lit de la rivière suite à une crue, ou une croissance saisonnière de végétation aquatique au sein de la section. Dans notre rapport nous nous intéresserons aux détarages engendrés par un changement de la géométrie du lit. Etant donné le rôle central joué par la variable « débit » en hydrologie, la quantification des incertitudes associées à la courbe de tarage est une thématique importante. Ces incertitudes sont évidemment problématiques pour toute méthode utilisant ces chroniques de débit : on peut par exemple citer l'estimation de quantiles de crue ou d'étiage, ou le calage de modèles hydrologiques. En dépit de l'importance de ces incertitudes pour de nombreux domaines de l'hydrologie, l'établissement et la gestion des courbes de tarage, ainsi que l'estimation des incertitudes associées, restent des tâches complexes, seulement partiellement standardisées, et faisant appel à une expertise importante, l'analyse ou la modélisation hydrauliques étant généralement rarement utilisées. Il est donc primordial de développer des méthodes robustes, utilisant au mieux les données disponibles (jaugeages) et les connaissances hydrauliques existantes, et rendant compte de manière réaliste des conditions opérationnelles. Le traitement des non-stationnarités des courbes de tarage reste aujourd'hui assez sommaire en France. Une réflexion a été engagée dans les années 2000 à EDF (cf. logiciel Moryciel), pour redéfinir a posteriori le nombre optimal de courbes de tarage. Le passage à une nouvelle courbe de tarage doit être justifié par un écart significatif de la nouvelle courbe par rapport à la précédente, compte-tenu des incertitudes. On reste toutefois à un traitement par sous-périodes stationnaires. Des développements méthodologiques sont en cours à EDF-DTG avec une approche variographique [Jalbert et al., 2011] et la thèse en cours de Thomas Morlot sur la gestion dynamique opérationnelle des courbes de tarage EDF [Perret, 2013],[Morlot et al., 2014]. Enfin, l'approche bayésienne non-stationnaire est étudiée à Irstea par l'intermédiaire de la thèse de Valentin Mansanarez débutée en novembre 2013. L'objectif de cette thèse est de développer un cadre statistique et hydraulique unifié pour la gestion des

courbes non stationnaires et de leurs incertitudes, et l'implémenter dans la méthode BaRatin existante [Le Coz et al., 2014].

Par l'intermédiaire de l'étude de la station débimétrique d'un torrent de montagne, l'Arvan à St-Jean de Maurienne, on souhaite apporter des éléments dans l'étude des non-stationnarités des stations hydrométriques. Comment comprendre et repérer les non-stationnarités d'ordre morphologique ? Comment prendre en compte les détarages dans le calcul du débit ? La station d'étude est équipée d'un radar aérien mesurant une vitesse de surface et une hauteur. L'acquisition de la mesure d'une vitesse d'écoulement permet de calculer le débit en s'affranchissant de la construction de la courbe de tarage par la méthode de la vitesse témoin (Index velocity method). La méthode de la vitesse témoin fait intervenir le produit entre la vitesse débitante et la surface mouillée. Cette méthode a émergé récemment comme une solution intéressante pour ce type de stations instables, mais la maîtrise de la mesure sur un lit instable et des incertitudes associées au débit est encore à parfaire. Comment associer une incertitude au débit issu de la méthode de la vitesse témoin ? Quelle est la sensibilité au détarage de cette méthode ? Quelle méthode de calcul de débit est la plus précise : par une courbe de tarage ou bien par la vitesse témoin ?

2 Matériels et méthodes

Cette partie présente les notions générales, le vocabulaire, les principes de calcul de débit et incertitude qui seront employés par la suite.

2.1 Base physique des relations hauteur-débit simples

Aucun instrument de mesure ne permet de mesurer le débit en continu d'un cours d'eau directement. Le débit se calcule classiquement à des stations hydrométriques par des relations hauteur-débit. La correspondance entre cotes du plan d'eau et débit est établie grâce à des jaugeages. Les jaugeages sont des mesures ponctuelles de hauteur et de débit. Les méthodes de jaugeage sont diverses : dilution, exploration du champ des vitesses par courantomètres, moulinet, ADCP, etc. Ces mesures permettent de construire la relation de tarage H-Q. Cette relation H-Q est utilisée pour convertir en débit un enregistrement continu du niveau d'eau. Les stations hydrométriques sont de préférence positionnées de façon à obtenir une relation univoque H-Q. La forme générale de la relation hauteur-débit pour un contrôle hydraulique élémentaire est de la forme puissance :

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

Suivant les gammes de hauteurs, les paramètres a, b, c peuvent être différents, les courbes sont donc définies par morceaux. La base physique de cette méthode indirecte de mesure de débit est le contrôle hydraulique. L'allure de la courbe de tarage résulte des caractéristiques hydrauliques et topographiques de la rivière aux abords de la station. Le contrôle hydraulique peut s'exercer par le chenal (figure 1) dans son ensemble soit par une section de contrôle (figure 2), où l'écoulement passe par le régime critique.

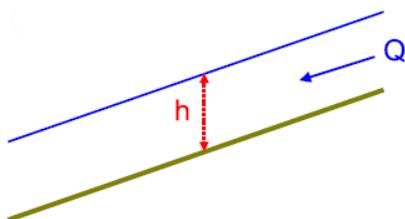


Figure 1 Schéma d'un contrôle par chenal [Le Coz et al. 2013]

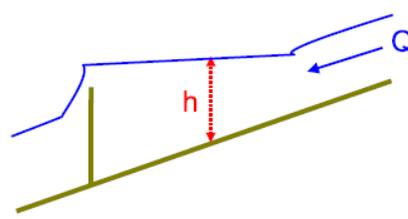


Figure 2 Schéma d'un contrôle par seuil [Le Coz et al. 2013]

Ainsi, la nature du contrôle hydraulique varie selon la gamme de hauteur considérée. Les contrôles hydrauliques peuvent être modélisés par des équations reliant soit le débit à la hauteur d'eau, soit la vitesse débitante et la hauteur d'eau. On appelle la vitesse débitante $V = \frac{Q}{S}$, où S représente la surface mouillée et Q le débit. Les équations (2) modélisent un contrôle de chenal par l'équation de Manning-Strickler simplifiée pour une section rectangulaire large dans un régime permanent uniforme. Le rayon hydraulique est approché par la hauteur d'eau et la surface mouillée par le produit $S = (h - h_0) B$, où B est la largeur du cours d'eau. La rugosité du lit est modélisée par le coefficient de Strickler K . Le coefficient de Strickler varie de 20 pour les rivières très accidentées et

rugueuses à 80 pour les canaux profonds à berges lisses. Le paramètre j est la pente de la ligne d'énergie qui en régime uniforme s'apparente à la pente de la ligne d'eau i .

$$Q = KB \bar{j}(h - h_0)^{5/3} \quad (2a)$$

$$V = K \bar{j}(h - h_0)^{2/3} \quad (2b)$$

Les équations (3a) et (3b) modélisent un contrôle de section par un seuil rectangulaire épais sur une section rectangulaire large. La valeur du coefficient C dépend de la longueur du seuil, de la hauteur du seuil, de la hauteur d'eau et des conditions d'approche (vitesses, rugosité,...). Pour un seuil épais rectangulaire, il est compris entre 0.38 et 0.48, on le fixera à 0.4 par défaut. La hauteur h_0 est la hauteur à l'échelle de la crête du seuil.

$$Q = CB \sqrt{2g}(h - h_0)^{3/2} \quad (3a)$$

$$V = C \sqrt{2g}(h - h_0)^{1/2} \quad (3b)$$

Une courbe de tarage est donc une relation univoque croissante $Q(h)$ prévalant à une section de l'écoulement dans des conditions hydrauliques de référence. Le régime hydraulique de référence est défini par les contrôles hydrauliques usuels en régime permanent. Les conditions d'écoulement peuvent être plus complexes, notamment en crue, et s'écarter temporairement ou durablement des conditions de référence sur lesquelles la courbe a été établie. Dans ces cas, la relation $Q(h)$ ne peut rendre compte des évolutions temporelles sans la reconstruction complète de la courbe à l'aide de nouvelles données.

2.2 Méthode de la vitesse témoin

2.2.1 Principe

Le principe est d'utiliser une vitesse d'écoulement ponctuelle v_{mes} sur une section de la rivière mesurée en continu puis de la relier à la vitesse débitante V afin d'en déduire le débit Q par le produit vitesse débitante-surface mouillée S (équation 4). Ainsi, cette méthode s'affranchit de la construction d'une courbe de tarage.

$$Q = V \cdot S = V v_{mes} \cdot S(h) \quad (4)$$

Elle a été développée par l'USGS¹ (United State Geological Survey), et est utilisée sur plus de 470 stations américaines jaugées avec cette méthode [Levesque et al., 2012]. Cette méthode est également nommée « Méthode de la vitesse index » dérivant de la qualification anglophone « Index velocity method », la qualification québécoise « méthode de la vitesse témoin » (HydroQuébec : fournisseur d'électricité québécois) est employée dans la suite du rapport.

¹ USGS : (Relevés géologiques des Etats-Unis) est une agence scientifique des Etats-Unis étudiant les ressources naturelles, les risques naturels et les paysages, recouvrant des domaines de l'hydrologie, la géologie, la géographie et la biologie.

A partir d'une série de jaugeages, et d'une série de mesure de vitesse de surface en continu, la relation vitesse débitante-vitesse témoin est décrite. Le guide d'hydrométrie, *Manual on Stream Gauging* Volume II [OMM, 2010] présente plusieurs types de relations : linéaire, curviligne ou bien composé.

Dans le cas le plus simple la relation vitesse débitante-vitesse témoin est linéaire.

$$V = kv_{mes} + v_0 \quad (5)$$

Le paramètre v_0 représente la vitesse débitante lorsque v_{mes} est nulle. Le coefficient k correspond au coefficient d'intégration de la vitesse ponctuelle. On distingue deux dimensions, l'intégration verticale de la vitesse et l'intégration sur le transect représenté respectivement par les coefficients k_v et k_t , tels que :

$$k = k_t k_v \quad (6)$$

La vitesse débitante s'écrit en fonction de la vitesse moyenne sur la verticale du capteur. On appelle v_{mes} la vitesse moyenne sur la verticale du capteur, et on a ainsi :

$$\begin{aligned} V - v_0 &= k_t v_{mes} \\ v_{mes} &= k_v v_{mes} \end{aligned} \quad (7)$$

A partir de la surface mouillée S de la section de référence et de la vitesse débitante V , le débit s'obtient par le produit de ces deux variables (cf. équation 4).

2.2.2 Méthodologie

La méthode de la vitesse témoin présente donc les étapes suivantes :

- Collecter les données sur une section de référence : bathymétrie, vitesses débitantes, hauteurs d'eau et vitesses témoin,
- Analyser la relation entre la vitesse témoin et la vitesse débitante suivant sa linéarité, la morphologie du lit (lit composé, lit simple),
- Déterminer la relation et les coefficients de vitesse,
- Etablir la relation donnant la surface mouillée en fonction de la hauteur d'eau,
- Calculer le débit par le produit de la surface mouillée par la vitesse débitante.

La méthode de la vitesse témoin est fortement dépendante de la topographie de la section de référence, il est donc nécessaire de vérifier les variations de la topographie régulièrement en opérant des bathymétries. Cette méthode demande également des mesures de la vitesse débitante et de la vitesse témoin pour pouvoir caler la relation qui les lie. Cette relation est d'autant plus précise que les jaugeages sont nombreux et couvrent une large gamme de vitesse. A l'heure actuelle, pour le calcul de débit issu de la méthode de la vitesse témoin, aucune méthode de calcul direct des incertitudes n'est établie et spécifiée par une norme.

2.3 Incertitudes

En métrologie, une mesure est une estimation de la valeur vraie de la grandeur mesurée ou mesurande. La différence entre cette valeur mesurée et la valeur vraie inconnue est appelée erreur. Deux types d'erreur de mesure se distinguent : l'erreur systématique et l'erreur aléatoire. La première est engendrée par les réglages de l'appareil de mesure et les procédures de calcul tandis que la seconde provient du manque de sensibilité de l'appareil de mesure, des fluctuations naturelles de la grandeur mesurée. Ainsi, la répétition de la mesure réduit l'erreur aléatoire tandis que la mesure complémentaire par outils et paramétrages différents diminue l'erreur systématique. L'incertitude est alors l'estimation de la distribution statistique de l'erreur de mesure. Le guide pour l'expression de l'incertitude [GUM, 2008] définit les termes d'incertitudes, incertitudes élargies et incertitudes composées, et établit des règles générales pour l'évaluation et l'expression de l'incertitude.

Incertainces types : mesure de la largeur de la distribution de la valeur vraie autour de la valeur mesurée. Le GUM donne une classification des incertainces-types sous une catégorie A et B selon la méthode d'évaluation. L'incertaince de type A est fondée sur des distributions de fréquence et l'incertaince de type B sur des lois a priori.

Incertainces composées : combinaison des incertainces types est la racine carrée de la variance composée. La combinaison d'incertaince s'effectue avec la loi de propagation de l'incertaince qui sera utilisée dans le calcul de l'incertaince du débit issu de la méthode de la vitesse témoin.

Incertainces élargies : elles correspondent à un intervalle à l'intérieur duquel on peut espérer voir se situer une large fraction de la distribution des valeurs. Elle s'obtient par la multiplication de l'incertaince composée par un facteur d'élargissement.

La norme ISO 748 (cf. chapitre 9 et l'annexe E) met en place des méthodes de calcul des incertainces types pour les jaugeages. Irstea a développé une mesure de l'incertaince pour les jaugeages appelées incertaince Q+ [Le Coz et al., 2012] qui s'inspire de la norme ISO 748 mais prend en compte les incertainces de l'intégration de la vitesse verticale et latérale. La méthode de calcul est introduite explicitement en annexe B.

2.4 Outil BaRatin

La méthode BaRatin (Bayesian RATING curve analysis) permet l'analyse des courbes de tarage et de leurs incertainces sous hypothèse de stabilité de la relation hauteur-débit. Elle est développée par Irstea et diffusée librement [Le Coz et al. 2014]. Les questions d'incertainces sur les débits restent ouvertes. L'incertaince totale sur $Q(t)$ combine les incertainces issues de la courbe de tarage $Q(h)$, les incertainces issues des conditions hydrauliques réelles à l'instant t , des incertainces sur le niveau d'eau à l'instant t . La méthode BaRatin utilise la théorie de l'inférence bayésienne et les simulations de Monte-Carlo par chaînes de Markov (MCMC) pour construire des courbes de tarage et obtenir une incertaince sur le débit. La méthode consiste à croiser l'information issue des connaissances hydrauliques et des observations pour produire les résultats sous la forme d'une distribution a posteriori puis par des simulations MCMC obtenir une courbe de tarage la plus probable, encadrée par un intervalle de confiance.

La figure 3 représente les étapes de la méthode BaRatin. Le débit est formalisé par une fonction continue définie par morceaux, sur des gammes de hauteur r par des fonctions puissances de la forme de l'équation (1). La modélisation du débit par la méthode BaRatin se formalise par l'équation suivante :

$$Q = \prod_{r=1}^{N \text{ segments}} 1_{K_{r-1}; K_r}(h) \prod_{j=1}^{N \text{ contrôles}} M(r, j) a_j (h - b_j)^{c_j} \quad (8)$$

où $1_{K_{r-1}; K_r}$ est la fonction indicatrice. Elle prend la valeur 1 quand h est dans la gamme de hauteurs $K_{r-1}; K_r$ et 0 sinon, M est la matrice des contrôles hydrauliques : ses coefficients $M_{r, j}$ valent 1 pour un contrôle d'indice j prévalant la gamme de hauteur r , et 0 sinon. Ainsi, la matrice est diagonale pour un lit simple, un contrôle remplaçant un autre, dans le cas d'un lit composé les contrôles peuvent s'ajouter, la matrice M est alors triangulaire.

Les a priori hydrauliques sont les paramètres des contrôles hydrauliques et les hauteurs de transition des gammes de hauteur. La matrice M est construite en définissant les a priori à partir des connaissances de la station et éventuellement par un modèle hydraulique.

Le modèle statistique de BaRatin est construit sur le modèle d'erreur suivant :

$$Q_i = f(H_i, \theta) + \epsilon_i^f + \epsilon_i^Q, \quad \epsilon_i^f + \epsilon_i^Q \sim N(0, \overline{\sigma_f^2 + u_{Q_i}^2}), \quad (9)$$

f est la fonction donnant le débit, les θ sont les paramètres des contrôles a_j, b_j, c_j , l'écart-type du débit est noté u_{Q_i} et h est le niveau d'eau. La méthode suppose que les erreurs du débit ϵ_i^Q et les erreurs sur la représentation mathématique f du débit sont gaussiennes de moyenne nulle et respectivement d'écart-type u_{Q_i} et σ_f .

Le théorème de Bayes abouti à une distribution a posteriori des paramètres hydrauliques en effectuant le produit de la vraisemblance liées aux jaugeages et la distribution a priori.

Par des simulations MCMC, des réalisations (θ, σ_f) sont générées de la distribution a posteriori. A chacune des réalisations correspond une courbe de tarage. On obtient un ensemble de courbes de tarage possibles, la courbe de tarage la plus probable provient du maximum a posteriori qui maximise la densité de la distribution a posteriori. Cette courbe sera appelée la max-post. De cet ensemble de courbes et paramètres issus de BaRatin, résultent la dispersion des paramètres et des formulations mathématiques f . On a donc également l'incertitude sur le débit, un intervalle de confiance à 95% combinant l'incertitude sur les paramètres de la courbe de tarage et l'incertitude restante σ_f issue des simulations MCMC.

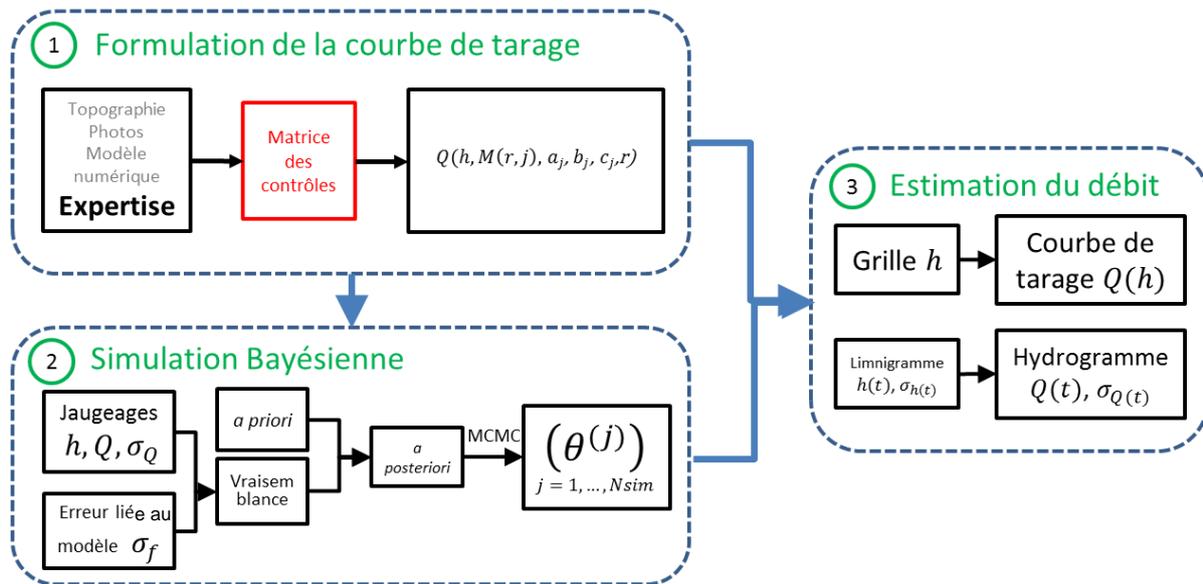


Figure 3 : Principe de la méthode BaRatin [Mansanarez, 2014]

Un intérêt de cette méthode est la pondération de la contribution de chacun des jaugeages suivant leurs incertitudes. La méthode ne prend pas en compte les modifications temporelles de la courbe de tarage, telles que les détarages et les hystérésis de crue. La thèse de Valentin Mansanarez est en cours à Irstea pour prendre en compte ces modifications dans la courbe de tarage et les incertitudes que calculent BaRatin.

2.5 Détarage et méthode de détection

2.5.1 Détarage et lit instable

La quantification des incertitudes n'est pas la seule difficulté de l'hydromètre. La rapidité de variation de la relation hauteur-débit rend souvent difficile le suivi en temps réel du débit par une relation de tarage. La fiabilité des données en continu est délicate à obtenir. Les instabilités présentent plusieurs raisons d'être, dont le changement de morphologie du cours d'eau, la présence de végétation et la propagation d'une crue.

On nomme détarage les phénomènes de modification de la relation hauteur-débit définitifs ou temporaires. Ils sont visibles sur les courbes de tarage par un décalage des points (hauteur-débit) de la courbe de tarage habituelle. Les détarages sont observés lorsque la morphologie du cours d'eau, les contrôles hydrauliques, la bathymétrie, l'aspect des rives ou encore la végétation aquatique sont modifiés.

Le terme d'instabilité des stations est utilisé pour qualifier les modifications fréquentes de changement de contrôle hydraulique sur ces stations [Perret, 2013]. La stabilité des contrôles peut être caractérisée par la variabilité des points de jaugeage par rapport à une courbe de tarage moyenne. Une méthode pour le calcul de débit pour les stations instables est d'utiliser une régression floue pondérée de plusieurs courbes de tarage [Westerberg, 2010].

La modification des relations hauteur-débit est gênante dans le calcul du débit par une courbe de tarage et peu de travaux en étudient les incertitudes associées [Westerberg, 2010]. Une méthode de détection des modifications a pour intérêt de repérer les détarages, les dater afin de corriger les

calculs de débit et de comprendre la cause des détarages. Le manuel *Hydrométrie appliquée au cours d'eau* [Audinet, 1995] présente quatre méthodes pour détecter les dates des détarages sur une station hydrométrique. La première méthode consiste en la lecture d'une seconde échelle à proximité de la station d'hydrométrie et comparer les deux lectures. Une anomalie dans la correspondance des deux échelles signalerait un détarage. La seconde méthode est la comparaison entre les débits de la station et une station de comparaison installée sur la même rivière ou une rivière voisine ayant les mêmes propriétés (altitudes, hypsométrie). En corrélant les deux débits des stations dans les périodes de stabilité, un détarage produit une anomalie dans la corrélation des deux débits. La troisième méthode consiste en l'analyse des limnigrammes, notamment au niveau des crues, on peut observer des anomalies dans les pentes. Enfin la quatrième méthode proposée est l'examen des profils en travers relevés par les jaugeages par moulinet et les topographies. Les méthodes de détermination de période de stabilité des courbes de tarage sont manuelles et peuvent être fastidieuses en cas de détarages fréquents.

L'acquisition d'une mesure de vitesse ponctuelle sur la section de référence permet de développer de nouvelles méthodes de détection de détarage. Trois méthodes de détection des détarages sont proposées dans ce rapport.

2.5.2 Méthodes de détection des détarages

Les méthodes de détection reposent sur l'analyse des couples (h, v) et repèrent les singularités des variations de différentes grandeurs : la vitesse ponctuelle, les résidus de débits par rapport à un débit de référence, les résidus de vitesses ponctuelles. L'objectif est de repérer un changement de fonction dans les contrôles hydrauliques.

2.5.2.1 Méthode de la variation de la vitesse à niveau d'eau fixé ($V(t)$ à H fixée)

Principe

La méthode consiste à étudier les variations de la chronique de vitesse de surface mesurée par un capteur de vitesse $v_{h_f} t$, pour une hauteur fixée h_f . On considère une période, t_1 est la date de début et t_2 la date de fin.

Ainsi, à un niveau d'eau donné h_f , à la date t_1 , le contrôle hydraulique se formalise sous l'équation (10) avec les paramètres de contrôle (a_1, b_1, c_1) . Après le détarage, à la date t_2 , il se formalise avec les paramètres (a_2, b_2, c_2) .

$$\begin{aligned} v_{h_f_1} &= a_1(h_f - b_1)^{c_1} \\ v_{h_f_2} &= a_2(h_f - b_2)^{c_2} \end{aligned} \quad (10)$$

En évaluant la différence de vitesse à h_f , on peut détecter les changements de contrôle hydraulique.

$$\Delta v_{h_f} = 100 \frac{v_{h_f}(t_1) - v_{h_f}(t_2)}{v_{h_f}(t_2)} \quad (11)$$

Les variations de vitesse ne sont pas seulement engendrées par un changement de contrôle hydraulique, mais également par les variations naturelles de vitesse : par les erreurs aléatoires de mesures de hauteur et de vitesse. On considère qu'un détarage a lieu lorsque la variation de vitesse Δv_{h_f} dépasse un certain seuil S_{h_f} de variation de vitesse. Le seuil de variation S_{h_f} est défini subjectivement, il dépend de h_f , de la dispersion des mesures de vitesse, des enjeux de la station hydrométrique. Lorsque la variation de vitesse Δv_{h_f} dépasse le seuil S_{h_f} , on estime qu'un détarage a potentiellement eu lieu. La date du détarage peut être encadrée par les dates t_1 et t_2 . Cependant, le détarage n'est pas forcément visible pour la gamme de hauteur de h_f . Le détarage peut concerner une gamme de hauteur dont h_f est exclue.

Méthodologie

Dans la pratique, cette méthode nécessite de choisir une période d'observation, une hauteur d'eau h_f et un seuil de variation S_{h_f} . La période d'observation définit la série de données temporelle que l'on va tester. Le choix de la hauteur d'eau h_f va s'appuyer sur les hauteurs de transition des contrôles hydrauliques, la finalité des données, l'exigence de l'utilisateur et également la fréquence des observations des hauteurs d'eau. Sur la période d'observation, toutes les vitesses v_{mes} des couples h_{mes}, v_{mes} telles que h_{mes} , arrondi au centimètre vaut h_f . On nomme v_{j,h_f} la vitesse journalière associée à la hauteur h_f , v_{h_f} la moyenne des vitesses ponctuelles associées à la hauteur h_f et à la période d'observation et σ_{95,h_f} le quantile à 95% de la distribution des écart-types de v_{h_f} . Le seuil S_{h_f} à partir duquel on signale une modification de contrôle, est construit avec les grandeurs v_{h_f} , h_f et $\sigma_{95,v_{h_f}}$. Le quantile à 95% est choisi puisque l'erreur de 95% est usuellement tolérée par les normes iso et le jugement professionnel des hydromètres. Le seuil s'écrit :

$$S_{h_f} = \frac{2 \sigma_{95,v_{h_f}}}{v_{h_f}} \quad (12)$$

On teste la variation journalière de la vitesse v_{j,h_f} et on la compare au seuil S_{h_f} lorsque le seuil est dépassé, les dates sont retenues.

L'application de cette méthode comporte les étapes suivantes :

- Choix de la période d'observation ;
- Choix de la hauteur h_f ;
- Choix de la période seuil ;
- Calcul des v_{j,h_f} et $\sigma_{95,v_{h_f}}$;
- Détermination du seuil S_{h_f} ;
- Test sur les variations journalières.

La méthode aboutit à l'établissement des périodes encadrant une variation de vitesse importante, et un potentiel détarage.

2.5.2.2 Méthode de variation du débit (Méthode ΔQ)

Principe

La méthode ΔQ consiste à identifier les différences de débit entre un débit de référence calculé par une courbe de tarage classique $Q(h)$ et un débit calculé par la méthode de la vitesse témoin $Q(v_{mes})$.

La méthode consiste à calculer les résidus des débits :

$$\Delta Q = 100 \frac{Q_h - Q(v_{mes}, h)}{Q(h)} \quad (13)$$

Elle compare les résidus à un seuil, fixé subjectivement, suivant la finalité des données. Le dépassement du seuil permet d'identifier des périodes de singularité, et de potentiel détarage.

Méthodologie

De la même manière que la méthode précédente, une période d'observation et un seuil sont à fixer. On peut effectuer le test de manière glissante sur une sous-période de la période d'observation et on repère les sous-ensembles où un certain pourcentage des couples vérifie la condition de dépassement du seuil. Deux paramètres supplémentaires sont à choisir, le pourcentage et la sous-période. Le test glissant permet de lisser les singularités dans les mesures et éviter une trop forte sensibilité aux erreurs aléatoires de mesure. Si l'on considère qu'un détarage est une modification de contrôle hydraulique temporaire mais d'un ordre de grandeur temporel supérieur à la semaine, la sous-période peut valoir plus de quelques jours.

2.5.2.3 Méthode de la relation hauteur-vitesse (Méthode H-V)

Principe

La méthode repose sur les modifications dans la relation hauteur-vitesse au cours du temps. Sur une période stable, une courbe de H-V de référence est construite à l'aide de la méthode BaRatin adaptée aux couples H-V. On détecte les détarages par les modifications de cette relation de plusieurs manières. Le changement de signe des résidus, la variation des résidus entre les observations temporelles de vitesses mesurées sur une période d'observation et la vitesse de référence donnée par la courbe de référence et la comparaison des observations avec le faisceau d'incertitude issu de BaRatin sont les trois observations qui permettent de repérer les modifications de contrôles hydrauliques. Cette méthode s'appuie également sur des paramètres fixés subjectivement.

Construction de la courbe de référence H-V

La méthode nécessite de connaître une période stable afin de construire une relation H-V de référence. L'utilisation marginale de BaRatin ne présente pas de difficultés majeures pour les couples (h, v) . Les paramètres a,b,c de l'équation (1) des contrôles hydrauliques sont modifiés à partir des équations des contrôles hydrauliques.

Exemple de formules des paramètres :

Formule de seuil épais horizontale (section rectangulaire large)

$$\begin{aligned} a &= C \sqrt{2g} \\ b &= h_0 \\ c &= 0.5 \end{aligned}$$

Formule de contrôle de chenal (écoulement uniforme section rectangulaire large)

$$\begin{aligned} a &= K \bar{i} \\ b &= h_0 \\ c &= 0.67 \end{aligned}$$

Second changement majeur, la matrice M doit être modifiée pour les lits composés, puisque la vitesse n'a pas la propriété d'addition. L'addition des contrôles n'est plus possible, ainsi, pour un lit composé une nouvelle formulation mathématique du contrôle doit être écrite, en s'appuyant sur la formule de Nicollet [Nicollet, 1979].

Les observations de jaugeages sont remplacées par des couples h_{mes}, v_{mes} . Afin de réduire le temps de calcul de BaRatin et de respecter l'hypothèse d'indépendance, les couples d'observation sont issus d'un échantillon de mesures. L'échantillonnage est effectué par gamme de hauteur aléatoirement afin d'assurer un échantillon recouvrant une large gamme de hauteur, car les couples h_{mes}, v_{mes} situés aux bornes extrêmes sont moins fréquents et importants pour le calage de la courbe de référence. On associe à chacune des vitesses une incertitude, représentant la dispersion des mesures sur cette période. Pour un couple (h_{mes}, v_{mes}) , l'incertitude sur h est fixée à 0.01m et l'incertitude sur v est construite à partir de l'écart-type des vitesses issu des couples (h_{mes}, v_{mes}) associées à une hauteur h_a telle que l'arrondi à 0.01m près de h vaut h_a . La courbe de référence est la max-post issue de BaRatin sur une période stable.

Calcul des résidus

Les indicateurs employés pour pouvoir comparer, au fil du temps, les couples h_{mes}, v_{mes} mesurés à la courbe de référence sont les résidus r_v et $r_{v,s}$. En standardisant les résidus $r_{v,s}$, la dispersion des vitesses est prise en considération.

$$r_v = v_{mes} h - v_{ref}(h) \quad (14)$$

$$r_{v,s} = \frac{v_{mes} h - v_{ref}(h)}{\sigma_{v_{ref}}(h)} \quad (15)$$

$\sigma_{v_{ref}}$ correspond à l'intervalle du faisceau de confiance de BaRatin pour une courbe H-V.

Tests et seuil

A partir des résidus et du faisceau d'incertitudes issu de BaRatin plusieurs tests de détarage sont envisageables.

Le premier test consiste à étudier le signe du résidu au cours du temps. C'est un test glissant sur le signe du résidu, sur une sous-période de la période d'observation. Lorsque le nombre de résidus ayant le même signe dépasse un pourcentage fixé, on signale qu'une modification a eu lieu dans la sous-période. Cette méthode fait intervenir une sous-période de quelques jours et un pourcentage de mesure.

Le deuxième test s'appuie sur le faisceau d'incertitude de BaRatin de la relation H-V pour identifier les sous-périodes de potentiel détarage. Le faisceau de la courbe de référence est construit pour encadrer 95% des couples h, v . Ainsi, si un pourcentage plus faible d'observations (h_{mes}, v_{mes}) est dans le faisceau sur une sous-période glissante, on peut émettre l'hypothèse qu'un changement de contrôle a modifié la relation h_{mes}, v_{mes} . Dans cette troisième méthode le pourcentage et la sous-période sont à fixer par l'utilisateur suivant la finalité des données.

3 Site d'étude

3.1 Description du site

3.1.1 Le bassin versant de l'Arvan

La zone d'étude du bassin versant de l'Arc et de l'Isère (figure 4) a été choisie pour les nombreux aménagements hydroélectriques qu'elle comporte et les concentrations fortes en matières en suspension (MES). Les études sur le bassin expérimental de l'Arc-Isère ont pour objectifs de mieux connaître les impacts des usines hydroélectriques et la dynamique des MES. Dans cette optique, la connaissance précise des débits est indispensable. Le site Arc-Isère a été reconnu depuis 2008 comme site atelier de la Zone Atelier du Bassin du Rhône (ZABR), ce qui favorise les échanges interdisciplinaires entre les équipes de recherche. L'unité de recherche hydrologie-hydraulique en a fait un de ses bassins d'observation.

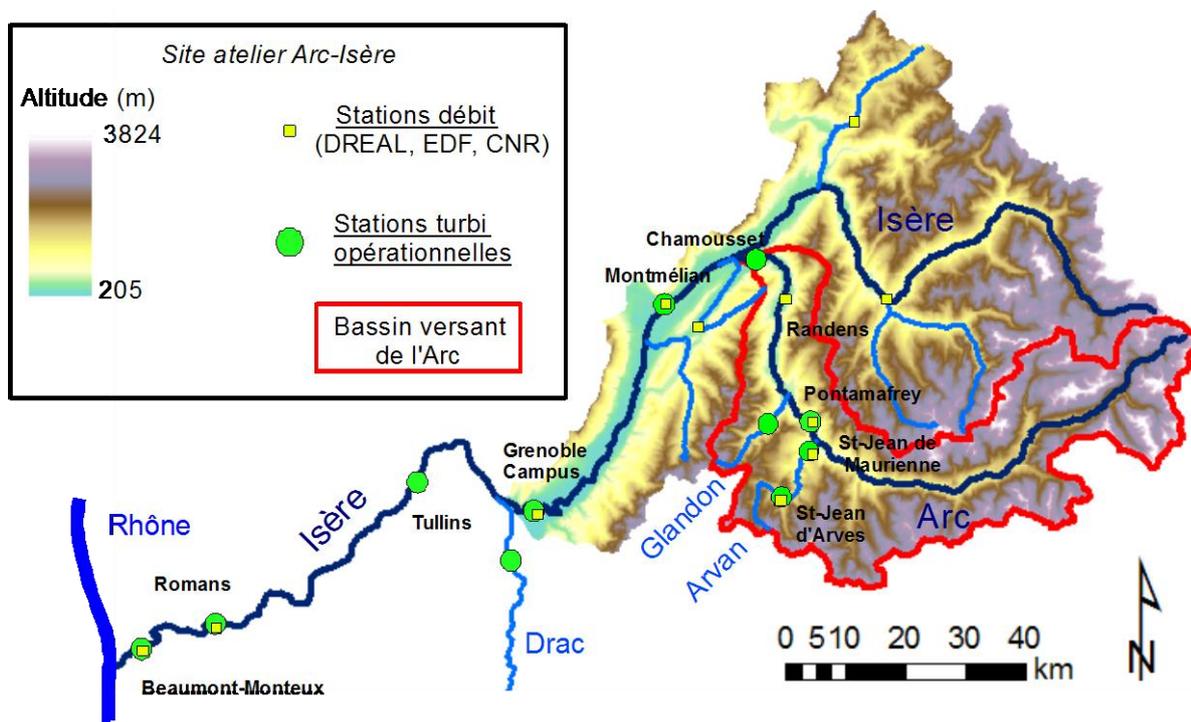


Figure 4 : Carte du bassin versant de l'Arc présentant les stations hydrométriques et turbimétriques (Base de données BDOH)

L'Arvan est un affluent de l'Arc, il prend sa source à 3200m d'altitude sur le flanc nord des Aiguilles d'Arves, et se jette dans l'Arc à Saint-Jean de Maurienne à une altitude de 500m (figure 5). Le bassin versant de l'Arvan a une surface de 222km². L'Arvan est caractérisé par sa forte pente et un transport

sédimentaire important. La pente de l'Arvan est de 1,9% environ au niveau de la station hydrométrique [Fougerit 2011]. On observe de nombreux cônes de déjection de matières argilo-sableuses. Les eaux de l'Arvan, très chargées en MES, sont turbides et revêtent une couleur grisâtre [Thollet 2011]. Le tri sédimentaire n'est pas complètement effectué, on retrouve donc dans le lit des sédiments de granulométrie très variée. Les hauteurs d'eau varient quotidiennement suivant l'activité des centrales hydroélectriques.

Deux centrales au fil de l'eau sont présentes sur le bassin versant de l'Arvan. La première est exploitée par EDF, la prise d'eau se situe au niveau du barrage de Belleville sur l'Arvan, le Pradin et le Rieu Gilbert, affluents de l'Arvan (figure 5). Une conduite forcée longue de 8km fait chuter l'eau sur 581m de dénivelé. L'eau est ensuite turbinée par deux turbines, puis rejetée dans son milieu naturel au niveau de Le Tilleret². La centrale possède une puissance de 30MW.

Le second aménagement hydroélectrique présent sur l'Arvan est géré par la SOREA (Société des Régies de l'Arc). Il a été inauguré en juin 2012, il turbine les eaux de l'Arvan prélevées au niveau du pont du Tilleret, en conduite forcée sur 2741m. La centrale hydraulique a une production annuelle de 15,8 GWh. Elle est dépendante de la centrale située en amont³.

Dans le cadre des recherches sur le transport sédimentaire, plusieurs stations de mesures de turbidité et de débit ont été installées sur l'observatoire. Deux stations sont localisées sur l'Arvan, une station amont à Saint-Jean d'Arve et une seconde en aval à Saint-Jean de Maurienne.

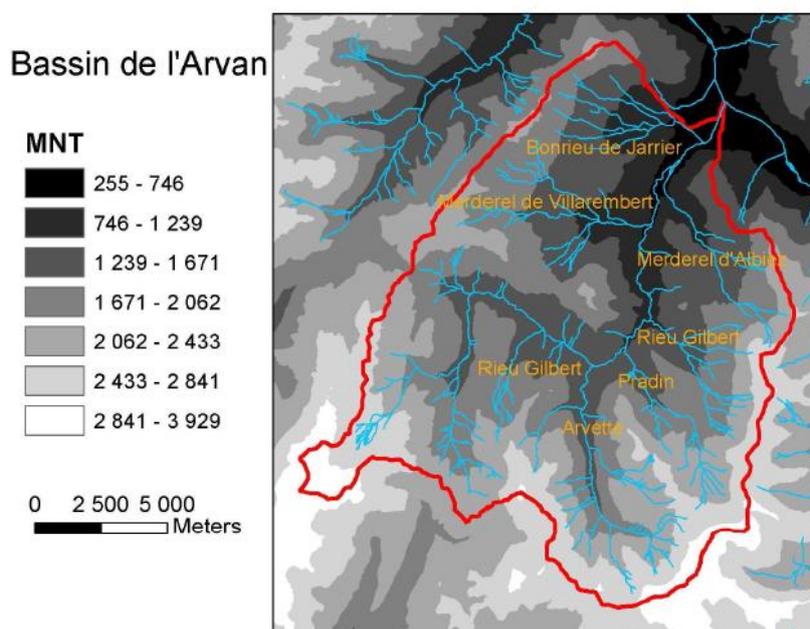


Figure 5 : Carte du bassin versant de l'Arvan représentant les affluents de l'Arvan [Fougerit, 2011]

²EDF Unité de Production Alpes GEH Vallée de la Maurienne, l'Arvan

³ SOREA http://energie2007.fr/images/upload/sorea_dossier_de_presse_barrage_clapeys_juin2012.pdf, consulté le 22/04/2014

3.1.2 Présentation de la station hydrométrique de Saint-Jean-de-Maurienne

La station hydrométrique de Saint-Jean de Maurienne a été installée par Irstea en 2009 pour suivre le débit et pour connaître la dynamique du transport sédimentaire du bassin versant de l'Arvan en partenariat avec EDF. La localisation de la station a été principalement définie pour les facilités de mise en œuvre, la proximité de la route et l'accès à l'électricité (figure 6a). Dans le cadre de l'observation du transport sédimentaire un turbidimètre et un préleveur asservi au turbidimètre ont été installés. Un radar aérien sans contact avec l'écoulement et une échelle graduée complètent l'équipement de la station pour le calcul du débit liquide (figure 6c). Le radar mesure la hauteur d'eau et la vitesse de l'écoulement de surface. Il a été déplacé de l'aval du pont à l'amont du pont SNCF le 16 septembre 2010 afin de pouvoir suivre les étiages.

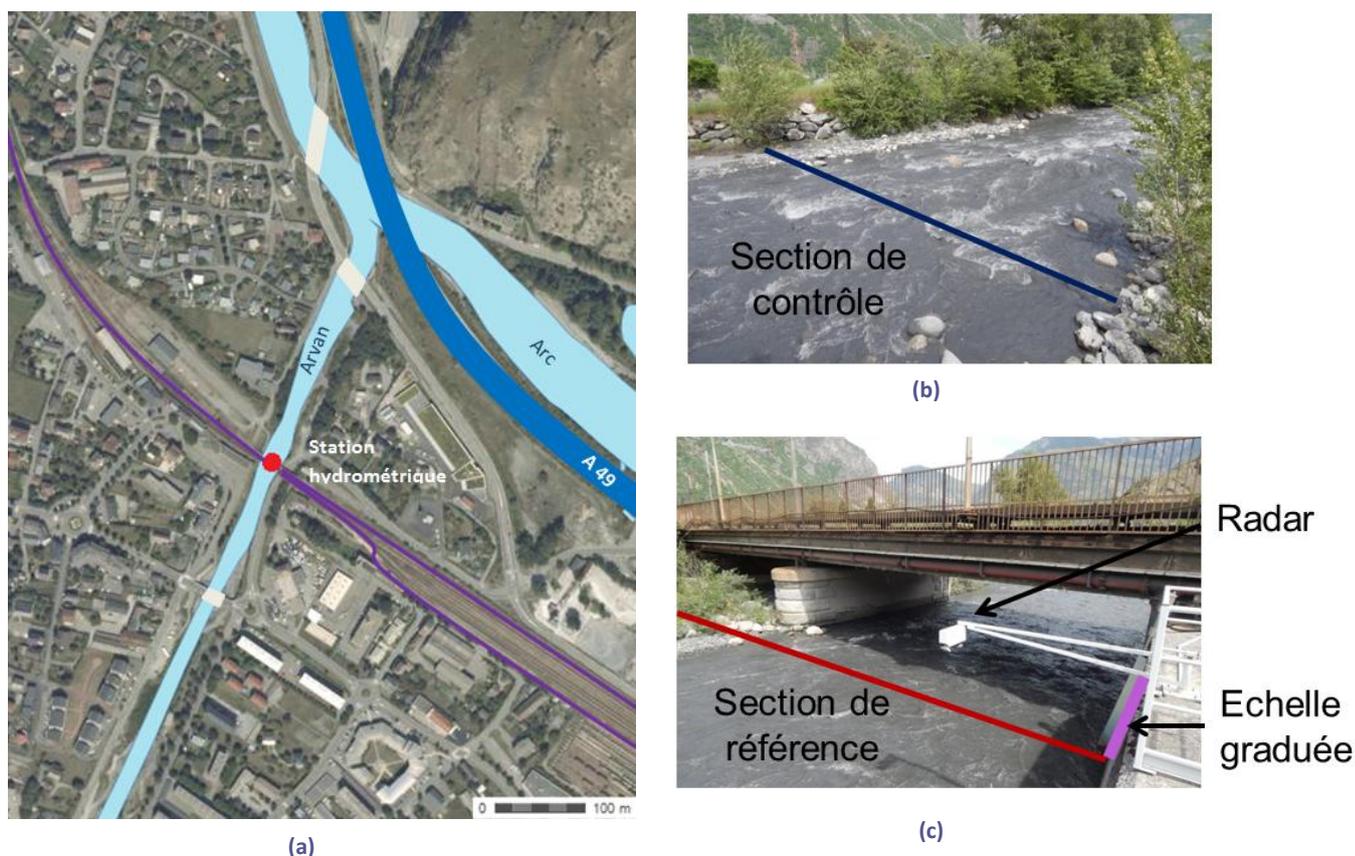


Figure 6 : Présentation de la station en photo

(a) Vue aérienne de l'emplacement de la station hydrométrique de Saint-Jean de Maurienne

(b) Vue de l'Arvan du radar Sommer RQ-24 et du pont SNCF depuis la rive droite

(c) Vue de l'Arvan en aval du pont SNCF prise de la rive

3.2 Le radar Sommer

Le radar installé à la station d'étude est un radar Sommer RQ-24. Un radar identique a été installé par la DREAL Rhône-Alpes sur l'Arc à Aiguebelle en mai 2011 [Héraud, 2012]. Le radar mesure la vitesse de surface et la hauteur d'eau. La hauteur d'eau est évaluée à partir du tirant d'air entre la surface et la position de l'émetteur. Un court train d'onde est émis verticalement par le radar, l'onde se réfléchit à la surface et le capteur enregistre le temps de transit de l'onde. La distance parcourue par l'onde est ainsi déterminée. A partir d'un étalonnage, la hauteur d'eau en est déduite. La vitesse

de surface est calculée grâce à l'effet doppler. Le radar émet un train d'onde de fréquence 24 GHz à un angle d'inclinaison variable α , le constructeur recommande un angle d'inclinaison compris entre 40° et 60°. L'angle d'ouverture φ , correspond à l'angle d'ouverture du faisceau émis du radar, et vaut 10°. Ces deux paramètres, ainsi que la hauteur T_a entre la surface du plan d'eau et l'émetteur radar permettent de connaître la surface de l'écoulement sur laquelle la mesure est effectuée (figure 7).

On peut estimer le diamètre D_O et la surface S_O sur laquelle le radar effectue la mesure de vitesse, à partir des paramètres d'inclinaison α et d'ouverture φ utilisés par le radar équipant la station :

$$\alpha = 50^\circ, \quad \varphi = 10^\circ.$$

La hauteur T_a comprise entre la surface du plan d'eau et l'émetteur varie en fonction de la hauteur d'eau. On prendra approximativement $T_a = 3m$.

$$D_O = T_a \tan(90 - \alpha) - T_a \tan(90 - \alpha - \varphi/2) \quad (16)$$

$$D_O = 0.42 \text{ m}, \quad S_O = 0.14 \text{ m}^2.$$

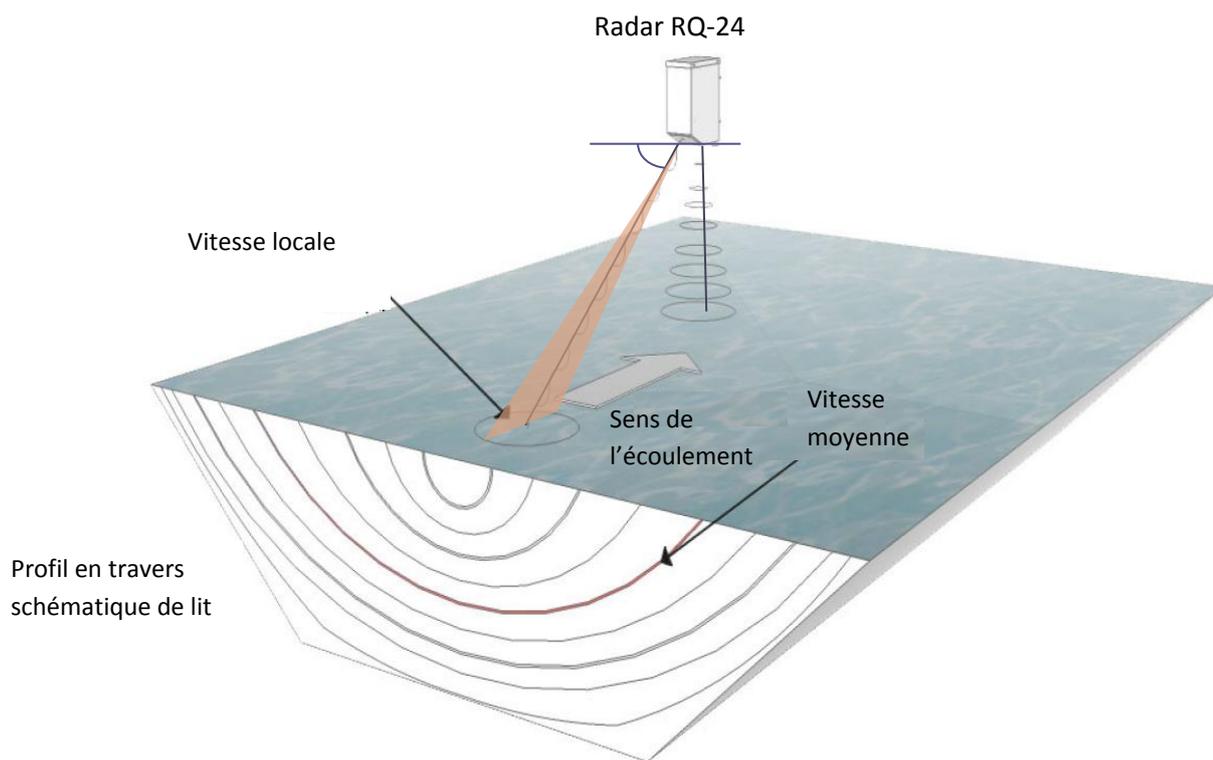


Figure 7 : Schéma de fonctionnement du radar RQ-24 (source: Product sheet RQ-24)

La mesure de la vitesse se fait à une profondeur de 0,75mm sous la surface. Le courant induit par le vent n'est pas complètement dissipé à cette profondeur [Plant and Wright, 1980]. L'influence du vent dépend de son orientation et de son amplitude, elle suit une loi logarithmique suivant la profondeur, [Plant and Wright, 1980]. Cependant, le courant causé par le vent reste négligeable pour des vents faibles et dans des directions différentes de celles de l'écoulement [Costa et al. 2006]. Pour un vent de 36km/h mesuré à 10m au-dessus du plan d'eau et dans l'axe d'écoulement on obtient une

erreur de mesure de la vitesse d'écoulement de 0,11m/s. Sur la station nous ne disposons pas de mesure précise du vent, nous estimons son influence faible compte tenu des fortes vitesses d'écoulement comprises entre 1 et 4m/s.

Pour obtenir un signal réfléchi cohérent, l'écoulement ne doit pas présenter de tourbillon, d'objet flottant encombrant le champ d'émission de l'onde. Des vaguelettes doivent être visibles à la surface et mesurées plus de 3 mm, pour éviter un effet miroir et un signal rétrodiffusé trop atténué.

Le train d'onde est partiellement réfléchi par la surface et sa fréquence est modifiée par le mouvement des vaguelettes de surface (effet doppler). Le capteur analyse le signal réfléchi par analyse spectrale. Une mesure de vitesse est constituée d'un nombre de scans variant entre 1 à 40. Un scan correspond à un train d'onde et une mesure, il a une durée de mesure fixe. Le radar effectue ensuite une moyenne sur plusieurs scans. En augmentant le nombre de scan on augmente la durée de la mesure. D'après le manuel du constructeur (Manuel/Sommer-RQ-24/juin 2010), le nombre de scans recommandé est de 4 pour une durée de mesure de 70s. Le radar sur l'Arvan est réglé sur un nombre de scans de 4 de 2010 à mai 2014 puis à 8 scans à partir du 21 mai 2014. Le nombre de scans diminue l'incertitude de la mesure en lissant potentiellement les variations de hauteur sur une minute. En mai 2014, nous avons décidé d'augmenter le nombre de scans pour améliorer le lissage des données. La fiche d'information de l'appareil définit une précision du niveau mesuré de 1mm et une résolution de mesure de la vitesse 1mm/s. Les données du constructeur ne fournissent pas d'incertitude de mesure sur le niveau d'eau et la vitesse.

3.3 Historique de la station et données disponibles

La chronologie présentée en annexe A replace les données disponibles sur la station de Saint-Jean de Maurienne. En raison du travail effectué sur les données antérieures à 2011, le rapport présente des résultats provenant des données datant après 2011.

En annexe C, un tableau résume les points de jaugeage et leurs incertitudes Q+ associées. Dans la liste des jaugeages on distingue deux familles, les jaugeages effectués par radar aérien SVR et les jaugeages effectués par exploration du champ des vitesses (ECV). La méthode de jaugeage par SVR est présentée en annexe D.

Les jaugeages par la méthode SVR sont dépouillés à l'aide du logiciel BAREME développé par la DREAL Rhône-Alpes. BAREME [Bechon P.M., 2012]. BAREME permet de calculer un débit à partir des vitesses de surface et d'un profil vertical simplifié en trapèze de la même surface qu'un profil en puissance. Le trapèze est construit à partir du coefficient de Strickler des rives et du fond. On a considéré un coefficient de vitesse de 0,75 sur les rives et de 0,80 sur le fond pour le dépouillement. Ces coefficients proviennent principalement des observations faites sur l'Arc. La théorie développée par l'USGS [Rantz et al. 1982] a défini des coefficients de vitesse de 0,80 pour les rivières très rugueuses, de 0,90 pour les chenaux profonds à fond lisse, 0,85 pour les rivières naturelles. La norme ISO 748 rapporte également ces coefficients à partir du coefficient de Chézy. Les études sur l'Arc menées par Irstea ces dernières années, notamment pendant les chasses de la chaîne de barrage hydroélectrique justifient ces coefficients [Dramais et al. 2011]. Ce coefficient permet d'obtenir la vitesse moyenne sur chacune des verticales à partir des vitesses de surface mesurées et de la loi puissance qui modélise le champ des vitesses sur une verticale. BAREME associe également une incertitude à chacun des jaugeages qui s'appuie sur la norme ISO 748 et sur la méthode Q+ [Le Coz et al., 2012] développée par Irstea et exposée en annexe B.

Les deux méthodes de jaugeages se distinguent par la gamme de hauteur qu'elles couvrent. Les jaugeages par exploration du champ des vitesses sont préférés par faibles hauteurs d'eau, inférieures à 20 cm (hauteur échelle graduée), tandis que pour des hauteurs supérieures à 20cm le radar mobile aérien présente des avantages de sécurité et une rapidité de déploiement évidente. Elles se différencient également par leurs incertitudes. Les incertitudes associées aux jaugeages par exploration du champ des vitesses sont plus faibles, de l'ordre de 7% tandis que les incertitudes associées aux jaugeages SVR sont plus élevées de l'ordre de 15% d'après les incertitudes des jaugeages disponibles. Cette différence s'explique par la part élevée allouée à l'incertitude sur l'intégration des vitesses sur les verticales pour les jaugeages au radar de surface qui dépend d'un coefficient fixé lors du dépouillement.

3.4 Bilan hydrologique sommaire

Le régime de l'Arvan peut être caractérisé par l'observation de la répartition des hauteurs et des vitesses de surface. La gamme de hauteurs d'eau à l'échelle graduée la plus fréquente est centrée autour de 0 à l'échelle graduée. La vitesse la plus fréquente est dans la gamme de vitesse de 1 à 1.5m/s (figure 8).

Le diagramme (figure 9) renseigne sur le régime de l'Arvan. La fonte des neiges printanière entraîne une augmentation du débit, soit une observation de vitesse et niveau d'eau élevés pendant cette période. Les mois d'hiver sont associés aux basses eaux, une rétention de l'eau sous forme de neige explique les moyennes de vitesses et de hauteurs mensuelles plus faibles en hiver. Néanmoins, l'Arvan est sensible aux pluies automnales et hivernales certaines années avec l'observation de crues en novembre et décembre. Durant les mois d'été, des pics de hauteurs sont enregistrés. Ils correspondent à des phénomènes pluvieux, tel que des orages. Ainsi, le diagramme de hauteur mensuel varie selon les années, il dépend de l'enneigement du bassin versant, des événements pluviométriques, et de la température.

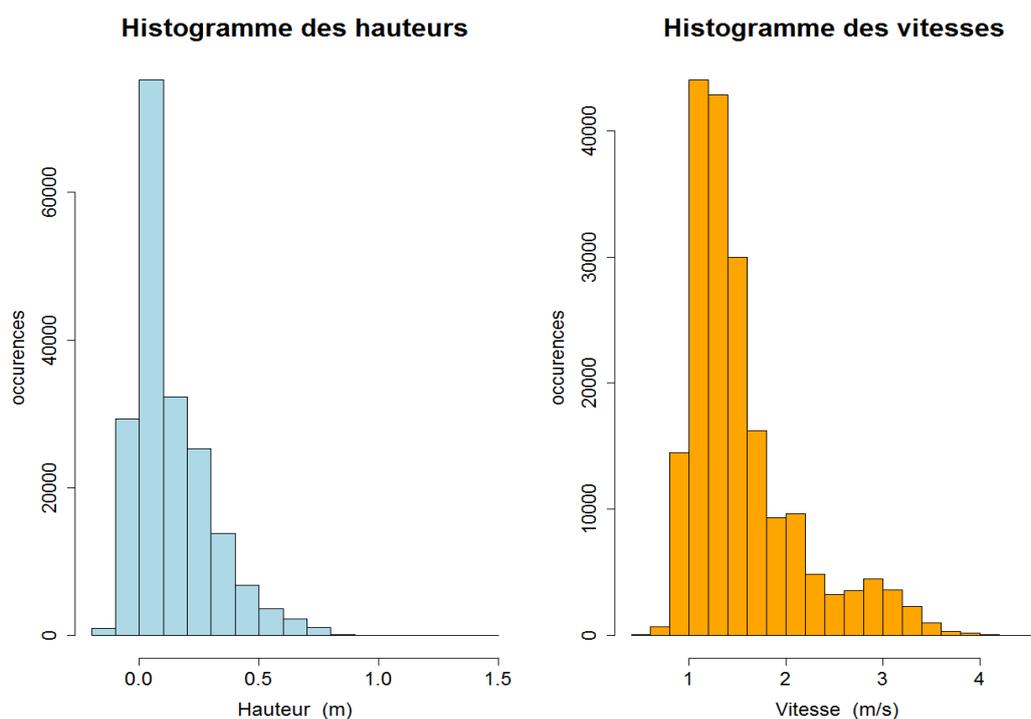


Figure 8 : Histogramme des occurrences des hauteurs et vitesses sur 4 années complètes de données

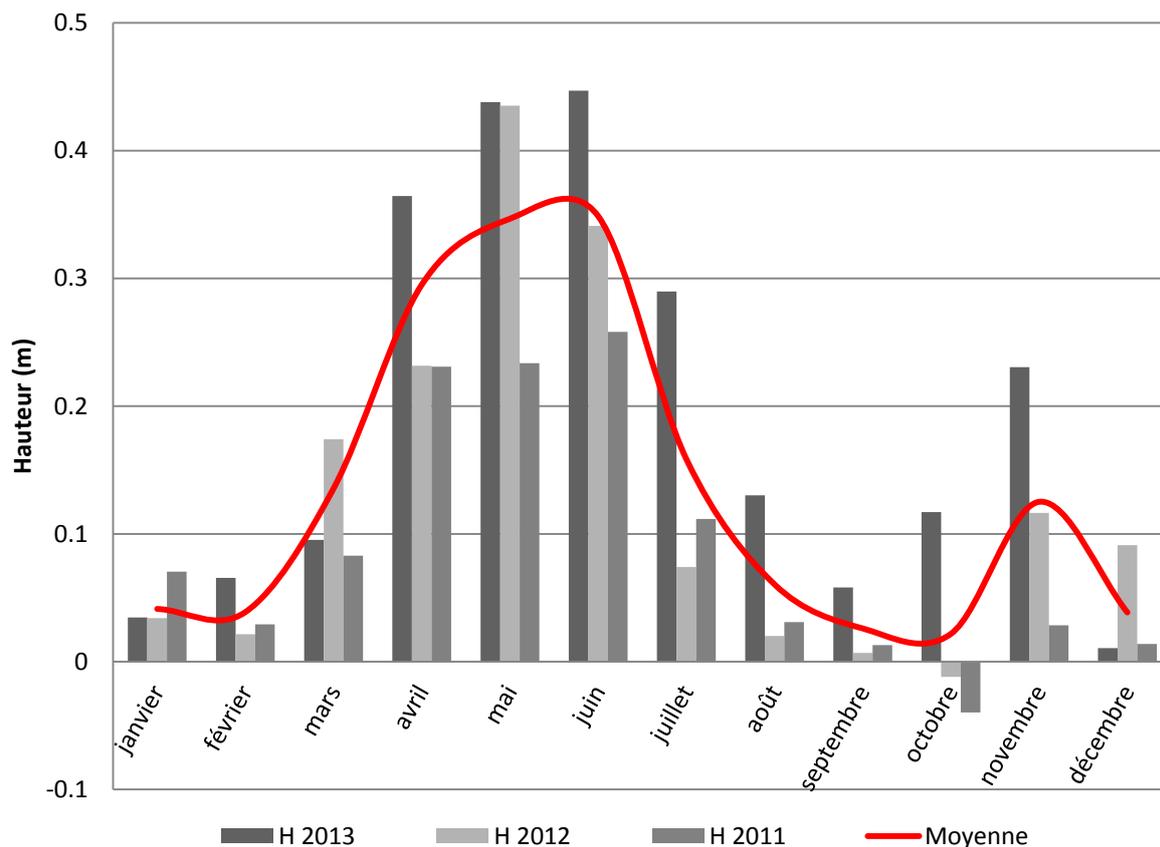


Figure 9 : Diagramme des hauteurs mensuelles à la station de Saint-Jean de Maurienne

3.5 Les contrôles hydrauliques de la station

La station est disposée sur un tronçon quasi rectiligne du cours d'eau. Le lit mineur de l'Arvan est composé de galets de tailles variables. La confluence avec l'Arc se situe à une distance de 320m de la station hydrométrique (figure 6a). L'Arc n'a pas d'influence sur les débits de l'Arvan au niveau de la station. Le pont présente une cassure de pente, avec en aval du pont un seuil naturel composée de galet de longueur du seuil naturel. La pente du lit avant la station est de 1.8%, sur les 54m suivant la station la pente est de 0.7% puis de nouveau une pente de 2%. Au Pk 280 on retrouve une seconde cassure de pente et avec un tronçon de 30m muni d'un pente de 0.3%, puis une pente plus importante sur 100m (figure 10).

Profil en long du tronçon en février 2014

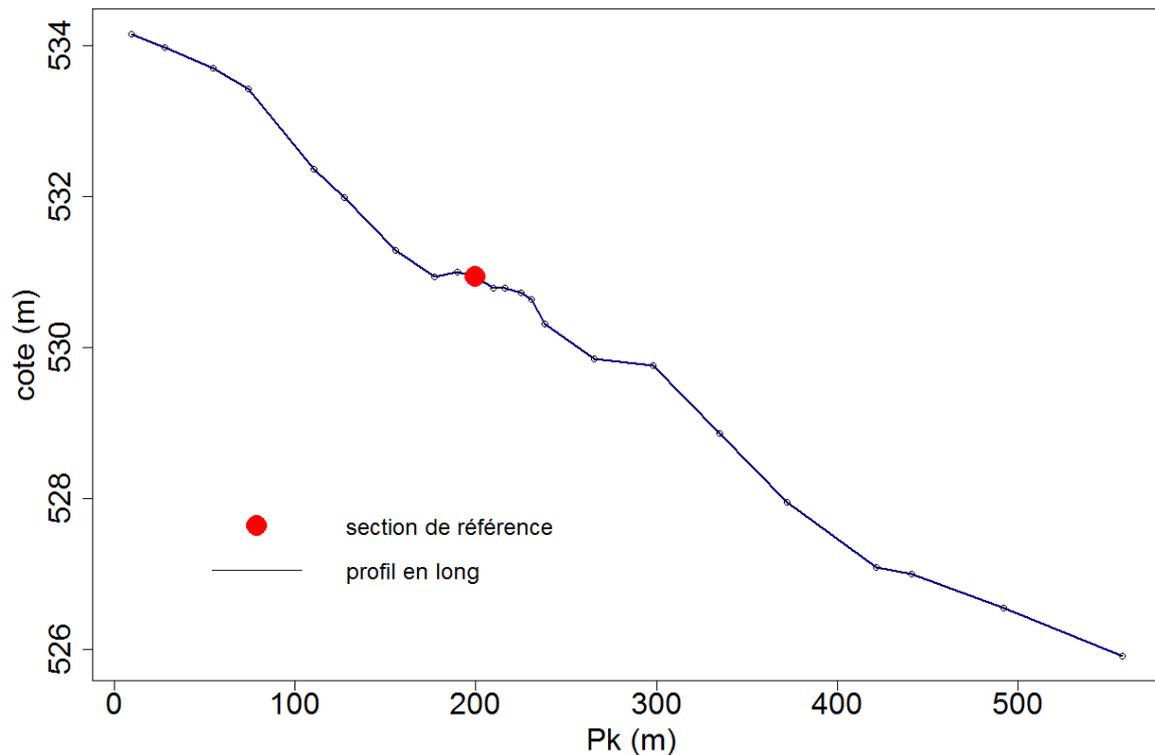


Figure 10 : Profil en long du tronçon de l'Arvan au niveau de la station hydrométrique de Saint-Jean de Maurienne.

Au niveau de la station, la berge de rive droite est limitée par un mur soutenant le pont de la SNCF et protégeant la route des débordements de l'Arvan (figures 6a). Les berges de la rive gauche sont enherbées, et des petits arbustes d'un mètre de hauteur poussent à quelques mètres du lit mineur. Les berges de la rive gauche sont également constituées par le remblai de la rue. Le pont comporte deux arches (figures 6c et 11). Le lit mineur se tient entièrement dans l'arche côté rive droite du pont. Sous l'arche de rive gauche on observe un dépôt de galets et une altitude supérieure de 1m au lit sous l'arche droite.

On définit la section de référence de la station par la position de l'échelle graduée et du radar (figure 6a et 6b)

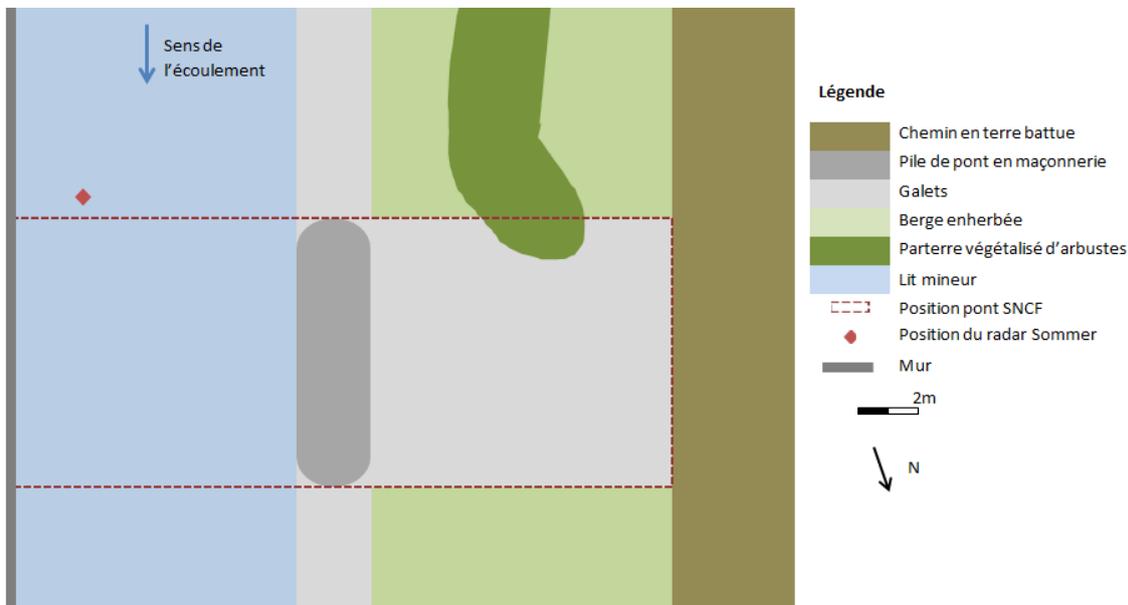


Figure 11 : Schéma de la station vue en plan

L'observation du lit permet de définir trois contrôles hydrauliques :

- Le premier contrôle est un contrôle par le seuil naturel situé en aval de la section de référence, le seuil peut être modélisé par un seuil épais de la largeur du lit mineur. Ce seuil représente alors la section de contrôle pour une première gamme de hauteur que l'on détermine par observation de -0.3 à 0.1m.
- Le second contrôle correspond au contrôle de chenal du lit mineur. Il régit le débit une fois que le seuil est noyé, pour une gamme de hauteur située entre 0.1 et 0.7m. La borne supérieure de la gamme est définie par la hauteur à partir de laquelle l'eau déborde du lit mineur dans le lit majeur.
- Le troisième contrôle correspond au contrôle de chenal du lit appelé lit majeur, au sens hydraulique, il correspond au lit mobilisé pour des crues s'arrêtant au sommet du remblai de rive gauche et au sommet du mur en rive droite pour une hauteur d'eau supérieure à 0.7m. Pour des fortes vitesses, l'influence de la pile de pont peut avoir un impact sur la mesure du radar.

3.6 Evolution de la bathymétrie

Pour juger de la stabilité de la section de référence, des bathymétries sont réalisées annuellement. Elles sont effectuées à l'aide d'un GPS centimétrique, et d'un tachéomètre. Le tachéomètre relève des points dans un repère flottant puis avec trois points communs GPS/tachéomètre, les points mesurés par le tachéomètre sont translatés dans le repère Lambert 93. Les topographies effectuées avant 2011 se trouvent dans le repère Lambert 3 zone, à l'aide du logiciel CIRCEE elles sont converties dans le repère Lambert 93.

Sur la figure 12, on compare les topographies de la section de référence pour 4 années. Elles correspondent à 4 profils en travers projetés sur un même plan de référence. Sur les profils en

travers, la rive droite est délimitée par un mur en béton soutenant le pont de la SNCF et protégeant la départementale D77, il est positionné à l'abscisse 20m. Sur les 4 topographies dont nous disposons, on identifie deux parties du lit. Une partie du lit jugé stable, la topographie de 2014 la décrit soigneusement, et une partie mobile qui correspond à des abscisses de 10 à 20m. La partie stable de -5 à 10 m représente le lit majeur de la rivière au sens hydraulique sa topographie n'a pas changé sur les 5 années d'observation. Il est rarement en eau, les sédiments s'y trouvant sont rarement mobilisés par l'Arvan. Les variations de fond sur la partie mobile sont plus importantes. Les variations les plus importantes s'observent entre les bathymétries de 2011 et 2013, avec environ 20 cm de variation. On ne distingue pas de tendance puisque nous ne disposons que de 4 topographies sur 4 années, ce qui est peu par rapport aux événements hydrologiques que connaît le bassin versant. Dans les 7 derniers mois, on constate un dépôt sur la section de référence. Nous comparons dans ce paragraphe uniquement la topographie de la section de référence, cependant, la morphologie du seuil de contrôle et du chenal de contrôle évolue également. Dans la mesure classique de débit par la relation $Q(h)$, la morphologie de la section de contrôle joue un rôle important.

Les mesures de bathymétrie sont effectuées seulement pour des faibles profondeurs permettant de passer à pied dans le lit de l'Arvan. Il est possible qu'il y ait d'autres variations pendant les forts débits printaniers et en cours de crue avec des phénomènes de « respiration » du fond, des érosions puis des dépôts. Entre la topographie de 2011 et de 2013 nous ne disposons pas d'information sur les variations de bathymétries.

Profil (abscisse-côte) projeté dans plan de référence

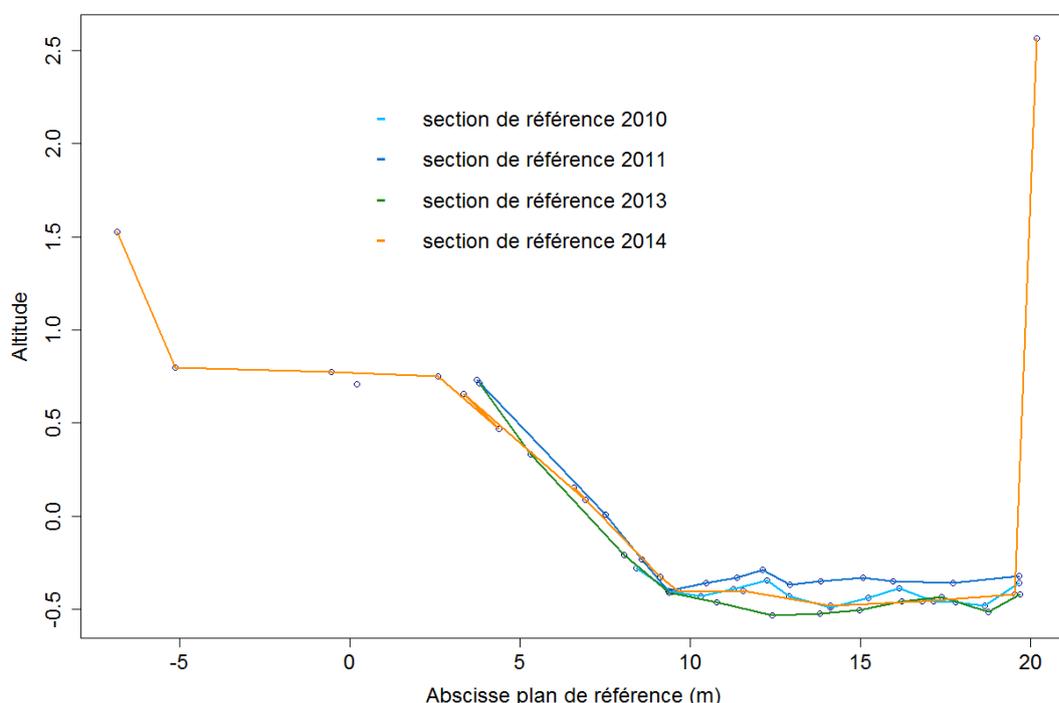


Figure 12 : Profil (abscisse-côte) des sections de référence dans le plan projeté

4 Analyse hydraulique du site

4.1 Relation surface mouillée-hauteur

L'estimation du débit à partir des données de vitesse et de surface mouillée est étroitement liée à la section de référence. Elle est généralement choisie pour sa stabilité topographique. Le calcul du débit via la vitesse de surface mesurée nécessite la connaissance de la surface mouillée au droit de la section du radar.

Cette variation peut également se noter par l'évolution de la surface mouillée en fonction de la hauteur d'eau (figure 13).

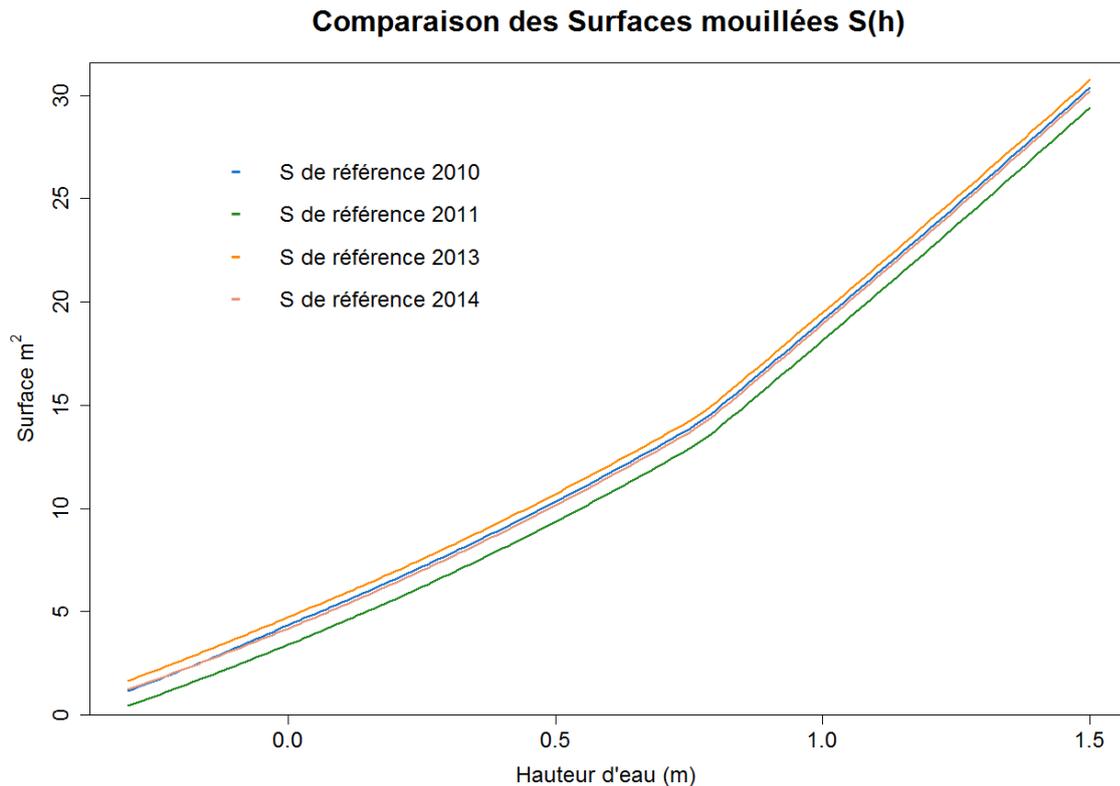


Figure 13 : Comparaison des surfaces mouillées en fonction de la hauteur d'eau.

4.2 Répartition de la vitesse

On souhaite établir la relation entre la vitesse mesurée v_{mes} , et la vitesse débitante V . On prend l'hypothèse que la relation $V(v_{mes})$ est propre à chacun des contrôles hydrauliques. On choisit une relation de premier ordre (équation 5). Avant de déterminer les paramètres k et v_0 pour chacun des contrôles, l'analyse de la répartition de la vitesse sur la section et sur la verticale à l'aide des données des jaugeages permet de mieux comprendre les composantes de cette répartition suivant les contrôles et de vérifier que la vitesse mesurée est représentative de la vitesse débitante. L'analyse sur la verticale n'est pas présentée dans le rapport. Les mesures de vitesse sur une verticale sont très

dispersées par l'ADV (Acoustic Doppler Velocimetry). Elles permettent de vérifier que la répartition est parabolique mais ne permettent pas un ajustement pour les trois contrôles.

La répartition des vitesses sur la section est déterminée par les jaugeages effectués d'août 2011 à avril 2014. La figure 14 présente le rapport entre vitesse verticale moyenne et vitesse débitante pour deux gammes de hauteur. La première gamme de hauteur correspond au contrôle de seuil, 7 jaugeages par exploration du champ des vitesses sont exploités entre les niveaux -6cm à 3cm à l'échelle graduée. La deuxième gamme de hauteur concorde avec le contrôle de chenal mineur, la moyenne des vitesses verticales de 3 jaugeages par radar de surface sans contact dans les gammes de vitesses de 20cm à 40cm. Ce rapport ne permet pas de construire la relation $V(v_{mes})$. Néanmoins, il apporte l'information que le radar occupe une bonne position, puisqu'il est proche du centre de la veine principale du courant. La veine principale de courant est située à l'abscisse où le rapport entre vitesse verticale moyenne et vitesse débitante est maximale. Il justifie également la construction d'une relation par morceaux de la relation $V(v_{mes})$.

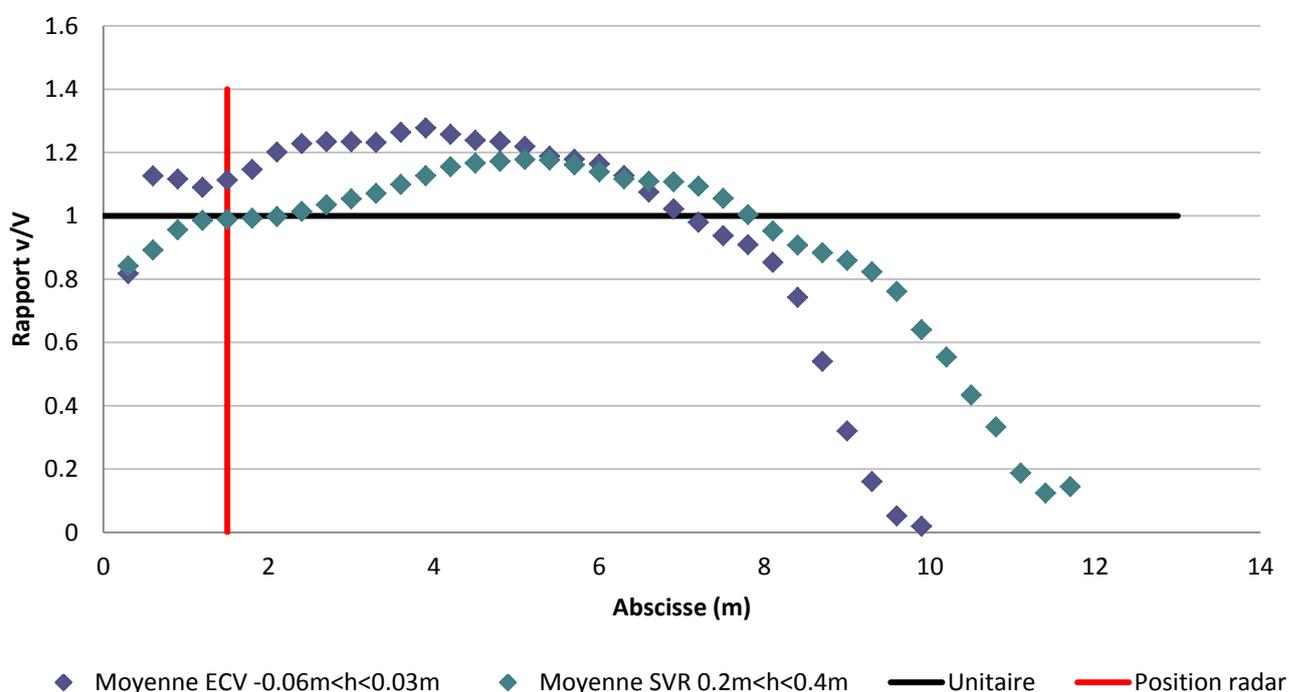


Figure 14 : Répartition de la vitesse de surface sur la section de jaugeage

4.3 Relation vitesse débitante -vitesse mesurée

La relation $V(v_{mes})$ est établie par morceaux pour les trois gammes de hauteurs correspondant aux trois contrôles hydrauliques identifiés dans l'analyse hydraulique de la station. Trois relations affines sont construites à partir des données en veillant à la continuité.

$$V = \begin{cases} k_1 v_{mes} + v_{01} & \text{pour } h \leq h_1 \\ k_2 v_{mes} + v_{02} & \text{pour } h_1 \leq h \leq h_2 \\ k_3 v_{mes} + v_{03} & \text{pour } h_2 \leq h \end{cases}$$

Les hauteurs de transitions (h_1, h_2, h_3) sont fixées par observation sur le terrain, elles peuvent également être issues d'un modèle hydraulique du tronçon de cours d'eau ou encore de la méthode BaRatin.

La figure 15 présente la vitesse débitante en fonction de la vitesse mesurée pour chacun des jaugeages d'août 2011 à avril 2014. Sur la figure 15, on a différencié les jaugeages par gamme de hauteur qui correspondent également à des types de jaugeage. On note que dans le dépouillement des jaugeages par radar de surface, la répartition de vitesse verticale est forcée par le coefficient de fond entré dans le logiciel BAREME. Le coefficient de fond a été fixé à 0,8 d'après les observations sur l'Arc [Dramais et al., 2011]. Cette relation $V(v_{mes})$ présente une grande variabilité, et constitue un point crucial dans la méthode de la vitesse témoin.

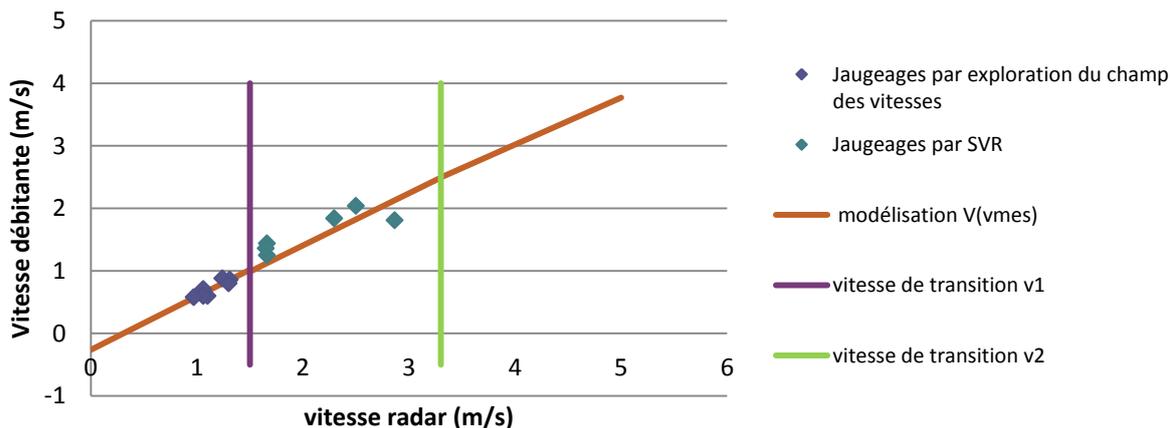


Figure 15 : Vitesse débitante en fonction de la vitesse mesurée et régressions linéaires par gamme de hauteur

Les paramètres k_1, v_{01} proviennent d'une régression linéaire entre les vitesses débitantes issues de jaugeages et les vitesses. Les paramètres k_2, v_{02} émanent également d'une régression linéaire et d'une condition de continuité de la relation $V(v_{mes})$. Aucune donnée n'est disponible pour établir la relation $V(v_{mes})$ du troisième contrôle, on effectue l'hypothèse que la relation ne change pas du contrôle de chenal mineur au chenal majeur. Sur le troisième contrôle, le lit du cours d'eau est plus large et le coefficient de Strickler moins élevé par la mise en eau des berges enherbées.

Contrôle		Gamme de hauteur (m)		k_i	v_{0i}
1	de seuil	-0.3	0.1	0.83	-0.26
2	mineur	0.1	0.7	0.85	-0.23
3	majeur	0.7		0.85	-0.23

Tableau 1 : Coefficients de la relation $V(v_{mes})$ pour les trois gammes de hauteur.

4.4 Calcul de débit et incertitude sur une période stable

Deux calculs de débits sont effectués sur la station, un calcul de débit Q_{CT} utilisant une courbe de tarage issue de la méthode BaRatin et un calcul de débit Q_{VT} provenant de la méthode de la vitesse témoin.

4.4.1 Méthode par une relation de tarage issue de BaRatin

La période de stabilité des contrôles hydrauliques et donc du lit est indispensable au calcul de débit par une relation de tarage. L'hypothèse de stabilité de la courbe de tarage présentée dans les résultats suivants correspond à la période du 1^{er} septembre 2011 au 1^{er} avril 2014. C'est le nombre restreint de jaugeages qui a déterminé une période aussi longue. A la suite de l'analyse hydraulique, on définit les a priori pour chacun des contrôles hydrauliques.

- Les hauteurs minimum et maximum
Ces hauteurs correspondent aux hauteurs extrêmes enregistrées par le radar hauteur sur les 4 années d'étude.
 $H_{\min} = -0,4\text{m}$ et $H_{\max} = 1,5\text{m}$

On distingue alors trois contrôles hydrauliques différents :

- Contrôle par seuil épais

C'est le contrôle de bas débit imposé par le seuil en aval du pont SNCF. On détermine les coefficients a, b, c correspondant aux paramètres de la formalisation des contrôles hydrauliques pour l'utilisation de BaRatin. Ces paramètres dépendent du coefficient d'ouvrage C de 0,4 avec une incertitude de plus ou moins 0,05 et de la largeur du seuil, B=11m, correspondant à la moyenne des largeurs mesurées par les jaugeages avec une incertitude de plus ou moins 3m, la hauteur à l'échelle de la crête du seuil est fixée à - 0,4m plus ou moins 0,2m.

- Contrôle par chenal dans le lit mineur

Le premier contrôle de chenal est choisi tel que le seuil naturel est noyé et avant que l'eau arrive sur la partie enherbée de la berge gauche, soit entre les hauteurs de 0,5 et 1m. Les coefficients sont calculés grâce à la pente de l'écoulement $j = 0.019\text{m/m}$ entachée de l'incertitude +/- 0,005m, à la largeur B=11m et le coefficient de Strickler K=35.

- Contrôle de chenal par le lit majeur

Le troisième contrôle hydraulique correspond au contrôle de chenal lorsque le lit s'étend sous la seconde arche du pont et sur la partie végétalisée de la rive gauche correspondant au lit majeur. On modifie le coefficient de Strickler K= 20 et la largeur du lit majeur. Les incertitudes sont augmentées puisque nous disposons d'observations de terrain moins précises.

On obtient la matrice de contrôle (tableau 2), les cases vertes symbolisent l'activation du contrôle hydraulique :

Segments	limite inférieur (m)	Limite supérieur (m)	Incertitude +/- (m)	Contrôle 1	Contrôle 2	Contrôle 3
				Seuil	Chenal mineur	Chenal majeur
1	-0.3	0.10	0.2			
2	0.10	0.7	0.2	(-)		
3	0.7	1.5	(-)	(-)		

Tableau 2 : Matrice des contrôles de la station

Les paramètres des contrôles issus de la formulation des contrôles sous la forme $Q(h) = a(h - b)^c$ sont présentés dans le tableau 3, les paramètres b des contrôles 2 et 3 sont obtenus par continuité.

paramètres		Contrôle 1 Seuil		Contrôle 2 Chenal mineur		Contrôle 3 Chenal majeur	
			+/-		+/-		+/-
a	a priori	19.5	5.8	53.07	17.77	27.57	16.48
	a posteriori	19.47	5.9	49.92	14.2	28.46	9.2
b	a priori	-0.4	0.2	(-)	(-)	(-)	(-)
	a posteriori	-0.26	-0.069	0.07	0.000001	1.38	0.001
c	a priori	1.5	0.05	1.67	0.05	1.67	0.05
	a posteriori	1.51	(-)	1.68	0.05	1.66	0.05
h	a priori	(-)	(-)	0.10	0.2	0.7	0.2
	a posteriori	(-)	(-)	0.11	0.08	0.72	0.2

Tableau 3 : Tableau des paramètres de contrôle de la simulation de BaRatin

On considère les jaugeages effectués après du 1^{er} aout 2011 au 1^{er} avril 2014.

Pour le premier contrôle les jaugeages sont dispersés, le faisceau à 95% est plus important que dans la gamme de hauteur du deuxième contrôle (figure 16).

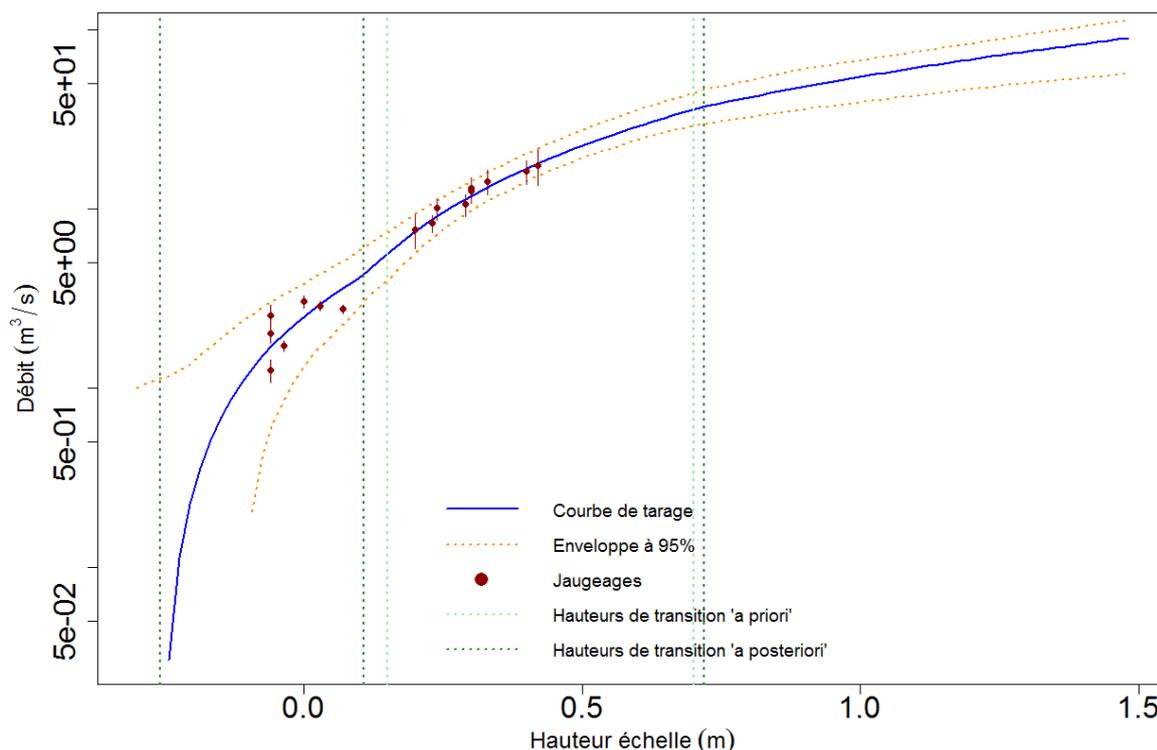


Figure 16 : Courbe de tarage en échelle logarithmique résultant de la méthode BaRatin sur la période du 01/09/2011 au 01/04/2014.

L'incertitude sur les paramètres des contrôles hydrauliques est plus grande pour le troisième contrôle puisque nous n'avons pas de jaugeage et les a priori sont également associés à des incertitudes plus importantes.

Grâce à ces éléments on peut construire un hydrogramme (figure 17) sur la période de validité de la courbe. Les résultats de BaRatin ont l'intérêt de nous donner un faisceau d'incertitude sur le débit.

4.4.2 Méthode de la vitesse témoin

L'analyse hydraulique a déterminé la relation $V(v_{mes})$, à partir d'une surface mouillée on calcule un débit Q_{VT} . La figure 17 présente la chronique de hauteur d'août 2012 à décembre 2012 ainsi que les jaugeages. On remarque des différences entre les débits Q_{CT} et Q_{VT} , notamment pour des hauteurs d'eau importantes, lors de la crue de novembre et de l'augmentation de débit en janvier. Ces différences proviennent de la dispersion de la vitesse mesurée par le radar sur cette période.

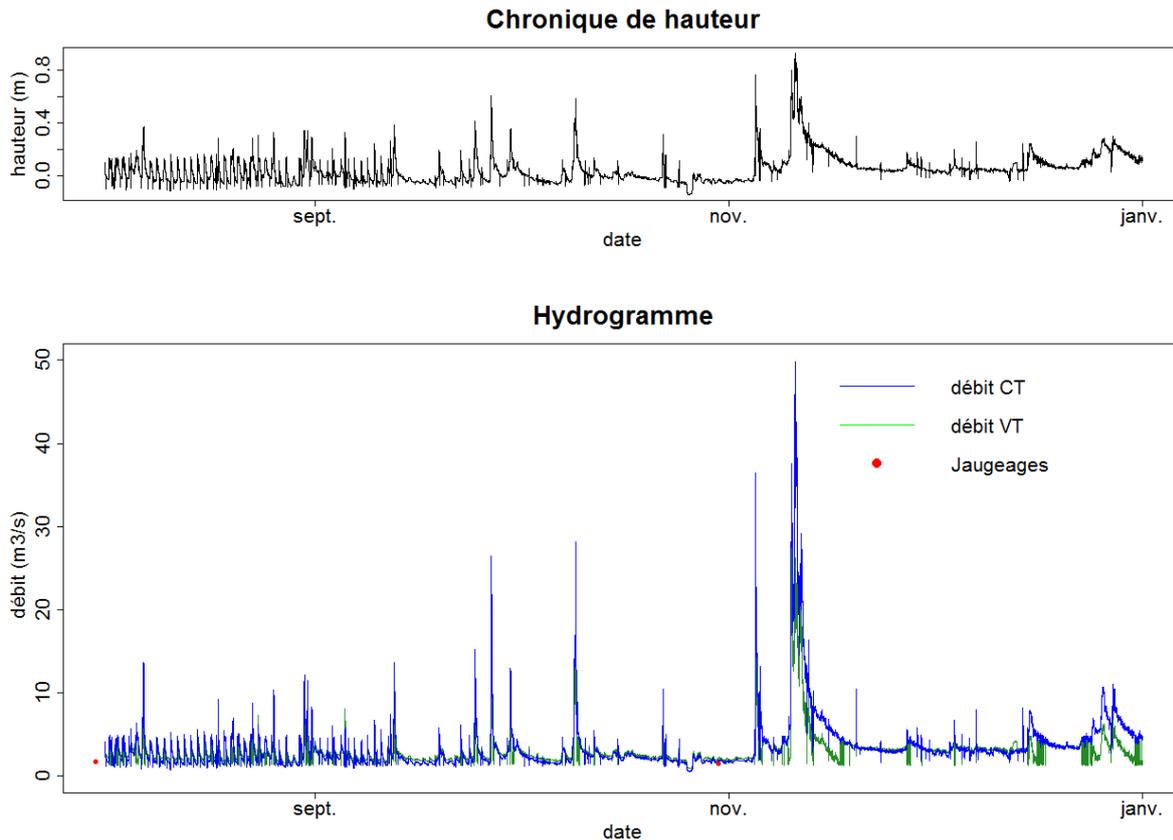


Figure 17 : Chronique de hauteur et hydrogramme d'août à décembre 2012

4.4.3 Approximation de l'incertitude associée au débit issu de la méthode témoin

L'approche BaRatin a l'intérêt d'associer directement à l'estimation du débit un intervalle de confiance et donc une incertitude élargie issue d'une analyse bayésienne. Aucune méthode de calcul d'incertitude n'est associée à la méthode de la vitesse témoin d'après la littérature. En s'appuyant sur la méthode du GUM, l'incertitude approchée à la mesure du débit est calculée dans la partie suivante.

Le débit issu de la méthode témoin s'obtient par la relation

$$Q_{VT} = (kv_{mes} + v_0).S(h) \quad (17)$$

Hypothèses de calcul d'incertitude :

- Calcul d'incertitude sur une période de stabilité des contrôles ;
- Les trois paramètres $k_i, v_{mes}, S h$, ne sont pas corrélés puisque k_i est issu des mesures de jaugeages, v_{mes} du capteur de vitesse, et $S h$ est une fonction de la hauteur mesurée par un capteur de hauteur indépendant du capteur de vitesse ;
- L'incertitude sur le choix de la formulation mathématique de la vitesse débitante $V v_{mes}$ n'est pas prise en compte.

On nomme u_k , $u_S(h)$, $u_{v_{mes}}$, les incertitudes-types relatives respectivement des grandeurs k , S , h , v_{mes} . D'après le GUM on obtient la relation suivante pour l'incertitude relative sur le débit pour une relation $V(v_{mes})$ de type affine (équation 5).

$$u^2(Q_{VT}) = \left(1 - \frac{v_{oi} S h}{Q_{VT}}\right)^2 u^2 k_i + \left(1 - \frac{v_{oi} S h}{Q_{VT}}\right)^2 u^2 v_{mes} + u^2 S(h) \quad (18)$$

Dans le cas simple où la relation V v_{mes} est de la forme V $v_{mes} = k_i \cdot v_{mes}$, la formulation de l'incertitude du débit est plus simple :

$$u^2(Q_{VT}) = u^2 k_i + u^2 v_{mes} + u^2 S(h) \quad (19)$$

Les équations 18 et 19 sont seulement valables pour des incertitudes relatives.

Hypothèse de calcul sur u_{k_i} :

Pour chacun des contrôles, une incertitude relative est affectée aux paramètres k_i . Or les informations sur la distribution de k_i ne sont pas nombreuses. On définit donc des lois rectangulaires sur la distribution de k_i . Pour chacun des jaugeages, on calcule le rapport $k = \frac{V-v_{oi}}{v_{mes}}$, les valeurs extrêmes (k_{min} , k_{max}) définissent les bornes de la loi rectangulaire. D'après le GUM, l'incertitude type de cette estimation vaut $u(k_i) = \frac{l}{3}$, avec l la demi largeur telle que $l = \frac{k_{min}-k_{max}}{2}$. Le tableau 4 présente les incertitudes du paramètre k_i .

Aucun jaugeage n'est disponible pour des hauteurs supérieures à 0,8 m, on fixe l'incertitude à 15% de manière subjective.

Contrôle	k_{min}	k_{max}	$u(k_i)$	$\frac{u(k_i)}{k_i}$ (%)
Seuil	0.78	0.92	0.040	4.9
Mineur	0.71	1.01	0.086	10.2
Majeur	(-)	(-)	(-)	15

Tableau 4 : Incertitude du paramètre k_i pour les trois contrôles.

Hypothèse de calcul de $u_{v_{mes}}$:

L'incertitude $u_{v_{mes}}$ est estimée par l'écart-type expérimental $s(v_{mes})$ sur les vitesses v_{mes} associées à la même hauteur d'eau au centimètre près.

Hypothèses de calcul de $u_{S(h)}$:

L'incertitude $u_{S(h)}$ est décomposée en deux termes :

$$u^2 S(h) = \frac{\partial S^2}{\partial h} \cdot u^2(h) + u^2(S_0) \quad (20)$$

Le premier terme en u_h correspond à l'incertitude sur le niveau d'eau, elle est estimée à 1cm quelle que soit la hauteur, elle est dans la gamme d'incertitude donnée par l'état de l'art [McMillan, 2012]. Le coefficient $\frac{\partial S}{\partial h}$, est estimé par la tangente de la courbe S h (figure 13). Pour des raisons de simplification de calcul, la courbe $S(h)$ pour la période d'août 2012 à décembre 2012 est issue de la topographie de 2013. La courbe $S(h)$ est assimilée à la courbe définie par morceaux suivante :

$$S h = \begin{cases} 12,03 \cdot h + 4,80 & \text{pour } h < 0,8 \\ 22,33 \cdot h - 2,81 & \text{pour } h \geq 0,8 \end{cases} \quad \text{d'où } \frac{\partial S}{\partial h} = \begin{cases} 12,03 & \text{pour } h < 0,8 \\ 22,33 & \text{pour } h \geq 0,8 \end{cases}$$

Le second terme en $u^2(S_0)$ correspond à l'incertitude sur la topographie. Elle est estimée par une loi rectangulaire sur la dispersion des relations $S \ h$ pour les topographies de la section de référence de 2010, 2011, 2013 et 2014 (figure 13). La largeur de la loi rectangulaire est définie par la largeur maximum de dispersion, soit $1,34\text{m}^2$. Ce terme permet de prendre en compte l'incertitude de la topographie engendrée par les détarages sur plusieurs années.

Résultats

On obtient en utilisant l'équation suivante :

$$u^2(Q_{VT}) = \left(1 - \frac{v_{oiS} h}{Q_{VT}}\right)^2 u^2 k_i + \left(1 - \frac{v_{oiS} h}{Q_{VT}}\right)^2 u^2 v_{mes} + \frac{\partial S^2}{\partial h} \cdot u^2(h) + u^2(S_0) \quad (21)$$

L'incertitude composée $u^2(Q_{VT})$ correspond à une incertitude élargie de $2 u(Q_{vt})$. Elle est homogène à un faisceau à 95% (figure 18). L'incertitude issue de l'analyse bayésienne et l'incertitude approximée de Q_{VT} par la méthode issue du GUM ne sont pas rigoureusement comparables. Cependant, cette comparaison donne une première approche sur les incertitudes issues de la méthode de la vitesse témoin. La superposition des deux courbes est rassurante en bas débit. En haut débit, on ne dispose pas de jaugeage, la courbe de la méthode de la vitesse témoin présente donc un intérêt puisqu'elle est construite sur des observations des couples h_{mes}, v_{mes} même si la relation entre V et v_{mes} n'est pas établie par des observations. Elle semble plus proche de la réalité.

L'incertitude associée au débit Q_{VT} a une moyenne de 30% sur l'ensemble des données.

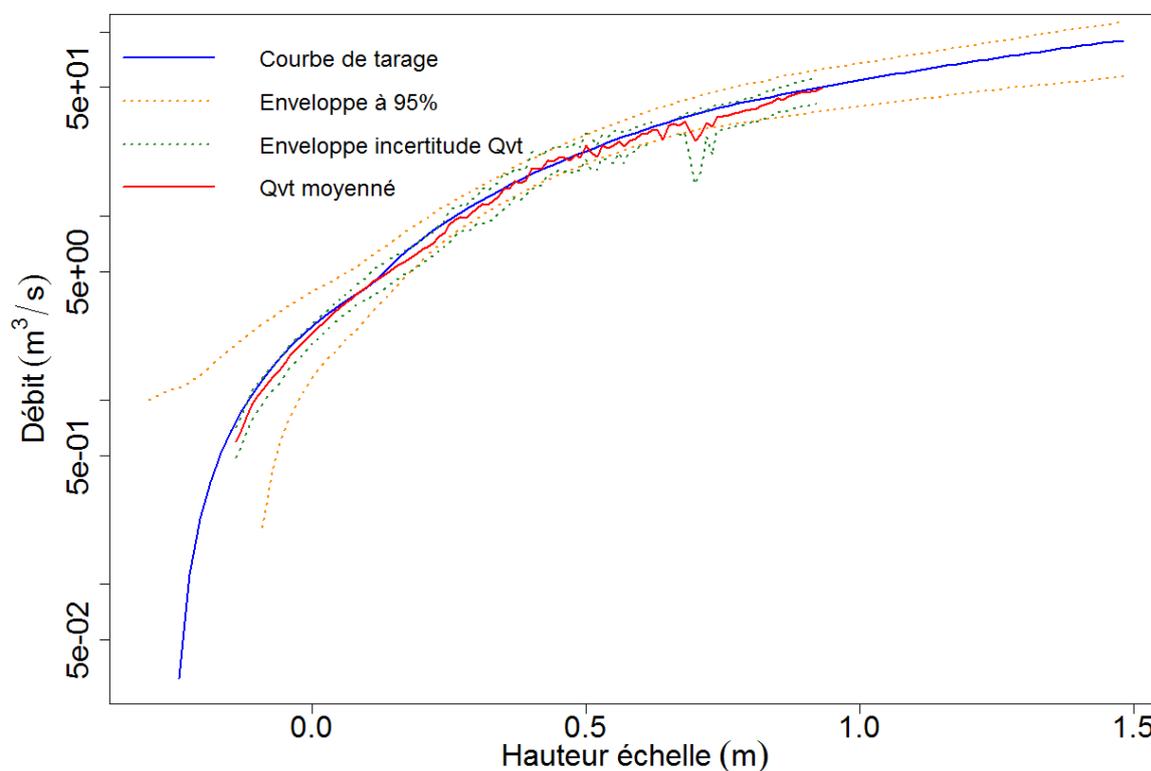


Figure 18 : Courbe de tarage et faisceau d'incertitude d'août 2012 à décembre 2012.

Les incertitudes sur Q_{VT} permettent également de connaître la pondération des paramètres dans l'incertitude totale. La figure 19 représente la répartition des quatre termes dans la somme des

variances (équation 21), par simplification des légendes, les parts sont appelées $v(v_{mes})$, $v(k)$, $v(S_0)$, et $v(S)$. Suivant les hauteurs d'eau la pondération des paramètres diffère : l'incertitude sur la topographie est prépondérante pour des hauteurs d'eau supérieures à 0,10m. Puis pour des hauteurs comprises entre 0,11m et 0,36m, l'incertitude sur le paramètre k devient prépondérante. Pour des hauteurs d'eau supérieures à 0,36m, le paramètre k reste prépondérant, l'incertitude sur la vitesse v_{mes} prend un part plus importante dans l'incertitude totale. Le découpage des hauteurs d'eau ne correspond pas aux gammes de hauteur des contrôles hydraulique car sur la période considérée les données sont trop peu nombreuses pour des hauteurs d'eau élevées. De manière générale, le troisième contrôle est rarement prévalant (figure 8). La part de l'incertitude liée aux détarages, $u^2 S_0$, représente plus de la moitié de l'incertitude totale pour des hauteurs inférieures à 0,11m et plus du quart de l'incertitude élargie quelle que soit la hauteur d'eau.

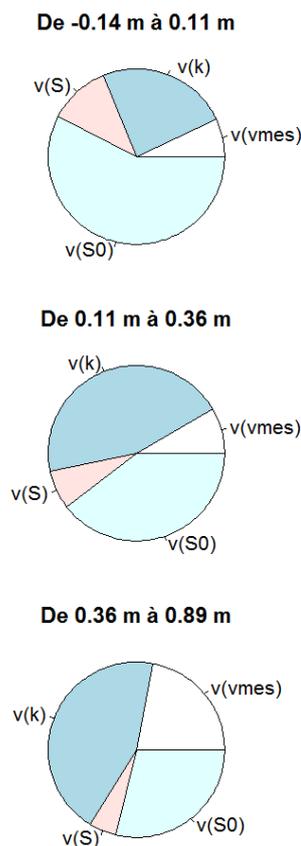


Figure 19 : Répartition des incertitudes par paramètre sur les 3 gammes de hauteurs.

Le calcul d'incertitude suivant la méthode du GUM présente pour le débit Q_{VT} des approximations importantes. Pour des hauteurs d'eau importantes, l'incertitude liée à v_{mes} s'éloigne de la réalité puisque les données sont moins fréquentes, la dispersion est moins importante et donc l'incertitude diminue. Cette approche ne tient pas compte de l'incertitude liée au paramètre v_0 et à la formulation mathématique de la relation $V(v_{mes})$.

Sur une période stable sur la station de Saint-Jean de Maurienne, cette première approche des incertitudes montre que la méthode de la vitesse témoin est intéressante puisque les incertitudes associées au débit Q_{VT} ne sont pas plus importantes que les incertitudes associées au débit Q_{CT} . En effet, l'enveloppe à 95% de la max-post est large car les jaugeages sont dispersés et leur nombre est faible. La principale difficulté consiste à obtenir un nombre de jaugeage suffisant pour construire une

courbe de tarage sur une période de stabilité. Outre la différence sur le faisceau d'incertitude, la différence de sensibilité au détarage des deux méthodes est à remarquer.

4.4.4 Sensibilité au détarage du calcul de débit

Les résultats sur les détarages et les débits nous mènent à l'hypothèse que le débit Q_{VT} est moins sensible au détarage que le débit Q_{CT} . En effet, en reprenant l'équation 5, lors d'un détarage, la valeur de la vitesse débitante V est affectée mais la mesure de la vitesse de surface v_{mes} nous permet de prendre un compte le détarage. Le coefficient k semble avoir une sensibilité au détarage limitée, un dépôt ou un changement de bathymétrie ne changera pas forcément la répartition de la vitesse sur la section. Puis, la surface mouillée S dépend de la hauteur d'eau et de la bathymétrie de la section de référence. A la station, S connaît des variations inférieures à 10% pour une hauteur d'eau supérieure à 10cm. La méthode classique, quant à elle, est plus sensible au détarage puisqu'elle ne dépend que de la hauteur d'eau et d'une courbe de tarage. Un changement de la section de contrôle aura un impact plus important. L'épisode de crue d'octobre 2013 montre cette différence de sensibilité. On observe un changement deux fonctions dans la relation $H-Q_{VT}$ au passage de la crue.

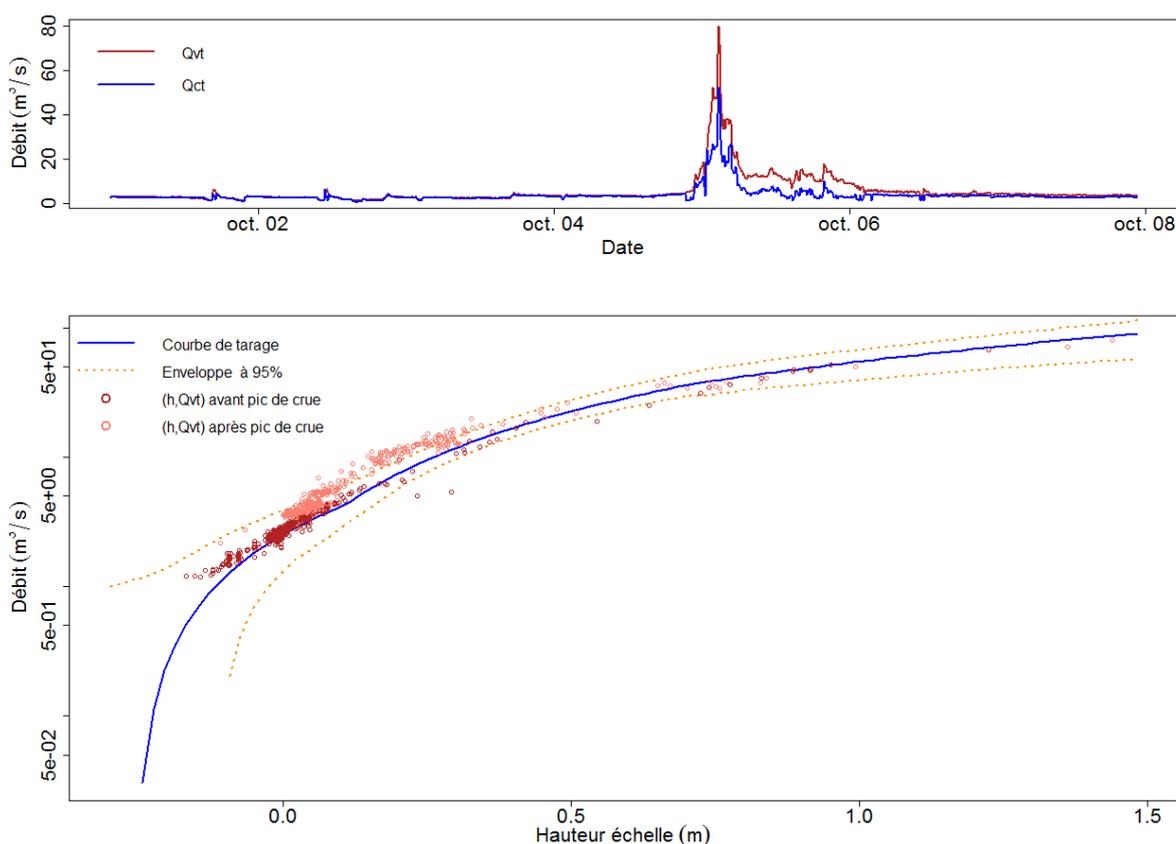


Figure 20 : Chroniques de débit et relations de tarage pour la première semaine d'octobre.

Par ailleurs, l'utilisation de la méthode de la vitesse témoin présente un second intérêt dans l'ajustement de la relation après un détarage. En effet, après le passage d'une crue, la méthode de la vitesse témoin est plus facilement ajustable au changement de morphologie que la méthode employant une courbe de tarage. La construction d'une nouvelle courbe de tarage demande plusieurs jaugeages à plusieurs niveaux d'eau tandis que la méthode de la vitesse témoin demande

une simple mise à jour de la bathymétrie. Ainsi, la méthode de la vitesse témoin semble adaptée à la station de Saint-Jean de Maurienne puisqu'elle est plus sensible au détarage, et demande moins de déplacement sur le terrain. Elle donne un débit aux incertitudes comparables à celles de Q_{CT} .

5 Détection des détarages

La particularité de la station de Saint-Jean de Maurienne est la modification des contrôles hydrauliques au cours du temps. Les détarages engendrent une modification de la courbe de tarage, la station peut donc passer par plusieurs équilibres dynamiques au cours de l'année. L'acquisition d'une vitesse d'écoulement permet de détecter ces détarages.

Les résultats présentés dans la partie suivante proviennent des données de l'année 2013, du 1^{er} mars au 1^{er} juillet 2013, cette période couvre le début de la fonte printanière. Sur cette période d'observation, on repère un détarage par un changement dans la relation H-V (figure21).

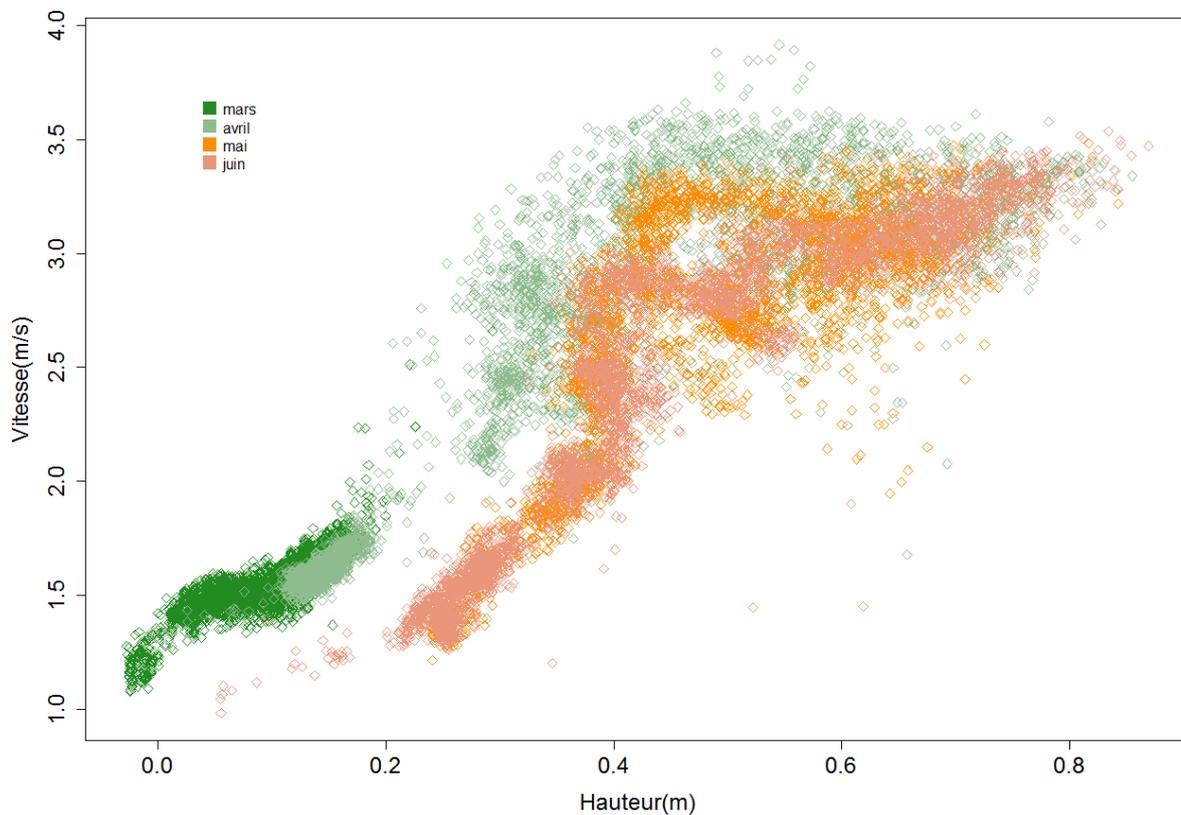


Figure 21 : Relation hauteur-vitesse du mois de mars au mois de juin 2013

Dans cette partie on se propose d'utiliser les méthodes présentées en 2.5.1 pour détecter ce détarage connaître sa raison et la gamme de hauteur qu'il concerne. Cette étude permet également de comparer les tests proposés.

5.1.1 Méthode $V(t)$ à H fixé

Les résultats de la figure 22 sont issus de la méthode $V(t)$ pour les hauteurs de 0,5m 0,4m et 0,3m. Pour chacune des chroniques de vitesse, on repère les dates où les variations de vitesse dépassent le seuil défini par l'écart-type journalier des vitesses. Le premier graphe comporte la chronique de hauteur ainsi que des barres de couleur qui indique les périodes pour chacune des hauteurs fixées où les variations de hauteur dépassent le seuil. Les parties de la chronique grisées représentent l'ensemble les hauteurs d'eau pour l'ensemble de ces périodes. Le second graphique montre les chroniques journalières représentées par des lignes et les points représentent les données de vitesse de surface. A une hauteur donnée, le test s'effectue jour par jour, on constate donc que le détarage est détecté en premier par la hauteur à 0.3m puis par la hauteur 0.4m et enfin par la hauteur 0.5m. Le test paraît plutôt sensible aux lâchés de barrage, puisque à la hauteur de 0.4m, une variation de vitesse singulière est détectée au lâché de barrage du 27 juin 2013. Cette méthode a l'intérêt d'utiliser des grandeurs mesurées pour détecter directement des détarages. Néanmoins, suivant la hauteur que l'utilisateur se fixe, les résultats diffèrent, puisque la hauteur d'eau n'est pas forcément enregistrée le jour du détarage. De plus, pour les hauteurs d'eau peu usuelles, la dispersion de mesure est faible et donc le seuil de détection faible. Ainsi, le test peut être trop sensible pour des hauteurs d'eau rarement enregistrées. Finalement, ce test permet de signaler que la période de fonte entraîne des variations de vitesse importantes pour les trois gammes de hauteurs étudiées. On peut l'encadrer par la période du 23 avril au 20 mai. Ce test demande donc une expertise pour repérer les détarages.

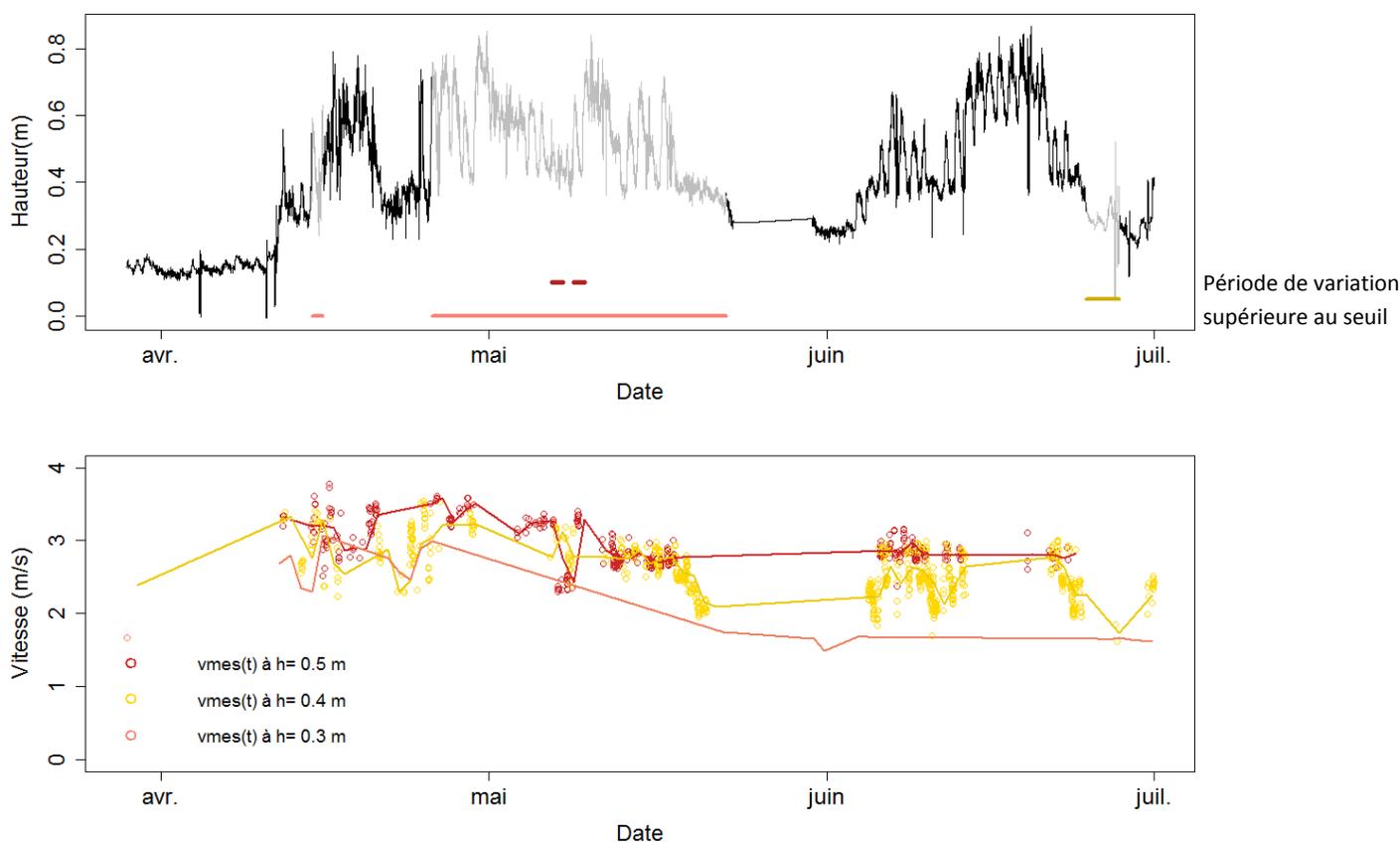


Figure 22 : Détection de détarage par la méthode de $V(t)$ à H fixé du 1^{er} mars au 1^{er} juillet 2013

5.1.2 Méthode de variation du débit (Méthode ΔQ)

Sur la période du 1^{er} avril 2013 au 1^{er} juillet 2013, on repère les sous-périodes de plus de 7 jours, telles que la différence entre le débit Q_{VT} et Q_{CT} dépasse un seuil de 20%. Les sous-périodes identifiées sont telles que plus de 95% des résidus de débits sont supérieurs à 20% du débit Q_{VT} . Le premier graphe de la figure 23 présente les chroniques de débits Q_{VT} et Q_{CT} . Le second graphe représente les résidus relatifs des débits. Ce test détecte des périodes illustrées en rouge sur les chroniques de débit et de résidus. Ce test repère des décalages dans les débits dès le mois de mars. Les deux débits semblent très différents pour les faibles débits et pour les forts débits. Ce test ne permet pas de repérer clairement un détarage pour plusieurs raisons. Le calage entre les deux débits n'est pas effectué et est délicat à réaliser puisque nous ne disposons pas assez de jaugeages sur une même période stable.

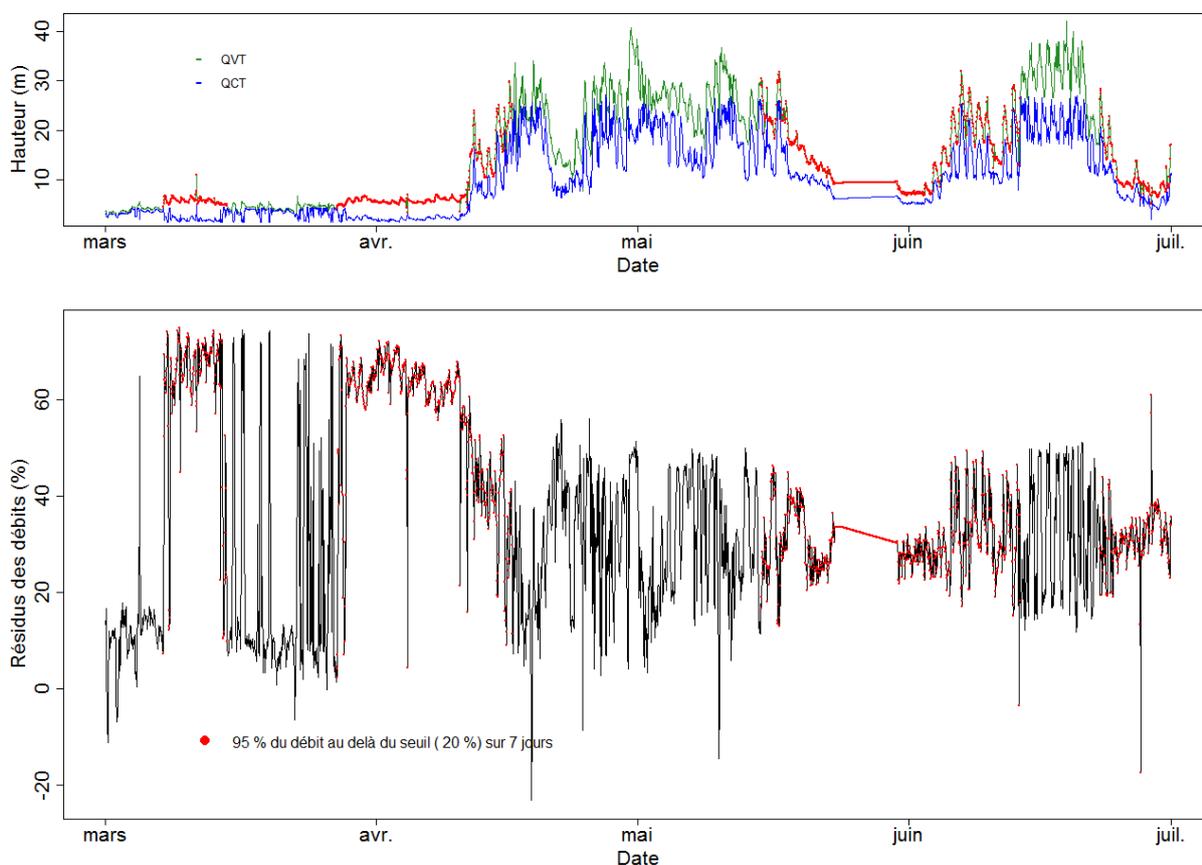


Figure 23 : Détection de détarage par la méthode ΔQ du 1^{er} mars au 1^{er} juillet 2013, chronique de hauteurs et de résidus

5.1.3 Méthode de la relation hauteur vitesse

Sur la même période on effectue le test 1 sur le signe des résidus de vitesses mesurées par rapport à la vitesse d'une courbe de référence et le test 3 sur le critère du faisceau à 95% issu de BaRatin.

La courbe hauteur-vitesse de référence

La courbe de référence est construite sur la période de mars à début avril. Cette période est choisie pour obtenir une gamme de hauteur large et également pour sa stabilité d'après la visualisation de la relation H-V sur cette période. On effectue l'échantillonnage de 80 points en tirant 10 couples sur 8 gammes de hauteurs réparties régulièrement. La max-post résultant de BaRatin est la courbe de référence pour les tests (figure 24).

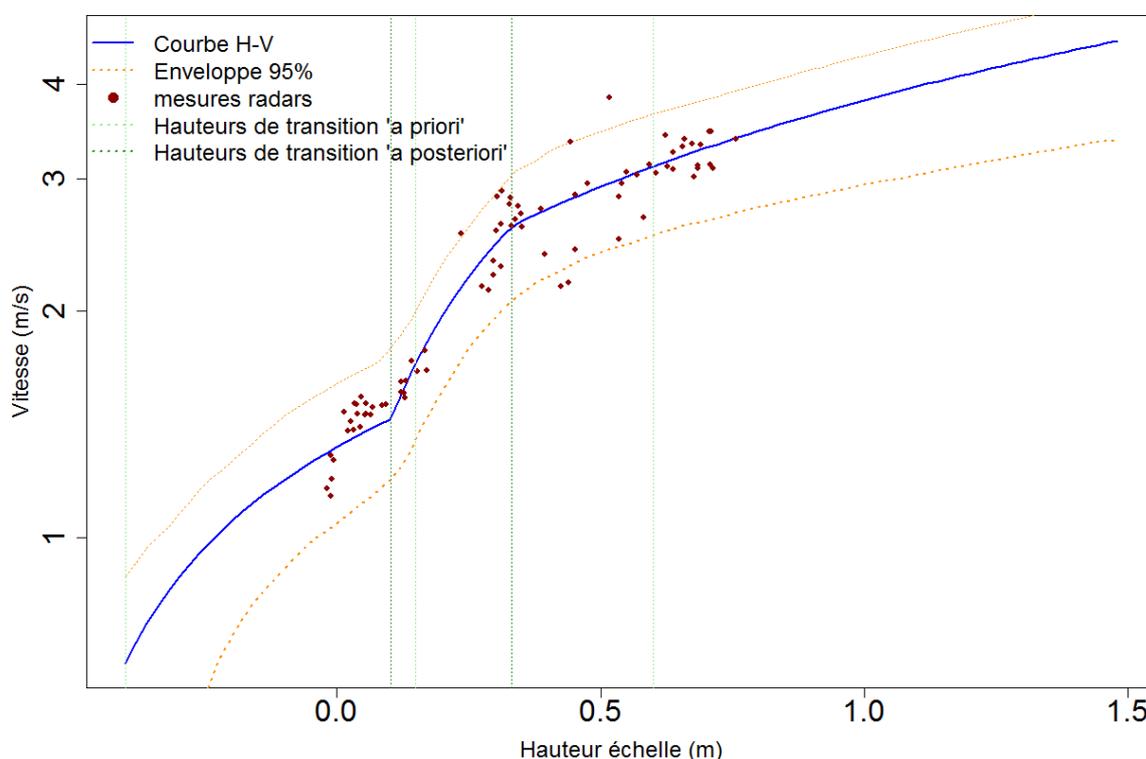


Figure 24 : Relation hauteur vitesse sur la période du 1^{er} mars au 20 avril 2013 en échelle logarithmique issue de BaRatin

Test 1 : étude du signe du résidu sur les vitesses (figure 25).

La figure 26 présente la chronique de hauteur et la chronique de résidu de vitesse. La sous-période glissante est de 7 jours, et le pourcentage de résidus de même signe retenu est de 95%. Ainsi, en couleur sont indiquées les parties de chroniques où plus de 95% des résidus sont du même signe sur une période de 7 jours. Ce test permet de dater le détarage à quelques jours près, autour du 20 juin 2013. Ce détarage est visible sur les résidus seulement pour les gammes de hauteur inférieures à 0.4m puisque les résidus entre le 6 et 23 juin sont proches de zéro comparé à la période du 16 mai au 5 juin. L'intérêt de construire un test sur le signe du résidu permet de détecter des détarages faibles, et des tendances de changement de contrôle.

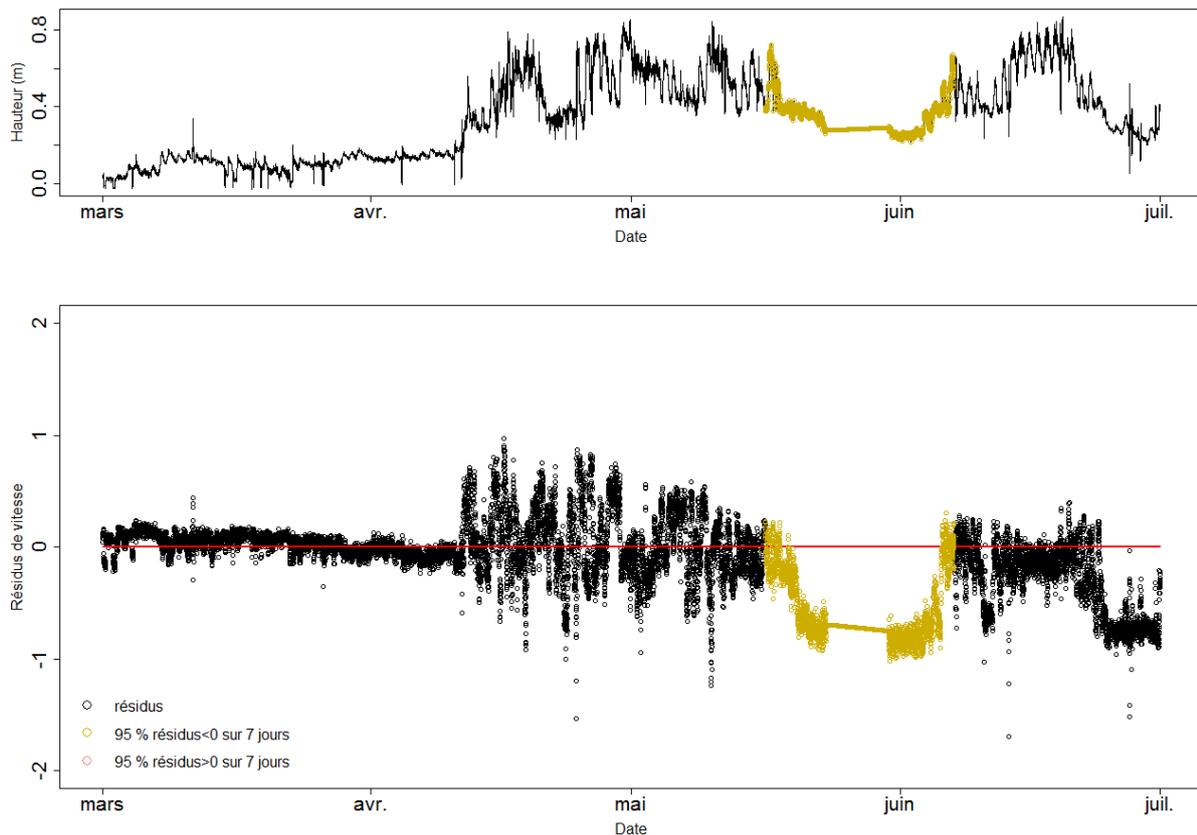


Figure 25 : Détection de détarage par le signe des résidus de vitesse sur la période du 1^{er} mars 2013 au 1^{er} juillet 2013

Test 3 : Comparaison au faisceau de BaRatin

La sous-période glissante est de 7 jours, et le pourcentage de mesure au-delà du faisceau sur une sous-période qui constitue le critère d'identification des périodes de détarage est de 5%. D'après ces critères, la relation de tarage obtenue (figure 26) sort du faisceau à 95% par deux fois, du 15 avril 2013 jusqu'au 29 avril 2013 et du 9 mai au 1^{er} juillet. Les dix jours entre les deux périodes où les points de mesures sont en dehors du faisceau correspondent à des débits relativement hauts. On peut donc signaler qu'un détarage a eu lieu pendant la fonte des neiges avec un changement dans la relation H-V pour les hauts débits de façon temporaire dans un premier temps et pour les bas débits de manière plus notable.

On constate qu'au mois de juin, les variations journalières sont très marquées, ces variations peuvent avoir un impact. Qu'elle est la sensibilité du test à ces variations ?

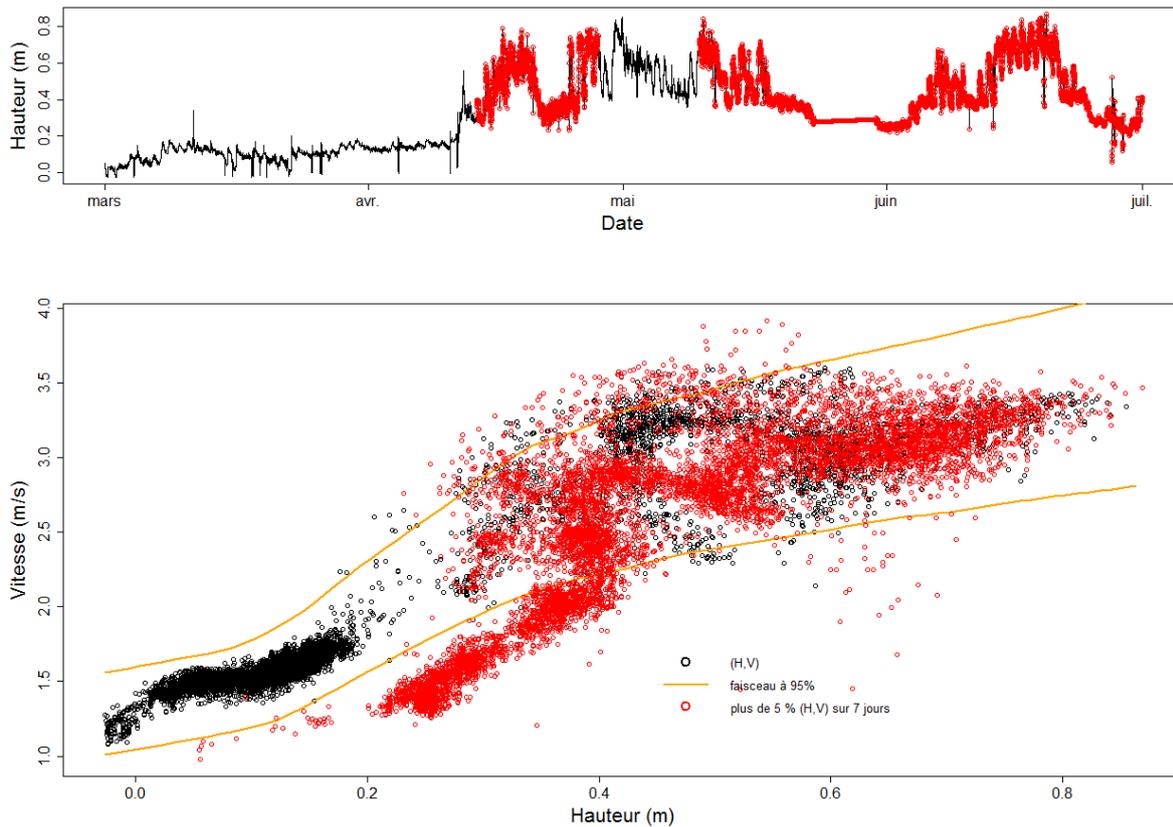


Figure 26 : Détection de détarage par le faisceau à 95% issu de BaRatin du 1^{er} mars 2013 au 1^{er} juillet 2013

5.1.4 Discussion

Le premier constat est que les 4 tests représentés n'identifient pas les mêmes périodes de potentiel détarage. Ce constat souligne la différence de sensibilité au détarage entre les méthodes et les tests. Ces différences proviennent des seuils fixés, de la période de référence et des méthodes.

La première méthode a comme avantage de ne pas dépendre d'une période de référence. Cependant, elle dépend d'une hauteur h_f que l'utilisateur fixe. Cette hauteur détermine la gamme sur laquelle on identifie les détarages. Si cette hauteur a une occurrence faible, le test va identifier une période de potentiel détarage longue. Les difficultés de cette méthode sont de déterminer une hauteur d'eau adéquate à la période d'observation, puis de gérer la forte sensibilité du test. Cette difficulté du choix de h_f peut être contournée par l'utilisation d'une grandeur intermédiaire telle que le débit. La sensibilité du test peut être diminuée en lissant les vitesses.

La deuxième méthode présentée permet d'identifier des périodes d'anomalies sur l'ensemble des hauteurs. Elle compare les deux débits n'ayant pas la même sensibilité au détarage. Contrairement à la méthode précédente, elle nécessite une période de référence stable pour construire le premier débit Q_{CT} . Sur l'Arvan, on peut contester la construction du débit Q_{CT} , puisque le nombre de jaugeages en période stable est faible. De plus, la méthode demande à l'utilisateur de fixer 3 paramètres. La sensibilité du test dépend fortement des choix des paramètres de l'utilisateur mais également de la précision des calculs de débit puisque le test s'appuie sur une valeur calculée.

La méthode H-V a pour avantage de reposer sur des valeurs mesurées et de permettre la détection de détarages sur l'ensemble des hauteurs. L'utilisation de test glissant permet de diminuer la

sensibilité aux erreurs aléatoires de mesures. Les tests 1 et 2 sont complémentaires puisque le test 1 permet de détecter de très faibles détarages tandis que le test 2 dépend de la grandeur du faisceau issu de BaRatin, ils n'ont pas les mêmes critères. Cependant, dès qu'une période est détectée et un détarage effectif diagnostiqué, une nouvelle courbe de référence H-V doit être construite.

Le tableau 5 synthétise quelques éléments de comparaison entre les différents tests et méthodes.

Méthode	V(t) à H fixée	ΔQ	H-V	
			Test 1	Test 3
Grandeur	v_{h_f}	ΔQ	$\text{sgn}(r_v)$	v_{mes}
Nombre de paramètres fixés par l'utilisateur	2	3	2	2
	h_f S_{h_f}	Période glissante Pourcentage Seuil	Période glissante Pourcentage	Période glissante Pourcentage
Période stable de référence	non	oui	oui	Oui
Détection sur l'ensemble des hauteurs	non	oui	oui	Oui

Tableau 5 : Comparaison des méthodes de détection de détarage

Suivant la station, l'activité hydroélectrique, les données disponibles et le régime du cours d'eau, les méthodes sont plus au moins aisées à mettre en œuvre. Sur la station de Saint-Jean de Maurienne, les tests 1 et 2 semblent les plus adaptées puisqu'ils détectent sur l'ensemble des hauteurs par l'intermédiaire d'une grandeur mesurée v_{mes} . Sur la période d'observation du 1^{er} mars au 1^{er} juillet, un détarage est causé par la fonte des neiges après le 11 avril 2013.

En conclusion, ces méthodes de détection facilitent le repérage d'anomalies dans les relations H-V et H-Q et donc des changements dans les contrôles hydrauliques. Néanmoins, ils ne s'affranchissent pas d'une expertise de l'utilisateur pour acter un détarage. L'inconvénient majeur est que leur sensibilité dépend de paramètres fixés par l'utilisateur.

6 Perspectives

Les perspectives sont nombreuses et concernent plusieurs points.

- Perspectives d'amélioration de la mesure sur la station :

La station de Saint-Jean de Maurienne équipée d'un radar, et dotée du jeu actuel de jaugeages, ne permet pas de caler la courbe de tarage et la courbe $V(v_{mes})$ pour des hauteurs supérieures à 0,8 m. Des jaugeages pour les gammes de hauteurs supérieures à 0,8m permettraient d'affiner cette relation et de réduire la part de l'incertitude associée au paramètre k dans le calcul d'incertitude de Q_{VT} .

La construction d'un modèle hydrosédimentaire unidimensionnel permettrait de simuler les détarages d'origine morphodynamique et leurs conséquences sur les différents segments de la courbe de tarage $Q(h)$, mais aussi des courbes $V(h)$ et $S(h)$. Le modèle affinerait également les a priori hydrauliques dans la méthode BaRatin.

La station est constituée d'un lit composé, le radar unique montre alors ces limites pour représenter la vitesse débitante quand le lit composé est mobilisé. Néanmoins, le modèle hydrosédimentaire pourrait également apporter de l'information sur la répartition des vitesses dans le lit majeur.

- Perspectives sur le calcul d'incertitude sur la vitesse témoin :

Le calcul d'incertitude reste approximatif, il propage la dispersion des mesures mais ne tient pas compte des a priori sur la formulation mathématique. Plusieurs pistes d'amélioration se dessinent. Dans un premier temps, en gardant l'approche par la méthode du GUM, on pourrait affiner le calcul, en prenant en compte l'incertitude sur le paramètre v_{0i} , en améliorant les connaissances sur la distribution de k (par des jaugeages), ou encore la loi a priori sur la dispersion de la topographie. Enfin pour comparer de manière homogène les deux débits, Q_{VT} et Q_{CT} les incertitudes doivent provenir des mêmes méthodes et des hypothèses identiques de calculs doivent être prises. Une analyse bayésienne sur une relation S-V serait appropriée à la comparaison en hypothèse de stabilité.

- Perspectives sur la détection de détarage :

L'utilisation de la méthode BaRatin pour les couples (h,v) est une originalité apportant des méthodes de détection intéressantes, cependant pour généraliser ces méthodes, des applications à d'autres stations hydrométriques sont nécessaires. Il serait intéressant de tester ces méthodes dans des stations similaires, mais également sur des stations où l'impact des aménagements hydroélectriques est moins important.

Conclusion

L'étude approfondie d'une station hydrométrique instable équipée d'un radar sans contact a mis en exergue des nouveaux éléments pour la détection des détarages. La mesure de la vitesse fournit une donnée appréciable pour ce type de station. L'application de la méthode de la vitesse témoin semble appropriée : on obtient un débit moins sensible au détarage. Le calcul d'une incertitude approchée par la méthode GUM permet d'identifier les paramètres les plus sensibles, et de donner des pistes d'amélioration du dispositif de mesure. Ainsi, l'obtention de bathymétries proches des dates de détarage et de quelques points de jaugeage supplémentaires en haut débit permettraient de perfectionner la mesure. De plus, la méthode de la vitesse témoin met en évidence les limites de la méthode classique pour cette station. L'acquisition d'une vitesse d'écoulement permet de déceler les non stationnarités de la station en visualisant les variations dans les relations H-V. L'étude d'autres stations pourraient fournir des éléments de réponses et améliorer les méthodes de détection. Enfin, cette méthode est à relier aux avancées technologiques sur la mesure de la bathymétrie. Des hydrophones, échosondeurs et radars immergés sont testés actuellement par des laboratoires français. De tels appareils pourraient faciliter l'acquisition de la bathymétrie et ainsi favoriser la mise en œuvre de cette méthode et son déploiement en routine sur le terrain par les services hydrométriques.

Références bibliographiques

Audinet M., (1995), *Hydrométrie appliqués au cours d'eau*, éditions Eyrolles, Collection de la direction des études et recherche d'électricité, 17p.

Bechon P.M. (2012), *Guide de l'utilisateur de BAREME*, 100 p.

Costa, J.E., Chang, R.T., Haeni, F.P., Melcher. N., Teague, C., and Barrisck, D., (2006), *Use of radars to monitor stream discharge by noncontact methods*, Water-Resources Research, 42, W07422.

Dramais, G., Le Coz, J., Camenen, B., Hauet, A. Duby, P. (2011), *Utilisation des mesures sans contact pour quantifier le débit des rivières torrentielles*. Colloque SHF : « L'eau en montagne : mieux observer pour mieux prévoir », Lyon, 16-17 mars 2011. 11 p.

EDF Unité de Production Alpes GEH Vallée de la Maurienne, l'Arvan (2011), plaquette de communication. 4p.

Fougerit V. (2011), *Calculs des chroniques de débit et de flux sédimentaire*. Mémoire de stage, Irstea, Lyon. 8-23.

Jalbert, Mathevet, and A.-C. Favre., (2011) *Temporal uncertainty estimation of discharges from rating curves using a variographic analysis*. Journal of Hydrology, 397:83–92, 2011.

JCGM 100:2008 (GUM), *Evaluation of measurement data-guide to the expression of uncertainty in measurement*. JCGM member organizations (BIPM, IEC, IFCC, ILAD, ISO, IUPAP and OIMIL), 2008, 120p.

Héraud, A.-L. (2012). *Analyse des données d'un radar de vitesse de surface*. Mémoire de stage, DREAL Rhône-Alpes. 24p.

Le Coz, J., Renard, B., Bonnifait, L., Branger, B., Le Boursicaud, R. (2013), *Combining hydraulic knowledge and uncertain gaugings in the estimation of hydrometric rating curves: a Bayesian approach*, Journal of Hydrology. 509,573-587

Le Coz J., Camenen B., Peyrard X., Dramais G., (2012), *Uncertainty in open-channel discharges measured with the velocity-area method*, Flow Measurement and Instrumentation 26 18-29

Le Coz J., Camenen B., Dramais G., Ribot-Bruno J., Ferry M., Rosique J.L., (2011), *Contrôle des débits réglementaires, Application de l'article L. 214-18 du Code de l'environnement*, Onema/Irstea.

Levesque, Oberg, (2012) *Computing Discharge Using the index velocity method*, USGS, Virginia.

McMillan H., Krueger T., Freer J., (2012), *Benchmarking observational uncertainty for hydrology: rainfall, river discharge and water quality*, Hydrological Processes 26 (26) 4078-4111.

Morlot T., Perret C., Favre A.C., Jalbert J., (2014), *Dynamic rating curve assessment for hydrometric stations and computation of the associated uncertainties: Quality and station management indicators*, Journal of Hydrology, 517:173-186.

Perret C., Morlot T., Favre A.C., (2013), *La gestion dynamique des relations hauteur-débit des stations d'hydrométrie et le calcul des incertitudes associées : un indicateur de qualité et de suivi*, La Houille blanche, 6 :24-30.

Nicollet, G. et Uan, M. (1979), *Ecoulements permanents à surface libre en lits composés*. La Houille Blanche, 1:21-30.

NF EN ISO 748 (2009), *Mesure de débit des liquides dans les canaux découverts – Méthodes d'exploration du champ des vitesses*, Norme ISO, 50 p.

Rantz SE., (1982), *Measurement of stage and discharge*. Vol. 1. Water-Supply Paper 2175. Washington: US Geological Survey

Sommer GmbH, (2012), *RQ-24 Contact free discharge measurement for channels and open rivers using radar technology*, Product information.

SOREA Dossier de presse de l'inauguration du barrage de Clapeys juin 2012
http://energie2007.fr/images/upload/sorea_dossier_de_presse_barrage_clapeys_juin2012.pdf

Thollet F. et Dramais G. (2011), *Mesures hydrosédimentaires sur la zone atelier Arc-Isère Année 2010*. Cemagref, Lyon. 23p.

Thollet F. (2012), *Mesures hydrosédimentaires sur la zone atelier Arc-Isère Année 2011*. Cemagref, Lyon.

Westerberg, I., Guerrero, J.-L., Seibert, J., Beven, K.J., Haldin, S., (2011), *Stage discharge uncertainty derived with a non stationary rating curve in the Choluteca River, Honduras*. Hydrological Processes 25,603-613.

World Meteorological Organization (2010), *Manual on Stream Gauging Computation of discharge*, volume II.

Liste des acronymes

ADCP : Acoustic Doppler Current Profiler

ADV : Acoustic Doppler velocimetry

BaRatin : Bayesian RATING curve analysis

EDF : Électricité De France

ECV : Exploration du champ des vitesses

ENTPE : Ecole Nationale des Travaux Publics de l'Etat

GUM : Guide Uncertainty Measurement

INSA : Institut National de Sciences Appliquées

Irstea : Institut national de Recherche en Sciences et Technologies pour l'Environnement et l'Agriculture

MCMC : Monte-Carlo par chaînes de Markov

PAMHYR : Programme d'Aide à la Modélisation en HYdraulique des Rivières

PK : Point Kilométrique

TFE : Travail de Fin d'Études

SVR : Surface Velocity Radar

SNCF : Société Nationale des Chemins de Fer français

USGS : United State Geological Survey

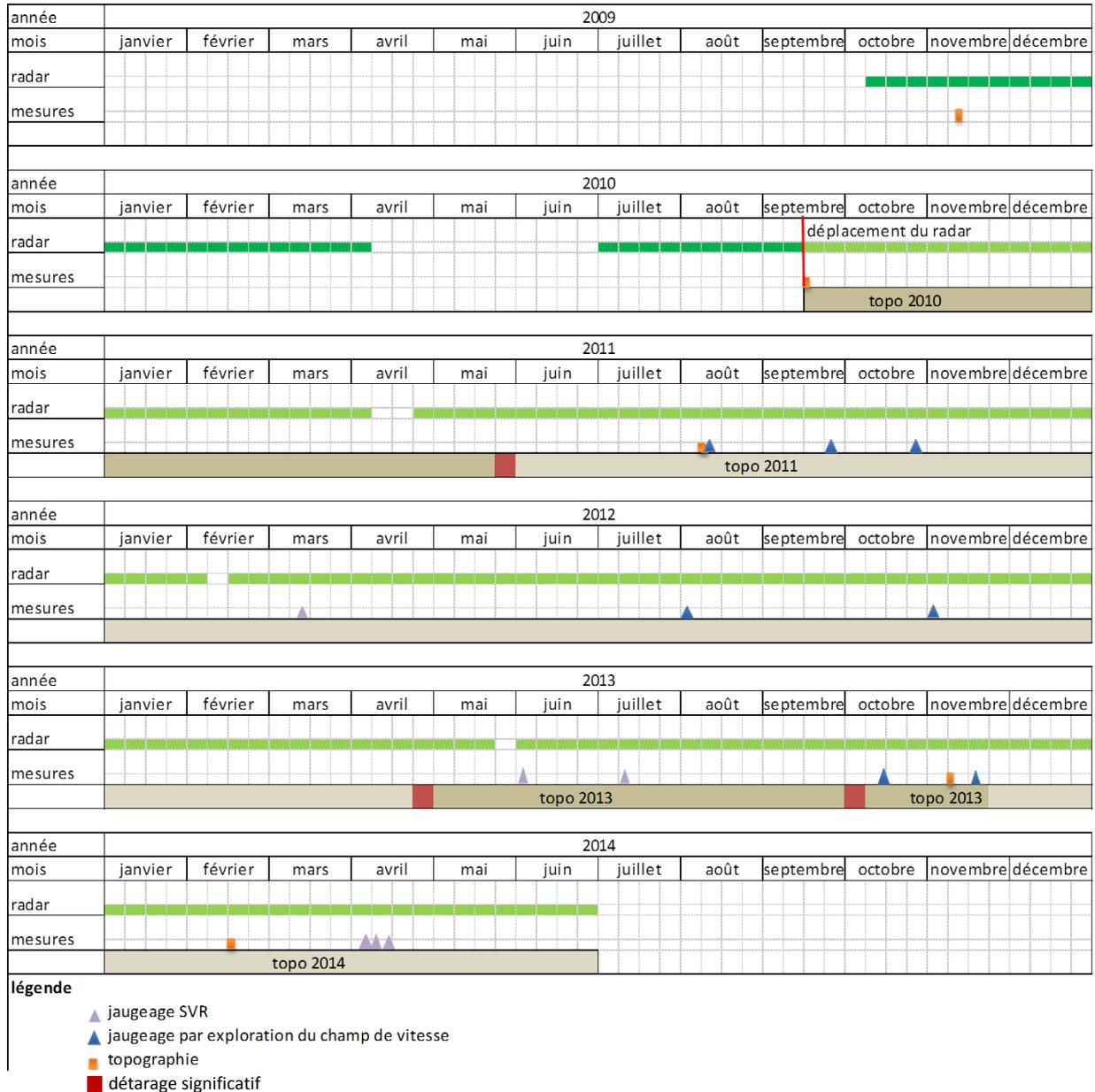
Liste des notations

a_i	Coefficient correspondant au contrôle i dans la méthode Baratin	USI
B	Largeur du cours d'eau	m
b_i	Coefficient correspondant au contrôle i dans la méthode Baratin	m
C	Coefficient de débit	Sans dimension
c_i	Coefficient correspondant au contrôle i dans la méthode Baratin	Sans dimension
f	Formulation mathématique de la relation $Q(h)$	
g	Accélération de pesanteur	m/s^2
h	Hauteur d'eau	m
h_f	Hauteur d'eau fixée	m
h_0	Niveau de crête de seuil	m
i	Pente de la ligne d'eau	Sans dimension
j	Pente de la ligne d'énergie	Sans dimension
K	Coefficient de résistance à l'écoulement	$m^{1/3}/s$
K_r	Hauteur définissant la borne supérieur du contrôle r	m
k_t	Coefficient de vitesse verticale à la vitesse débitante sur la section	Sans dimension
k_v	Coefficient de vitesse ponctuelle à la vitesse moyenne verticale	Sans dimension
k	Coefficient de vitesse passant de la vitesse de surface à la vitesse débitante	Sans dimension
Q	Débit	m^3/s
Q_{CT}	Débit issu d'une courbe de tarage	m^3/s
Q_{VT}	Débit issu de la méthode de la vitesse témoin associé	m^3/s
r	Numéro de la gamme de hauteur	
r_v	Résidu sur les vitesses	m/s
$r_{v,s}$	Résidu sur les vitesses standardisé	Sans dimension
S	Section mouillée	m^2
S_{h_f}	Seuil	Sans dimension
T_a	Hauteur entre la surface d'eau et l'émetteur radar	m
t	Date	hh :mm jj/mm/aaaa
u	Incertitude relative	
V	Vitesse moyenne débitante	m/s

v_{mes}	Vitesse de surface mesurée par le radar	m/s
v_0	Vitesse débitante lorsque v_{mes} est nulle	m/s
v_{mes}	Vitesse moyenne sur la verticale du radar	m/s
v_j	Vitesse journalière	m/s
α	Angle d'inclinaison du radar de vitesse Sommer	°
ϵ	Erreur	
θ	Paramètres de contrôles hydrauliques	
σ	Ecart-type	°
φ	Angle d'ouverture du radar de vitesse Sommer	

Annexes

Annexe A : Chronologie des mesures sur la station de l'Arvan de 2009 à 2014 : jaugeages, topographies, radar



Une visualisation mois par mois des couples (h,v) a permis de détecter trois détarages importants. A partir de ces dates de détarage approximatives, les topographies ont été affectées à des périodes.

Annexe B : Incertitudes : méthode de la norme ISO 748 et Q+

La méthode de calcul d'incertitude de la norme ISO 748 donne la formule simplifiée suivante en considérant les mêmes incertitudes sur chacune des verticales de jaugeages:

$$u_Q^2 = u_s^2 + u_m^2 + \frac{1}{m}(u_b^2 + u_h^2 + u_p^2 + \frac{1}{n}(u_c^2 + u_e^2))$$

Elle a été construite pour la mesure de l'incertitude d'un débit mesuré par jaugeage au moulinet.

u_Q : est l'incertitude type composée relative(en pourcentage) sur le débit.

u_s : est l'incertitude-type relation aux erreurs systématique de l'instrumentation.

u_m : est l'incertitude due au nombre limité de verticales.

u_b : est l'incertitude-type relative à la largeur.

u_h : est l'incertitude-type relative à la profondeur.

u_p : est l'incertitude-type relative à l'intégration de la vitesse sur la verticale.

m : est le nombre de verticale.

u_c : est l'incertitude sur la vitesse due aux erreurs aléatoire de mesure.

u_e : est l'incertitude aux fluctuations de vitesse dans le cours d'eau

Les incertitude-types composantes de l'incertitude sur le débit sont indiquées dans l'Annexe E de la norme ISO 748 mais ne sont pas toujours applicable à tous jaugeages par exploration du champ des vitesses.

L'incertitude Q+ a été développée par Irstea en intégrant l'incertitude liée à l'intégration des vitesses sur la verticale et l'intégration transversale des vitesses. Elle fait intervenir un angle, qui décrit les variations de topographie. Dans le dépouillement des jaugeages de la station de l'Arvan un angle α de 20° a été choisi pour le calcul des incertitudes.

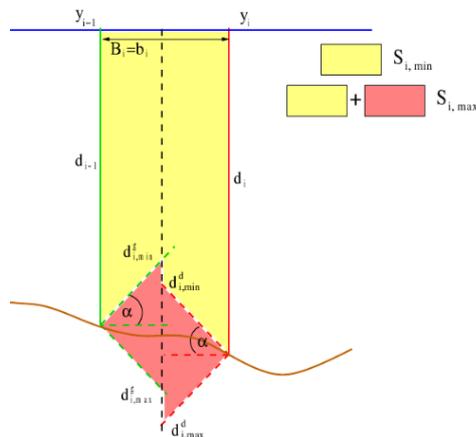


Figure : Profil en travers représentant le découpage de la surface mouillée pour le dépouillement d'un jaugeage avec la méthode Q+

Annexe C : Liste des jaugeages

Date Heure	Cote (cm)	Débit (m3/s)	Section mouillée (m2)	Vitesse moyenne (m/s)	Mode de Jaugeage	Incertitude validée %	Incertitude calculé (Q+) %
05/08/2011 10:03	0	3,06	3,47	0,88	PP	8	8
22/09/2011 14:07	-6	1,26	2,11	0,6	SVR	15	23
25/10/2011 09:39	-6	2,02	2,86	0,71	PP	11	11
19/03/2012 17:00	20	7,66	5,33	1,44	SVR	22	22
30/07/2012 14:10	-3,5	1,72	2,95	0,58	PP	7	7
30/10/2012 08:52	-6	1,48	2,48	0,6	PP	10	10
30/05/2013 16:20	28	10,1	8,06	1,25	SVR	14	14
08/07/2013 12:26	29	10,6	7,79	1,36	SVR	14	14
08/10/2013 07:30	-6	2,54	2,96	0,86	PP	15	8
18/11/2013 12:49	3	2,89	3,61	0,8	PP	6	6
13/02/2014 15:52	7	2,76	3,71	0,74	PP	5	5
07/04/2014 11:40	33	14,2	7,87	1,81	SVR	16	
07/04/2014 15:37	40	16,2	8,82	1,84	SVR	15	15
08/04/2014 09:06	42	17,5	8,6	2,04	SVR	23	23
21/05/2014 09:09	30	12,6	8,3	1,52	SVR	15	15
21/05/2014 12:52	30	13,1	8,48	1,55	SVR	15	15
05/06/2014 11:00	23	8,33	6,21	1,34	SVR	11	11

Annexe D: Jaugeage au radar mobile de vitesse de surface

Le radar de vitesse de surface aérien mobile est un instrument permettant de mesurer la vitesse de surface d'un écoulement. Il nécessite que la surface de l'écoulement soit rugueuse et utilise les mêmes principes physiques que le radar Sommer. Cet instrument de mesure est utilisé pour compléter la courbe de jaugeage de la station de l'Arvan pour des hauteurs d'eau supérieures à 20 cm d'après lecture de l'échelle limnimétrique.

Le radar de vitesse de surface permet dans notre cas un jaugeage rapide et sans risque pour les opérateurs. Le choix de son utilisation est motivé par l'absence d'autres moyens de mesure adaptés à la station et disponible. La vitesse d'écoulement étant importante, la turbidité également un jaugeage à l'ADCP est difficilement réalisable. Les mesures au moulinet et ADV et courantomètre sont également difficilement réalisable en raison des vitesses importantes.



Figure : Photo de l'Arvan vue du pont vers l'amont avec installation du radar SVR (Fabien Thollet)



Figure : Image de profil du radar SVR
(source : <http://www.decatursvr.com/index.html>
22/05/2014)