

Groupe Doppler France

Intercomparaison ADCP sur le canal de La Gentille (12-16/09/2011)

Rapport – Version définitive (14/12/2012)

Rédacteurs : A. Hauet¹, J. Le Coz², D. Sevrez¹, G. Dramais², F. Henault¹, C. Perret¹, G. Pierrefeu³, K. Pobanz³, F. Thollet²

¹ EDF – DTG ; ² IRSTEA ; ³ CNR



13/09/2011 – Amont de l'usine de La Gentille

Sommaire

Sommaire	2
Liste des Figures.....	4
Résumé	6
Abstract	7
1 Introduction	8
2 Organisation	9
2.1 Participants	9
2.2 Matériels.....	10
2.2.1 Profileurs	10
2.2.2 Logiciels	10
2.3 Logistique.....	11
2.3.1 Site.....	11
2.3.2 Planning.....	12
2.3.3 Sécurité.....	12
3 Protocole.....	12
3.1 Aménagement des transects et déploiement des ADCP.....	12
3.2 Débits « de référence ».....	13
3.3 Mesures complémentaires	13
3.4 Série de mesure	14
3.5 Réglage du matériel.....	14
3.6 Analyse des résultats en temps réel et après l'intercomparaison	15
4 Analyse des conditions hydrauliques de mesure	15
4.1 Stabilité du débit et du niveau	15
4.2 Analyse des profils verticaux ADCP et du coefficient de surface	20
4.2.1 Évolution longitudinale du coefficient de vitesse de surface dans le canal.	20
4.2.2 Évolution latérale du coefficient de vitesse de surface dans le canal.....	24
5 Analyse métrologique des incertitudes ADCP	26
5.1 Résultats des mesures ADCP	26
5.1.1 Intercomparaison des mesures ADCP par série	26
5.1.2 Intercomparaison des mesures ADCP par appareil.....	27
5.1.3 Intercomparaison des mesures ADCP par type d'appareil.....	28
5.2 Estimation des incertitudes par comparaison interlaboratoire	30
5.2.1 Méthode d'analyse	30
5.2.2 Examen des données	30

5.2.3 Résultats	31
6 Comparaisons des différentes techniques et différents appareils de mesure.....	33
6.1 Mesure au camion jaugeur	33
6.2 Comparaison mesures en amont du pont.....	36
6.3 Comparaison mesures en aval du pont.....	38
7 Essais par dilution à la rhodamine WT (GD et CP)	41
7.1 Conditions de l'expérimentation	41
7.2 Injection G1 & G2 du 13 septembre	42
7.3 Comparaison au débit usine pour G1	44
7.4 Comparaison au débit usine pour G2	44
7.5 Injection C1 du 14 septembre.....	45
7.6 Cas de la sonde Hydrolab.....	46
7.7 Mesure du débit de C1	46
7.8 Injection G3 du 14 septembre	47
7.9 Comparaison au débit usine pour G3	48
7.10 Injection G4 du 15 septembre	48
7.11 Test de sensibilité sur le dépouillement	50
7.12 Conclusion.....	51
8 Conclusions et retour d'expérience.....	52
9 Bibliographie	54
Annexe 1 : Intercomparaison des débits ADCP par série : graphiques.	55
Annexe 2 : Liste des équipes prises en compte dans la comparaison interlaboratoire.....	60
Annexe 3 : Résultats des statistiques h et k de la comparaison interlaboratoire	61

Liste des Figures

Figure 1 : Situation en France et vue globale centrée sur le canal de la Gentille (source Google Earth).....	11
Figure 2 : Positionnement des passerelles P1 à P6 (de l'amont vers l'aval) sur le canal de la Gentille, latéral à la Garonne.....	11
Figure 3 : Débits turbinés du 13/09 au 15/09, pendant l'intercomparaison. Les séries de l'intercomparaison sont illustrées en couleur.....	16
Figure 4 : Enregistrements de niveau d'eau aux ponts P1, P5, P6 et dans le bassin de mise en charge (BMC) de l'usine de la Gentille, pendant les journées d'intercomparaison.....	17
Figure 5 : Débits turbinés du 13/09, pendant l'intercomparaison. Les séries de l'intercomparaison sont illustrées en couleur.....	18
Figure 6 : Débits turbinés du 14/09, pendant l'intercomparaison. Les séries de l'intercomparaison sont illustrées en couleur.....	18
Figure 7 : Débits turbinés du 15/09, pendant l'intercomparaison. Les séries de l'intercomparaison sont illustrées en couleur.....	19
Figure 8 : Évolution longitudinale du coefficient de surface déduit des profils verticaux ADCP (série stationnaire S30), en conservant la vitesse mesurée la plus haute. Les profils ADCP sont numérotés de l'aval vers l'amont.	21
Figure 9 : Évolution longitudinale du coefficient de surface déduit des profils verticaux ADCP (série stationnaire S30), en excluant la vitesse mesurée la plus haute. Les profils ADCP sont numérotés de l'aval vers l'amont.	21
Figure 10 : Profils verticaux de vitesse moyens de chaque appareil sur la série stationnaire S30 mesurés au centre du canal pendant XXX minutes. Les vitesses ADCP en bleu sont associées au profil théorique de vitesse en loi puissance en rouge. Le coefficient de surface issu de l'intégration en trapèzes et celui issu de la loi puissance calée sont indiqués pour comparaison.	24
Figure 11 : Analyse des profils verticaux de vitesse en travers de la section, à partir des séries 10, 24, et 27.....	25
Figure 12 : Courbe de densité des écarts des débits moyens de chaque appareil au débit moyen de la série. :.....	27
Figure 13 : Densités de probabilité des écarts au débit moyen de chaque série, par type d'appareil.....	29
Figure 14 : Série S13 - Incertitudes sur la mesure de débit issue de la moyenne de N transects et p ADCP. Attention, les valeurs inférieures à 2 ou 3 % sont sans doute sous-estimées dans la mesure où le biais sur la méthode ADCP a été négligé.....	32
Figure 15 : Série S14 - Incertitudes sur la mesure de débit issue de la moyenne de N transects et p ADCP. Attention, les valeurs inférieures à 2 ou 3 % sont sans doute sous-estimées dans la mesure où le biais sur la méthode ADCP a été négligé.....	33
Figure 16 : Série S31 - Incertitudes sur la mesure de débit issue de la moyenne de N transects et p ADCP. Attention, les valeurs inférieures à 2 ou 3 % sont sans doute sous-estimées dans la mesure où le biais sur la méthode ADCP a été négligé.....	33
Figure 17 : Mesures au saumon hydrométrique déployé par camion jaugeur.....	34
Figure 18 : Restitution du logiciel Jasmine pour le jaugeage réalisé au camion hydrométrique	34
Figure 19 : Profil vertical de vitesse normalisé: mesures au camion hydrométrique (croix) et loi puissance d'exposant 1/8 calée (ligne rouge)	35

Figure 20 : Schéma d'une section en travers trapézoïdale avec les débits mesurés et extrapolés par l'ADCP.	36
Figure 21 : Visée radar SVR depuis la passerelle avec en arrière-plan le camion-jaugeur	37
Figure 22 : Vitesses de surface mesurées lors de la série 22 en amont du pont P6 par différentes techniques : ADCP (cellules du haut), flotteurs (citrons), camion jaugeur (moulinet en surface) et radar vélocimétrique SVR	37
Figure 23 : Une image telle qu'enregistrée par la caméra et la même image orthorectifiée en vue de l'analyse des vitesses LSPIV.....	38
Figure 24 : Champ moyen de vitesse de surface obtenu pour l'essai LSPIV_1.	39
Figure 25 : Vitesses de surface moyennes LSPIV pour l'essai LSPIV_4, correspondant à la série ADCP S22, et mesures simultanées au camion jaugeur et au citron.	40
Figure 26 : Canal de la Gentille (injection : point rouge, mesures : points violet) Geoportail	42
Figure 27 : Injection globale au centre de la section avec rinçage du seau.....	42
Figure 28: Variations du débit pendant les traçages G1 & G2 du 13 septembre	43
Figure 29 : Variations de fluorescence au pont aval pendant les traçages G1 & G2	44
Figure 30 : Le dispositif d'injection pour les traçages à débit constant.....	45
Figure 31 : Signal de rhodamine WT observé au pont aval pour les traçages C1 et G3.....	46
Figure 32 : Variations du débit pendant les traçages du 14 septembre	48
Figure 33 : Variations du débit pendant le traçage du 15 septembre.	49
Figure 34 : Justesse des points de contrôle des fluorimètres.....	50
Figure 35 : Valeurs de débits obtenues en dépouillant avec les valeurs de calibration 1&2. ..	51

Résumé

Du 12 au 16 septembre 2011, le Groupe Doppler¹ a organisé une intercomparaison de mesure de débit par Profileur de Courant Acoustique Doppler (ADCP) sur le canal latéral à la Garonne de La Gentille, en amont de l'usine EDF de La Gentille. Cette intercomparaison ADCP a impliqué 27 équipes déployant 36 ADCP, soit 7 modèles d'ADCP commercialisés par 3 constructeurs concurrents et émettant à des fréquences comprises entre 600 et 3000 kHz selon les appareils. Les mesures ont été effectuées sur un tronçon rectiligne du canal de 200m de long. Malgré le contrôle de l'usine de La Gentille, les conditions hydrologiques d'étiage sévère n'ont pas permis d'assurer un débit constant pendant toutes les sessions de mesure.

Ces journées ont également permis de rassembler les utilisateurs d'une technique de mesure de débit par dilution de rhodamine à injection globale. Une intercomparaison basée sur cette technique a été réalisée. Des mesures de débit par exploration du champ de vitesse au moyen d'un ensemble moulinet-saumon déployé par un camion jaugeur ont donné des valeurs de débit indépendantes de la technologie ADCP et ont permis d'analyser l'extrapolation sur les bords des logiciels ADCP. Des mesures de vitesse de surface par corps flottant (citrons, radar SVR et LSPIV) ont été réalisées et les résultats en terme de vitesse pour ces différentes méthodes sont analysés.

Les débits fournis par les différents appareils ADCP ont été comparés entre eux, ainsi qu'aux mesures indépendantes. De manière générale, les débits moyens obtenus par ADCP sont en bon accord entre eux (écarts inférieurs à 5%).

Une estimation de l'incertitude de mesure de la méthode ADCP dans les conditions de mesure de l'intercomparaison a été réalisée à partir des méthodes normalisées d'essais interlaboratoires. Les incertitudes élargies au niveau de confiance de 95% obtenues sont entre 6 % et 7,5 %, pour un seul transect ADCP. En réalisant la moyenne de 6 transects successifs, les incertitudes élargies au niveau de confiance de 95% obtenues sont entre 4 % et 6 %.

L'intercomparaison a été appréciée par l'ensemble des participants, qui ont pu également bénéficier d'échanges techniques avec d'autres hydromètres parfois éloignés géographiquement, dans une ambiance conviviale. Le retour d'expérience (logistique, propagation et stabilisation des débits, hydraulicité des sections de mesure) permettra d'optimiser le planning des futures intercomparaisons.

¹ Groupe technique inter-organismes d'utilisateurs francophones d'ADCP constitué en 2005.

Abstract

On September 12-16, 2011, the Groupe Doppler² organized an intercomparison test of discharge measurements by Acoustic Current Doppler Profiler (ADCP) in the Canal de La Gentille upstream of La Gentille EDF power plant. This intercomparison involved 27 teams deploying 36 ADCP of 7 models from 3 concurrent manufacturers with operating frequencies ranging from 600 to 3000 kHz. Discharge measurements were realized on a straight reach of the channel of 200m. A constant discharge could not be maintained for the whole measurement sessions because of drought and very low flow conditions.

An intercomparison of chemical gauging method using RWT tracer was also performed. Measurements using propeller current-meter gave discharge values which can be compared to ADCP, especially in terms of edge discharge extrapolations. Free surface velocities measurements were also performed using oranges, SVR Radar and LSPIV.

The discharges yielded by the different instruments were compared all together, and against independent measurements. Overall mean ADCP discharges are consistent (differences less than 5%).

An estimation of the measurement uncertainty of the ADCP technique, in the measurement conditions of the intercomparison, was conducted following standard methods for interlaboratory tests. The covered uncertainty ($k=2$, 95% confidence level) of mean discharges over discharge stages ranges between 6 % and 7,5% for a unique ADCP transect. 6 transects averaging leads to a covered uncertainty ranging between 4 % and 6 % at a 95 % confidence level.

The intercomparison was appreciated by all the participants who could also have technical exchange with other hydrometers sometimes geographically remote, in a friendly atmosphere. The feedback on the organization, on the propagation and stabilization of discharge, on the hydraulic conditions at cross-sections, will help optimize the planning of next intercomparisons.

² French-speaking ADCP user group created in 2005

1 Introduction

Les Profileurs de Courant Acoustiques Doppler (ADCP), utilisés en France à partir de 1994 pour mesurer le débit des cours d'eau, ont révolutionné les pratiques hydrométriques. Lors d'une traversée de la rivière d'une rive à l'autre, l'appareil, immergé en surface de l'écoulement, mesure les profondeurs et les vitesses d'écoulement qui permettent de calculer le débit d'eau s'écoulant à travers la section de mesure. Cette technique a fait l'objet de vérifications au sein des équipes d'hydrométrie. Dans de bonnes conditions d'utilisation, il est admis généralement que l'incertitude sur le débit obtenu est de l'ordre de 5%. En l'absence d'étalon de débit raccordé, les intercomparaisons ADCP sont un moyen utile d'évaluer l'incertitude de la technique dans des conditions de mesure données. Plusieurs intercomparaisons ADCP ont été organisées dans différents pays (par exemple : (Everard, 2009), (Everard, 2007), (Iredale, 2006) ou (Terek, et al., 2008) (Terek, et al., 2008).

Le Groupe Doppler est un groupe de travail réunissant des utilisateurs francophones d'ADCP et constitué en 2005 à l'initiative de la CNR, d'EDF, du Cemagref, de l'IRD et des services hydrométriques d'Etat (DREAL, DRIEE).

Les 3-4-5 février 2009, le Groupe Doppler a organisé la première intercomparaison ADCP inter-organismes en France sur la Vézère au pont de Garavet à Allasac (Corrèze). Cette intercomparaison a permis de comparer les débits mesurés par 35 appareils déployés par 21 équipes, soit 7 modèles d'ADCP commercialisés par 4 constructeurs concurrents et émettant des ultrasons à des fréquences comprises entre 600 et 3000 kHz selon les appareils (Le Coz, et al., 2009).

Du 12 au 15 octobre 2010, le Groupe Doppler a organisé une seconde intercomparaison de mesure de débit par ADCP par bateau sur le Rhône à l'aval du barrage de Génissiat, exploité par la CNR (Pobanz, et al., 2011). Cette intercomparaison ADCP a impliqué 6 modèles d'ADCP commercialisés par 2 constructeurs concurrents (Teledyne RDI and Sontek) et de fréquence nominale comprise entre 600 et 3000 kHz. De manière générale, les débits moyens obtenus par ADCP sont en bon accord entre eux (écarts inférieurs à 5%). Une estimation de l'incertitude de mesure de la méthode ADCP dans les conditions de mesure de l'intercomparaison a été réalisée à partir des méthodes normalisées d'essais interlaboratoires. En considérant l'ensemble des 26 ADCP déployés, l'incertitude élargie ($k=2$, niveau de confiance 95%) des débits moyens par palier est inférieure à 2%. L'incertitude d'un débit ADCP individuel (moyenne de 4 transects consécutifs) est variable selon les sites et le débit considéré de 4 à 6% sur un site favorable, et de 8 à 12% sur un site moins favorable.

La troisième intercomparaison s'est déroulée du 12 au 16 septembre 2011 sur le canal de la Gentille, en amont de l'usine EDF de La Gentille (Haute Garonne), faisant l'objet du présent rapport. Les mesures ont été menées grâce à des flotteurs tractés par des drisses tendues de part et d'autre du canal. EDF a assuré l'organisation logistique et le plan de prévention des risques. Les débits turbinés mesurés à l'usine permettent une mesure en continu et indépendante de la technologie ADCP.

Les journées des 13, 14 et 15 septembre 2011 ont permis de mesurer des débits variant de 9 à 18 m³/s. L'intercomparaison ADCP a permis de comparer les débits mesurés par 27 équipes

déployant 36 ADCP, soit 7 modèles d'ADCP commercialisés par 3 constructeurs concurrents et émettant à des fréquences comprises entre 600 et 3000 kHz selon les appareils.

Ces journées ont également permis de rassembler les utilisateurs d'une technique de mesure de débit par dilution de rhodamine à injection globale. Une intercomparaison basée sur cette technique a été réalisée. Des mesures de débit par exploration du champ de vitesse au moyen d'un ensemble moulinet-saumon déployé par un camion jaugeur ont donné des valeurs de débit indépendantes de la technologie ADCP et ont permis d'analyser l'extrapolation sur les bords des logiciels ADCP. Des mesures de vitesse de surface par corps flottant (oranges, radar SVR et LSPIV) ont été réalisées et les résultats en terme de vitesse pour ces différentes méthodes sont analysés.

Les objectifs de ces essais étaient donc les suivants :

- comparer les débits ADCP entre eux
- comparer les débits ADCP avec les débits issus des groupes de l'usine de la Gentille ;
- comparer les débits ADCP avec les autres méthodes de mesure déployées (camion-jaugeur et moulinet, mesures par flotteurs, mesure par dilution)
- tester et comparer les débits mesurés par dilution de rhodamine à débit constant
- permettre des échanges techniques au sein du réseau d'utilisateurs sur les différents matériels et leur mise en œuvre ;
- disposer d'un retour d'expérience (REX) sur le protocole d'organisation des intercomparaisons ADCP sur bateaux motorisés, en vue des suivantes.

Les paragraphes suivants rapportent les résultats de l'intercomparaison « La Gentille 2011 » ainsi que les éléments de retour d'expérience correspondants.

2 Organisation

2.1 Participants

27 équipes de jaugeage ont assuré le déploiement des 36 ADCP pendant les essais. Ces équipes, identifiées par un trigramme, ont été constituées par :

- Des services hydrométriques d'Etat :
 - DREAL Aquitaine (AQU)
 - DREAL Auvergne (AUV)
 - DREAL Nantes (NAN)
 - DREAL Pays de Loire (ANG)
 - DREAL Bourgogne (BRG)
 - DREAL Rhône Alpes (RAL)
 - DREAL Limousin (LIM)
 - DREAL Lorraine (LOR)
 - DREAL Midi-Pyrénées (MPY)
 - DREAL Centre (CTR)
 - DREAL PACA (PAC)
 - ONEMA Toulouse (ONM)
 - SPC Dordogne (DOR)
 - SPC Littoral Atlantique (ATL)
 - SPC Vienne Thouet (VTH)
- Une société d'aménagement :

- Compagnie d'Aménagement des Coteaux de Gascogne (GAS)
- Des producteurs d'électricité :
 - Compagnie nationale du Rhône (CNR)
 - EDF-DTG Brive (BRI)
 - EDF-DTG Grenoble (GRE)
 - EDF-DTG Toulouse (TLS)
 - EDF-DTG Développement Mesures Méthodes (DMM)
 - EDF-R&D LNHE (LNH)
- Des instituts de recherche :
 - Cemagref de Lyon
 - CNRS Bellevue (BEL)
- Des constructeurs des profileurs Doppler impliqués dans cette intercomparaison :
 - Ott (OTT)
 - RDI Teledyne (RDI)
 - Sontek (STK)

La constitution précise des équipes est présentée sous forme de tableau en annexe 1. Ce tableau, répertoriant les organismes, les noms des participants ainsi que le matériel mis à disposition, a été complété par chaque organisme quelques semaines avant l'intercomparaison. Les renseignements synthétiques fournis ont permis de préparer la logistique et la sécurité en fonction du matériel et du nombre de participants. Deux personnes par transect de mesure sont requises, à minima, pour assurer un déroulement optimal des mesures.

L'équipe de coordination comportait 6 personnes, ayant pour rôle l'organisation générale, la logistique générale, la coordination des mesures, la centralisation des données, les échanges d'information, le lien entre l'usine de La Gentille et chaque équipe.

2.2 Matériels

2.2.1 Profileurs

36 ADCP ont été déployés, soit 7 modèles d'ADCP commercialisés par 3 constructeurs concurrents et émettant à des fréquences comprises entre 600 et 3000 kHz selon les appareils. Le Tableau 1 présente les types d'ADCP déployés pour l'intercomparaison.

Code	Modèle	Fréquence	Constructeur	Nombre
RG6	RioGrande 600	600 kHz	Teledyne RDI	1
RR6	RiverRay	600 kHz	Teledyne RDI	2
RG12	RioGrande 1200	1200 kHz	Teledyne RDI	6
M9	M9	1000/3000 kHz	Sontek	2
S5	S5	1000/3000 kHz	Sontek	1
SP	StreamPro	2400 kHz	Teledyne RDI	23
QL	Q Liner		Ott	1

Tableau 1 : types d'ADCP déployés pour l'intercomparaison 2011

2.2.2 Logiciels

Pour l'organisation des intercomparaisons, il est utile de recenser les logiciels utilisés et de définir des versions de référence. Pour homogénéiser le dépouillement des mesures issues de capteurs Teledyne RDI, la dernière version de WinRiver2 a été imposée.

- Teledyne RDI : WinRiver2 (version 2.07 demandée)
- Sontek : RiverSurveyor Live (version 4.00)

2.3 Logistique

2.3.1 Site

Le canal de la Gentille est un ouvrage EDF. C'est un canal parallèle à la Garonne, alimentant l'usine EDF de la Gentille, située dans le village de Miramont de Comminges (31800). Le plan général donné en Figure 1 illustre la localisation du canal de la Gentille.



Figure 1 : Situation en France et vue globale centrée sur le canal de la Gentille (source Google Earth).

Le canal est en béton, d'une longueur de 5km avec une pente longitudinale de 0.03%. Sa forme est trapézoïdale avec un fruit de 1/1 et une largeur au fond de 11 mètres. Il est traversé par une série de passerelles comportant des piles. Plus particulièrement, les mesures ADCP lors de l'intercomparaison ont été déployées autour du premier pont en amont de l'usine (pont n°6, Pt6). La Figure 2 montre les différentes passerelles situées en amont de l'usine, numérotées de P1 à P6 de l'amont vers l'aval.

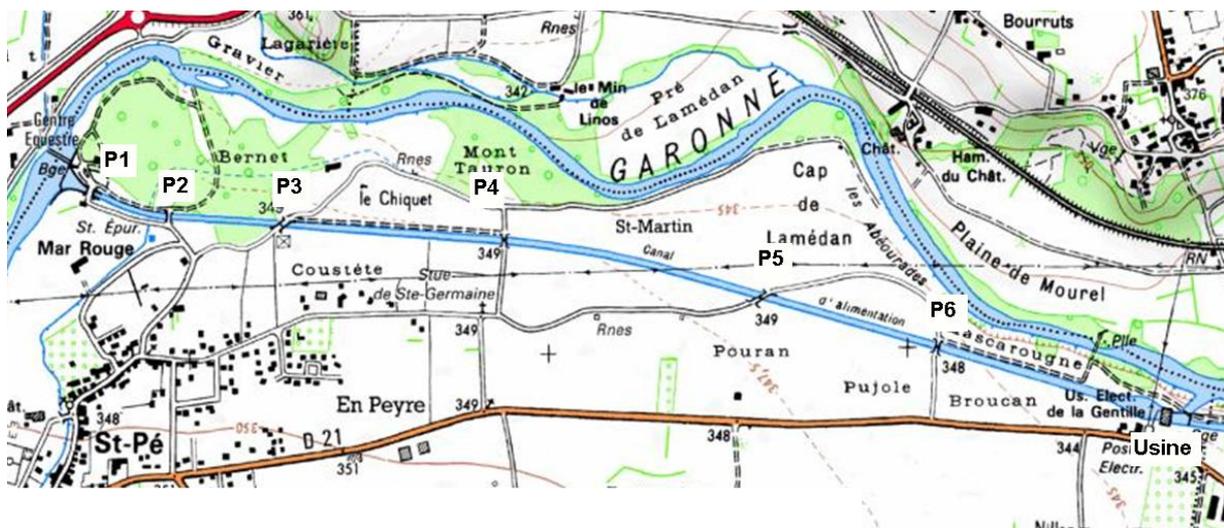


Figure 2 : Positionnement des passerelles P1 à P6 (de l'amont vers l'aval) sur le canal de la Gentille, latéral à la Garonne.

Un bâtiment situé sur le site de l'usine de la Gentille a été prêté par EDF pour y installer le quartier général de l'équipe de coordination (bureau pour le dépouillement et le traitement de la donnée). Le stockage et le rechargement électrique du matériel a pu se faire dans ce local de l'usine de la Gentille.

2.3.2 Planning

La campagne d'intercomparaison « La Gentille 2011 » s'est déroulée du lundi 12 au jeudi 15 septembre 2011.

- lundi 12 :
 - accueil des participants à l'hébergement du Bois Perché
- mardi 13, mercredi 14 et jeudi 15 matin :
 - mesures selon le programme présenté au paragraphe 3.4
- jeudi 15 après-midi :
 - débriefing et bilan au Bois Perché
 - rappels sur l'intégration du profil vertical de vitesse
 - présentation des résultats de mesure des différentes équipes et techniques
 - discussions techniques sur la cohérence de ces résultats
- vendredi 16 :
 - retour des participants

2.3.3 Sécurité

Le plan de prévention des risques a été réalisé quelques semaines avant l'intercomparaison (EDF-DTG et Groupement d'Usine de Camon-Pointis). Il a été lu de manière détaillée à l'ensemble des participants le mardi 13/09/2011 et a été signé par un membre de chaque organisme. On notera les points importants de sécurité suivants (non exhaustif) :

- port du gilet de sauvetage obligatoire pour les opérateurs intervenant au bord de l'eau
- bouées de sauvetage disponibles à intervalle régulier
- port du gilet fluo obligatoire pour les opérateurs intervenant sur les routes et ponts
- contact permanent de l'équipe de coordination avec l'usine
- le GSM passe sur la zone des mesures
- communication des consignes de sécurité de l'usine de La Gentille vers l'équipe de coordination ;
- horaires de fin de mesure à respecter ;
- respect des règles de travail concernant la pause méridienne et la durée totale de travail journalière.

3 Protocole

3.1 Aménagement des transects et déploiement des ADCP

Les transects de mesure sont numérotés et matérialisés de chaque côté du canal au moyen de peinture et de piquets. Ils sont distribués de part et d'autre du pont situé en amont de l'usine de la Gentille, Pt6, sur environ 200 m de part et d'autre. La répartition des équipes sur les transects de mesure du canal s'est faite le mardi matin directement sur place. Cette répartition est consignée sur une grille par l'équipe de coordination. Chaque équipe reste toujours sur le

même transect ensuite. Si elle le souhaite, une équipe peut déployer deux ADCP de fréquences distinctes sur des supports couplés, à condition de bien maîtriser les trajectoires et arrivées aux bords. La coordination des traversées s'est faite depuis le pont Pt6, avec des signaux sonores marquant le début et la fin des séries de 6 traversées.

Les déplacements des supports ADCP sont alternés rive droite rive gauche au départ et les équipes maintiennent autant que possible cette alternance pendant toute la durée du test. La priorité est donnée à la régularité du transect (direction et vitesse sans variation brutale, pas de rotation de l'ADCP sur lui-même) ; la synchronisation précise des trajectoires n'est pas impérative. Le déploiement par support radiocommandé n'a pas été autorisé (uniquement drisse manuelle ou motorisée) à cause des vitesses et de la proximité de l'usine. La communication par bluetooth est imposée avec les ADCP pour éviter toute interférence radio.

De chaque côté du canal, la distance au bord (« laisse ») a été laissée constante pour toutes les traversées, et suffisante pour que l'extrapolation de rives puisse se faire à partir de bonnes mesures de vitesse et profondeur. Elle a donc été fixée à 1,50 m entre le centre de l'ADCP et le point de fleur d'eau en rive, et est contrôlée directement par les opérateurs à l'aide d'un repère fixé sur la corde lors des tests du premier matin.

3.2 Débits « de référence »

- Débits turbinés à l'usine de la Gentille : les puissances produites par les groupes de l'usine sont convertis en débit turbinés via les abaques de rendement. Cette donnée est enregistrée à un pas de temps de la minute.
- Mesure de débit pas exploration du champ de vitesse au moyen d'un ensemble moulinet/saumon déployé à partir d'un camion jaugeur.
- Moyenne des débits ADCP de l'ensemble des équipes. L'écart à cette moyenne permet surtout d'identifier les appareils déviants, en considérant qu'il est plus probable que les ADCP s'écartant systématiquement de la moyenne soient biaisés, plutôt que tous les autres.

3.3 Mesures complémentaires

- Topographie : des mesures topographiques ont été réalisées afin de repérer :
 - les positions géoréférencées des différents instruments de mesure
 - les positions géoréférencées des extrémités de chaque profil ADCP
 - les fleurs d'eau au niveau de chaque limnimètre pour un raccordement NGF
 - les lignes d'eau le long du canal
- Limnimètres : 4 limnimètres provisoires (type Paratronic Mac10) ont été installés sur le canal en amont de l'usine. Ils étaient répartis ainsi : un dans le bassin de mise en charge de l'usine, un au niveau de Pt6 (pont où l'intercomparaison est effectuée), Pt5 et Pt1.
- Température : 1 thermomètre a été installé au niveau du Pt6 pour des mesures ponctuelles à chaque série d'intercomparaison. Cela permet de vérifier les températures mesurées par les ADCP.
- Dilution rhodamine WT : des mesures de débit par dilution de rhodamine WT en injection globale et en injection à débit constant ont été réalisées. Le détail de ces mesures est en partie 7 .

- Mesures de vitesse de surface : des mesures de vitesses de surface ont été réalisées grâce à :
 - Un radar de mesure de vitesse type Decatur SVR
 - Mesure de temps de transit de flotteurs, en utilisant des citrons
 - Analyse d'images de la surface de la rivière ensemencée avec des chips d'amidon (technique LSPIV)

3.4 Série de mesure

14 séries d'intercomparaison ADCP ont été réalisées :

- S01 : série de mise en place, le 13/09 de 12 :05 à 12 :45
- S11 : le 13/09 de 15 :40 à 16 :00
- S12 : le 13/09 de 16 :10 à 16 :25
- S13 : le 13/09 de 16 :30 à 16 :45
- S14 : le 13/09 de 17 :00 à 17 :15
- S21 : le 14/09 de 10 :00 à 10 :30
- S22 : le 14/09 de 10 :40 à 11 :00
- S23 : le 14/09 de 11 :10 à 11 :30
- S24 : le 14/09 de 11 :40 à 11 :55
- S30 : le 14/09 de 15 :00 à 15 :15
- S31 : le 14/09 de 15 :20 à 15 :40
- S32 : le 14/09 de 15 :50 à 16 :05
- S33 : le 14/09 de 16 :20 à 16 :35
- S40 : le 15/09 de 09 :30 à 11 :30

3.5 Réglage du matériel

Les ADCP, les PC, les appareils photos, ont été réglés à l'heure de l'horloge parlante à 5 s près (fuseau horaire TU+2).

Pour l'ensemble des appareils, il a été demandé de fixer la taille des cellules à 20 cm, de minimiser la zone aveugle en haut (blank) et de ne pas moyenniser les ensembles (verticales) de mesure. Pour les appareils RDI, cela donnait les commandes suivantes :

WM12 WS20 WK20 WF0 WN15 WP1 BP1

Paramètres de débit (dans Wizard/Configuration Dialog ou F3/Discharge) :

- shore pings = 5 (au lieu de 10 par défaut)
- berges triangle (valeurs par défaut)
- lois top/bottom : power/power 0.1667 (valeurs par défaut)

Il a été demandé de fixer le nombre d'ensembles de bords à 5. Souvent, la valeur par défaut (10) a été conservée, ce qui n'entraîne pas de différence significative dans les résultats de débit. Pour les appareils RDI, la procédure type de traversée était donc la suivante :

- F5, 5 ensembles bons sur place, traversée, 5 ensembles bons sur place, F5
- Attendre 10 secondes (pour 5 ensembles réussis) avant de démarrer la traversée et avant de terminer l'enregistrement.
- Les utilisateurs Sontek, FlowQuest et Qliner ont transmis leur logiciel à l'équipe de coordination et ont précisé les paramètres utilisés.

3.6 Analyse des résultats en temps réel et après l'intercomparaison

Une analyse des résultats en temps réel a été réalisée par l'équipe coordinatrice. Cette analyse permet aux organisateurs et aux participants de contrôler la bonne marche des essais et d'adapter le protocole en fonction des résultats obtenus. Elle permet également de vérifier immédiatement les problèmes de données manquantes ou de dépouillement à régler avec les participants.

La méthode retenue pour ces essais était de faire remonter régulièrement les fichiers bruts à l'équipe coordinatrice chargée de rejouer l'ensemble des données pour en extraire les résultats à chaud. La collecte des données brutes a été effectuée en fin de chaque demi-journée (une clé USB par équipe). L'architecture imposée est la suivante :

- nom de dossier mesure (1 par série) : Sxx_Pyy_APP_TRI (S suivi du n° de la série xx, P suivi du n° du profil yy, trigramme de l'ADCP APP puis trigramme de l'équipe TRI).

Cette architecture a l'avantage de rendre homogène le classement des données.

4 Analyse des conditions hydrauliques de mesure

4.1 Stabilité du débit et du niveau

Le contrôle du débit dans le canal de la Gentille est assuré par les turbines de l'usine hydroélectrique. La puissance turbinée est convertie en débit turbiné via des abaques de rendement. Les chroniques de débits turbinés ont été fournies par l'exploitant EDF. Comme détaillé en partie 3.1, le débit turbiné provenant de l'usine EDF de la Gentille est en très bon accord avec les mesures ADCP de l'intercomparaison. Comme le site ADCP est très proche de l'usine (propagation négligeable), ce débit peut être utilisé en tant que débit représentatif des conditions hydrauliques de la mesure (Figure 3).

La Figure 3 présente les débits turbinés du 13/09 au 15/09, pendant l'intercomparaison. Les séries de l'intercomparaison sont illustrées sur le graphique.

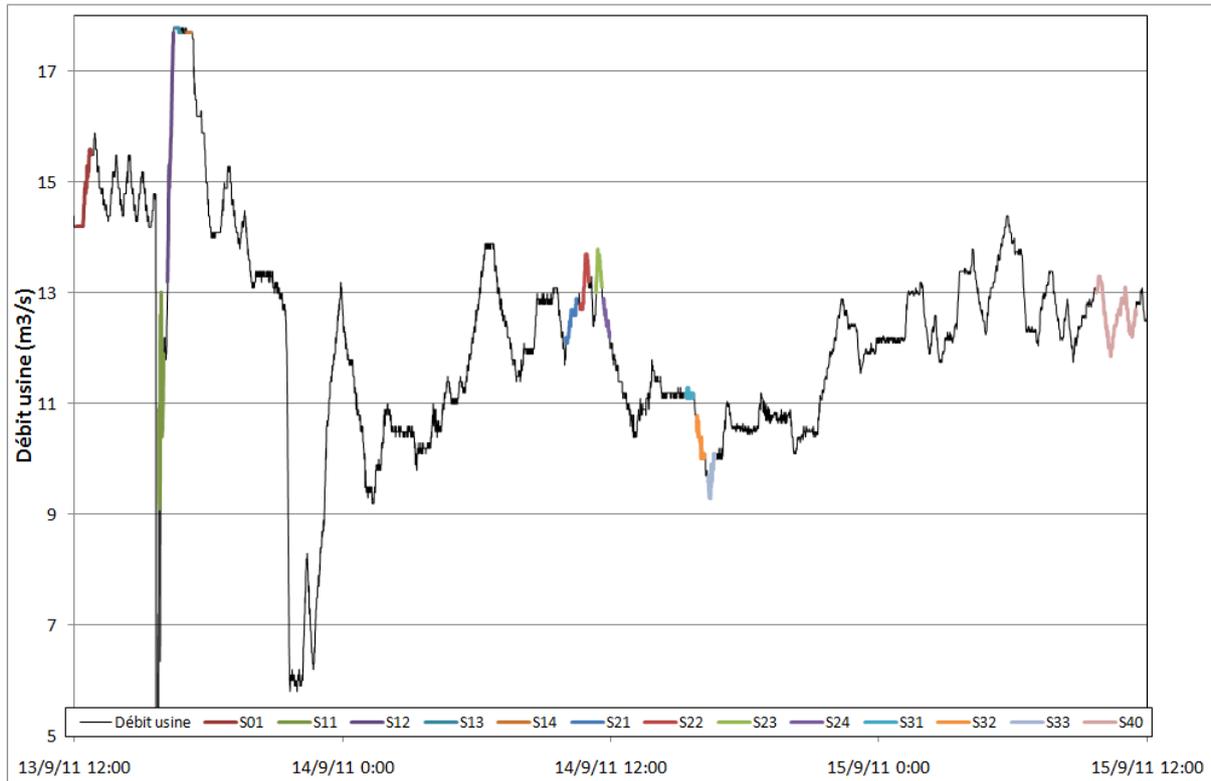


Figure 3 : Débits turbinés du 13/09 au 15/09, pendant l'intercomparaison. Les séries de l'intercomparaison sont illustrées en couleur

A cause des conditions hydrologiques (sécheresse sur le bassin de la Garonne et étiage sévère), le débit n'a pas pu être stabilisé comme prévu à 1% près par l'usine EDF pour chaque demi-journée. La gamme de débit disponible est également limitée de 9 à 18 m³/s. De plus, un incident sur un groupe de l'usine a provoqué un arrêt des turbinés le 13/09, pendant la série d'intercomparaison S11. Des limnimètres ont été installés aux passerelles Pt1, Pt5, Pt6 et au bassin de mise en charge de l'usine (BMC). On constate, sur la Figure 4, que le limnimètre en P1, en aval direct de la prise d'eau sur la Garonne, fluctue beaucoup. Dès Pt5, le niveau se stabilise et la dynamique des fluctuations se retrouve de façon identique en Pt5, Pt6 et au BMC. Hormis l'arrêt des turbinés le 13/09, le niveau en Pt6 batille sur environ 5 cm (1 à 2% du tirant d'eau).

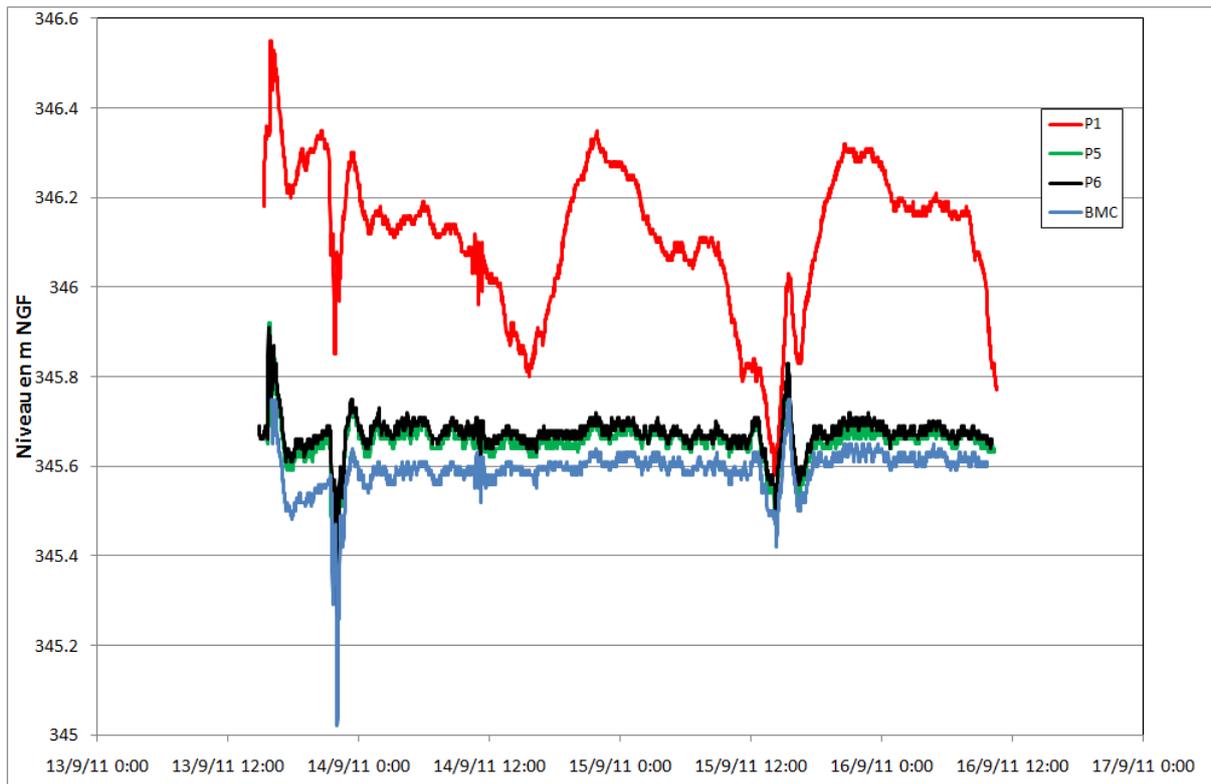


Figure 4 : Enregistrements de niveau d'eau aux ponts P1, P5, P6 et dans le bassin de mise en charge (BMC) de l'usine de la Gentille, pendant les journées d'intercomparaison.

La série S40 s'étant déroulée le 15/09 de 09 :45 à 11 :30, elle est découpée en une sous série S41 plus homogène de 10 :30 à 11 :30.

Les graphiques Figure 5, Figure 6 et Figure 7 montrent les variations du débit usine par journée d'intercomparaison.

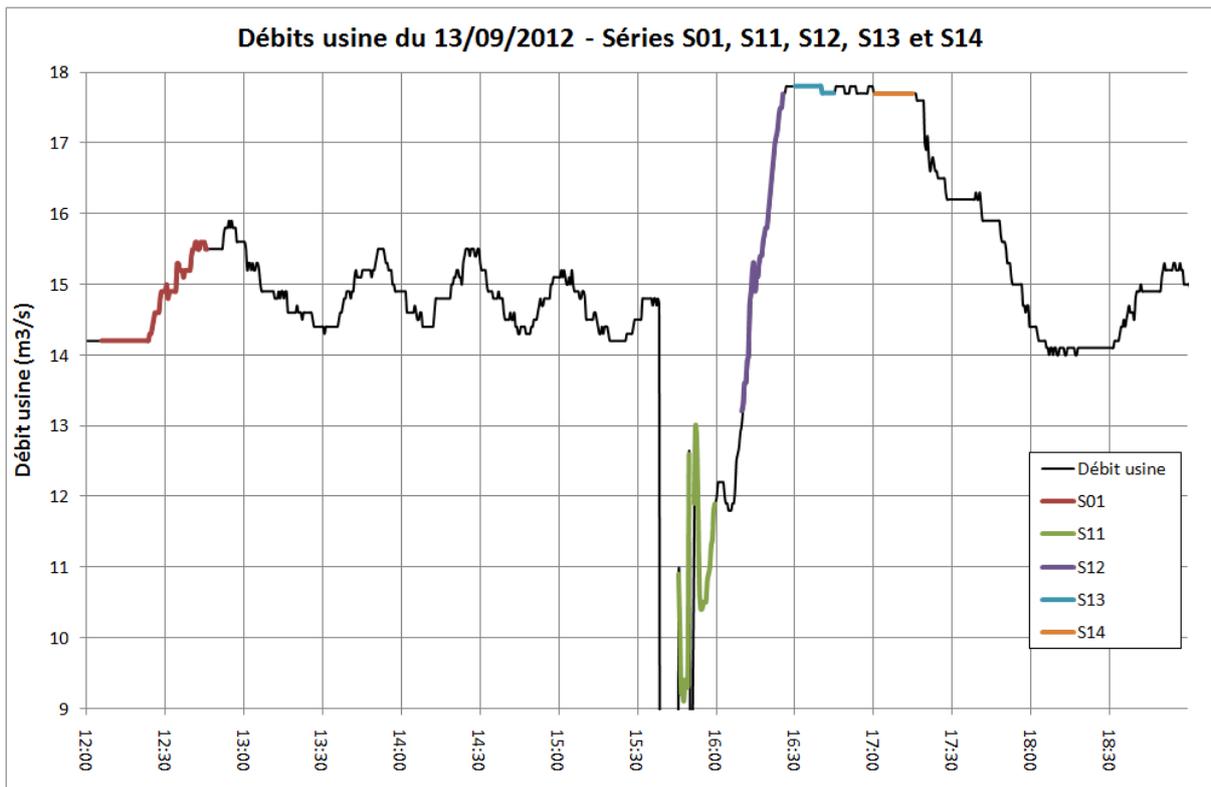


Figure 5 : Débits turbinés du 13/09, pendant l'intercomparaison. Les séries de l'intercomparaison sont illustrées en couleur

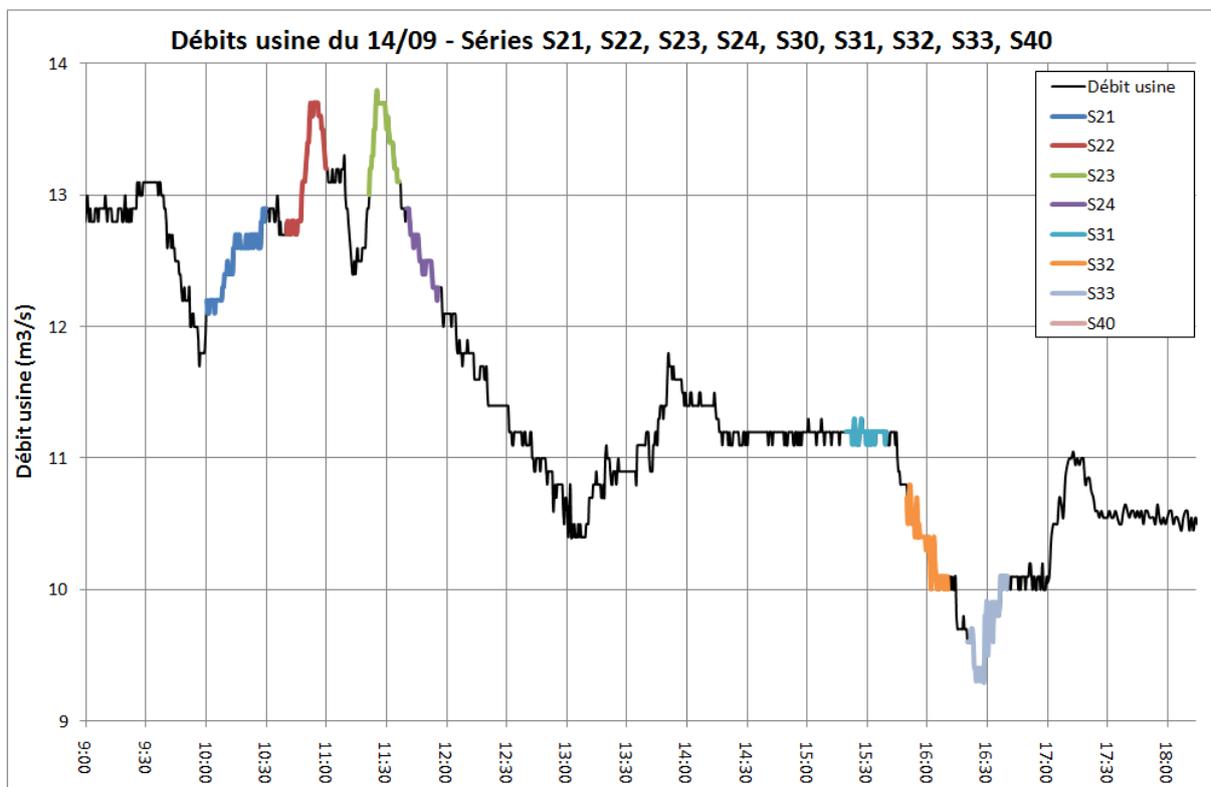


Figure 6 : Débits turbinés du 14/09, pendant l'intercomparaison. Les séries de l'intercomparaison sont illustrées en couleur

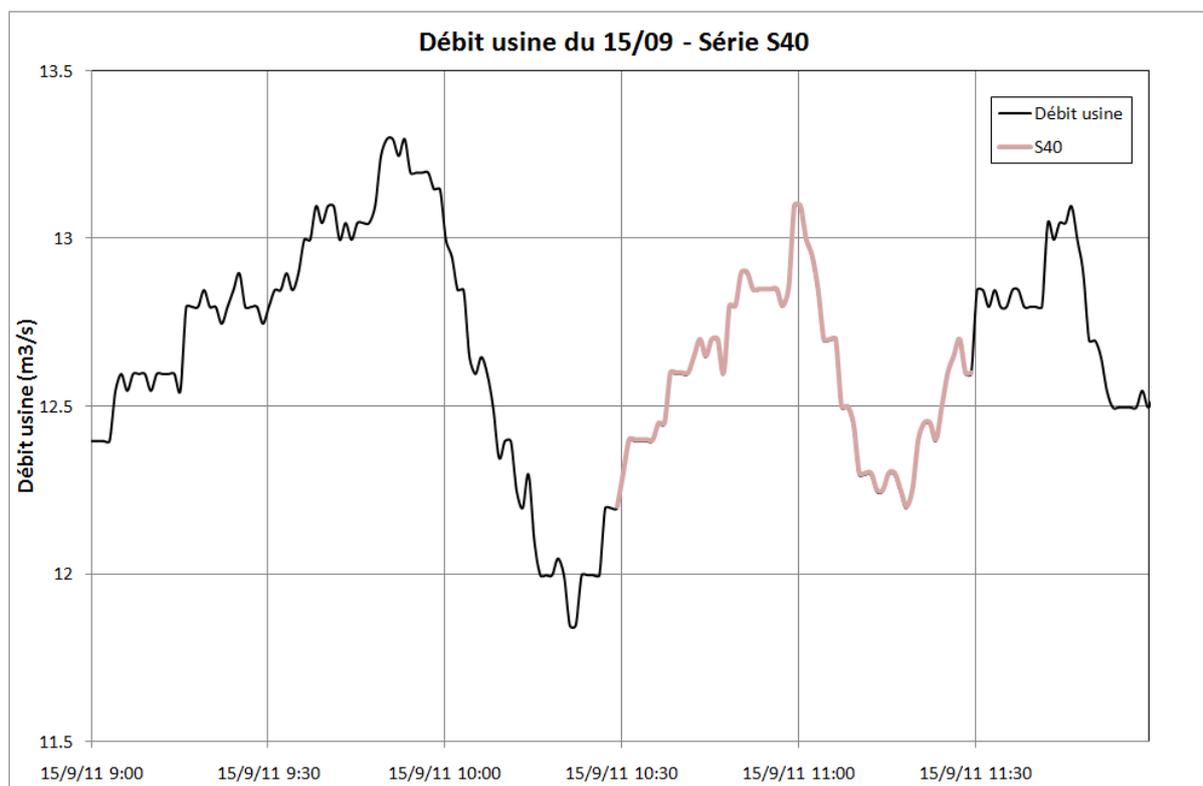


Figure 7 : Débits turbinés du 15/09, pendant l'intercomparaison. Les séries de l'intercomparaison sont illustrées en couleur

Le Tableau 2 détaille les conditions de débit lors des différentes séries d'intercomparaison.

Débits Usine						
Série	Q moyen (m3/s)	Ecart-type	Ecart-type/moyenne (%)	Q min série(m3/s)	Q max série (m3/s)	Ecart max / moyenne (%)
S01	14.7	0.52	3.57%	14.2	15.6	6.23%
S11	10.8	1.14	10.55%	9.1	13.0	20.37%
S12	15.6	1.30	8.35%	13.2	17.7	13.46%
S13	17.8	0.05	0.27%	17.7	17.8	0.18%
S14	17.7	0.00	0.00%	17.7	17.7	0.00%
S21	12.5	0.23	1.85%	12.1	12.9	3.23%
S22	13.2	0.38	2.91%	12.7	13.7	3.86%
S23	13.4	0.23	1.74%	13.0	13.8	2.67%
S24	12.5	0.19	1.51%	12.2	12.9	2.81%
S31	11.2	0.05	0.44%	11.1	11.3	1.05%
S32	10.3	0.23	2.22%	10.0	10.8	4.68%
S33	9.7	0.26	2.66%	9.3	10.1	4.05%
S41	12.6	0.24	1.88%	12.2	13.1	4.09%

Tableau 2 : conditions de débit lors des différentes séries d'intercomparaison

Les périodes de stabilité de débit sont atteintes pour les séries suivantes, qui pourront donc être analysées en tant qu'essais interlaboratoires pour détermination de l'incertitude de la technique de mesure, dans les conditions de mesure des essais :

- S13 : débit moyen de 17,8 m³/s, écart type de la série sur la moyenne de 0,27%, variation de débit de 17,7 à 17,8 m³/s.
- S14 : débit moyen de 17,7 m³/s, écart type de la série sur la moyenne de 0%, pas de variation de débit.
- S31 : débit moyen de 11,2 m³/s, écart type de la série sur la moyenne de 0,05%, variation de débit de 11,1 à 11,3 m³/s.

Les séries S21, S22, S23, S24, S32 et S33 et S41 ne présente pas un débit assez constant pour l'analyse interlaboratoire, mais peuvent néanmoins être analysées en intercomparaison de débits moyens :

- S21 : débit moyen de 12,5 m³/s, écart type de la série sur la moyenne de 1,85%, variation de débit de 12,1 à 12,9 m³/s.
- S22 : débit moyen de 13,2 m³/s, écart type de la série sur la moyenne de 2,91%, variation de débit de 12,7 à 13,7 m³/s.
- S23 : débit moyen de 13,4 m³/s, écart type de la série sur la moyenne de 1,74%, variation de débit de 13 à 13,8 m³/s.
- S24 : débit moyen de 12,5 m³/s, écart type de la série sur la moyenne de 1,51%, variation de débit de 12,2 à 12,9 m³/s.
- S32 : débit moyen de 10,3 m³/s, écart type de la série sur la moyenne de 2,22%, variation de débit de 10 à 10,8 m³/s.
- S33 : débit moyen de 12,6 m³/s, écart type de la série sur la moyenne de 2,96%, variation de débit de 11,9 à 13,3 m³/s.
- S41 : débit moyen de 12,6 m³/s, écart type de la série sur la moyenne de 1,88%, variation de débit de 12,2 à 13,1 m³/s.

Les séries S01, S11 et S12 seront retirées de l'analyse pour cause de trop forte variation de débit.

4.2 Analyse des profils verticaux ADCP et du coefficient de surface

4.2.1 Évolution longitudinale du coefficient de vitesse de surface dans le canal.

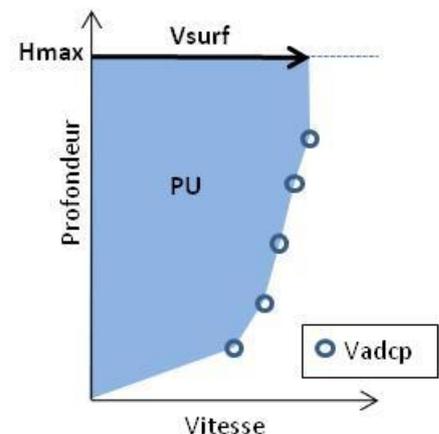
L'objet est de rechercher la forme du profil vertical de vitesse au centre du canal sur tout le linéaire des mesures ADCP. Un indicateur de cette forme est le rapport de la vitesse moyenne d'une verticale sur la vitesse de surface.

$$K = \left(\frac{V_{moy}}{V_{surf}} \right)$$

Dans un premier temps, le coefficient K a été évalué sur chaque profil disponible de la série S30, série dédiée à la mesure du profil vertical en maintenant l'ADCP immobile au centre du canal pendant 5 minutes. Le calcul a été mené comme suit :

- Moyenne dans le temps des mesures ADCP sur chaque section de mesure avec hypothèse d'immobilité de l'appareil (ce travail n'a pu être réalisé que sur les appareils RDI avec taille de cellule constante).
- Intégration du profil de vitesse moyenne sur la profondeur pour déduire une vitesse moyenne :

$$V_{moy} = \frac{PU}{H_{max}}$$



- NB : la vitesse est prise nulle au fond et égale à la vitesse ADCP la plus proche de la surface en vitesse de surface

Cette analyse permet de visualiser l'évolution du champ vertical de vitesse le long du canal dans les conditions de mesure de S30, comme présenté en Figure 8 :

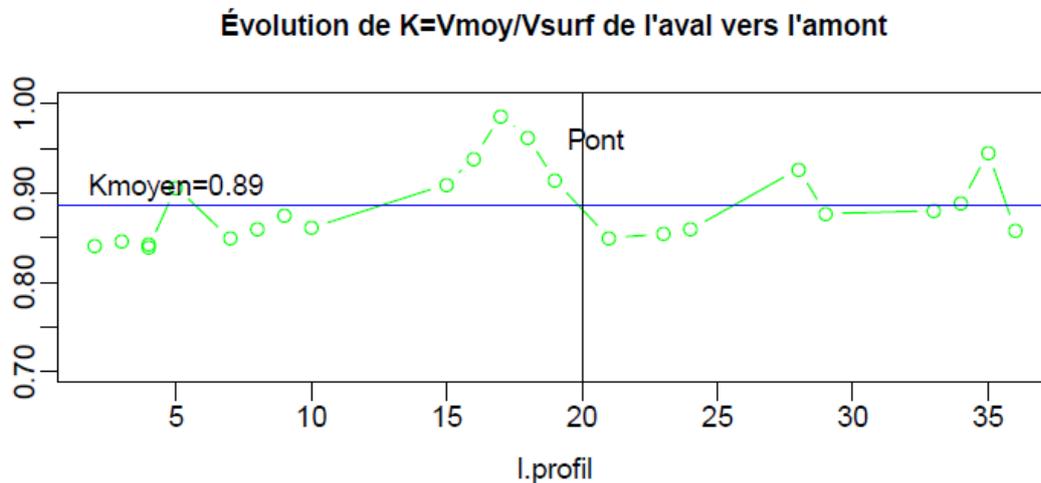


Figure 8 : Évolution longitudinale du coefficient de surface déduit des profils verticaux ADCP (série stationnaire S30), en conservant la vitesse mesurée la plus haute. Les profils ADCP sont numérotés de l'aval vers l'amont.

On constate une certaine dispersion sur la valeur de K. Les valeurs de K hors tendance (P05 ; P28 et P35) correspondent à une valeur faible de V_{surf} comparativement au reste du profil vertical. Les mêmes calculs ont donc été menés en retirant la vitesse ADCP la plus en surface. Les résultats sont présentés en Figure 9.

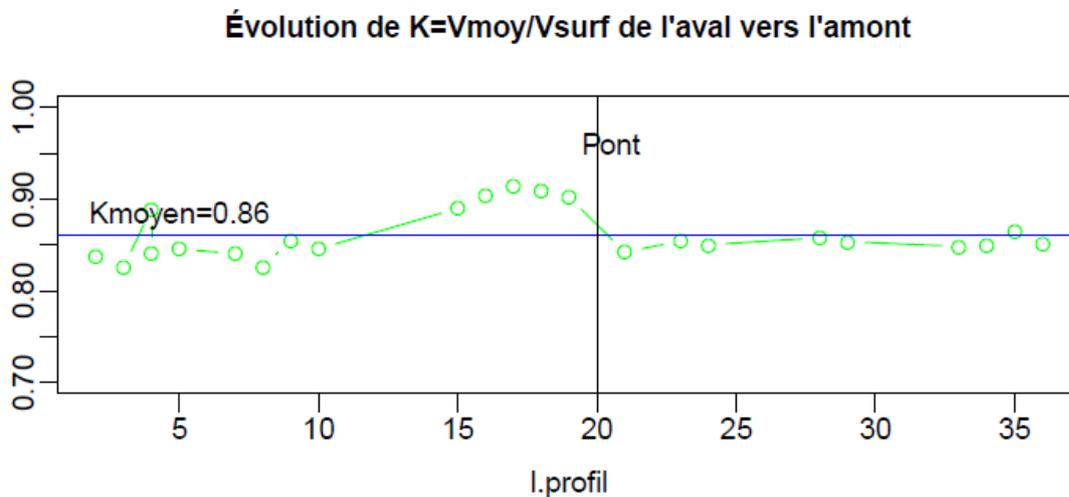


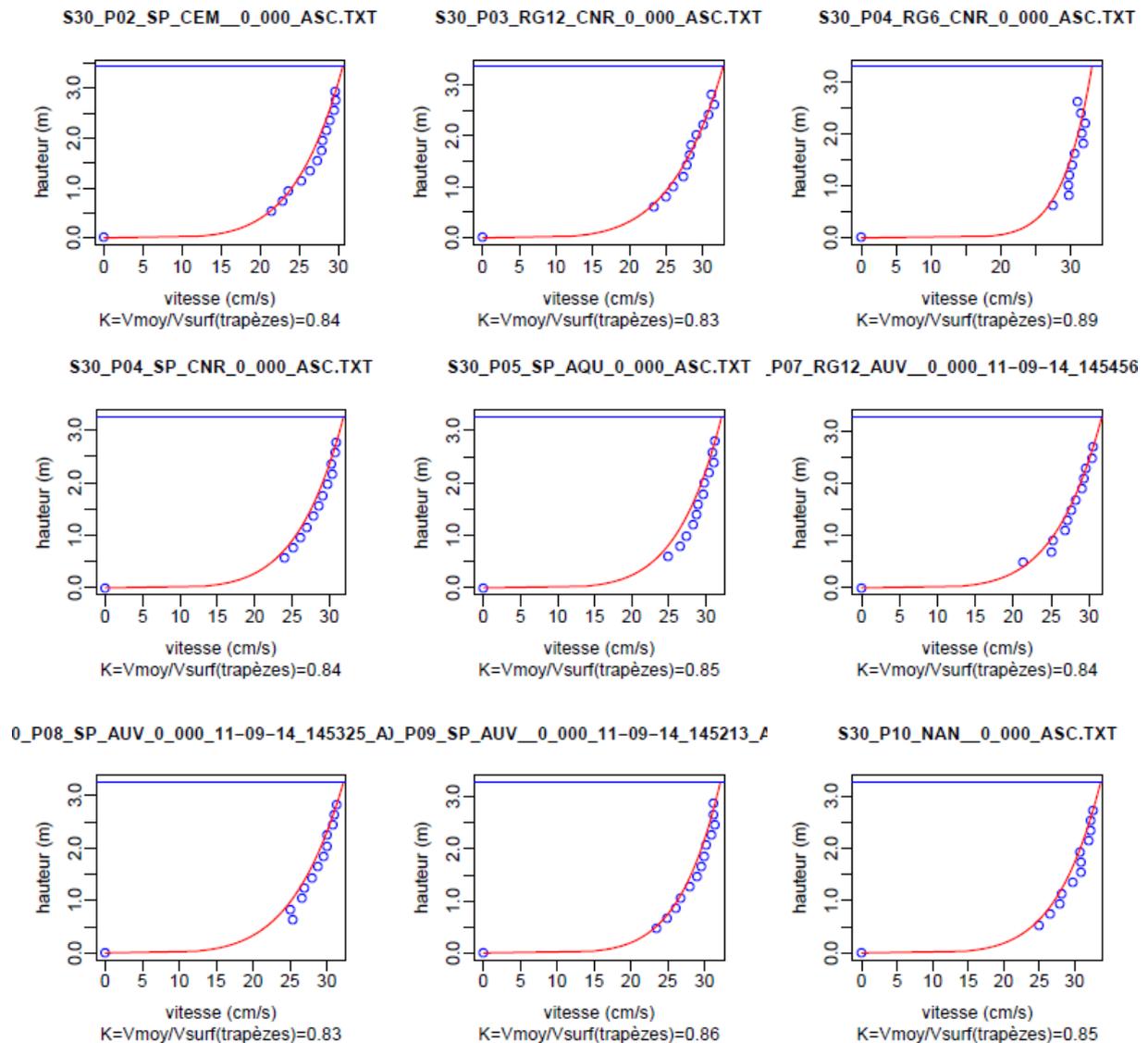
Figure 9 : Évolution longitudinale du coefficient de surface déduit des profils verticaux ADCP (série stationnaire S30), en excluant la vitesse mesurée la plus haute. Les profils ADCP sont numérotés de l'aval vers l'amont.

L'analyse révèle quelques faits intéressants:

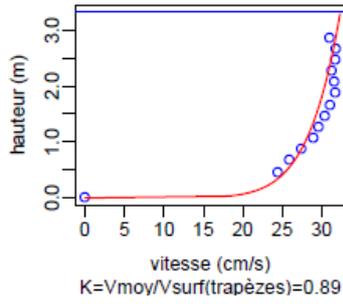
- Sensibilité de la valeur de K à la mesure de la vitesse la plus en surface (d'où la seconde analyse sans ce point).

- Influence remarquable du pont sur le profil de vitesse. Le sillage des piles induit une perturbation du champ vertical des vitesses avec un profil de vitesse bombé et une vitesse maximale située à 1/3 de la hauteur maximale sous la surface (cf. profils P15 à P19 ci-après).
- Légère influence du remous de l'usine aval qui induit une inclinaison du profil vertical de vitesse et une diminution du coefficient K (cf. profils P02 à P10 ci-après). Ce phénomène peut être expliqué par l'influence du ralentissement de l'écoulement de surface en amont de l'usine.
- Un K moyen (0,86) plus faible que celui issu du dépouillement de la mesure au saumon (=0,89). La mesure au saumon a cependant été réalisée en amont de la passerelle pour un débit différent de la série S30.

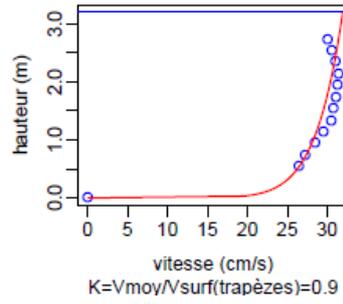
On fournit en Figure 10 le profil de vitesse moyen de chaque appareil dépouillé sur la mesure S30 (les vitesses ADCP en bleu sont associées au profil théorique de vitesse en loi puissance en rouge).



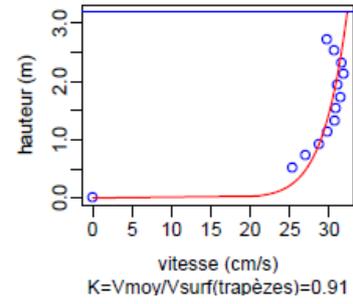
S30_P15_SP_LOR_000_ASC.TXT



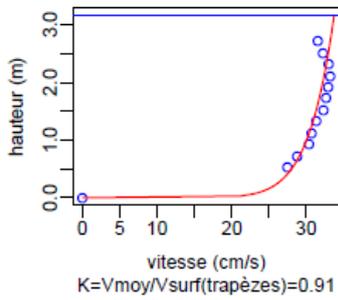
S30_P16_MPY_0_000_ASC.TXT



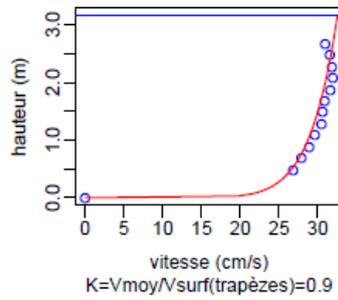
S30_P17_SP_MPY_0_000_11-09-14_144402_



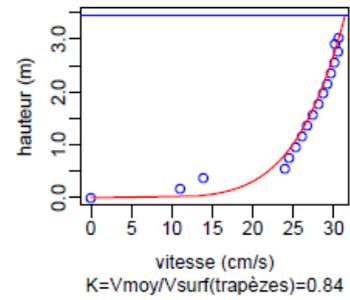
S30_P18_MPY_0_000_11-09-14_144528_ASC



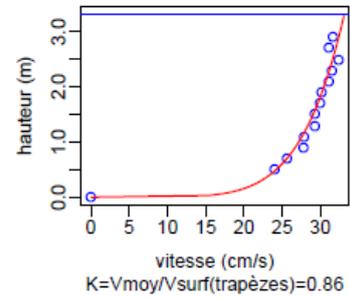
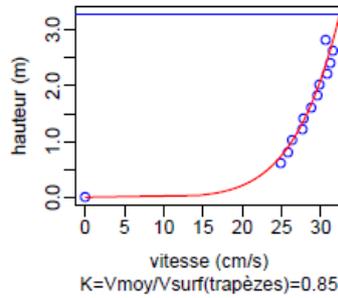
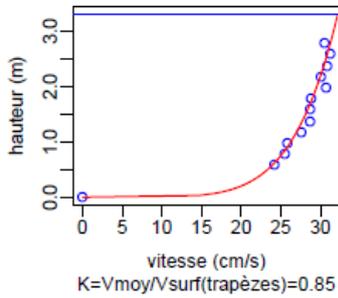
S30_P19_CTR_0_000_ASC.TXT



S30_P21_DMM_RR_0_000_11-09-14_144412_



P23_RG12_DOR_0_000_11-09-14_144911_0_P24_SP_LNH_0_000_11-09-14_144423_A0_P28_SP_TRI_0_000_11-09-14_150108_



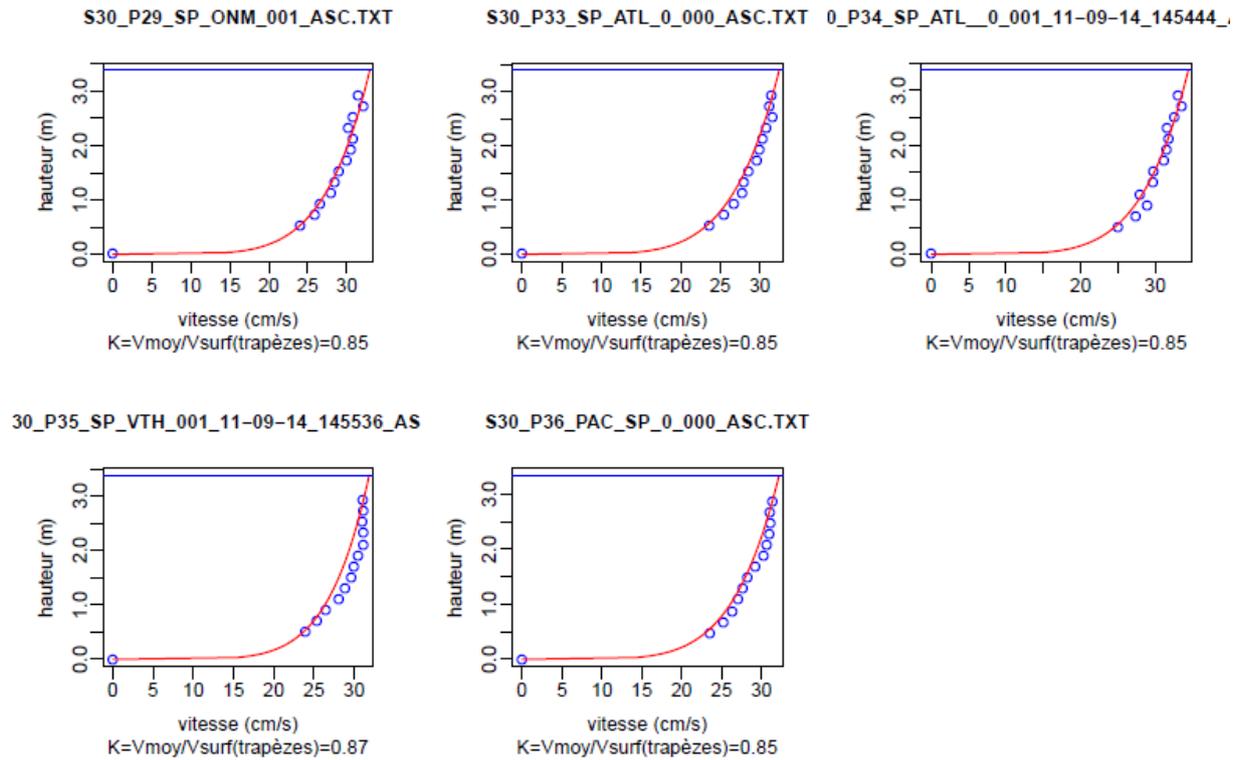


Figure 10 : Profils verticaux de vitesse moyens de chaque appareil sur la série stationnaire S30 mesurés au centre du canal pendant XXX minutes. Les vitesses ADCP en bleu sont associées au profil théorique de vitesse en loi puissance en rouge. Le coefficient de surface issu de l'intégration en trapèzes et celui issu de la loi puissance calée sont indiqués pour comparaison.

4.2.2 Évolution latérale du coefficient de vitesse de surface dans le canal.

En complément de l'approche longitudinale, il est possible de valoriser les données ADCP pour qualifier le champ de vitesse dans la largeur du canal.

Une analyse rapide des profils P10 (en aval de la passerelle), P24 et P27 (en amont de la passerelle) a été réalisée pour évaluer l'évolution latérale du coefficient de vitesse K (cf. paragraphe précédent).

Un coefficient K moyen a été déterminé dans 5 tranches d'eau de largeurs égales dans la partie homogène du canal (hors berges) en agrégeant les données ADCP de trois traversées de la série S23 (points bleus des graphiques de la Figure 11). Un profil de vitesse équivalent en loi puissance a été affiché pour mémoire (en rouge sur les graphiques de la Figure 11).

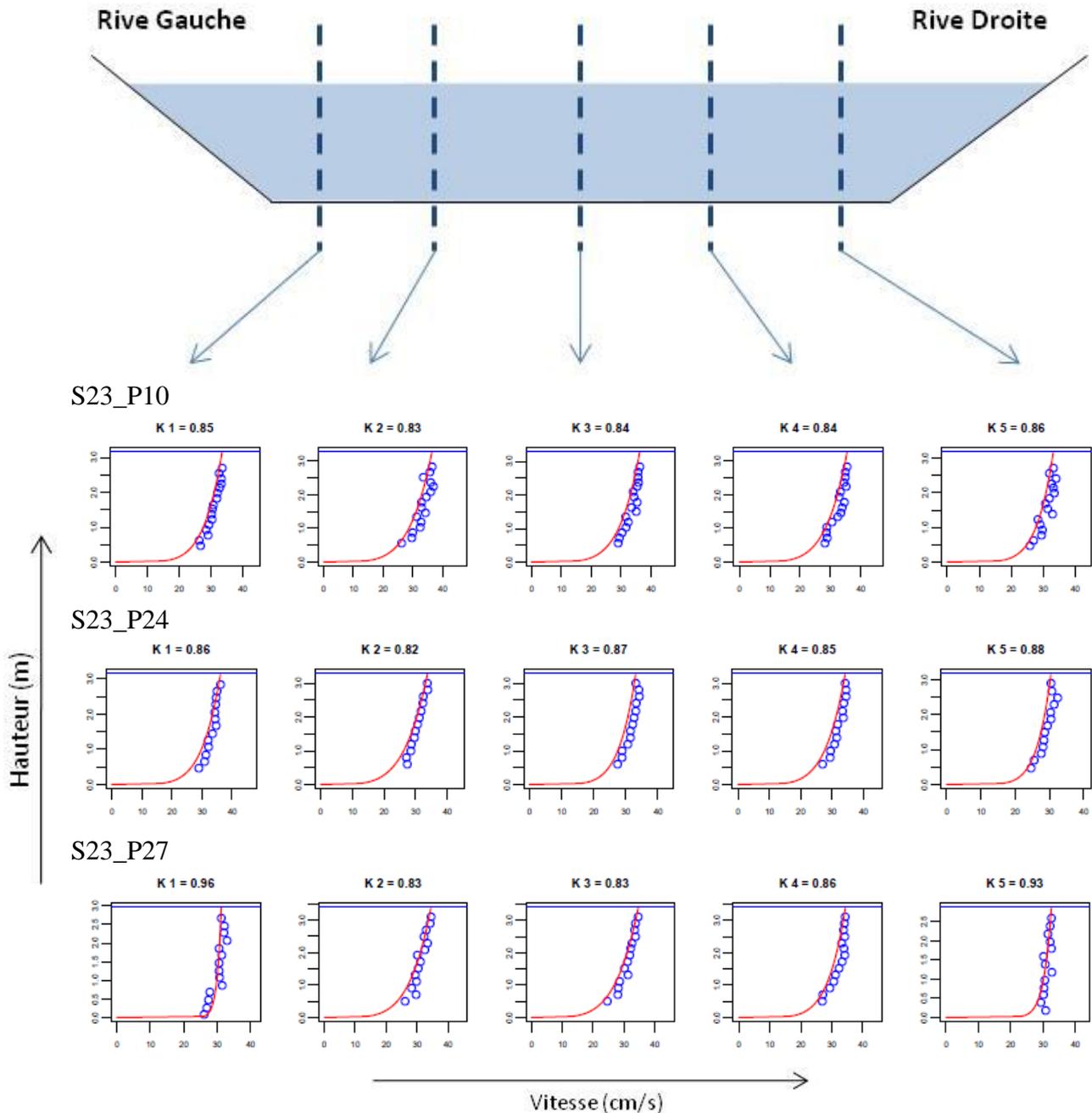


Figure 11 : Analyse des profils verticaux de vitesse en travers de la section, à partir des séries 10, 24, et 27.

On constate que la forme du gradient de vitesse est assez homogène dans la largeur mais une augmentation systématique (mais faible) de K à l'approche des berges est visible en particulier sur le profil P27. On peut supposer que ce phénomène est lié aux rugosités de bord qui incurvent le profil de la vitesse vers la surface libre, comme c'est aussi le cas à l'aval de la passerelle dans l'analyse longitudinale.

5 Analyse métrologique des incertitudes ADCP

5.1 Résultats des mesures ADCP

Comme expliqué en partie 2.1., les séries S01, S11 et S12 sont exclues de l'analyse pour cause de fluctuations trop importante du débit. Tous les jaugeages ont été rejoués, et les jaugeages présentant des défauts ont été éliminés (transect non complet, mauvaise programmation, trajectoire ou bathymétrie aberrantes, etc...)

5.1.1 Intercomparaison des mesures ADCP par série

L'intercomparaison par série permet d'identifier le comportement des différents appareils déployés par rapport à la moyenne de tous les appareils, servant de débit de référence. Pour chaque série, on calcule la moyenne des débits moyens de chaque appareil (débit moyen de la série). On calcule également l'écart type de la distribution des débits moyens de chaque appareil, ainsi que l'écart-type divisé par le débit moyen de la série. Enfin, on calcule l'écart quadratique des débits moyens de chaque appareil au débit moyen de la série, et on calcul la racine de la moyenne de ces écart quadratique par série (Root Mean Square Error, RMSE). Le RMSE permet de comparer les différentes séries entre elles. Le récapitulatif de ces paramètres par série est donné en Tableau 3.

	S13	S14	S21	S22	S23	S24	S31	S32	S33	S41
Q moyen série (m3/s)	17.659129	17.6	12.7	13.2	13.2	12.9	11.3	11.0	10.5	12.8
Ecart type série	0.35	0.41	0.30	0.40	0.34	0.32	0.31	0.31	0.25	0.29
ET/moyenne (%)	1.95%	2.34%	2.33%	3.01%	2.58%	2.52%	2.76%	2.80%	2.40%	2.27%
RMSE série	0.34	0.40	0.29	0.39	0.34	0.32	0.31	0.30	0.25	0.28
Nombre d'appareils	31	29	33	32	34	31	32	34	35	11
Q moyen usine (m3/s)	17.8	17.7	12.5	13.2	13.4	12.5	11.2	10.3	9.7	12.6
Diff. ADCP/usine (%)	-0.61%	-0.84%	1.67%	0.16%	-1.71%	2.48%	1.47%	6.21%	8.35%	1.81%

Tableau 3 : Débits moyens et dispersions sur l'ensemble des ADCP pour chaque série de débit relativement constant. Comparaison avec le débit turbiné fourni par l'usine.

Le débit ADCP moyen de chaque série est très proche du débit moyen usine correspondant, à part pour les séries S32 et S33. Pour les autres séries, la différence entre le débit ADCP moyen de chaque série et le débit usine est inférieur à 2,5%. Les séries S32 et S33 sont dans des périodes de gradient de débit importants rendant la comparaison entre les débits ADCP et les débits usine délicate.

Pour chaque série, un graphique compare les débits moyens de chaque appareil au débit moyen de la série (+/- 5%). Ces graphiques sont données en Annexe 1.

On constate, sur les graphiques de l'Annexe 1, qu'aucun appareil ne présente un comportement anormal sur l'ensemble des séries. Aucun appareil n'a donc de biais évident. Une analyse par appareil et par type d'appareil sera développée dans une partie suivante. On constate également, en traçant la courbe de densité des écarts des débits moyens de chaque appareil au débit moyen de la série, que 95% des débits moyens de chaque appareil ont un écart inférieur à 5% au débit moyen de la série, comme montré dans la Figure 12.

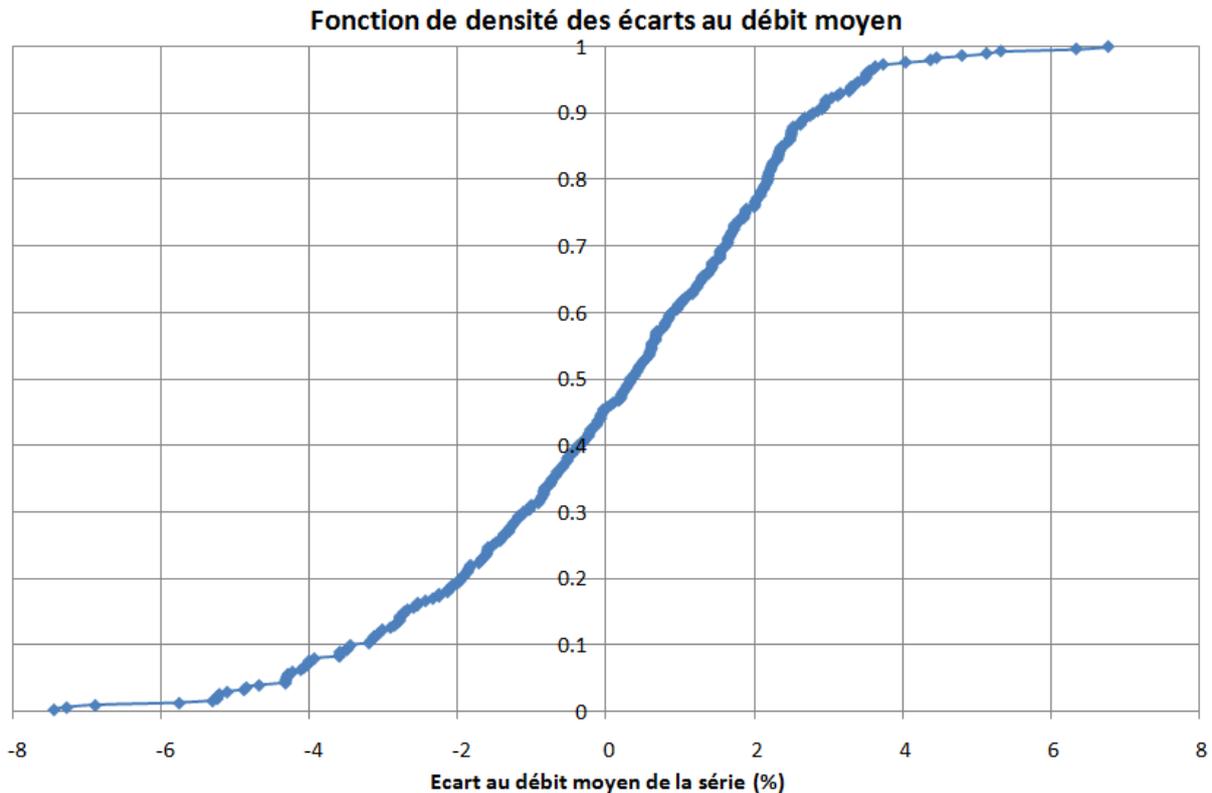


Figure 12 : Courbe de densité des écarts des débits moyens de chaque appareil au débit moyen de la série. :

5.1.2 Intercomparaison des mesures ADCP par appareil

Pour chaque appareil, sous condition d'un échantillon de plus de 5 séries, on calcule le RMSE et l'écart moyen, avec le débit moyen de chaque série comme référence. Les résultats sont présentés dans le Tableau 4. On a surligné les appareils avec un RMSE supérieur à $0,5 \text{ m}^3/\text{s}$ et une rapide analyse de ces cas est réalisée :

- P04_RG6_CNR : c'est le seul RioGrande 600 de l'intercomparaison. Un StreamPro était déployé sur le même profil pendant les séries d'intercomparaison. On constate que, du fait de l'enfoncement du capteur, et des zones de blanking de surface et de fond, le ratio de débit mesuré sur débit total est de l'ordre de 50% en moyenne pour le RG600, alors que ce ratio atteint 75% en moyenne avec le Streampro. Le biais constaté sur le RG600 vient, à première analyse, de cette différence de surface mesurée.
- P19_SP_CTR : le profil 19 est situé en aval direct de la passerelle Pt6. Comme constaté en partie 2.2.1., ce profil est sous l'influence des piles de la passerelle.
- P21_RR_DMM : le profil 21 est situé en amont direct de la passerelle Pt6. Comme pour le cas précédent, ce profil est sous l'influence des piles de la passerelle.

Equipe	RMSE (m3/s)	Ecart moyen
S33_P01_SP_GAS	0.23	1.38%
S33_P02_SP_CEM	0.11	0.09%
S41_P03_RG12_CNR	0.24	1.67%
S41_P04_RG6_CNR	0.50	-3.87%
S41_P04_SP_CNR	0.11	-0.10%
S33_P05_SP_AQU	0.29	1.74%
S33_P07_RG12_AUV	0.36	-0.43%
S41_P08_SP_AUV	0.28	2.10%
S33_P09_SP_AUV	0.48	2.73%
S41_P10_RG12_NAN	0.29	1.64%
S41_P10_SP_NAN	0.49	3.00%
S33_P12_RG_BRG	0.19	0.18%
S33_P13_SP_RAL	0.32	0.72%
S33_P14_S5_LIM	0.23	0.90%
S33_P15_SP_LOR	0.29	2.03%
S31_P16_SP_MPY	0.30	-1.69%
S33_P17_SP_MPY	0.35	-2.25%
S33_P18_SP_MPY	0.26	-1.57%

Equipe	RMSE (m3/s)	Ecart moyen
S33_P19_SP_CTR	0.51	-3.66%
S14_P21_SP_DMM	0.54	-0.63%
S33_P22_M9_BEL	0.26	-0.41%
S41_P23_RG12_DOR	0.44	-3.22%
S33_P24_SP_LNH	0.32	-1.65%
S41_P25_SP_BRI	0.26	1.99%
S33_P26_M9_STK	0.20	-0.84%
S33_P27_SP_GRE	0.21	1.29%
S33_P28_RG12_TLS	0.33	0.40%
S33_P28_SP_TLS	0.45	1.19%
S33_P29_SP_ONM	0.27	1.97%
S33_P31_SP_AQU	0.48	-3.28%
S33_P32_RR_RDI	0.26	0.22%
S33_P33_SP_ATL	0.16	0.83%
S33_P34_SP_ATL	0.18	-0.17%
S41_P35_SP_VTH	0.16	-0.09%
S33_P36_SP_PAC	0.24	-0.39%

Tableau 4 : RMSE et écart moyen, pour chaque ADCP, avec le débit moyen de chaque série pris comme référence. On a surligné les appareils avec un RMSE supérieur à 0,5 m3/s (soit environ 2,5% du débit total).

5.1.3 Intercomparaison des mesures ADCP par type d'appareil

Pour chaque type d'appareil, on calcule le RMSE et l'écart moyen, avec le débit moyen de chaque série comme référence. Les résultats sont présentés dans le Tableau 5.

Type d'appareil	RMSE (m3/s)	Ecart moyen (%)	Nombre de série
M9	0.234	-0.63%	17
RG12	0.321	-0.05%	53
RG6	0.500	-3.87%	8
RR	0.399	0.13%	17
S5	0.229	0.90%	9
SP	0.316	0.26%	194

Tableau 5 : RMSE et écart moyen, pour chaque type d'ADCP, avec le débit moyen de chaque série pris comme référence.

La Figure 13 illustre les densités de probabilité des écarts au débit moyen de chaque série, par type d'appareil.

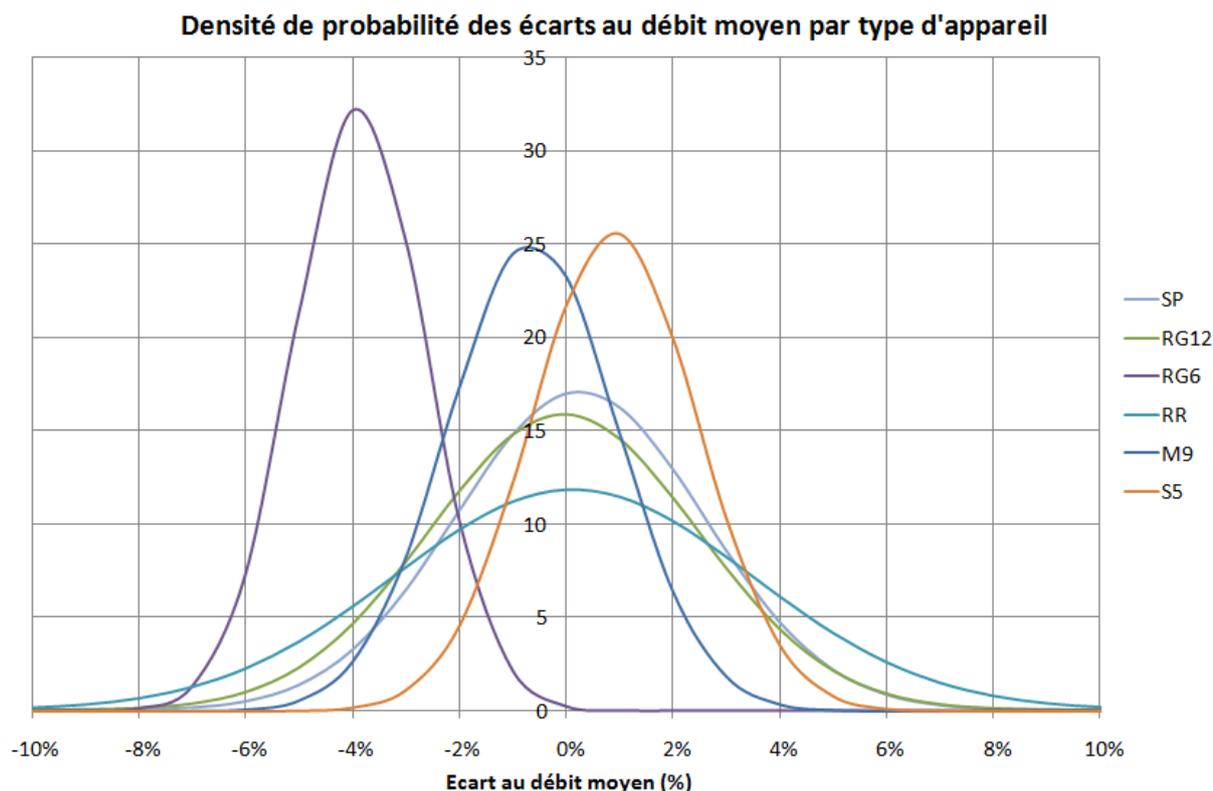


Figure 13 : Densités de probabilité des écarts au débit moyen de chaque série, par type d'appareil.

On constate que les écarts suivent une loi normale. Un modèle de loi normale, basé sur la moyenne et l'écart type des écarts de chaque type d'appareil, est donné pour permettre une comparaison plus aisée :

- On constate que le Rio Grande 1200 et le Stream Pro ont des comportements très semblables, avec des RMSE faible et pas de biais significatif. Leurs distributions de densité de probabilité des erreurs sont très semblables.
- Le Rio Grande 600 a un RMSE élevé et un biais de l'ordre de -4%. Sa distribution de densité de probabilité est donc biaisée, mais a une dispersion faible. Comme expliqué en 2.2.1, un seul RG600 a été déployé pendant l'intercomparaison de la Gentille. On a donc un effet d'échantillonnage réduit. De plus, comme expliqué aussi en 3.1.2., les caractéristiques de mesure du RG600 (enfonceur du capteur, zones de blanking de surface et de fond) sont moins bien adaptées au canal de la Gentille que le RG1200 ou le StreamPro. Il en résulte un ratio débit mesuré sur débit total inférieur pour le RG600 (50%) que pour le RG1200 et le StreamPro (75%).
- Le River Ray montre un RMSE élevé mais pas de biais significatif. Sa distribution de densité de probabilité est bien centrée sur 0, mais la dispersion est importante. Les mesures avec le River Ray présentent des dispersions importantes près des bords du canal. L'angle d'ouverture plus important des faisceaux du River Ray (30°) par rapport aux RG et Stream Pro (20°) explique ces interférences aux ruptures de pentes du canal, près des bords.
- Les M9 et S5 montrent de faibles dispersions. Les légers biais constatés (respectivement -1 et +1%) ne sont pas significatifs vu le faible nombre d'appareils Sontek par rapport aux appareils RDI.

5.2 Estimation des incertitudes par comparaison interlaboratoire

5.2.1 Méthode d'analyse

L'objectif de la comparaison interlaboratoire est de déterminer l'incertitude des mesures de débit réalisées par ADCP, dans les conditions de mesure des essais, en s'appuyant sur les résultats de la comparaison des résultats obtenus par les équipes, pour des séries présentant un débit suffisamment constant au cours des essais.

Pour obtenir une incertitude de mesure compatible avec les documents internationaux en vigueur (GUM), et en l'absence de valeur de référence permettant un raccordement au S.I. et la mise en œuvre d'une propagation des incertitudes, le traitement statistique s'appuie sur l'application des normes et fascicules suivants :

- **ISO 5725-2** : Exactitude (justesse et fidélité) des résultats et méthodes de mesure - Partie 2 : Méthode de base pour la détermination de la répétabilité et de la reproductibilité d'une méthode de mesure normalisée, décembre 1994.
- **FD ISO/TS 21748** : Lignes directrices relatives à l'utilisation d'estimations de la répétabilité, de la reproductibilité et de la justesse dans l'évaluation de l'incertitude de mesure, Juin 2004.

La première norme a pour objectif de quantifier les performances de la méthode, en termes de répétabilité et de reproductibilité. La seconde norme permet de traduire ces résultats en termes d'incertitude de mesure.

La procédure détaillée pour application à des intercomparisons hydrométriques est présentée dans les rapports suivants de (Dramais, et al., 2011) et (Atmane, 2011).

5.2.2 Examen des données

Cette intercomparaison ayant été réalisée sous fortes contraintes hydrologiques entraînant une instabilité fréquente des débits, il a été décidé de n'appliquer la comparaison interlaboratoire qu'aux trois séries à débit présentant un coefficient de variation inférieur à 1%, soit les séries 13, 14 et 31 uniquement. Ceci de sorte à ne pas avoir de doute sur les valeurs d'incertitude obtenues, qui pourraient être augmentées à cause de l'instabilité du débit pendant les essais.

Après examen des données ADCP, n'ont été retenues pour l'analyse interlaboratoire que les équipes présentant des mesures jugées valides et comportant 5 ou 6 transects (sauf 1 exception à 10 transects). La liste de ces équipes pour les trois séries S13, S14 et S31 est consultable à l'Annexe 2. On dénombre ainsi 31, 30 et 32 équipes pour ces trois séries, dans l'ordre. Les effectifs comportent une majorité d'instruments RDI, notamment des StreamPro, mais aussi des instruments Sontek (2 M9, 1 S5, 1 ADP). Le Qliner Ott ne peut pas être pris en compte car il ne réalise pas des mesures répétées par transects, mais une unique mesure stationnaire par série. L'effectif est jugé suffisamment représentatif de la diversité des matériels ADCP, qui sont dans cette analyse considérés comme une technique de jaugeage homogène, le principe de fonctionnement et le paramétrage étant équivalents.

La méthode d'analyse interlaboratoire prévoit l'examen des statistiques h et k (voir les résultats en Annexe 3).

L'analyse de la **statistique k** , qui permet de comparer visuellement les variabilités intra-laboratoires pour les trois séries, doit être conduite en premier. Elle a pour objectif essentiel de détecter si une ou plusieurs équipes présentent une variabilité notablement supérieure aux autres, ce qui pourrait indiquer la présence d'erreurs aléatoires importantes au sein de ces équipes.

Pour les trois séries, les équipes semblent présenter des variabilités équivalentes, à part peut-être l'équipe ANG_ADP du profil P11, qui présente une variabilité intra-laboratoire légèrement supérieure pour les séries S13 et S14. Cela peut être attribué aux performances du modèle ADP Sontek de génération plus ancienne que les M9 notamment, et utilisant une analyse du signal « narrowband » moins précise.

L'analyse de la **statistique h** a pour objet de détecter les équipes présentant une erreur de justesse notablement plus importante que les autres équipes, de même amplitude et de même signe pour les trois séries.

L'examen de la statistique h sur les trois séries confirme l'analyse faite précédemment, puisque qu'une tendance sur l'erreur systématique apparaît de l'amont vers l'aval, avec des valeurs plus souvent positives à l'aval et négatives à l'amont, quel que soit l'appareil et la série. Cet effet est sans doute à expliquer par l'évolution du profil vertical des vitesses de l'amont vers l'aval, avec l'influence du pont.

A l'issue de cet examen des statistiques h et k , aucune équipe ne présente un comportement très différent des autres, susceptible de conduire à des tests statistiques de détection de valeurs aberrantes. Les calculs sont donc poursuivis avec l'ensemble des équipes disponibles pour chaque série.

5.2.3 Résultats

Le Tableau 6 rassemble les résultats de l'analyse interlaboratoire ADCP en termes de répétabilité et de variabilité interlaboratoire (écart-types s_r et s_L), et d'incertitude élargie au niveau de confiance 95 % pour la mesure de débit issue d'un seul transect ADCP. On a ici négligé la valeur du biais attribuable à la méthode ADCP (erreur systématique commune à toutes les équipes car liée au principe de la technique et au paramétrage commun), en supposant que ce biais était inférieur aux valeurs d'incertitude obtenues. En effet, par des tests en laboratoire et des tests de sensibilité aux paramètres, ce biais est souvent estimé proche de 2-3 % maximum (au niveau de confiance 95 %), alors que les incertitudes élargies obtenues sont entre 6 % et 7,5 %, pour un seul transect ADCP.

Série de mesure	Nombre d'ADCP	Débit moyen	s_r	s_L	Biais méthode ADCP	Incertitude 1 ADCP 1 transect	Incertitude 1 ADCP 6 transects
S13	31	17,7 m ³ /s	2,7 %	1,8 %	0 %	±6,4 %	±4,1 %
S14	30	17,6 m ³ /s	2,6 %	2,7 %	0 %	±7,4 %	±5,7 %
S31	32	11,4 m ³ /s	2,1 %	2,3 %	0 %	±6,2 %	±4,9 %

Tableau 6 : Résultats de l'analyse interlaboratoire ADCP en termes de répétabilité et de variabilité interlaboratoire (écart-types s_r et s_L), et d'incertitude élargie au niveau de confiance 95 % pour la mesure de débit issue d'un transect ADCP, ou de la moyenne de 6 transects ADCP.

L'usage opérationnel étant de jauger en réalisant la moyenne de 4 à 6 transects successifs, le tableau indique également les valeurs d'incertitude élargie (au niveau de confiance 95 %) pour les mesures de débit issues de la moyenne de 6 transects. Ces valeurs, comprises entre 4 % et 6 %, ne sont pas issues d'un calcul interlaboratoire supplémentaire, mais sont déduites des valeurs d'incertitude obtenues pour un transect, à partir de la formule suivante (Le Coz et al., 2012) donnant l'incertitude élargie sur une mesure de débit issue de la moyenne de N transects et p ADCP :

$$U_{N,p}(Q) = 2 \sqrt{u_{\text{biais}}^2 + \frac{s_r^2}{Np} + \frac{s_L^2}{p}} \quad (\text{Eq. *})$$

Cette formule permet de généraliser les résultats d'incertitude à une mesure de débit issue de N transects et p ADCP, comme présenté dans Figure 14, Figure 15 et Figure 16. Comme le biais de la méthode ADCP est considéré négligeable ($u_{\text{biais}} = 0$), les valeurs obtenues sont inférieures aux vraies incertitudes totales, et en particulier tous les résultats d'incertitude inférieurs à 2 % ou 3 % sont sans doute irréalistes.

Rappelons encore une fois que les valeurs d'incertitude obtenues ne sont valables que dans les conditions de mesure des essais, en termes d'écoulement, de géométrie de section et de tronçon, de protocole de déploiement, de paramétrage, de type de matériel, etc. Pour mémoire, les valeurs d'incertitude déterminées de la même façon pour l'intercomparaison de Génissiat 2010 étaient fortement variables selon le site de mesure, qu'il présente des conditions très favorables (amont du pont de Pyrimont) ou défavorables (aval du barrage de Génissiat). A Pyrimont, l'incertitude élargie (au niveau de confiance 95 %) était de 6,5 % pour 1 transect et de 3,9 % pour 6 transects. A Génissiat, l'incertitude élargie (au niveau de confiance 95 %) était de 12 % pour 1 transect et de 6,3 % pour 6 transects. Les valeurs obtenues dans le canal de la Gentille sont intermédiaires.

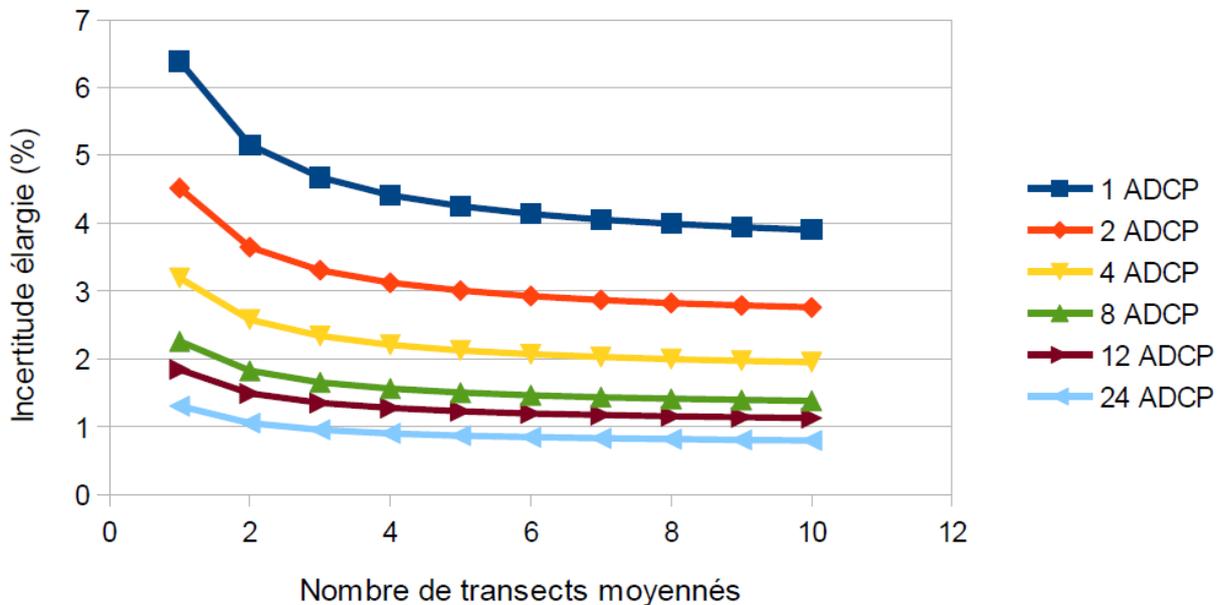


Figure 14 : Série S13 - Incertitudes sur la mesure de débit issue de la moyenne de N transects et p ADCP. Attention, les valeurs inférieures à 2 ou 3 % sont sans doute sous-estimées dans la mesure où le biais sur la méthode ADCP a été négligé.

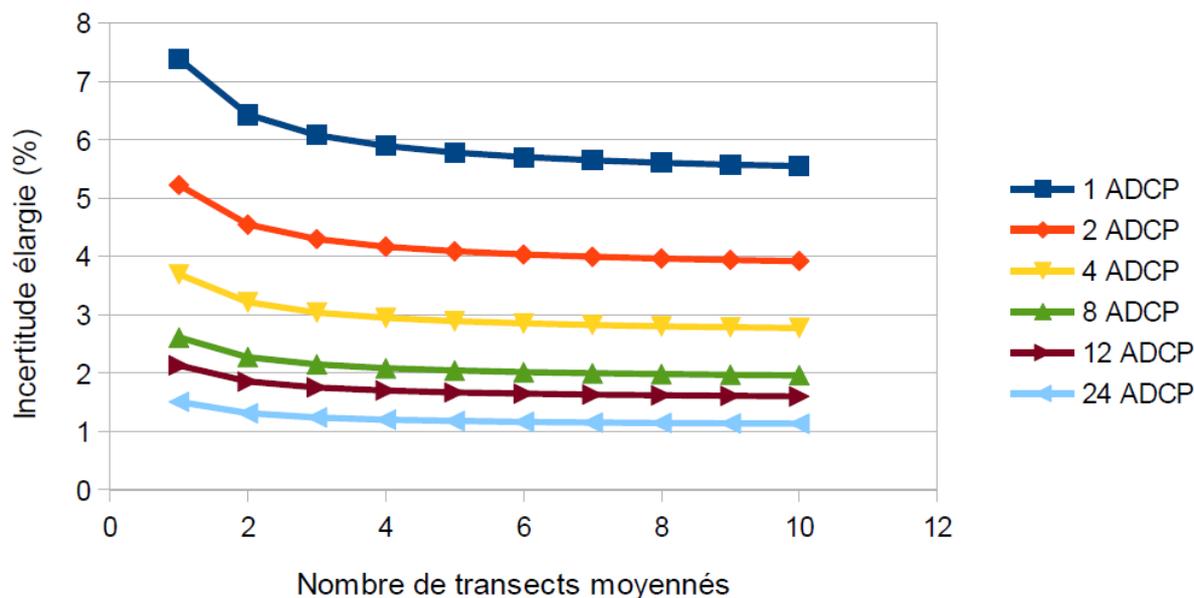


Figure 15 : Série S14 - Incertitudes sur la mesure de débit issue de la moyenne de N transects et p ADCP. Attention, les valeurs inférieures à 2 ou 3 % sont sans doute sous-estimées dans la mesure où le biais sur la méthode ADCP a été négligé.

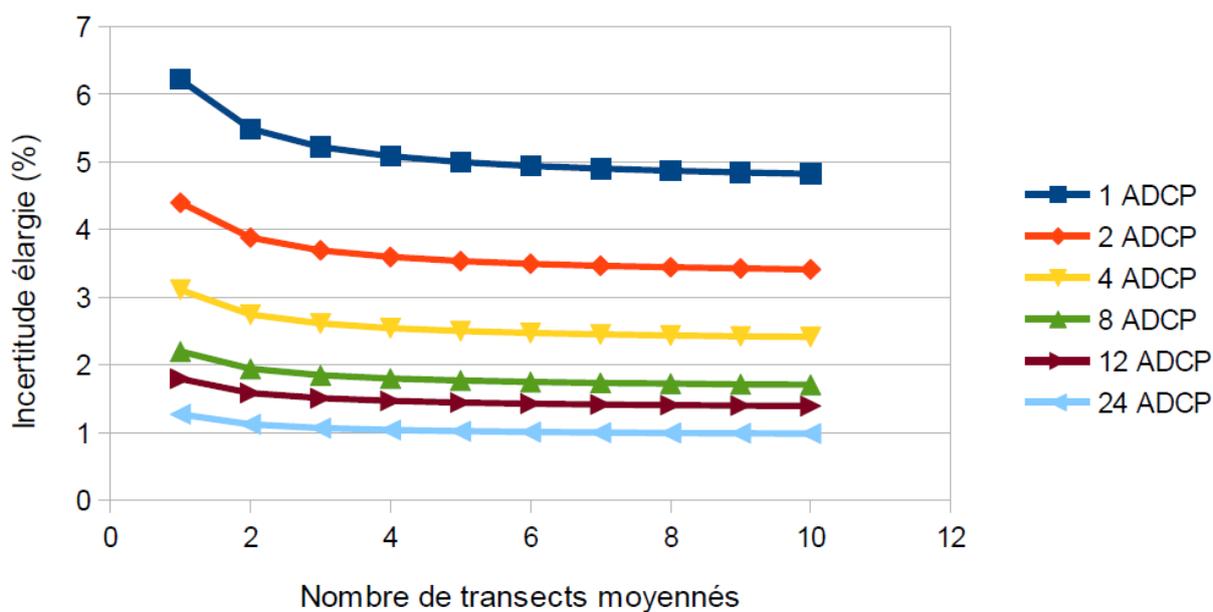


Figure 16 : Série S31 - Incertitudes sur la mesure de débit issue de la moyenne de N transects et p ADCP. Attention, les valeurs inférieures à 2 ou 3 % sont sans doute sous-estimées dans la mesure où le biais sur la méthode ADCP a été négligé.

6 Comparaisons des différentes techniques et différents appareils de mesure

6.1 Mesure au camion jaugeur

Afin d'obtenir des valeurs de débit de référence autres que celles des groupes de l'usine aval, deux mesures au camion jaugeur ont été réalisées (Figure 17). Une seule de ces mesures est

finaleme nt exploitable du fait des fortes variations de débit dans le canal. Celle-ci a été réalisée le 14 septembre entre 10h20 et 11h30 en amont immédiat de la passerelle.



Figure 17 : Mesures au saumon hydrométrique déployé par camion jaugeur

- Technique de mesure : exploration du champ de vitesse en mode point par point
- Appareil : moulinet C31 + hélice n°4 sur saumon de 45 kg
- Dépouillement du jaugeage : Logiciel EDF « Jasmine » avec extrapolation spline et loi puissance sur les bords et au fond
- Débit camion jaugeur: **14.1 m³/s**
- Débit des groupes de l'usine aval sur la période : 12.6 à 13.4 m³/s

La Figure 18 présente une restitution du logiciel Jasmine.

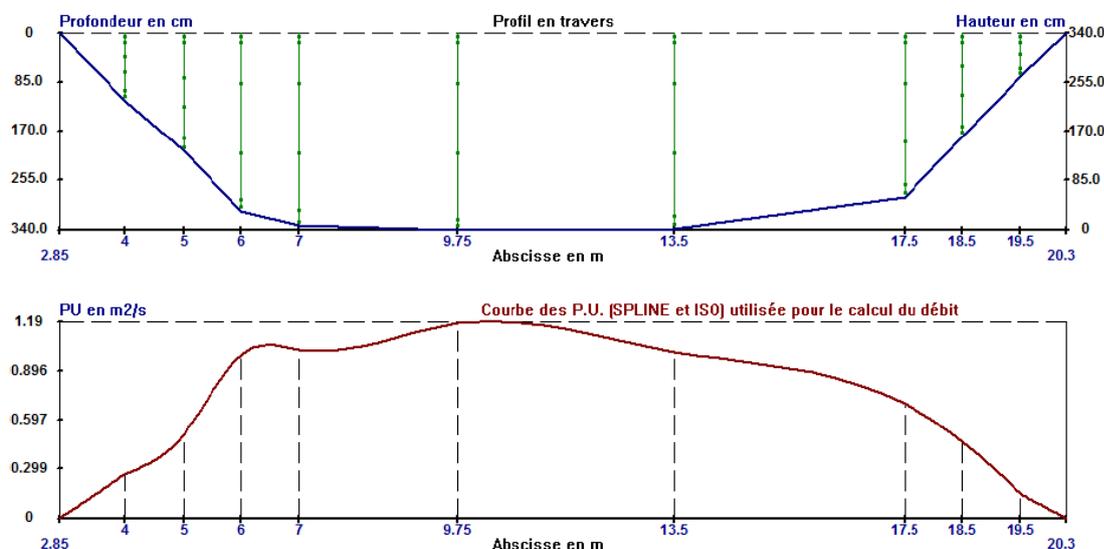


Figure 18 : Restitution du logiciel Jasmine pour le jaugeage réalisé au camion hydrométrique

Outre la valeur de débit, le jaugeage apporte une connaissance du champ de vitesse différente de celle fournie par les ADCP, en particulier sur les zones de blanking des profileurs doppler telles que les bords, le fond et la surface.

Un premier indicateur est le coefficient de vitesse de surface $K = \left(\frac{V_{moy}}{V_{surf}} \right)$. En réalisant la moyenne des K de chaque verticale jaugee, on obtient la valeur de référence $K_{moy}=0.89$.

Cette valeur est à relier au coefficient « m » de la loi puissance décrivant le gradient vertical de vitesse dans la Norme ISO 748 tel que :

$$V(h) = V_{surf} \left(\frac{h}{H_{max}} \right)^{\frac{1}{m}} \quad \text{On démontre alors que :} \quad K = \left(\frac{m}{m+1} \right)$$

La valeur de K obtenu pour le jaugeage de la gentille correspond à **m=8** qui est une valeur tout à fait cohérente pour un canal aux parois lisses, mais encombrées de quelques algues. La Figure 19 montre la comparaison des champs de vitesse mesurés et théorique.

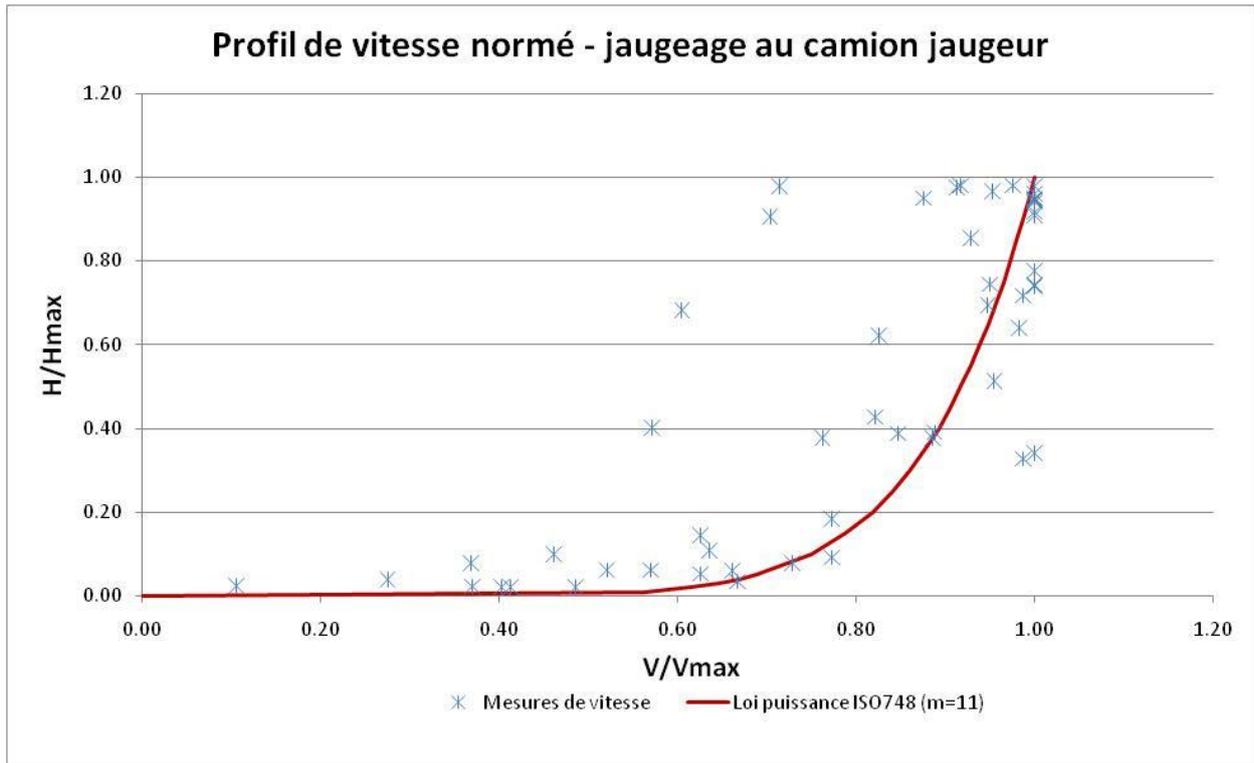


Figure 19 : Profil vertical de vitesse normalisé: mesures au camion hydrométrique (croix) et loi puissance d'exposant 1/8 calée (ligne rouge)

Le dépouillement « manuel » du jaugeage dans Excel (calcul par trapèzes et « mean-section ») permet également de calculer les débits de bord équivalents aux débits extrapolés dans les jaugeages ADCP. On compare ici les débits de bord à 3 mètres de la berge du jaugeage au saumon et certaines mesures ADCP redépouillées en coupant les ensembles à 3 mètres des berges. On rappelle que dans WinRiver (Logiciel RDI), le débit de bord est calculé à partir de la vitesse moyenne des 10 ensembles de berge et d'une hypothèse de Froude constant, $Fr(i) = \frac{V_{moy}(i)}{\sqrt{g \cdot h(i)}}$.

Dans le canal, les débits extrapolés se localisent ainsi (Figure 20) :

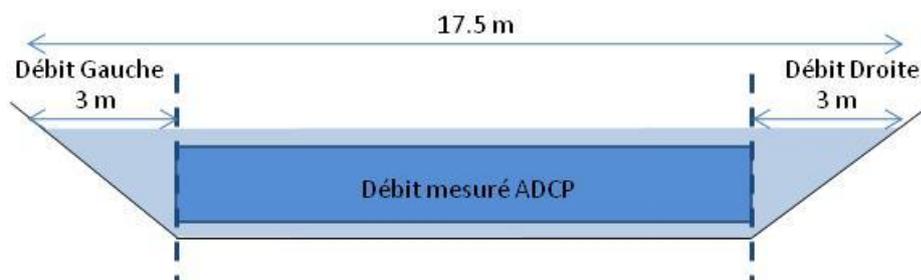


Figure 20 : Schéma d'une section en travers trapézoïdale avec les débits mesurés et extrapolés par l'ADCP.

On garde à l'esprit que le jaugeage au saumon fut beaucoup plus long que les mesures ADCP et que les débits ne sont pas strictement comparables. En revanche, les proportions extrapolées le sont. Le Tableau 7 synthétise les résultats.

	Saumon (trapèzes)	S22_P35	S22_P27	S22_P24	S22_P10-SP	S22_P11-RG
Débit Droite (m ³ /s)	1.15	1.08	1.11	1.05	1.08	0.98
Débit Gauche (m ³ /s)	1.25	0.99	1.04	1.02	1.06	0.97
Débit Bord (m ³ /s)	2.41	2.07	2.15	2.07	2.14	1.95
Débit total (m ³ /s)	13.75	12.74	13.3	12.69	13.24	12.74
Largeur au miroir (m)	17.18	17.54	17.5	17.48	17.53	17.49
Débit Droite	8.4%	8.5%	8.3%	8.3%	8.2%	7.7%
Débit Gauche	9.1%	7.8%	7.8%	8.0%	8.0%	7.6%
Débit Bord	17.5%	16.2%	16.2%	16.3%	16.2%	15.3%

Tableau 7: Comparaison des débits de rives dans les jaugeages ADCP et au camion hydrométrique.

On retient de la comparaison que les extrapolations de bord de WinRiver sont sensiblement égales aux débits de bords mesurés au saumon. On constate un écart en débit de 1% mais il faut rappeler que le fait de couper les ensembles à 3 mètres de la berge est pénalisant en terme de débit mesuré par les ADCP (on mesure ici 67% du débit contre 71% pour une mesure non tronquée).

6.2 Comparaison mesures en amont du pont

Une comparaison de 4 techniques de mesure de **vitesse de surface** a été menée en amont de la passerelle durant la matinée du 14 septembre (série de mesure S22). Les appareils déployés étaient les suivants :

- **ADCP du profil P23** : les valeurs de vitesse retenues sont celles de la cellule la plus en surface qui est centrée à 30 cm sous celle-ci.
- **Camion jaugeur** avec saumon de 45 kg déployé en amont de la passerelle. Pour les besoins de la comparaison, les vitesses de surfaces ont été extraites (les valeurs de vitesses sont prises à un rayon de saumon sous la surface soit 7 cm).
- **Radar de surface SVR** : chaque vitesse correspond à une moyenne de 10 tirs du radar en amont de la passerelle (Figure 21). Un tir de radar mesure la vitesse des rugosités de l'interface eau/air par analyse doppler. Le calcul comporte une correction trigonométrique à partir de l'inclinomètre embarqué du radar.



Figure 21 : Visée radar SVR depuis la passerelle avec en arrière-plan le camion-jaugeur

- **Mesure par temps de transit de flotteurs** sur une distance de 10 mètres en amont de la passerelle. Les flotteurs utilisés étaient des citrons présentant une densité adéquate pour ce type d'écoulement (absence d'influence du vent).

On synthétise les résultats dans la Figure 22.

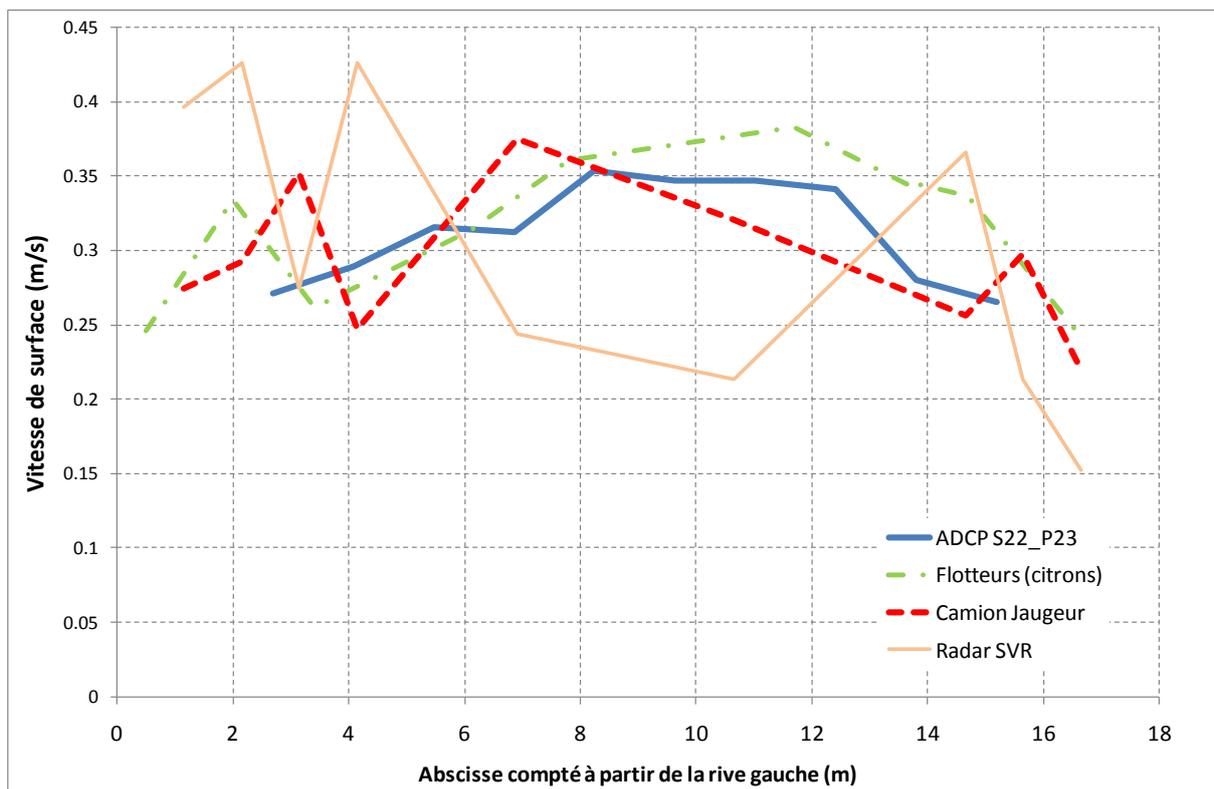


Figure 22 : Vitesses de surface mesurées lors de la série 22 en amont du pont P6 par différentes techniques : ADCP (cellules du haut), flotteurs (citrons), camion jaugeur (moulinet en surface) et radar vélocimétrique SVR

On retient la cohérence des valeurs de vitesses obtenues par les 4 techniques avec deux réserves :

- Le radar SVR montre une certaine dispersion sur les valeurs de vitesse (malgré le procédé par moyenne de 10 tirs). La qualité de la mesure radar dépend de l'intensité

du signal rétrodiffusé. Le canal de la Gentille présentant une surface libre très lisse, il se peut que l'intensité rétrodiffusée ait été trop faible, perturbant la mesure de vitesse.

- Le saumon mesure également un champ de vitesse hétérogène en apparence. Ceci peut avoir plusieurs causes telles que les variations de débit durant le jaugeage ou un temps de comptage de 30s trop court vis-à-vis de la pulsation de l'écoulement en surface.

6.3 Comparaison mesures en aval du pont

Une méthode de mesure de débit par analyse d'images a été déployée en aval du pont. Cette technique, appelée Large-Scale Particle Image Velocimetry (LSPIV), mesure le champ 2D instantané de vitesse de surface d'un écoulement grâce à la reconnaissance statistique du déplacement de traceurs représentatifs de cet écoulement. Aucun traceur n'étant naturellement présent à la surface de l'écoulement du canal de la Gentille, on a ajouté, lors des mesures LSPIV, des chips de maïs, biodégradables et sans danger pour l'environnement, à la surface libre. Ces chips suivent et tracent les vitesses de surface. Des séquences horodatées d'images de l'écoulement ensemencé sont enregistrées, et l'analyse LSPIV est menée a posteriori grâce au logiciel Fudaa_LSPIV. Cette analyse consiste en :

- Une orthorectification des images enregistrées afin de corriger des effets de perspective les prises de vue. La Figure 23 montre une image telle qu'enregistrée et la même image orthorectifiée.

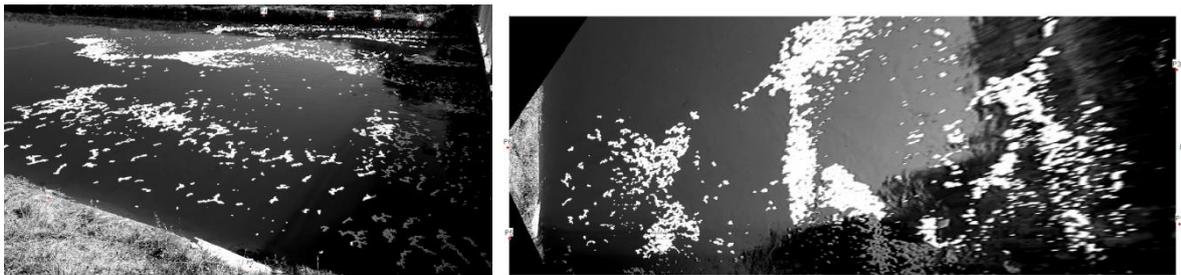


Figure 23 : Une image telle qu'enregistrée par la caméra et la même image orthorectifiée en vue de l'analyse des vitesses LSPIV.

- Une analyse du déplacement des traceurs de l'écoulement. Cette analyse est réalisée entre deux images successives, puis répétée sur toutes les paires d'images disponibles. On en tire des champs de vitesses instantanées 2D de surface par paire d'image analysée, et un champ de vitesses moyennes 2D de surface par essai LSPIV. La Figure 24 montre un champ moyen de vitesse pour l'essai LSPIV_1.

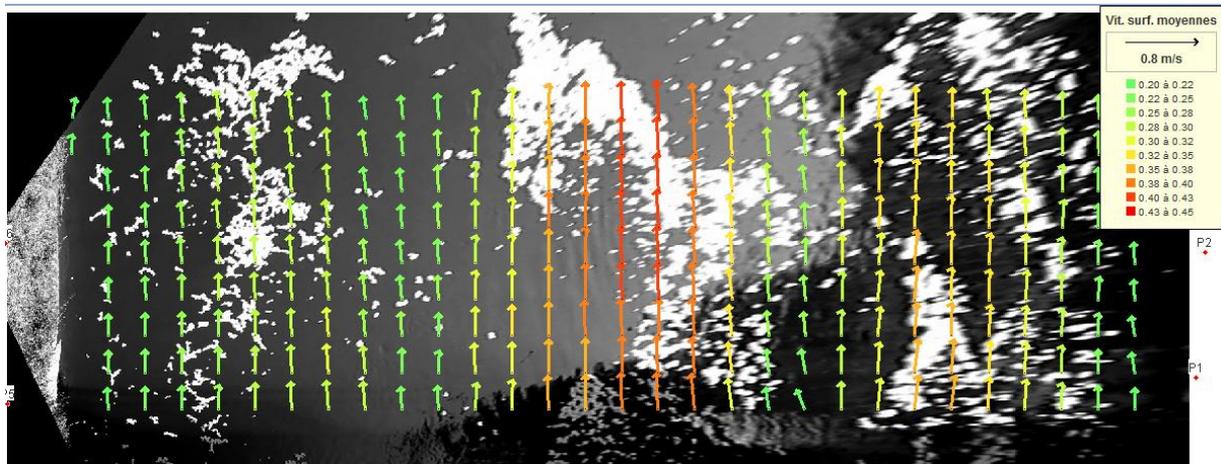


Figure 24 : Champ moyen de vitesse de surface obtenu pour l'essai LSPIV_1.

- En connaissant la bathymétrie et en intégrant un modèle hydraulique reliant la vitesse de surface à la vitesse moyenne sur la profondeur, on peut calculer le débit.

Cinq séries de mesures LSPIV ont été réalisées :

- LSPIV_1 : le 13/09 à 15h46
- LSPIV_2 : le 14/09 à 09h51
- LSPIV_3 : le 14/09 à 10h24
- LSPIV_4 : le 14/09 à 10h50
- LSPIV_5 : le 14/09 à 15h36

La Figure 25 montre le champ de vitesse de surface moyen LSPIV pour l'essai LSPIV_4, correspondant à la série ADCP S22, et réalisé en même temps que les mesures au camion jaugeur et au citron présentés en partie 6.2 .

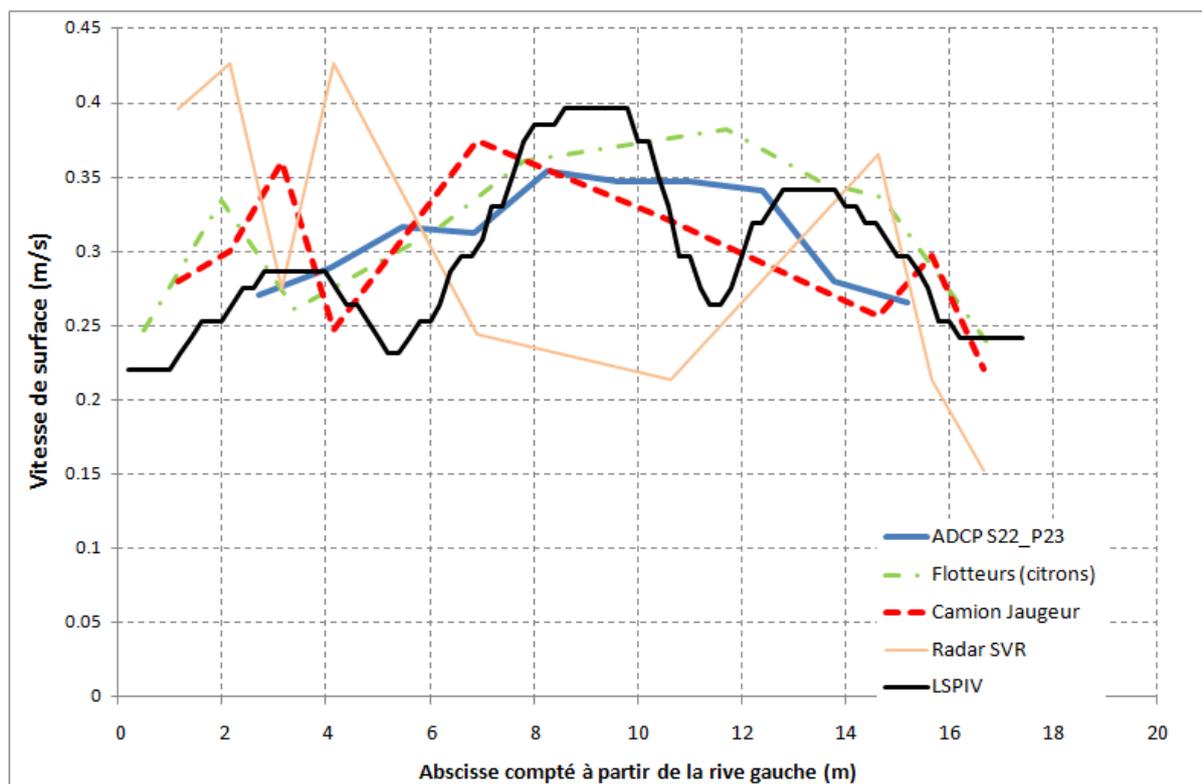


Figure 25 : Vitesses de surface moyennes LSPIV pour l'essai LSPIV_4, correspondant à la série ADCP S22, et mesures simultanées au camion jaugeur et au citron.

Les mesures étant réalisées en aval du pont Pt6, l'effet des piles est nettement visible sur le champ de vitesse de surface aux abscisses 5 et 11 mètres. Dans la partie centrale, où l'écoulement n'est pas perturbé par les piles de pont, les vitesses moyennes LSPIV sont de l'ordre de 0,4 m/s, légèrement supérieures aux vitesses mesurées par flotteurs (0,38 m/s) et camion-jaugeur (0,35 m/s).

Il est intéressant de comparer les débits mesurés par la méthode LSPIV aux débits ADCP des séries correspondantes. Pour cela, la vitesse de surface LSPIV est convertie en vitesse moyennée sur la profondeur en la multipliant par 0,9. Ce coefficient vient de l'analyse des profils verticaux de vitesse réalisée en partie 2.2.1 sur les ADCP en aval direct de Pt6. Les vitesses LSPIV sont interpolées sur un transect 5m en aval de la passerelle Pt6, et les vitesses moyennées sur la profondeur sont associées aux profondeurs du transect pour calculer le débit.

Le Tableau 8 montre les résultats obtenus.

Série LSPIV	Q LSPIV (m3/s)	Série ADCP	Q ADCP (m3/s)	Différence (%)
LSPIV_1		S11	10.8	
LSPIV_2	12.7	S21	12.5	1.60%
LSPIV_3	11.8	S21	12.5	-5.60%
LSPIV_4	12.5	S22	13.2	-5.30%
LSPIV_5	10.8	S31	11.2	-3.57%

Tableau 8 : Débits obtenus lors des essais LSPIV et comparaison aux débits moyens ADCP correspondants.

Les débits LSPIV sont très proches des débits ADCP moyens par série. La série S11, du fait de sa forte variabilité due à l'arrêt des groupes de l'usine, n'est pas étudiée. On remarque une sous estimation des débits LSPIV par rapport aux ADCP. La proximité importante du transect de calcul de débit LSPIV par rapport à Pt6 (5m en aval de Pt6) peut être incriminée. Le coefficient de débit de 0,9 est calculé sur le premier ADCP en aval de Pt6, 10m en aval. La perturbation des piles de la passerelle sur les profils verticaux de vitesse est probablement plus importante au niveau du transect LSPIV, et le coefficient de débit calculé en P19 est peut être sous estimé.

7 Essais par dilution à la rhodamine WT (GD et CP)

7.1 Conditions de l'expérimentation

La méthode de mesure des débits des cours d'eau par dilution de traceur est connue depuis le XIX^{ème} siècle (Perret, 2011). Son automatisation grâce à des enregistreurs de terrain est plus récente (conductiètres pour les traceurs salins et fluorimètres pour les traceurs fluorescents). Des fluorimètres dédiés aux mesures de débit ont été développés et sont testés actuellement dans différents services (EDF, CNR, Irstea). Il existe deux méthodes mesure par dilution de traceur :

- La méthode globale consiste à injecter instantanément dans le cours d'eau une masse connue de traceur. La concentration après dilution dans le cours d'eau est mesurée plus en aval, après l'obtention d'un mélange homogène du traceur dans la rivière.
- La méthode constante consiste à injecter le traceur en continu dans la rivière à l'aide d'un dispositif permettant de stabiliser le débit injecté. En aval, à la section de mesure, on doit atteindre une situation d'équilibre avec une concentration stable en traceur.

Les jaugeages par traçage réalisés pendant l'intercomparaison Gentille 2011 ont permis de mettre en œuvre 11 fluorimètres FL30 GGUN de Albillia et une sonde Hydrolab de Ott. Le traceur utilisé est la rhodamine WT. En trois jours 4 injections instantanées (méthode globale, notées G1 à G4) ont été réalisées et une injection à débit constant (notée C1). La distance entre le point d'injection et le pont aval est de 2,3 km. Trois ponts sont instrumentés et sont nommés pont amont, intermédiaire et aval (Figure 26). Les mesures ADCP sont réalisées au niveau du pont aval. La configuration de ce site n'est pas propice à une bonne application de la méthode par dilution car l'écoulement est très lent. La comparaison des signaux des capteurs reste intéressante pour améliorer leur déploiement.

Pour une meilleure représentativité du signal de rhodamine un point de contrôle est réalisé sur tous les fluorimètres en présence. Ce point de contrôle consiste à préparer une solution de concentration connue en rhodamine WT avec de l'eau de la rivière. Cette solution est conservée pour effectuer des contrôles en début et en fin de traçage.

Les données enregistrées par les instruments sont dépouillées par la suite pour obtenir des valeurs de débit.

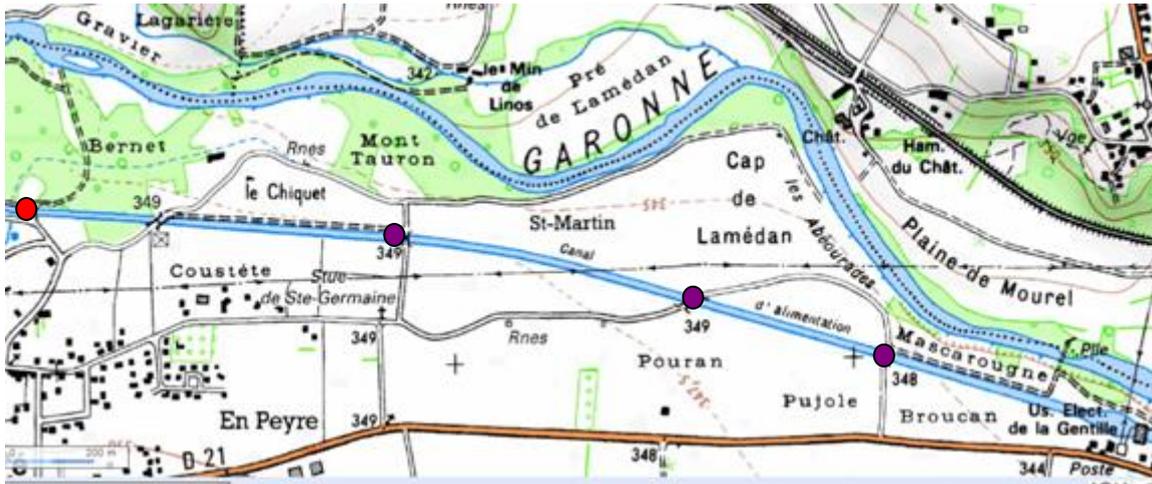


Figure 26 : Canal de la Gentille (injection : point rouge, mesures : points violet) Geoportail



Figure 27 : Injection globale au centre de la section avec rinçage du seuil

7.2 Injection G1 & G2 du 13 septembre

Pour les jaugeages par la méthode globale, 400 ml de rhodamine WT (diluée à 20%) de chez WWR (mesurée à la fiole jaugée) ont été injectés (Figure 27) en suivant différents modes

d'injection (centrée ou répartie sur la section). L'injection G1 est réalisée au centre de l'écoulement (injection à 12:35 TU+2). L'injection G2 est séparée en 3 seaux et est répartie dans la section (injection à 15:28 TU+2). Le nuage suite à l'injection G1 est un peu plus rapide que celui de l'injection G2, car il arrive au pont amont 5 min avant le second nuage et garde son avance jusqu'au pont aval. Le temps de propagation entre l'injection et le pont aval est de 1h25 pour G1 et 1h30 pour G2. Le mode d'injection explique donc le temps de propagation un peu différent entre les deux traçages. La Figure 29 représente les signaux des capteurs 517 et 518 au pont aval pour les traçages G1 et G2.

		Rive gauche	Intermédiaire	Milieu	Intermédiaire	Rive droite	Moyenne
Pont amont	N° Série	906	905	902	910	901	
	Débit [m³/s] G1	20,76	15,69	14,86	14,62	14,32	16,05
	Débit [m³/s] G2	17,7	14,13	15,81	16,88	17,4	16,38
Pont aval	N° Série	517		911		518	
	Débit [m³/s] G1	15,93		17,11		15,05	16,03
	Débit [m³/s] G2	18,96		19,87		18,16	18,99

Tableau 9 : Débit dépouillé des fluorimètres pour les traçages G1 & G2

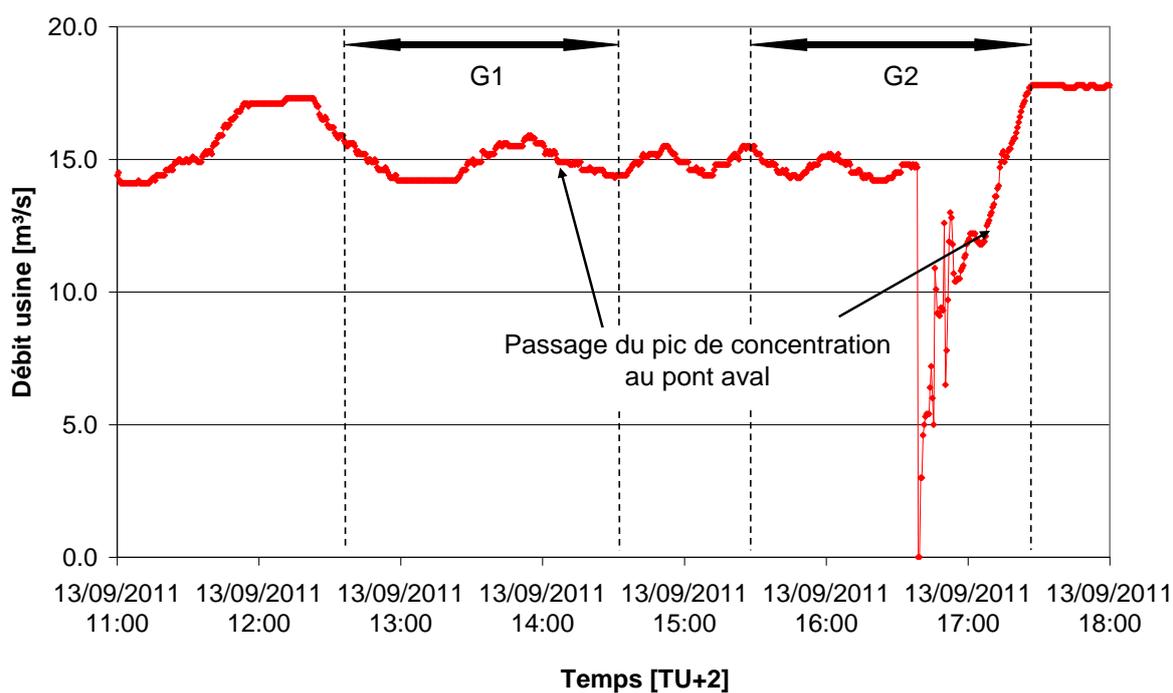


Figure 28: Variations du débit pendant les traçages G1 & G2 du 13 septembre

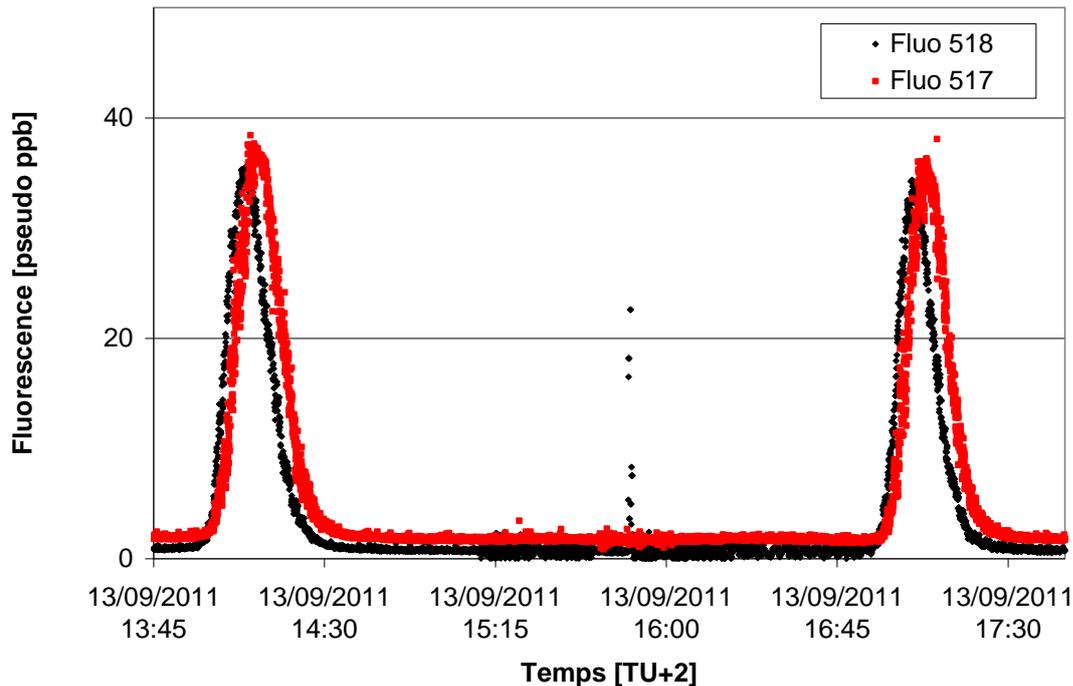


Figure 29 : Variations de fluorescence au pont aval pendant les traçages G1 & G2

7.3 Comparaison au débit usine pour G1

Il est difficile de comparer les débits du traçage (Tableau 9) avec le débit usine (Figure 28) du fait des variations de ce dernier pendant les essais. Sur la Figure 28 sont indiqués par des lignes pointillées le début d'injection et la fin du passage du nuage au pont aval, l'heure du pic de concentration est indiquée par une flèche. Si l'on prend le débit moyen entre le temps d'injection et le passage au pont aval on a un débit usine de $14,8 \text{ m}^3/\text{s}$. Si l'on considère le temps de passage du pic de concentration au pont aval et qu'on lui applique un retard correspondant au temps de déplacement de la masse d'eau jusqu'à l'usine (35min) on obtient $15,2 \text{ m}^3/\text{s}$, sans appliquer de retard le débit est de $14,9 \text{ m}^3/\text{s}$.

En considérant que le bon mélange est atteint au pont aval on a un écart compris entre +5,5 et +8,3 % de la valeur usine.

7.4 Comparaison au débit usine pour G2

En appliquant la même hypothèse de retard sur le cas de G2 on obtient un débit usine de $17,8 \text{ m}^3/\text{s}$ et la moyenne des fluorimètres surestime cette valeur de +6,6%. Pendant le passage du nuage G2 l'usine a cessé de fonctionner pendant quelques minutes ce qui rend difficile l'interprétation d'une moyenne des débits pendant le passage du nuage. Si l'on n'applique aucun retard et que l'on considère le temps d'arrivée du pic au pont aval, on a alors un débit usine plus faible de l'ordre de $12,5 \text{ m}^3/\text{s}$ qui est -34% inférieur au débit mesuré au pont aval avec les fluorimètres (en pleine remontée après un arrêt de l'usine, cf. Figure 28).

7.5 Injection C1 du 14 septembre

Un traçage avec injection à débit constant est réalisé avec le dispositif d'EDF DTG (injection 09:25-10:15 TU+2) 1l de solution commerciale est dilué dans dans 40l d'eau de la rivière.



Figure 30 : Le dispositif d'injection pour les traçages à débit constant

Des prélèvements sont réalisés sur les ponts : 10 prélèvements au pont amont durant 10 min et 10 prélèvements au pont aval durant 10 min

Si l'on analyse le signal observé sur les ponts comme si l'injection était globale on obtient un débit moyen de $14,4 \text{ m}^3/\text{s}$. Si l'on considère comme valeur usine le débit moyen entre l'heure d'injection et le passage au pont aval, on obtient un écart de +12% à la valeur usine ($12,8 \text{ m}^3/\text{s}$). Si on applique le retard de 35 min au milieu du plateau de concentration lorsqu'il passe au pont aval, on obtient un débit usine de $+12,6 \text{ m}^3/\text{s}$ soit 14 % d'écart. Cette exploitation des données est simplement indicative et la surestimation importante s'explique sans doute par la perte de traceur dans le dispositif d'injection (Figure 30) qui n'a pas d'influence lorsqu'on réalise une mesure par la méthode à débit constant.

7.6 Cas de la sonde Hydrolab

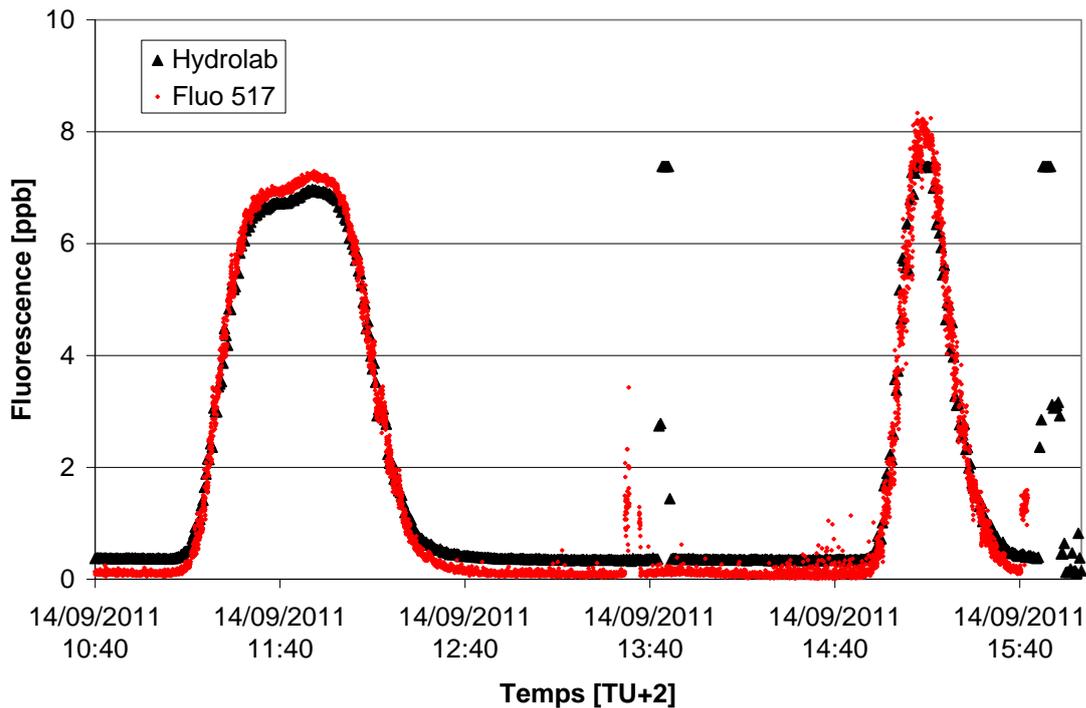


Figure 31 : Signal de rhodamine WT observé au pont aval pour les traçages C1 et G3

Une sonde Hydrolab (Ott) a été couplée à la sonde Albillia 517 pour comparaison. La sonde Hydrolab malgré un pas de temps minimal à la minute reproduit bien la dynamique du passage des deux nuages de traceurs (C1 et G3) observés le 14 septembre. Sur la Figure 31 le signal de la sonde 517 est convertit en ppb réel à l'aide d'une droite de calibration réalisée au laboratoire à Irstea Lyon, on se rend compte que les deux signaux se superposent bien. En effet les sondes Albillia mesurent dans une unité intermédiaire : les ppb de solution de commerciale, cette solution commerciale n'étant pas pure la correspondance en concentration réelle doit être calculée pour chaque instrument.

7.7 Mesure du débit de C1

Avec le signal en ppb réel obtenu par conversion ou directement par la sonde Hydrolab on peut facilement appliquer la formule théorique du procédé de dilution par injection à débit constant :

$$Q = q \frac{C_1}{C_2}$$

Avec Q le débit de la rivière en m^3/s

q le débit de la solution injectée en m^3/s

La concentration C_1 en g/l de la solution injectée

La concentration C_2 en g/l du plateau de concentration mesuré en aval

Application numérique

q : pour 40 litres injectés en 50 minutes soit $1.33 \cdot 10^{-5} \text{ m}^3/\text{s}$

C_1 : 200 g de rhodamine WT pure (1 litre à 20%) dans 40 litres soit 5 g/l

C_2 : 6.9 ppb soit $6.9 \cdot 10^{-6} \text{ g/l}$

On obtient un débit de $9.66 \text{ m}^3/\text{s}$ qui s'écarte donc de -26% de la valeur usine si on considère le débit pendant le passage du nuage au pont aval avec ou sans retard. Cet écart est considérable. La forme du pic mesuré au pont aval (Figure 31) semble indiquer que la concentration n'était pas stabilisée, ce qui pourrait expliquer que le bon mélange ne soit pas atteint pour cet essai et donc la méthode à débit constant inappropriée à cet endroit.

7.8 Injection G3 du 14 septembre

Pour ce troisième traçage tous les instruments ont fonctionné. L'injection est globale centrée sur la section et est réalisée à 13:00 TU+2. Les fluorimètres sont placés sur trois ponts en aval du point d'injection, les résultats sont présentés dans le Tableau 10.

		Rive gauche	Inter.	Milieu	Inter.	Rive droite	Moyenne
Pont amont	N° Série	906		902		901	
	Débit [m ³ /s] G3	17,59		11,18		9,35	12,71
Pont intermédiaire	N° Série	907		908		909	
	Débit [m ³ /s] G3	12,21		11,22		13,92	12,45
Pont aval	N° Série	517	910	911	905	518	
	Débit [m ³ /s] G3	13,8	12,04	12,12	12,79	11,91	12,53

Tableau 10 : Débit des fluorimètres pour le traçage G3

Lors de ce traçage on a visiblement un débit plus faible ce qui explique sans doute que le bon mélange soit plus long à atteindre, on voit dans les résultats qu'au pont amont le mélange n'est pas homogène. On a un débit à droite très inférieur au débit à gauche. Cette expérience nous confirme l'importance de la distance de bon mélange et de l'utilisation de plusieurs appareils pour bien évaluer le débit par la méthode globale.

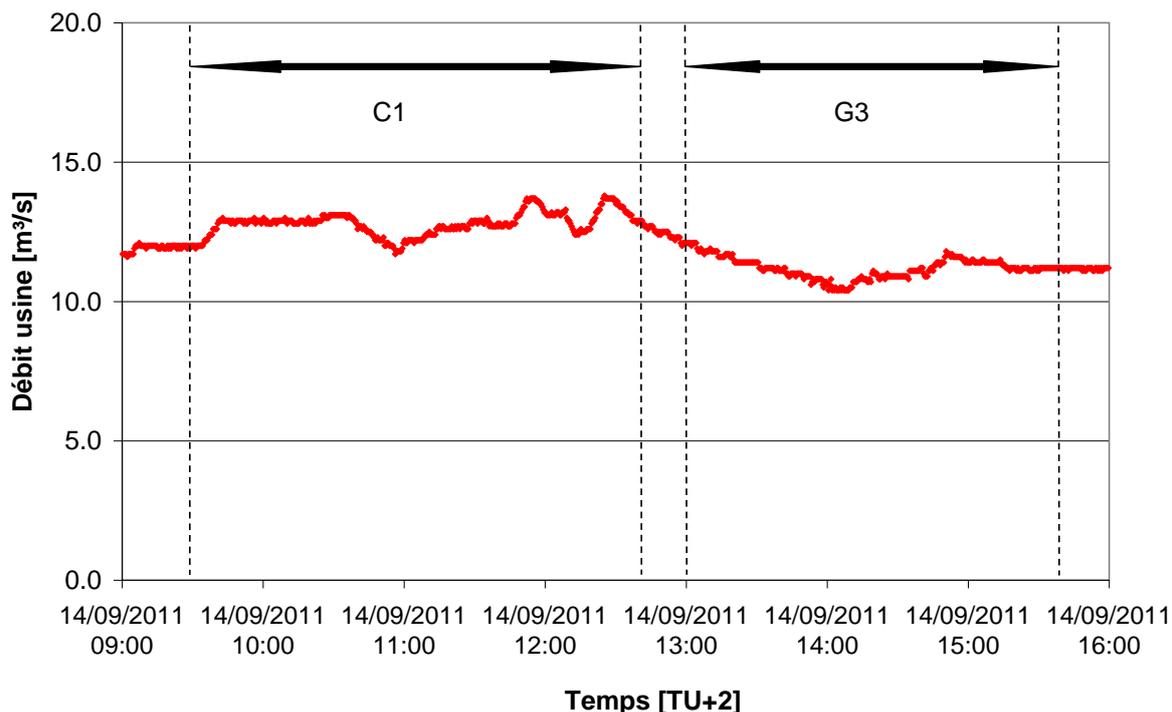


Figure 32 : Variations du débit pendant les traçages du 14 septembre

7.9 Comparaison au débit usine pour G3

Le temps de propagation entre l'injection et le pont aval est de 1h50 pour G3. En appliquant la même hypothèse de retard sur les cas précédents on obtient un débit usine de 11,1 m³/s et la moyenne des fluorimètres surestime cette valeur de 13%. Si l'on considère le temps de passage du pic de concentration au pont aval et qu'on lui applique un retard correspondant au temps de déplacement de la masse d'eau jusqu'à l'usine on obtient sensiblement le même écart. Si l'on n'applique pas de retard on réduit un peu l'écart à +9.7% de la valeur usine.

7.10 Injection G4 du 15 septembre

Tous les fluorimètres sont placés au niveau du pont aval, ils sont répartis dans la section comme indiqué dans le Tableau 11. L'injection est réalisée entre 09:00 et 09:15 TU+2.

	Rive gauche	Intermédiaire	Milieu	Intermédiaire	Rive droite
Surface	908		907		902
Milieu	518		901		906
Fond	911	910	905	517	909

Tableau 11 : Répartition des fluorimètres (N° Série) dans la section pendant le traçage G4.

	Rive gauche	Intermédiaire	Milieu	Intermédiaire	Rive droite
Surface	11,2		12,2		12,3
Milieu	14,0		14,7		14,4
Fond	13,8	13,5	14,1	14,2	13,9

Tableau 12 : Répartition des débits en m³/s pour le traçage G4

Pour cet essai la moyenne des débits sur la section est de 13,5 m³/s avec un écart type de 1,09 m³/s. On remarque que les valeurs les plus faibles sont en surface. La valeur usine correspondante est de 12,6 m³/s soit un écart de 6.7%. Le débit est beaucoup plus stable lors de cet essai que pour les autres traçages (Figure 33).

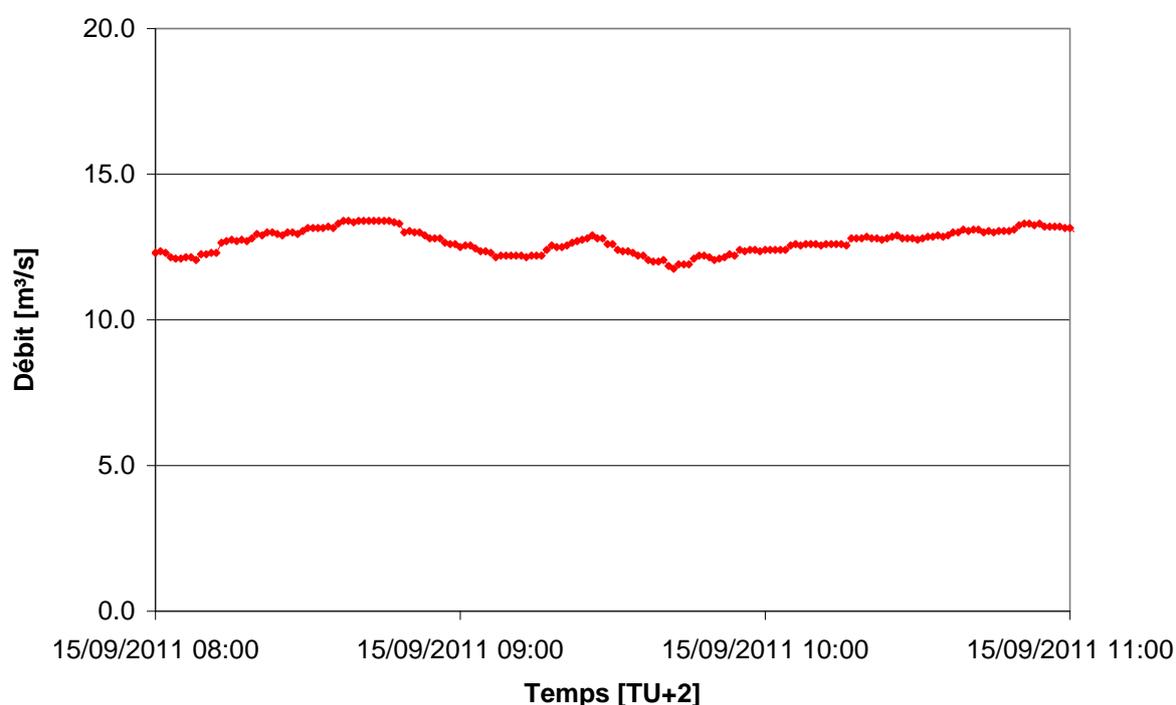


Figure 33 : Variations du débit pendant le traçage du 15 septembre.

7.11 Test de sensibilité sur le dépouillement

Les différents signaux enregistrés sont dépouillés avec le logiciel FLUO.exe d'Albilis en suivant les recommandations du constructeur.

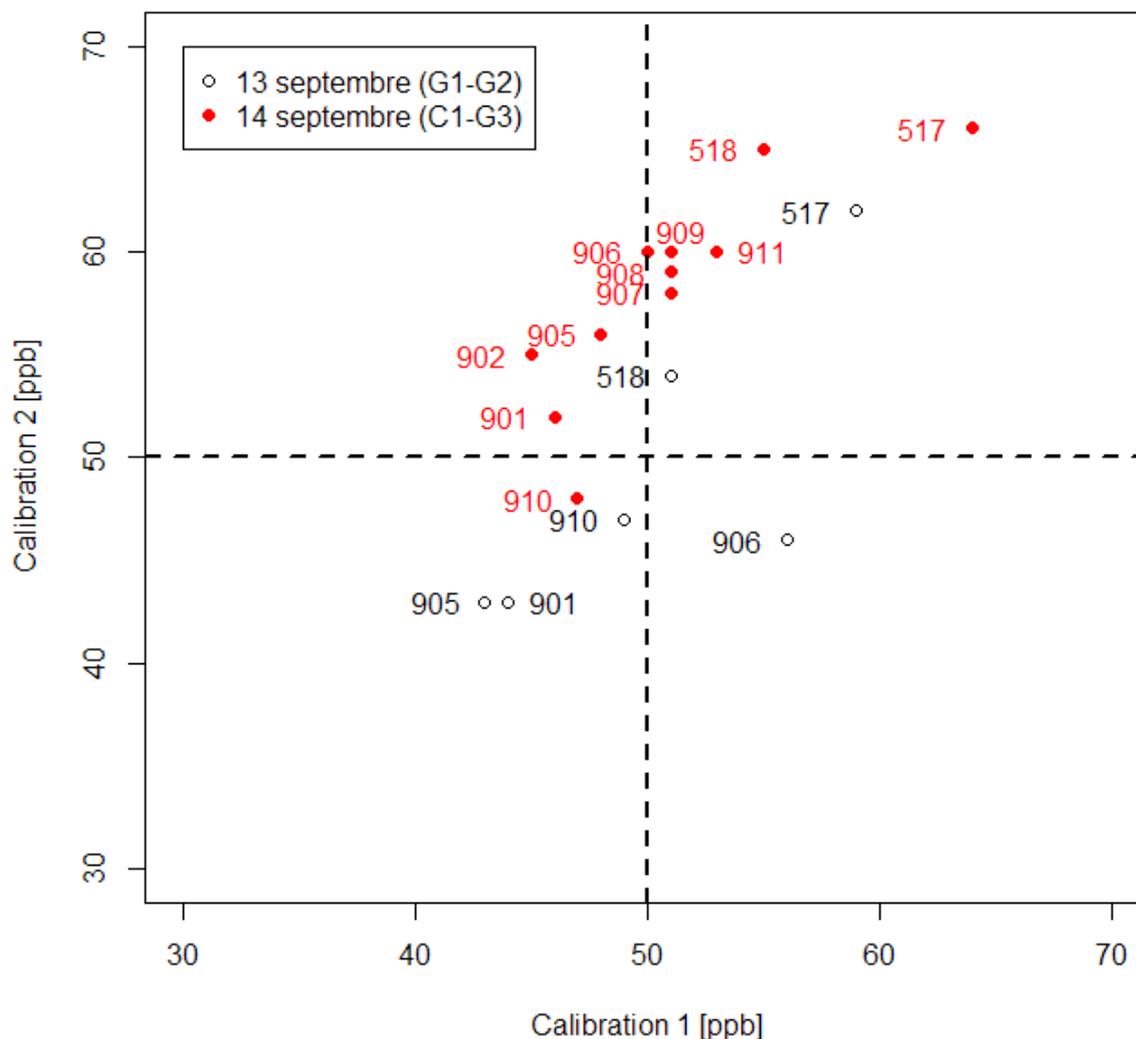


Figure 34 : Justesse des points de contrôle des fluorimètres.

La Figure 34 nous donne des indications sur la qualité de la mesure des points de calibration ou de contrôles. Chaque solution de contrôle à 50 ppb est mesurée deux fois (en début et en fin de journée), les deux séries (points vides et pleins) correspondent aux journées du mardi 13 et du mercredi 14. La tendance générale que l'on peut remarquer est que la deuxième calibration tend à surestimer la concentration ce qui est un peu surprenant car on pourrait penser que la rhodamine se dégrade pendant la journée (elle est conservée dans des seaux spécifiques de DTG, opaques, fermés et maintenus à température de l'eau de la rivière). Les deux solutions de calibration testées appartiennent au même lot et ont été préparées dans des conditions de laboratoire rigoureuses. Ce type de graphique peut nous apporter des informations sur des appareils en particulier, par exemple on remarque que le fluorimètre 517 surestime systématiquement la concentration mais qu'il est plus fidèle que l'instrument 906.

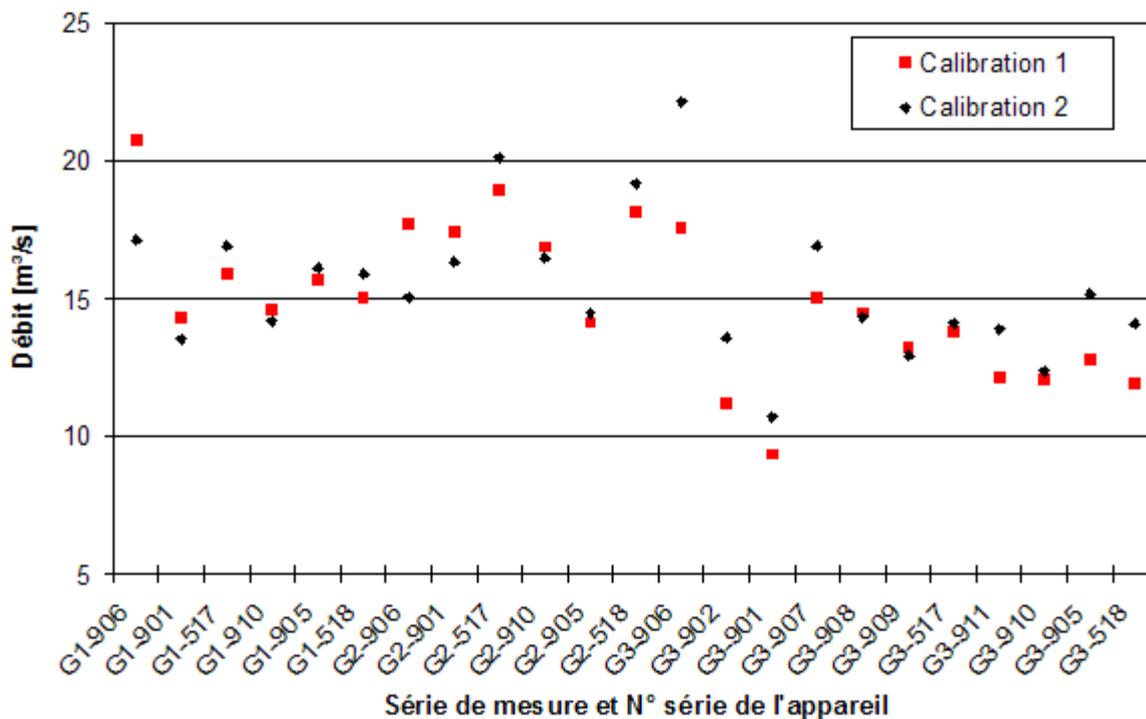


Figure 35 : Valeurs de débits obtenues en dépouillant avec les valeurs de calibration 1&2.

La Figure 35 représente les valeurs de débit obtenues pour chacune des injections globales pour lesquelles nous disposons de deux points de calibration. L'utilisation de la seconde mesure de calibration pour dépouiller les données des fluorimètres a tendance à donner des débits plus forts que la première calibration. Si l'on recoupe cela avec les informations de la Figure 34, la surestimation de la concentration de calibration entraînerait une surestimation du débit. L'écart entre les mesures issues des deux dépouillements (calibrations 1 et 2) représente 1,3 m³/s et 9 % en moyenne.

L'effet de l'opérateur sur le dépouillement a également été testé, la comparaison des dépouillements à chaud par les équipes avec un dépouillement au bureau par un seul opérateur appliquant le même protocole sur les données de chacun donne un écart moyen en débit de 0,5 m³/s (sur les séries G1 à G4).

Remarque : L'instrument 906 semble avoir un comportement anormal. Les points de calibration ne sont pas stables et entraînent un dépouillement douteux.

7.12 Conclusion

Cette campagne d'essai est très intéressante pour mieux comprendre la méthode par dilution de traceur et le fonctionnement des fluorimètres de terrain en particulier. On peut identifier un certain nombre de sources d'erreurs qui expliquent les résultats obtenus pour ces 5 traçages :

- Les conditions recommandées de mélange du traceur ne sont pas respectées (peut être jusqu'au pont aval), ceci se vérifie grâce aux mesures automatiques au niveau des ponts intermédiaires.
- La distance de mélange est aussi sans doute un peu courte pour palier au manque de brassage, en particulier pour le traçage C1 ou le pic mesuré n'a pas la forme d'un plateau stabilisé.

- L'instabilité du débit de l'usine augmente aussi l'incertitude sur les comparaisons de valeurs mesurées.
- Les points de calibration utilisés dans la méthode globale ont une influence considérable sur le calcul du débit, l'instabilité de ces solutions et/ou de la réponse des instruments est à approfondir pour rendre plus robuste la méthode.
- L'opérateur de calcul du débit a également une influence sur le résultat des dépouillements (jusqu'à 5% d'écart sur un même signal dépouillé), cette erreur est fortement liée à la stabilité du point de calibration.

La modélisation hydraulique pourra nous donner des réponses sur la diffusion du nuage de traceur et la propagation du débit. Le débit ADCP pourra également nous permettre des comparaisons plus robustes en le prenant comme mesure de référence au pont aval. Des tests métrologiques en conditions contrôlées doivent être menés sur les fluorimètres pour mieux maîtriser la chaîne de mesure et de calcul du débit. Nous pensions avant ces essais que la préparation de la solution de calibration était la principale source d'erreur. Il apparaît que sa mesure *in-situ* et peut être les conditions de sa mesure ou de sa conservation ont un rôle prépondérant dans les résultats des jaugeages par la méthode globale.

8 Conclusions et retour d'expérience

Cette intercomparaison Gentille 2011 s'est avérée un succès en termes d'organisation, de participation et d'échanges techniques, notamment avec les constructeurs (ex : discussions collectives avec les représentants Ott au sujet de la perche ADC et des problèmes de coefficient de fond dans le logiciel Qreview).

L'intercomparaison ADCP proprement dite a été menée à bien mais son exploitation a été rendue compliquée par des problèmes liés à un débit non stabilisé en raison du déficit hydrologique, à des conditions de mesures pas si homogènes finalement entre les sections de mesure (influence des piles du pont et dans une moindre mesure, de l'usine), et à des difficultés de coordination (on privilégiera à l'avenir la mesure en continu plutôt que des créneaux de mesure simultanée sur un nombre de transects fixé, plus difficiles à obtenir en pratique).

Les débits fournis par les différents appareils ADCP ont été comparés entre eux, ainsi qu'aux mesures indépendantes. De manière générale, les débits moyens obtenus par ADCP sont en bon accord entre eux (écarts inférieurs à 5%). Lors de l'intercomparaison ADCP, aucun appareil n'a été mis en défaut. On notera cependant que pour les conditions du canal, de meilleurs résultats ont été obtenus avec les RG1200 et SP qu'avec les RG600 et River Ray, ce qui s'explique par le tirant d'eau modeste des sections.

Une estimation de l'incertitude de mesure de la méthode ADCP dans les conditions de mesure de l'intercomparaison a été réalisée à partir des méthodes normalisées d'essais interlaboratoires. Les incertitudes élargies au niveau de confiance de 95% obtenues sont entre 6 % et 7,5 %, pour un seul transect ADCP. En réalisant la moyenne de 6 transects successifs, les incertitudes élargies au niveau de confiance de 95% obtenues sont entre 4 % et 6 %.

Concernant la technique ADCP et sa comparaison aux méthodes par exploration du champ des vitesses (saumon, flotteurs), les essais fournissent des retours intéressants sur la notion de profil vertical et d'extrapolation des débits par coefficient de fond ou de surface.

Pour la première fois, l'intercomparaison a été l'occasion d'essais comparatifs par dilution de traceur fluorescent (rhodamine WT). Les résultats contrastés appellent d'autres études pour mieux comprendre le problème de robustesse de la technique, sans doute lié à la variabilité de l'étalonnage selon des facteurs restant à préciser.

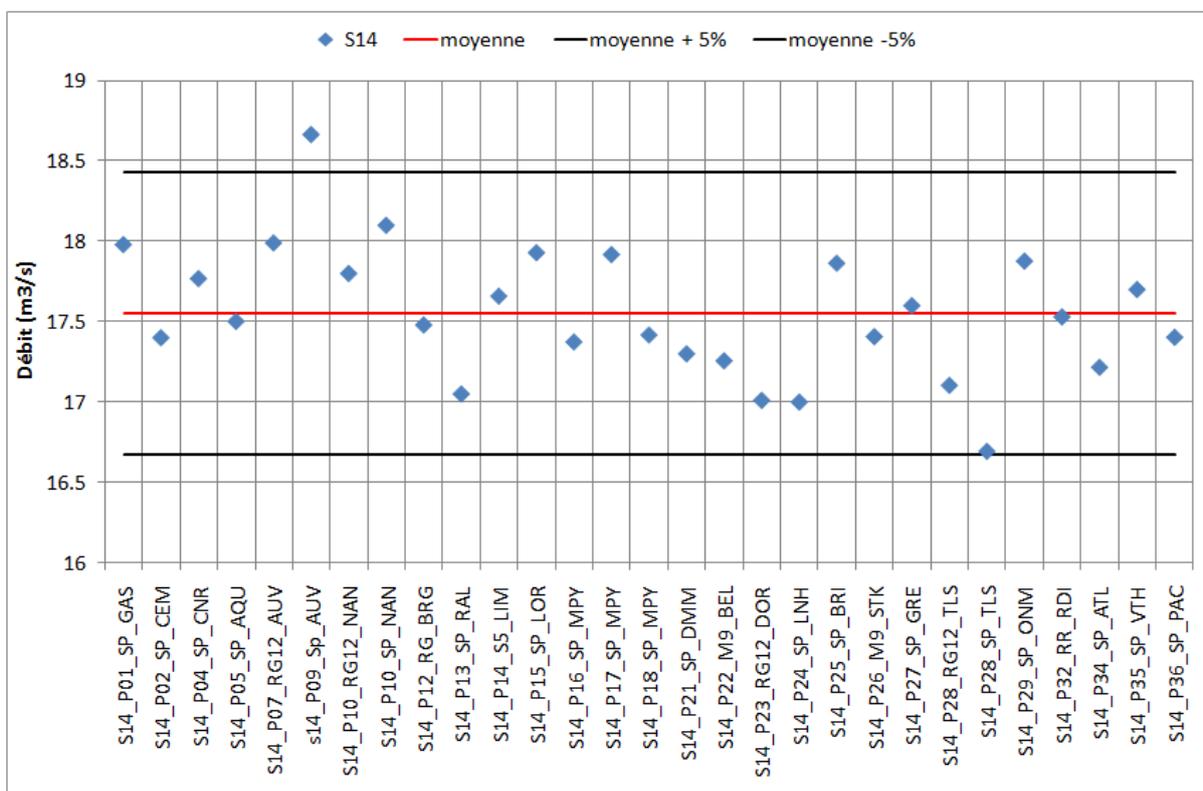
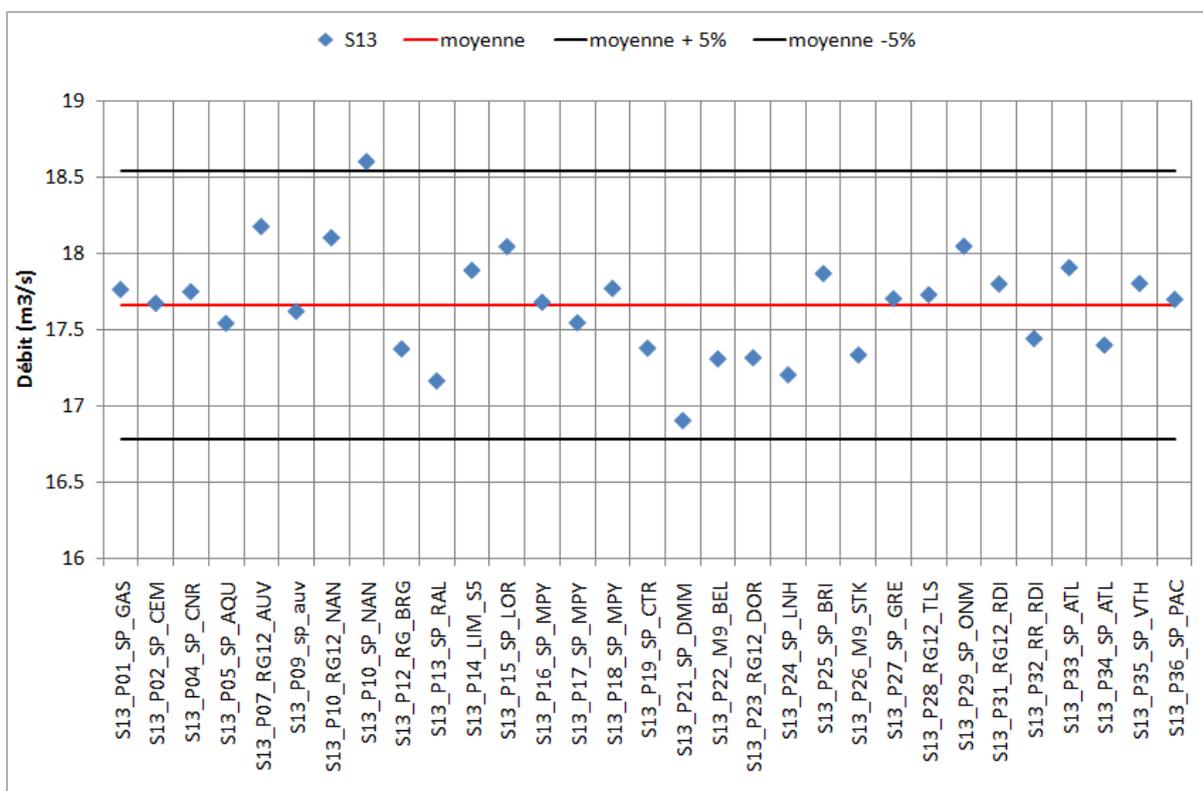
L'ensemble des mesures de débit indépendantes obtenues en parallèle fournit un intéressant comparatif entre techniques hydrométriques : ADCP, dilution, V-ADCP, flotteurs, LSPIV, etc.

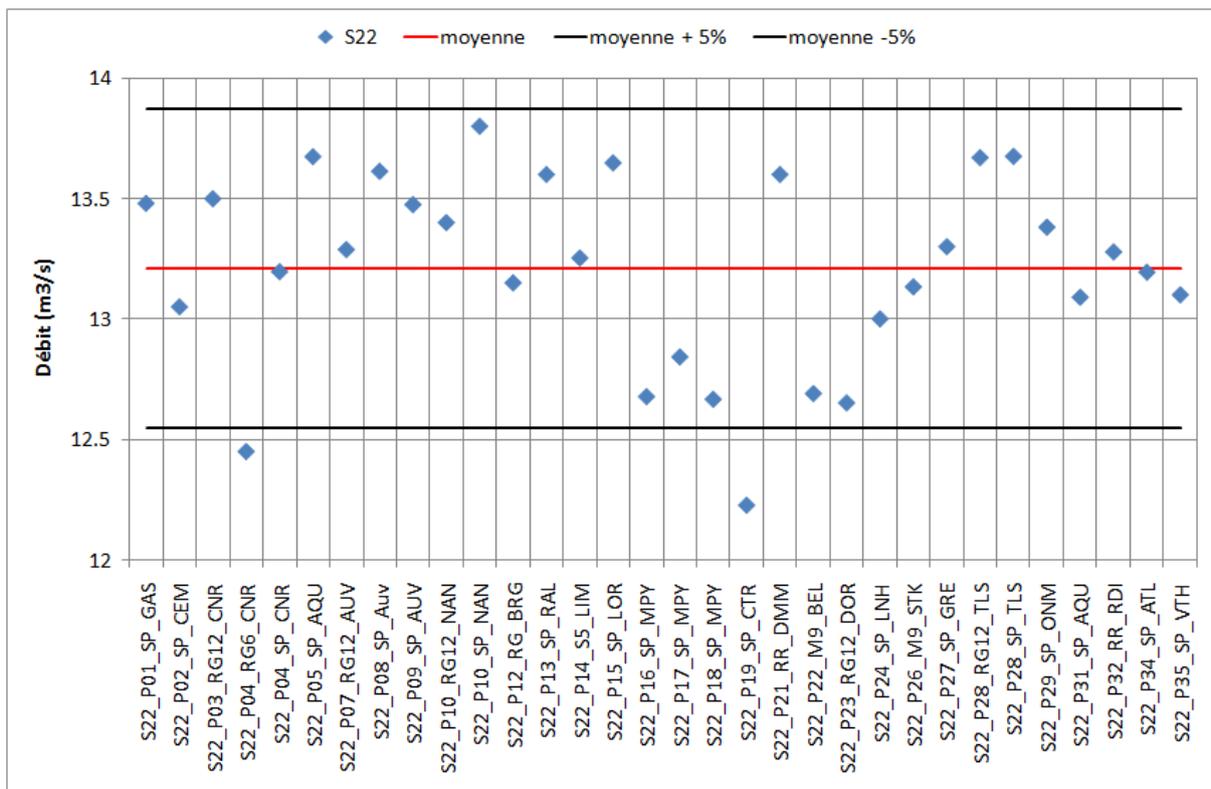
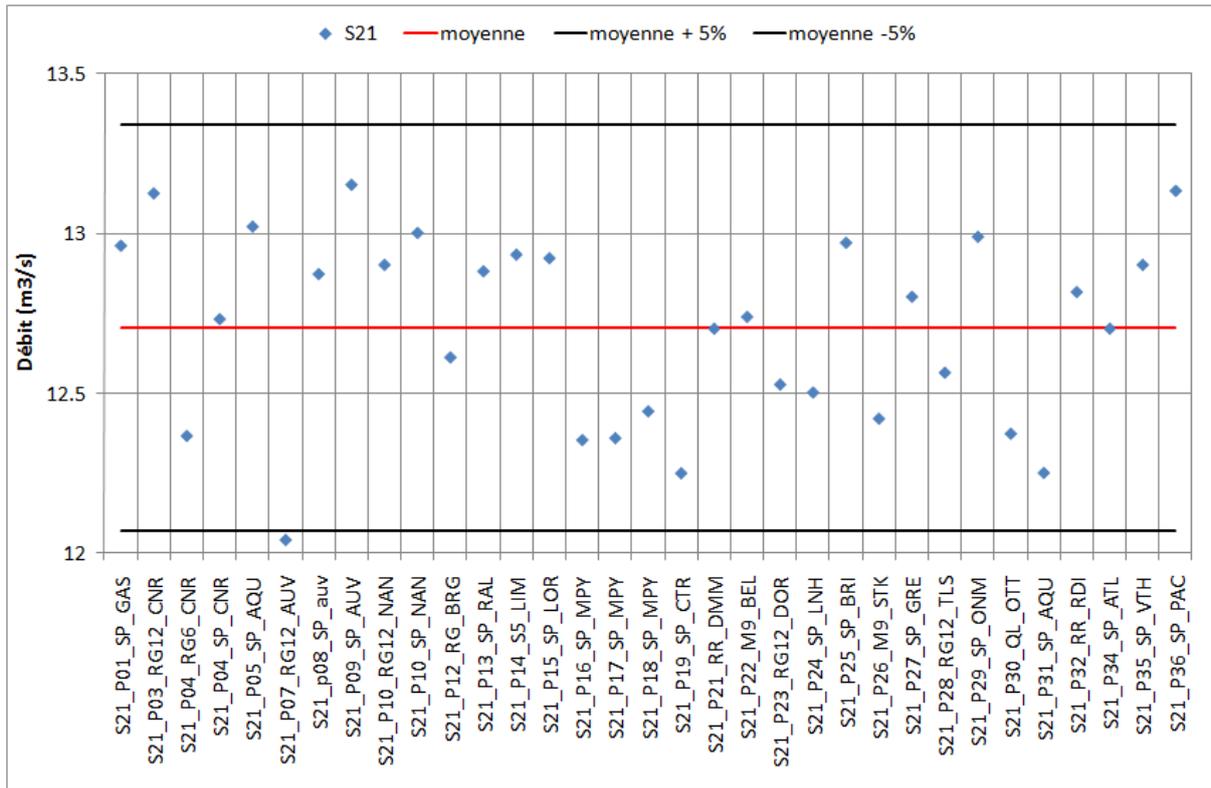
L'intercomparaison a été appréciée par l'ensemble des participants, qui ont pu également bénéficier d'échanges techniques avec d'autres hydromètres parfois éloignés géographiquement, dans une ambiance conviviale. Le retour d'expérience (logistique, propagation et stabilisation des débits, hydraulicité des sections de mesure) permettra d'optimiser le planning des futures intercomparaisons.

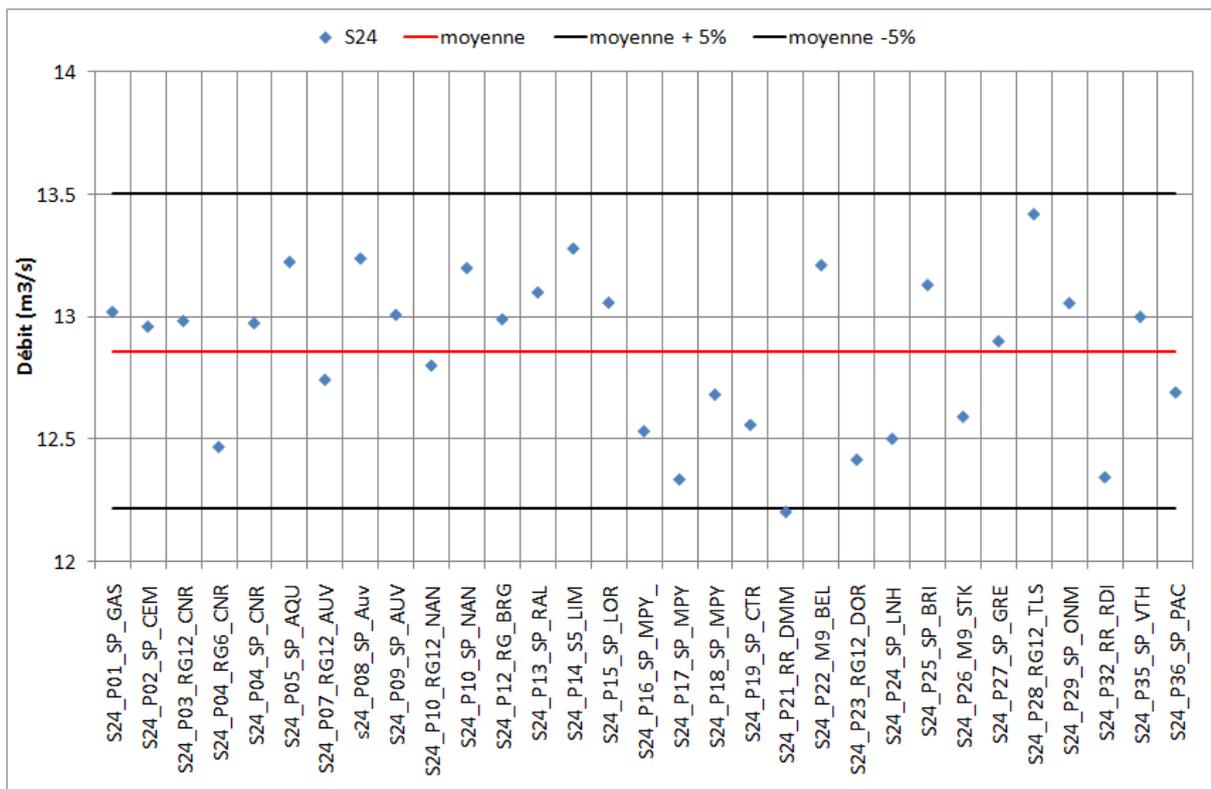
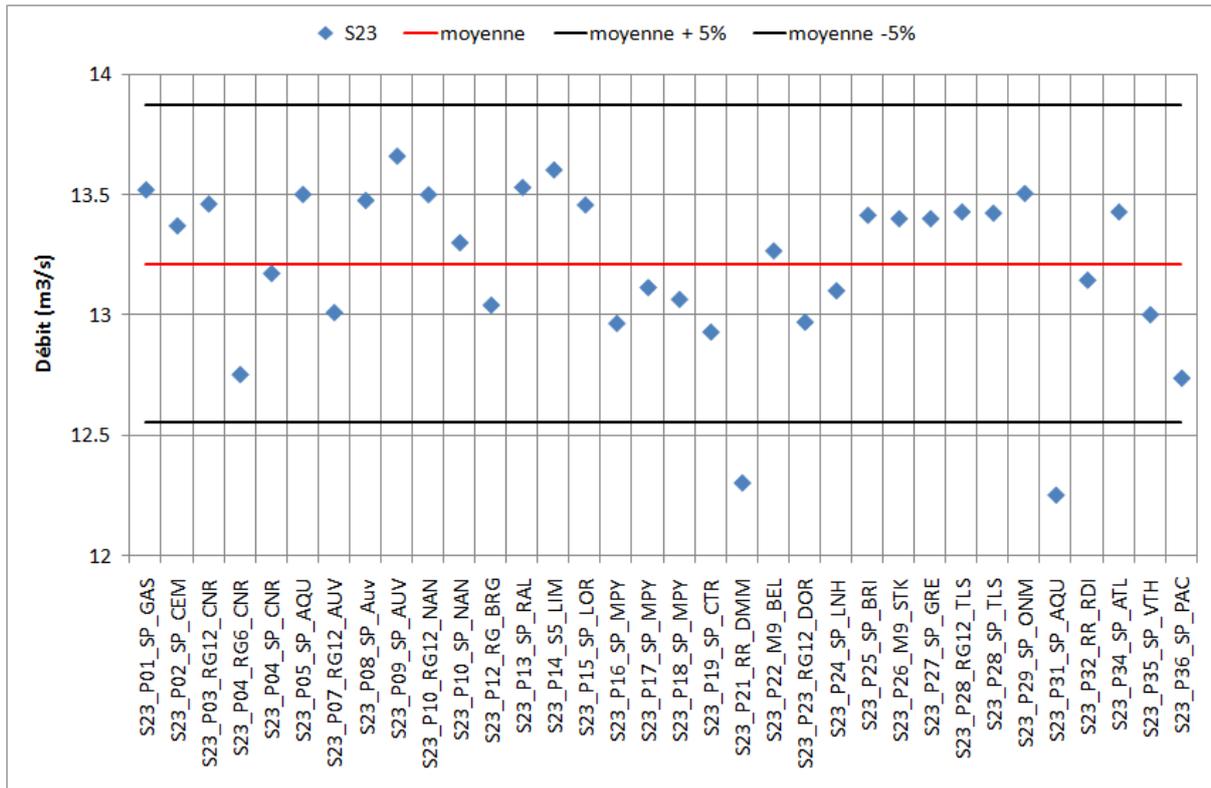
9 Bibliographie

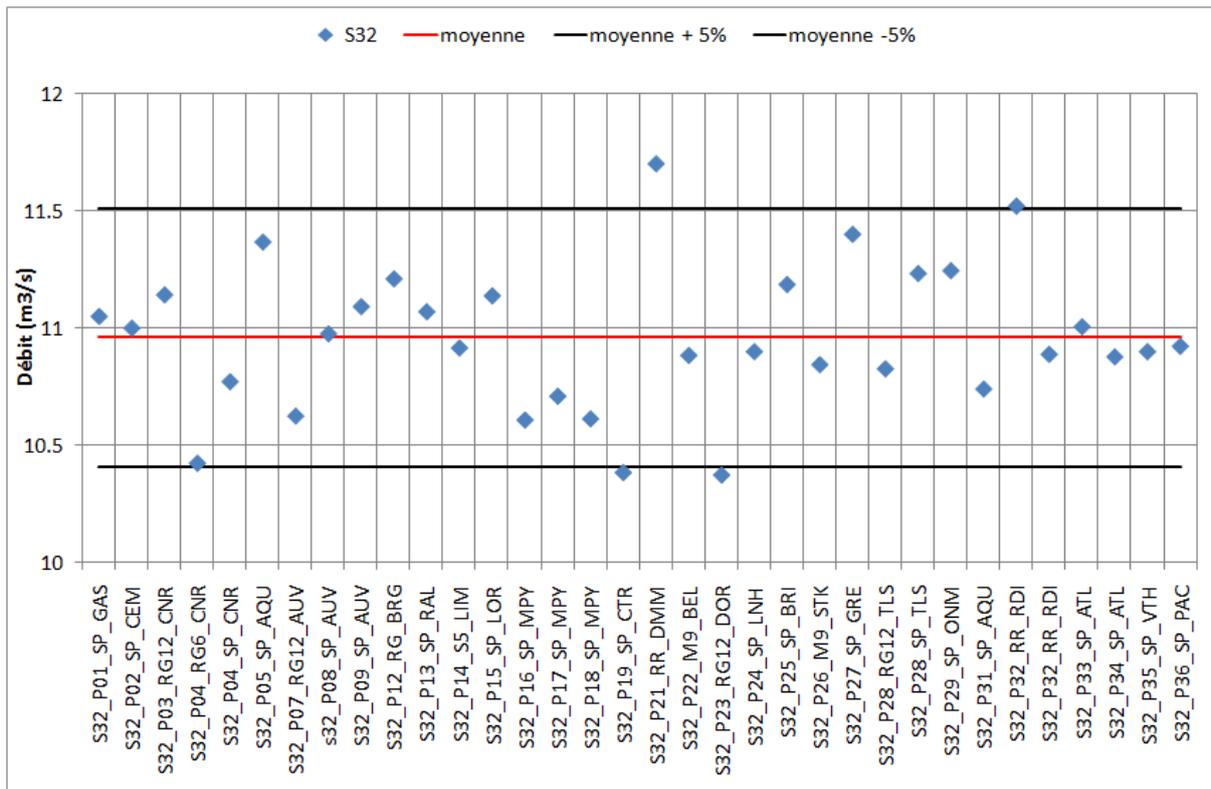
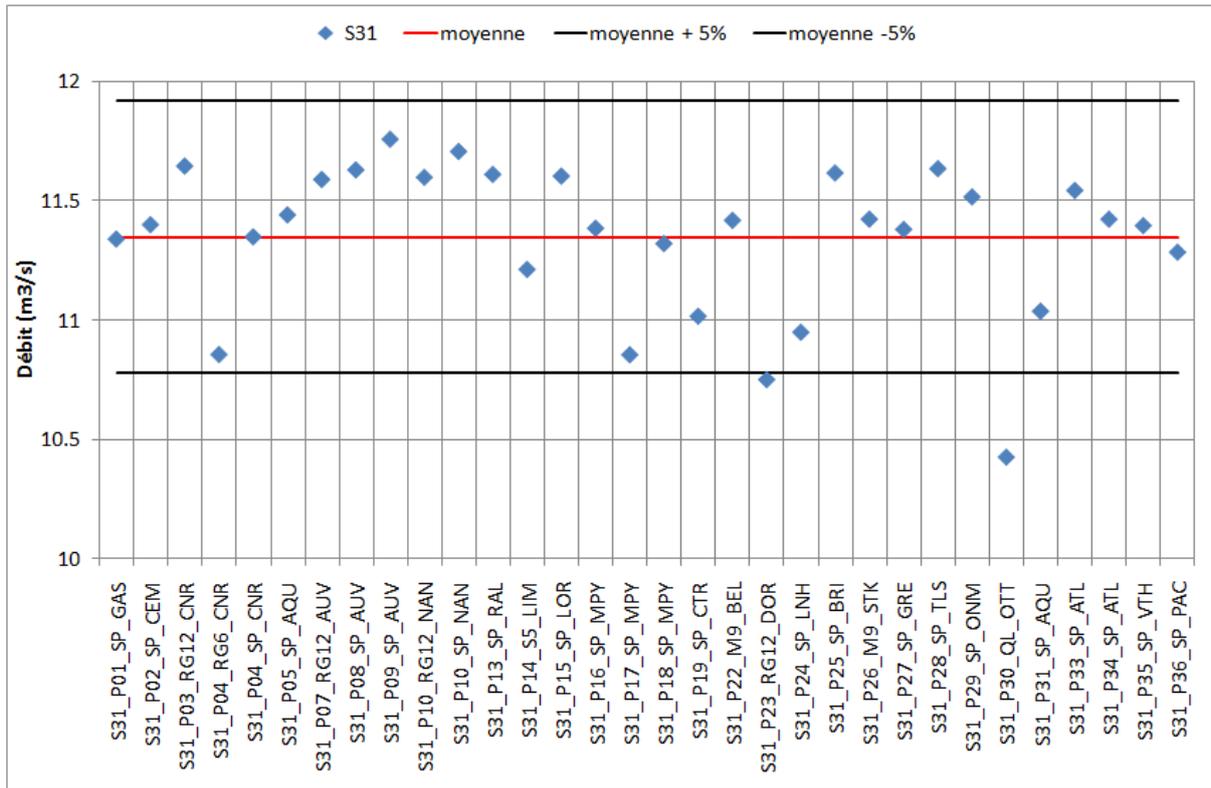
- Atmane D.** Les essais interlaboratoires en hydrométrie. Analyse des campagnes de mesures réalisées et amélioration du protocole. [Rapport]. - [s.l.] : IRSTEA, 2011.
- Dramais Guillaume, Blanquart Bertrand et Le Coz Jérôme** Comparaison de méthodes de mesure du débit des petits cours d'eau. Journées d'intercomparaison des 17 et 18 mai 2011 [Rapport]. - [s.l.] : IRSTEA, 2011.
- Everard N.** ADCP Regatta 2009 River Severn at Bewdley 4th June 2009, [Rapport]. - [s.l.] : UK Environment Agency, 2009.
- Everard N.** ADCP Regatta River Severn at Bewdley 21st August 2007 [Rapport]. - [s.l.] : UK Environment Agency, 2007.
- Iredale R.** A proposed method of assessing the comparative performance of ADCP's. Results from the Environment Agency "ADCP Regatta", River Severn, Bewdley [Conférence]. - Cannes, France. : conférence RDI "ADCPs in Action", 2006.
- Le Coz Jérôme, SAYSSET Gérard et Pierrefeu Gilles** Régate ADCP 1 - Vézère au Pont de Garavet (Allasac, Corrèze), rapport d'essais. [Rapport]. - 2009.
- Pobanz Karine, Le Coz Jérôme et Pierrefeu Gilles** Intercomparaison ADCP sur le Rhône à l'aval du barrage de Génissiat (12-15/10/2010) [Rapport]. - 2011.
- Terek B. [et al.]** Interkomparacijsko mjerenje protoka akustičkim Doppler (ADCP) protokomjerima, Sisak, Hrvatska Rujan [Rapport]. - [s.l.] : DHMZ Zagreb, 2008.

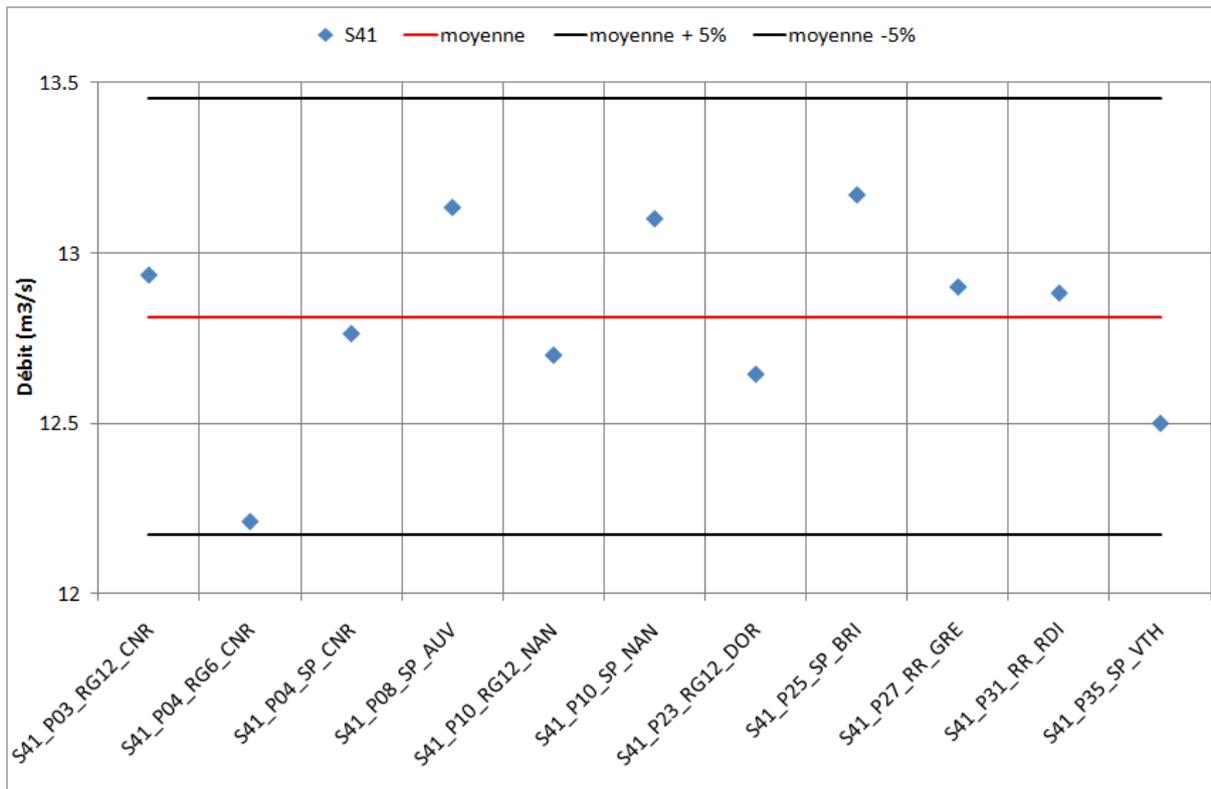
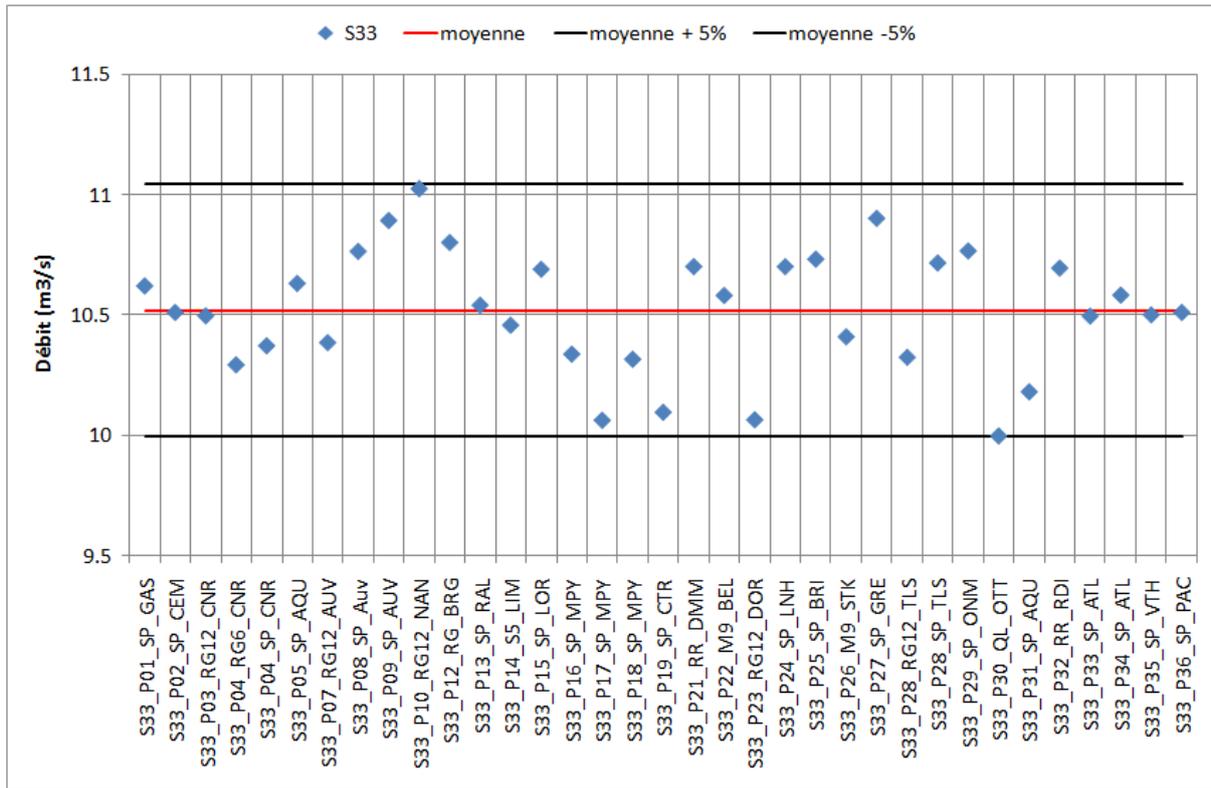
Annexe 1 : Intercomparaison des débits ADCP par série : graphiques.











Annexe 2 : Liste des équipes prises en compte dans la comparaison interlaboratoire

SERIE S13	SERIE S14	SERIE S31
S13_P01_SP_GAS	S14_P01_SP_GAS	S31_P01_SP_GAS
S13_P02_SP_CEM	S14_P02_SP_CEM	S31_P02_SP_CEM
		S31_P03_RG12_CNR
		S31_P04_RG6_CNR
S13_P04_SP_CNR	S14_P04_SP_CNR	S31_P04_SP_CNR
S13_P05_SP_AQU	S14_P05_SP_AQU	S31_P05_SP_AQU
S13_P07_RG12_AUV	S14_P07_RG12_AUV	S31_P07_RG12_AUV
		S31_P08_SP_AUV
		S31_P09_SP_AUV
S13_P10_RG12_NAN	S14_P10_RG12_NAN	S31_P10_RG12_NAN
S13_P10_SP_NAN	S14_P10_SP_NAN	S31_P10_SP_NAN
S13_P11_ADP_ANG	S14_P11_ADP_ANG	
S13_P12_RG_BRG	S14_P12_RG_BRG	
S13_P13_SP_RAL	S14_P13_SP_RAL	S31_P13_SP_RAL
S13_P14_S5_LIM	S14_P14_S5_LIM	S31_P14_S5_LIM
S13_P15_SP_LOR	S14_P15_SP_LOR	S31_P15_SP_LOR
S13_P16_SP_MPY	S14_P16_SP_MPY	S31_P16_SP_MPY
	S14_P17_SP_MPY	S31_P17_SP_MPY
	S14_P18_SP_MPY	S31_P18_SP_MPY
S13_P19_SP_CTR		S31_P19_SP_CTR
S13_P21_SP_DMM	S14_P21_SP_DMM	
S13_P22_M9_BEL	S14_P22_M9_BEL	S31_P22_M9_BEL
S13_P23_RG12_DOR	S14_P23_RG12_DOR	S31_P23_RG12_DOR
S13_P24_SP_LNH	S14_P24_SP_LNH	S31_P24_SP_LNH
S13_P25_SP_BRI	S14_P25_SP_BRI	S31_P25_SP_BRI
S13_P26_M9_STK	S14_P26_M9_STK	S31_P26_M9_STK
S13_P27_SP_GRE	S14_P27_SP_GRE	S31_P27_SP_GRE
	S14_P28_RG12_TLS	
S13_P28_RG12_TLS	S14_P28_SP_TLS	S31_P28_SP_TLS
S13_P29_SP_ONM	S14_P29_SP_ONM	S31_P29_SP_ONM
S13_P31_RG12_RDI		S31_P31_SP_AQU
S13_P32_RR_RDI	S14_P32_RR_RDI	S31_P32_RR_RDI
S13_P33_SP_ATL		S31_P33_SP_ATL
S13_P34_SP_ATL	S14_P34_SP_ATL	S31_P34_SP_ATL
S13_P35_SP_VTH	S14_P35_SP_VTH	S31_P35_SP_VTH
S13_P36_SP_PAC	S14_P36_SP_PAC	S31_P36_SP_PAC

Annexe 3 : Résultats des statistiques h et k de la comparaison interlaboratoire

