



Comparaison interlaboratoire de mesures de débit par profileur hydro-acoustique ADCP

Essais de Chauvan - 8, 9 et 10 novembre 2016

Rapport - Version provisoire





Rapport préliminaire, 13 février 2017

Rédacteurs :

AURÉLIEN DESPAX¹, ALEXANDRE HAUET², JÉRÔME LE COZ¹, GUILLAUME DRAMAIS¹, BERTRAND BLANQUART³, DAVID BESSON⁴, ARNAUD BELLEVILLE².

Affiliations :

¹ Irstea, UR HHLY, 5 rue de la Doua, 69100 Villeurbanne, France, email : aurelien.despax@irstea.fr

² EDF-DTG, 21 Avenue de l'Europe, BP 41, 38040 Grenoble, France

³ Conseil et formation en métrologie, 40 Avenue du Général Leclerc, 54600 Villers les Nancy, France

⁴ DREAL Centre Val de Loire, 5, avenue Buffon, 45064 Orléans, France

Photos : de couverture (de haut en bas) : Mesure par ADCP en aval du barrage de Chauvan et déploiement d'un Q-Liner en amont de la station hydrométrique EDF-DTG ; Photos de chapitre (Source : A. Despax).



Table des matières

| | | |
|----------|--|----------|
| 1 | Introduction et objectifs | 1 |
| 1.1 | Synthèse des précédentes intercomparaisons | 1 |
| 1.2 | Objectifs des essais | 2 |
| 2 | Organisation des essais | 5 |
| 2.1 | Participants | 5 |
| 2.2 | Matériels | 7 |
| 2.2.1 | Profileurs acoustiques et supports | 7 |
| 2.2.2 | Logiciels | 8 |
| 2.3 | Logistique | 8 |
| 2.3.1 | Planning | 8 |
| 2.3.2 | Programme du séminaire international hydrométrie | 8 |
| 2.3.3 | Sécurité | 9 |
| 2.4 | Présentation du site | 9 |
| 2.4.1 | Aménagement des sections de mesure | 10 |
| 2.5 | Evaluation de la qualité des sections de mesure | 12 |
| 2.5.1 | Qualité par équipe | 12 |
| 2.5.2 | Qualité par section de mesure | 13 |
| 2.6 | Présentation des mesures | 14 |
| 2.6.1 | Hydraulique - Paliers de débits et séries de mesures | 14 |
| 2.6.2 | Suivi limnimétrique et mesures complémentaires | 15 |
| 2.6.3 | Déroulement des mesures - plan d'expérience | 16 |

| | | |
|----------|---|-----------|
| 3 | Résultats | 19 |
| 3.1 | Analyse de la stabilité du débit | 19 |
| 3.2 | Débits associés à la courbe de tarage | 20 |
| 3.3 | Mesures de débit indépendantes | 23 |
| 3.3.1 | Mesure par dilution | 23 |
| 3.3.2 | Mesures par ADCP stationnaire | 23 |
| 3.3.3 | Mesures par ADCP en continu | 23 |
| 3.4 | Synthèse des estimations de débit | 24 |
| 3.5 | Résultats des mesures ADCP par session | 24 |
| 3.5.1 | Résultats globaux par session | 24 |
| 3.5.2 | Résultats par équipe | 25 |
| 3.5.3 | Résultats par section | 25 |
| 3.6 | Résultats des mesures normalisées | 28 |
| 3.6.1 | Résultats normalisés par équipe | 28 |
| 3.6.2 | Résultats normalisés par section | 29 |
| 3.6.3 | Ratios de débit mesuré par section de mesure | 29 |
| 4 | Analyse préliminaire des essais | 31 |
| 4.1 | Analyse statistique | 31 |
| 4.1.1 | Dispersion des résultats par équipe | 31 |
| 4.1.2 | Dispersion et écarts des résultats par section de mesure | 32 |
| 4.2 | Comparaison analyse qualitative – analyse objective | 33 |
| 4.3 | Analyse de l'incertitude selon les essais interlaboratoires | 35 |
| 4.3.1 | Résultats basés sur les débits normalisés | 35 |
| 4.3.2 | Incertaince selon le type de matériel (comparaison M9 et StreamPro) | 36 |
| 5 | Conclusions et perspectives | 37 |
| | Annexes | 38 |
| A | Bonus | 39 |
| B | Présentation des participants | 43 |
| C | Sections de mesure | 57 |
| C.1 | Photographies amont/aval | 57 |
| C.2 | Caractéristiques des sections de mesure | 63 |

| | | |
|----------|--|-----------|
| D | Plan d'expérience | 65 |
| D.1 | Fiches incident | 65 |
| D.2 | Fiches de terrain | 66 |
| E | Jaugeages réalisés à la station hydrométrique | 67 |
| F | Mesure de débit par dilution | 69 |
| G | Principes et calculs des essais interlaboratoires | 71 |
| | Bibliographie | 75 |



Avertissement au lecteur

La version de ce rapport n'est que provisoire. Les données traitées portent sur les mesures brutes transmises par les opérateurs au cours des essais.

Les résultats présentés ici sont volontairement restreints. En effet, des traitements complémentaires seront appliqués après homogénéisation du mode de dépouillement des mesures par l'utilisation du logiciel QRev (en collaboration avec l'USGS). Une étude plus approfondie sera notamment menée sur les coefficients d'extrapolation des vitesses utilisés par les opérateurs pour le calcul du débit. Les valeurs de débits seront ainsi susceptibles d'être sensiblement corrigées. Il est également possible que certaines mesures soient supprimées.

Par conséquent, le lecteur doit garder à l'esprit que les résultats et conclusions présentés dans le rapport ne sont que préliminaires et seront amenés à évoluer.



Résumé

Du 8 au 10 novembre 2016, le Groupe Doppler Hydrométrie a organisé sur le Taurion, à l'aval du barrage-usine de Chauvan, une campagne d'essais interlaboratoires de mesures de débit par profileur hydro-acoustique ADCP. En plus de permettre aux équipes participantes de confronter leurs outils et leurs pratiques, les essais interlaboratoires visent à contribuer collectivement à l'amélioration de la maîtrise de ces mesures et de leurs incertitudes. En l'absence de mesure de référence en termes de débit, les intercomparaisons constituent en effet un moyen utile pour quantifier l'incertitude de la technique de mesure dans des conditions de mesure données (Blanquart, 2013; Dramais *et al.*, 2013; Le Coz *et al.*, 2016).

Cette 5^{ème} campagne interlaboratoire du Groupe Doppler Hydrométrie (après celles de la Vézère en 2009, de Génissiat en 2010 et 2012 ainsi que celle du canal de la Gentille en 2011) a rassemblé 50 participants (ou équipes de mesure) français et étrangers issus d'organismes publics ou privés, permettant la réalisation de plus de 600 mesures de débit réparties sur 3 demi-journées en profitant de débits stables délivrés par le barrage-usine de Chauvan, de l'ordre de $14 \text{ m}^3/\text{s}$.

Les essais interlaboratoires de Chauvan se distinguent par leur dimension et par l'originalité du protocole d'essai mis en œuvre.

Alors que les campagnes précédentes ont eu lieu sur des sites de mesure plutôt favorables, caractérisés par des géométries de section en travers relativement simples, des sections de mesure plus variées et complexes ont cette fois été choisies (faibles profondeurs, écoulements parfois perturbés par des obstacles). Ainsi des permutations ont été réalisées par 48 participants parmi les 24 sections de mesure présentant des conditions de déploiement plus ou moins favorables pour les ADCP.

En parallèle, le débit a été mesuré en continu par deux ADCP (StreamPro et Q-Liner) sur des sections de mesure fixes et les hauteurs d'eau ont été enregistrées par trois capteurs limnimétriques (deux sondes piézométriques relatives (Paratronic) disposées sur deux sections de mesure et un radar (VEGA) au niveau de la station hydrométrique EDF-DTG).

Le suivi limnimétrique a permis de confirmer la stabilité du débit du cours d'eau (variations inférieures à ± 1 cm) au cours des trois sessions de mesure. Les résultats de débit des ADCP sont peu dispersés (écarts-types de l'ordre de $0,400 \text{ m}^3/\text{s}$) et la valeur de débit moyenne (référence construite) est proche des valeurs fournies par les mesures indépendantes à moins de 5% près (jaugeages par ADCP en continu aux deux sections fixes, jaugeage par la méthode globale de dilution et débit associé à la courbe de tarage selon la méthode de tracé conventionnelle, selon la méthode GesDyn ou selon la méthode BaRatin).

Les premiers résultats montrent que la dispersion des valeurs de débit semble nettement corrélée à la qualité des sections de mesure évaluée *in situ* par les équipes de mesure ainsi qu'au ratio du débit mesuré.

Les essais interlaboratoires conduisent à une évaluation d'incertitude de l'ordre de $\pm 6\%$ (au niveau de confiance de 95 %, soit un facteur d'élargissement $k=2$) pour un jaugeage par ADCP comportant 6 transects de mesure (dans les conditions de l'essai). Le nombre important de participants rassemblés permet une évaluation précise de cette incertitude de mesure bien que l'estimation de l'incertitude liée au biais de la technique de mesure reste problématique. Cette estimation reste néanmoins à affiner après homogénéisation des traitements des mesures à l'aide du logiciel QRev (Mueller, 2016).

La permutation des équipes au sein des différentes sections de mesure permettra la conduite d'une étude statistique visant à isoler l'incertitude liée à la section de mesure. Les résultats préliminaires tendent à montrer l'utilité de mesurer le débit sur plusieurs sections de mesure afin de réduire l'incertitude sur l'estimation du débit.

Enfin nous prévoyons de comparer les estimations d'incertitude par propagation des incertitudes telles que proposées par les logiciels Oursin (CNR), QRev (USGS), RiverFlowUA (South Florida Water management District), QMSys ou encore QUANT (Water Survey of Canada) aux résultats d'incertitude issus de ces essais interlaboratoires.



Abstract

Quantifying the uncertainty of discharge measurements (or “gaugings”) is a challenge in the hydrometric community. A useful tool to empirically estimate the uncertainty of a gauging method is the field inter-laboratory experiment (Le Coz et al., 2016). Previous inter-laboratory experiments conducted in France (in 2009, 2010 and 2012) showed that the expanded uncertainty of an ADCP gauging (considering an average discharge over six successive transects) is typically around 5% (with a probability level of 95%), under optimum measurement conditions (straight reach, uniform and smooth streambed cross-section, homogeneous flow, etc.). In practice, the selected cross-section does not always match all quality requirements which may result in larger uncertainty. However, the uncertainty due to site selection is very difficult to estimate with predictive equations.

From 8 to 10 November 2016, 50 laboratories or teams (from 8 different countries) with 50 ADCPs, simultaneously conducted more than 600 ADCP discharge measurements in steady flow conditions (around $14 \text{ m}^3/\text{s}$ released by a dam), during three half-days, over 500 m along the Taurion River at Saint-Priest-de-Taurion, France. 26 cross-sections with various shapes and flow conditions, and more or less favourable conditions, were distributed along the river. A specific experiment procedure, which consisted of circulating every team over half of the cross-sections, was implemented in order to quantify the impact of site selection on the discharge measurement uncertainty.

Beyond the description of the experiments, uncertainty estimates are presented. The overall expanded uncertainty is estimated to be around $\pm 6\%$ at 95% level of confidence for a measurement performed with 6 transects in the given measurement conditions of the experiments. However, the uncertainty of the discharge measurements varies among the cross-sections. These variations are

well correlated to the expert judgment on the cross-section quality made by each team. First results seems to highlight a relation between uncertainty computed for each cross-section and criteria such as the shallowness of the flow, the unmeasured discharge ratio.

Further investigations are necessary to identify the criteria related to error sources that are possibly meaningful for categorizing measurement conditions and site selection. Moreover, comparison between experimental uncertainty and analytical methods (such as computations recently proposed by QRev, Quant, Oursin or QMSys software) is planned to be done.



1. Introduction et objectifs

Depuis plusieurs années, des essais interlaboratoires de mesure de débit des cours d'eau ont lieu en France et à l'étranger. Ils réunissent des utilisateurs d'ADCP et permettent la confrontation de leur matériel pour déterminer la performance de la méthode de mesure. Ce chapitre propose un inventaire et la synthèse des précédentes intercomparaisons réalisées en France et expose les objectifs des essais de « Chauvan 2016 ».

1.1 Synthèse des précédentes intercomparaisons

Des comparaisons interlaboratoires de jaugeages à l'ADCP ont lieu régulièrement dans le monde de l'hydrométrie, par exemple en Allemagne, au Canada, aux USA, en Angleterre (Everard, 2007, 2009) ou en Croatie (Terek et Nimac, 2008) et en France depuis 2009 sous l'impulsion du *Groupe Doppler Hydrométrie* (Le Coz *et al.*, 2009; Pobanz *et al.*, 2011; Hauet *et al.*, 2012; Pobanz *et al.*, 2015) ainsi qu'au sein des services hydrométriques de l'État. Ces comparaisons ont également été transposées à d'autres techniques de jaugeage telles que les jaugeages par courantomètre lors d'essais réalisés en 2011 (Dramais *et al.*, 2011) et en 2013 (Despax *et al.*, 2014, 2016).

En France, ce type d'essais est conduit dans le but particulier d'estimer une incertitude de mesure dans les conditions des essais (Le Coz *et al.*, 2016). Le tableau 1.1 recense une synthèse des essais réalisés ainsi que l'incertitude associée.

On note que les essais interlaboratoires de mesure par ADCP donnent des incertitudes estimées de l'ordre de 4 à 12 %. La plus forte valeur d'incertitude provient des essais de Génissiat (en 2010 et en 2012) sur le site en aval du barrage. Cette forte incertitude, en comparaison aux essais réalisés simultanément sur le site de Pyrimont, s'explique par les conditions hydrauliques particulières du site de mesure.

Cet enseignement a montré l'importance du site de mesure pour l'estimation du débit et son influence sur l'incertitude associée. Les précédentes comparaisons interlaboratoires ayant eu lieu sur des sites aux conditions de déploiement plutôt favorable, les essais interlaboratoires réalisés à l'aval

du barrage de Chauvan visent à estimer l'impact du choix de la section de mesure sur l'incertitude de la mesure.

TABLE 1.1 – Synthèse des essais interlaboratoires réalisés en France et ayant fait l'objet d'une analyse d'incertitude. Les incertitudes élargies sont exprimées au niveau de confiance de 95% et basées sur la moyenne de 6 traversées successives (4 pour Génissiat 2010). Extrait et adapté de Dramais et al. (2013).

| Campagne | Instrument | Gamme de débit | Nombre de laboratoires | Incertitude (à 95%) | Source |
|--|----------------------------------|-------------------|------------------------|--------------------------|--------------------------------|
| | | m ³ /s | | % | |
| Vézère, 2009 | ADCP (tractés depuis les berges) | 30 | 37 | 4-9 | (Le Coz <i>et al.</i> , 2009) |
| Génissiat, 2010 - Aval du barrage - Site de Pyrimont | ADCP (sur bateaux) | 110-430 | 26 12 14 | 4-12 8-12 4-6 | (Pobanz <i>et al.</i> , 2011) |
| Gentille, 2011 | ADCP (tractés depuis les berges) | 10-20 | 34 | 6-7.5 | (Hauet <i>et al.</i> , 2012) |
| Ouvèze, 2011 Toulourenc, 2011 | Courantomètres (sur perche) | 1 0.4 | 11 11 | 15 16 | (Dramais <i>et al.</i> , 2011) |
| Chooz, 2012 | ADCP (tractés depuis les berges) | 35 | 4 | 6 | (Atmane, 2012) |
| Vaucluse, 2012 | ADCP (tractés depuis les berges) | 6 | 5 | 8-10 | (Atmane, 2012) |
| Génissiat, 2012 - Aval du barrage - Site de Bognes - Site de Pyrimont | ADCP (sur bateaux) | 230-550 | 32 12 11 9 | 4-12 12 4.4 4.3 | (Pobanz <i>et al.</i> , 2015) |
| Cernon, 2013 Durzon, 2013 | Courantomètres (sur perche) | 0.8 1 | 12 13-11 | 11 10 | (Despax <i>et al.</i> , 2014) |

1.2 Objectifs des essais

Les objectifs des essais sont les suivants :

- Comparer les débits ADCP entre eux et selon les modèles,
- Comparer les débits en fonction des sections de mesure,
- Permettre des échanges techniques au sein du réseau d'utilisateurs sur les différents matériels et leur mise en œuvre,
- Estimer les incertitudes par la méthode des essais interlaboratoires,
- Quantifier l'impact du choix de la section de mesure,
- Évaluer l'impact du choix des coefficients d'extrapolation des vitesses sur le débit,
- Comparer l'estimation de l'incertitude des essais aux estimations proposées par certains logiciels (méthodes de propagation analytique des incertitudes).

Contrairement aux essais précédents, des sections de mesure moins propices ont été sélectionnées (sites peu profonds, présence d'obstacles perturbant l'écoulement ou écoulement à surface libre agité).

Pour garantir un traitement homogène des données, les mesures seront traitées ultérieurement à l'aide du logiciel QRev développé par l'USGS (Mueller, 2016). Ce logiciel permet le recalcul du débit

en appliquant un algorithme indépendant de ceux utilisés par les logiciels des constructeurs. De plus, le module Extrap (Mueller, 2013) permet de recalculer automatiquement les coefficients d'extrapolation des vitesses (en surface et au fond) et permet ainsi la correction éventuelle de la valeur de débit.

Les précédentes intercomparaisons ont montré l'intérêt d'utiliser plusieurs appareils de mesure pour réduire sensiblement l'incertitude sur la mesure de débit. L'un des objectifs de cette campagne d'essais sera d'évaluer la meilleure stratégie pour réduire l'incertitude de mesure (par exemple par le changement de section de mesure ou le changement de matériel de mesure).



2. Organisation des essais

Ce chapitre présente un descriptif des participants et matériels rassemblés, des aspects logistiques ainsi que le programme du déroulement des essais.

2.1 Participants

50 équipes dont 7 équipes étrangères, ont assuré le déploiement de 50 ADCP pendant les essais. Ces équipes ont été constituées par des services hydrométriques d'État, des sociétés d'aménagement, des producteurs d'électricité, des instituts de recherche ainsi que des constructeurs de profileurs ADCP. On note que certains participants pratiquent des mesures ADCP occasionnellement tandis que pour d'autres, le travail de mesure de débit constitue la majeure partie de leur activité. Le niveau d'expertise est également variant au sein des équipes. Dans la suite, elles sont désignées par un quadrigramme :

- Compagnie d'Aménagement des Coteaux de Gascogne [CACG],
- *Confederación Hidrográfica del Ebro* (Confédération hydrologique du bassin de l'Ebre, Espagne) [CHEB],
- *Český hydrometeorologický ústav* (Institut hydrométéorologique tchèque) [CHMI],
- Compagnie Nationale du Rhône [CNR1 & CNR2],
- DREAL Grand-Est Strasbourg [ACAL],
- DREAL Angers [ANGE]
- DREAL Aquitaine [AQU1 & AQU2],
- DREAL Bretagne [BRE1 & BRE2],
- DREAL Centre Val de Loire [CVL1 & CVL2],
- DREAL Clermont-Ferrand [CLE1 & CLE2],
- DREAL Nantes [NAN1¹ & NAN2]
- DREAL Provence Alpes Côtes d'Azur [PAC1],
- DREAL Poitou-Charantes [VCA1, VCA2 & VCA3],
- DREAL Auvergne Rhône Alpes [ARA1 & ARA2]

1. L'équipe NAN1 a été constituée par des opérateurs de la DREAL Poitiers-

- DRIEE Ile-de-France [IDF1 & IDF2],
- EDF-DTG (Grenoble, Toulouse, Brive) [CHA1, CHA2, CHP1, CHMC, FIXE],
- EDF R& D [RED1 & RED 2],
- *Environment Agency UK* (Agence de l'environnement du Royaume-Uni) [ENUK],
- EPTB Seine [EPTB],
- Hydro Sciences Montpellier [HSM1],
- Irstea (Aix, Bordeaux, Lyon) [IRSA, IRSB & IRSL],
- *Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology* (Institut de génie civil et de travaux publics - Corée du Sud) [KICT],
- M2E21 Dijon [M2E2]
- *Norwegian Water Resources and Energy Directorate* (Direction nationale norvégienne des ressources en eau et de l'énergie) [NVE1],
- Q Measurement [QMEA],
- Société du Canal de Provence [SCP],
- *Sveriges Meteorologiska och Hydrologiska Institut* (Institut météorologique et d'hydrologique de Suède) [SMHI],
- SonTek [STEK],
- SPC Grand Delta [SGD1 & SGD 2],
- Teledyne RDI [TRDI],
- Université de Tours [TOUR],
- *USGS* (USA) [USGS].

Une photo de groupe montre l'ensemble des participants réunis (figure 2.1).



FIGURE 2.1 – Photo de groupe de tous les participants réunis.

Les photos des participants sont proposées à l'annexe B.

L'équipe de coordination comportait 6 personnes (voir photos en annexe B.2), 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'exploitant de l'usine de Chauvan et chaque équipe.

2.2 Matériels

2.2.1 Profileurs acoustiques et supports

5 types de profileurs hydro-acoustiques ADCP ont été utilisés lors de la campagne d'essais. Il s'agit des modèles M9 et S5 du constructeur SonTek, des modèles StreamPro et RiverPro de Teledyne RDI et du Q-Liner du fabricant OTT. Le nombre d'appareils rassemblés au cours des essais ainsi que les caractéristiques de chacun de ces appareils sont décrites au tableau 2.1.

TABLE 2.1 – Nombre d'appareils, caractéristiques techniques et supports utilisés au cours des essais. * Un M9 a été remplacé par un RiverPro à partir de la session 2 (équipe CHA1, en raison d'une panne matériel).

| Modèle | Constructeur | Nombre d'ADCP | Fréquence | Nombre de transducteurs | Echo-sondeur | Supports |
|-----------|--------------|---------------|-----------------|-------------------------|--------------|---------------------------------------|
| M9 | SonTek | 18* | 3.0 MHz | 8 | 0.5 MHz | TorrentBoard, HydroBoard |
| S5 | SonTek | 1 | 3.0 MHz / 1 MHz | 4 | 1 MHz | HydroBoard |
| StreamPro | Teledyne RDI | 26 | 2.4 MHz | 4 | | Catamaran, Petit Catamaran, RiverBoat |
| RiverPro | Teledyne RDI | 4* | 1.2 MHz | 4 | 0.6 MHz | TorrentBoard |
| Q-Liner | OTT | 1 | 2 MHz / 1 MHz | 4 | | |



FIGURE 2.2 – Capteurs ADCP vus de dessous. (Sources : SonTek, Teledyne RDI, ASB Systems & Tecnologia y Ambiente).



FIGURE 2.3 – Exemples d'ADCP sur différents supports flottant (de gauche à droite : M9 sur HydroBoard, M9 sur TorrentBoard, StreamPro sur Petit Catamaran, StreamPro sur Catamaran et Q-Liner).

2.2.2 Logiciels

Pour l'organisation des intercomparaisons, il est important de recenser les logiciels utilisés et de définir des versions de référence. Pour homogénéiser le dépouillement des mesures, les versions minimales suivantes de logiciel ont été imposées : version 2.10 de WinRiver II et version 3.6 pour RiverSurveyorlive. Certaines équipes ont donné les valeurs de débit dépouillées par le logiciel QRev (USGS et SMHI).

Le dépouillement des mesures réalisées avec le Q-Liner a été réalisé avec le logiciel interne de la SCP.

Un dépouillement homogène des mesures est prévu en utilisant le logiciel de post-traitement QRev (Mueller, 2016).

2.3 Logistique

2.3.1 Planning

La campagne d'intercomparaison Chauvan 2016 s'est déroulée du mardi 8 novembre au jeudi 10 novembre. La journée du lundi 7 novembre a permis l'installation du matériel et la préparation du briefing par l'équipe organisatrice.

Mardi 8/11 :

- 9h : Arrivée des participants.
- 9h30-10h30 : Briefing sécurité, avec l'exploitant EDF. Briefing mode opératoire.
- 10h30-12h00 : Mise en place des matériels de mesure pour vérification du bon fonctionnement.
- 12h00-14h00 : Repas « comparaison de produits régionaux » apportés par les participants (voir figure A.3).
- **14h00-17h00 : 1ère série de mesure (session 1).**
- 17h00-17h30 : Repli du matériel et récupération des données de la session de mesure.
- Repas.

Mercredi 9/11 :

- 8h00 : Arrivée des équipes.
- **8h30-12h00 : 2ème série de mesure (session 2).**
- 12h00-14h00 : Repas (traiteur).
- **14h00-17h00 : 3ème série de mesure (session 3).**
- 17h00-17h30 : Repli du matériel et récupération des données de la session de mesure.
- Repas.

Jeudi 10/11 :

- 8h00 : Arrivée des équipes.
- 8h00-9h30 : Bilan des essais à chaud.
- 9h30-12h00 : Démonstration de matériels par les constructeurs.
- 12h00-13h00 : Repas.
- 14h00-18h00 : Séminaire international hydrométrie (Barrage de Saint-Marc, voir section 2.3.2).

2.3.2 Programme du séminaire international hydrométrie

Une salle de réunion a été mise à disposition pour l'organisation d'un séminaire international hydrométrie dans la barrage-usine de Saint-Marc, en amont du site de Chauvan. Le programme des présentations a été le suivant :

- Mikael Lennermark (SMHI, Sweden) – ADCP measurements : improving measurement results with a higher voltage on the StreamPro (18V) and also about the quite common flow disturbance in the top cell.
- Chanjoo Lee (KICT, Korea) – River Experiment Centre, the unique controllable testing facility for evaluation of ADCPs.
- Kevin Oberg and Frank Engel (USGS, USA) – QA/QC using QRev - SurfBoard.
- Kristoffer Florvaag-Dybvik and Trine Lise Sorensen (NVE, Norway) - Impact of Extrap application on NVE reported discharge and flow disturbance on a still lake.
- Nick Everard (Environment Agency, UK) – ADCP test events in the UK in 2016, and benefits of RC boats to ADCP flow measurements, with focus on 2013/14 floods.
- José Ramón Sánchez Puertas (CH Ebro, Spain) – Some experiences with LSPIV using flood movies.
- Jérôme Le Coz (Irstea, France) - Non contact velocimetry techniques for flood gaugings (LSPIV and SVR).
- Gilles Pierrefeu (CNR, France) - OURSIN : OURSIN : Uncertainty repartition tool for ADCP measurements - OUtil de Répartition deS INcertitudes de mesure de débit par ADCP mobile.

2.3.3 Sécurité

Un plan de prévention des risques a été établi entre l'exploitant EDF et EDF-DTG, organisateur des essais. L'exploitant EDF a assuré la maîtrise des débits et la sécurité du site concernant le risque de montée des eaux. Chaque équipe a pris en charge sa propre sécurité pour les mesures de débit au bord de l'eau, EDF se déchargeant de la sécurité de chacun pour cela.

Deux personnes par section de mesure sont requises, *a minima*, pour assurer un déroulement optimal des mesures. Le port du gilet de sauvetage est obligatoire pour les opérateurs intervenant au bord de l'eau. Quatre personnes (référents) en berges ont été équipés de cordes de vie et trois embarcations légères (kayaks et radeau gonflables) installées pour intervenir dans l'eau en cas d'incident. Une communication permanente a été assurée entre les membres de l'équipe de coordination par talkie-walkie tout en restant en lien direct avec l'exploitant.

Un gardien a assuré la surveillance du matériel la nuit.

Aucun incident n'a été a déploré pendant les essais.

Note : pour des raisons de logistique et de sécurité, le nombre d'équipes a été limité à 50.

2.4 Présentation du site

Les essais interlaboratoires se sont déroulés sur le Taurion (affluent rive droite de la Vienne), à l'aval du barrage-usine de Chauvan (EDF), sur la commune de Saint-Priest-Taurion dans le département de la Haute-Vienne en France.

Un barnum a été monté pour y installer le quartier général de l'équipe de coordination, réunir les participants (briefing, présentation des résultats à chaud), servir les collations et les repas. Un gardiennage a été assuré la nuit afin de permettre aux équipes de laisser le matériel sur site. Un algeco a servi de bureau pour le dépouillement et le traitement des données ainsi que pour l'installation du

TABLE 2.2 – Caractéristiques géographiques du site.

| | |
|---------------------------|--------------------------------|
| Département | Haute-Vienne (71) |
| Commune (lieu-dit) | Saint-Priest-Taurion (Chauvan) |
| Latitude | 45.9046 N |
| Longitude | 1.4108 O |
| Altitude | 246 m |

laboratoire pour le dépouillement des mesures de débit par dilution. Des toilettes ont également été installées à proximité du barnum. Deux parkings étaient à disposition pour garer les véhicules.



FIGURE 2.4 – Aperçu du site depuis la rive droite du Taurion (Source : N. Everard, UK Environment Agency).

2.4.1 Aménagement des sections de mesure

26 sections de mesure, réparties sur un linéaire d'environ 500 m, ont été équipées de drisses et de poulies le jour précédant la campagne de mesure (le lundi 7 novembre en conditions de bas débit). La largeur des sections de mesure est de l'ordre de 35 m, pour une profondeur de 1 m. Cette configuration a permis de déployer tous les appareils de mesure depuis la rive droite du Taurion sans nécessiter la mise à l'eau des opérateurs. Aucun déploiement par support radio-commandé n'a été utilisé. Chaque section de mesure a été matérialisée par une lettre (de A à X).

La figure 2.5 présente la répartition des 24 sections de mesure sur le Taurion ainsi que la localisation de deux sections "fixes", notées SCP et FIXE, sur lesquelles des mesures par ADCP ont été réalisées de manière continue respectivement à l'aide d'un Q-Liner et d'un StreamPro, à proximité de la station hydrométrique EDF-DTG. Des prises de vue amont/aval sont proposées en annexe C.1.



FIGURE 2.5 – Localisation des sections de mesure à partir des données GPS des appareils de mesure (données cartographiques : OpenStreetMap). La station hydrométrique EDF-DTG est représentée par un triangle bleu.

2.5 Evaluation de la qualité des sections de mesure

Au cours des mesures, chacune des équipes a attribué un jugement sur la qualité de la section de mesure selon trois classes : bonne, moyenne ou mauvaise. La figure 2.6 montre la répartition des scores attribués à l'ensemble des sections tout au long des essais.

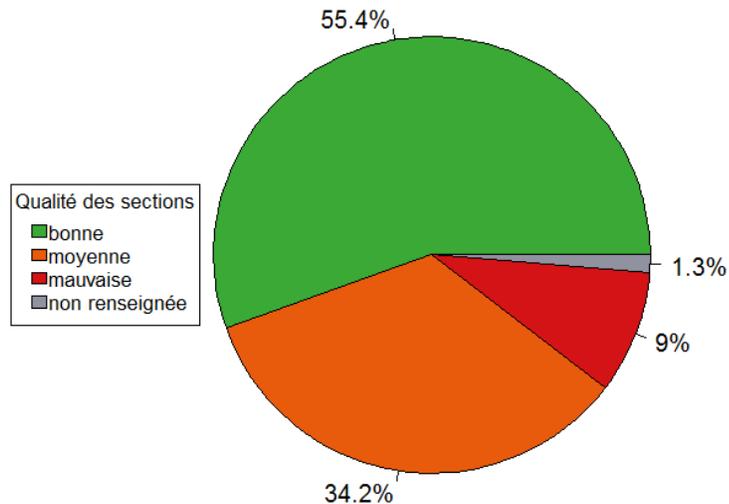


FIGURE 2.6 – Diagramme des appréciations attribuées aux sections de mesures (toutes sessions, toutes équipes et toutes sections confondues).

Globalement, plus de la moitié des sections ont été qualifiées comme bonnes. 9 % des sections ont été jugées mauvaises. Selon ce constat, le site de Chauvan apparaît comme site plutôt favorable à la réalisation de mesures par ADCP, bien qu'il ait été prévu de réaliser les mesures sur un site plutôt défavorable.

2.5.1 Qualité par équipe

A titre informatif, la figure 2.7 montre l'évaluation de la qualité des sites en fonction de l'équipe de mesure. On observe des appréciations subjectives différentes selon les organismes de rattachement. Celles-ci dépendent également des sections mesurées, certaines équipes ayant réalisé des mesures des sections plus défavorables que les autres équipes. Néanmoins, le nombre important d'équipes rend l'appréciation moyenne par section significative.

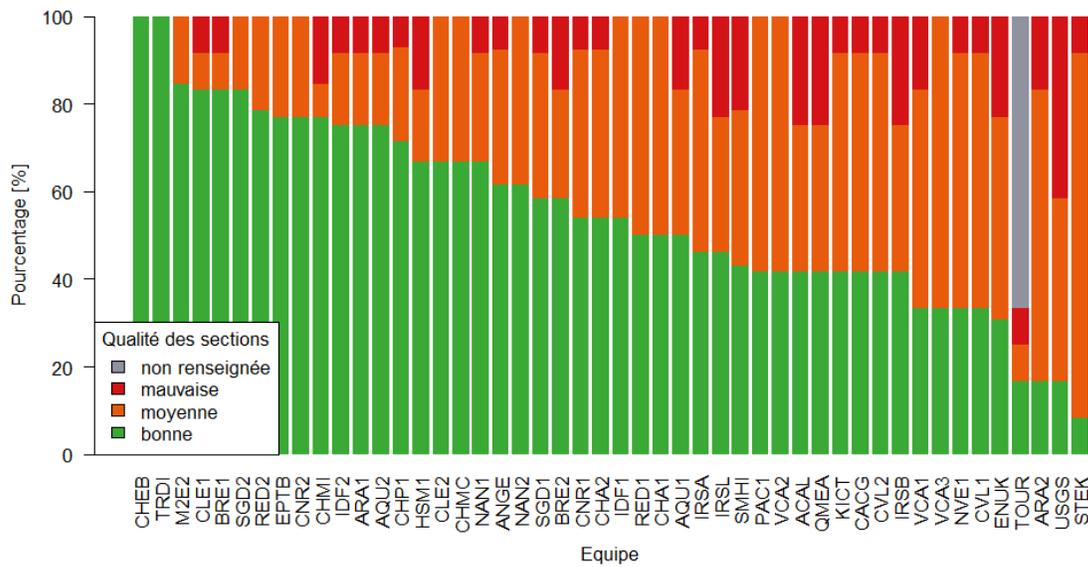


FIGURE 2.7 – Proportion des appréciations attribuées par les équipes.

2.5.2 Qualité par section de mesure

La figure 2.8 montre l'évaluation de la qualité de chaque section de mesure.

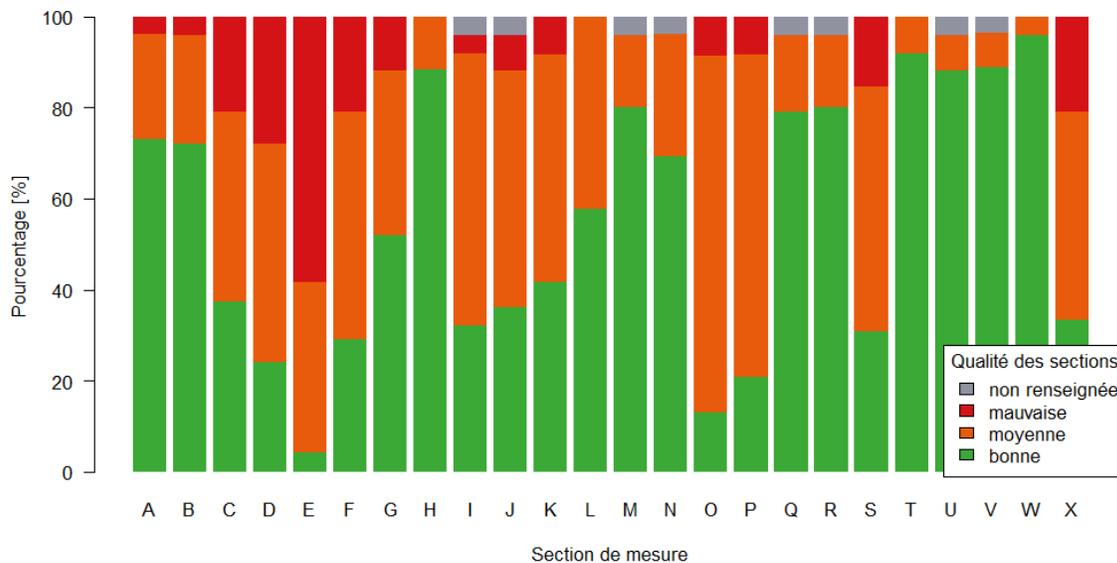


FIGURE 2.8 – Répartition des votes concernant la qualité de chacune des sections de mesure (d'amont en aval).

La figure 2.9 montre le classement des sections en fonction du score de chaque classe : bonne (figure 2.9a) ou mauvaise (figure 2.9b).

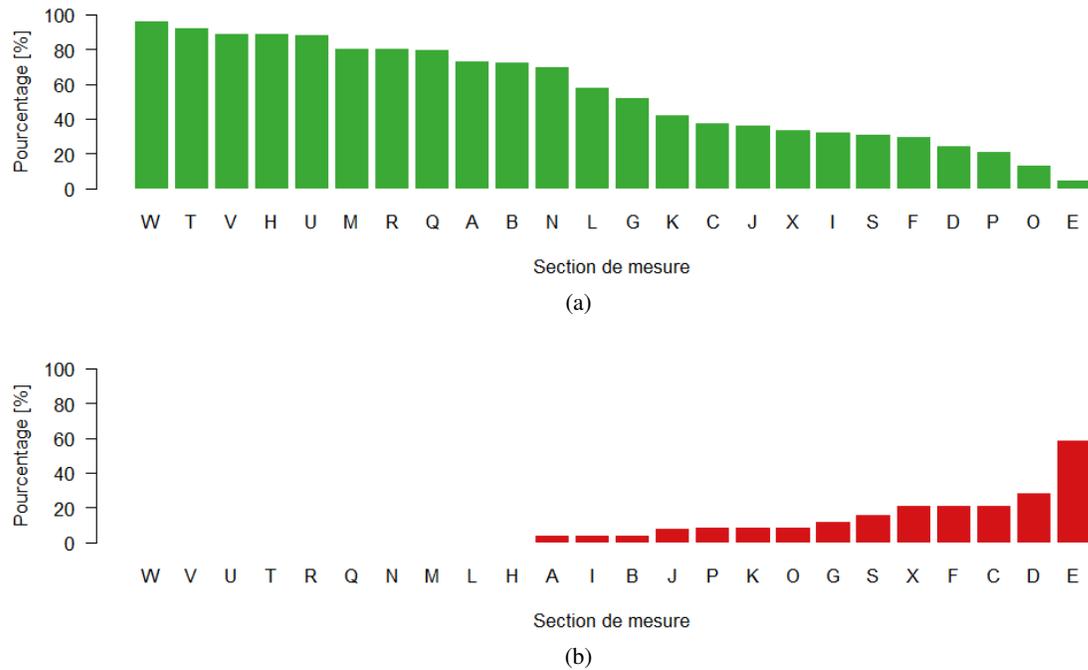


FIGURE 2.9 – Proportion des appréciations pour chaque section de mesure selon la qualité : (a) bonne et (b) médiocre.

Il apparaît clairement que la section E est la plus mauvaise section selon l'ensemble des participants. Ceci s'explique par les remous engendrés par la présence d'un arbre en amont immédiat de la section de mesure (voir photo 2.10).

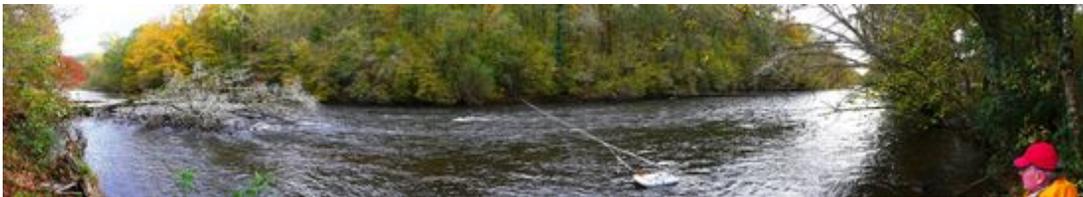


FIGURE 2.10 – Photo panoramique de la section de mesure E (Source : N. Everard, UK Environment Agency).

2.6 Présentation des mesures

2.6.1 Hydraulique - Paliers de débits et séries de mesures

Des paliers de débit ont été assurés par l'exploitant de l'usine-barrage de Chauvan lors des trois sessions de mesure. Lors des sessions 1 et 2, le débit a été délivré par les groupes turbo-alternateurs numéro 1 et 2 respectivement. En session 3, le débit a été directement délivré par la vanne de barrage comme illustré à la figure 2.11.



FIGURE 2.11 – Débit restitué par la vanne de barrage lors de la session 3 (Source : A. Despax).

Un affluent mineur entre les sections M et N a été observé. Son débit, de l'ordre de 0.01 à 0.02 m³/s (mesuré au courantomètre sur perche), est négligeable.

Lors de la session 2, une opération de dégrillage a provoqué le déversement d'environ 0.40 m³/s supplémentaires pendant moins de 5 minutes.

2.6.2 Suivi limnimétrique et mesures complémentaires

Le suivi de la hauteur d'eau a été réalisé en trois points : au niveau des sections de mesure P et X (la localisation des points de mesure est représentée à la figure 2.5) par deux sondes piézométriques relatives Paratronic (CNR) et au niveau de la station hydrométrique EDF-DTG par un radar de type VEGA (figure 2.12). Un contrôle visuel de l'échelle limnimétrique a été également réalisé au cours des différents essais. La station hydrométrique EDF-DTG est située en amont d'un seuil (voir photo 2.12) localisé entre les sections FIXE et E (figure 2.5). Par application d'une courbe de tarage, les hauteurs d'eau enregistrées seront converties en débit.



FIGURE 2.12 – Station hydrométrique EDF-DTG équipée d'un capteur limnimétrique radar VEGA (Source : A. Despax).

Des jaugages par dilution (à la fluorescéine, voir figure 2.13) ont été réalisés au cours des essais.



FIGURE 2.13 – Injection globale de traceur (fluorescéine) en aval du barrage de Chauvan (Source : A. Despax).

En complément, deux équipes ont assuré des mesures en continu par ADCP au niveau des sections SCP et FIXE respectivement à l'aide d'un Q-Liner (OTT), dont le déploiement est effectué verticalement par verticale, et d'un StreamPro (Teledyne RDI).

2.6.3 Déroulement des mesures - plan d'expérience

Le plan d'expérience a consisté à faire passer 48 équipes de mesure sur un maximum de sections. Pour cela, un plan de rotation a été défini et un ordre de passage établi pour chaque équipe de mesure. Ce plan de route impose, pour chaque session de mesure, le passage par 4 sections de mesure obligatoires et propose 4 sections de mesure optionnelles. Ce plan de route est distribué à chaque équipe en début de session sous forme de fiche terrain en version papier et en version numérique (voir annexe D.2). Cette fiche permet de consigner l'heure de début et de fin de chaque mesure, le nombre de transects valides, le débit moyen, l'écart-type des débits (mesurés par transects), l'évaluation de la qualité du site (bon / moyen / mauvais) et le ratio de débit mesuré par rapport au débit total. En fin de session, les fiches terrain sont collectées par l'équipe d'organisation afin de permettre l'affichage des résultats en direct. La version numérique ainsi que les données issues des mesures (fichiers des mesures brutes et résumés des mesures issus des logiciels constructeurs) sont également collectées.

Des fiches incidents ont été distribuées aux quatre référents de berge de manière à consigner les incidents et les remarques éventuelles au cours des essais. Un exemple de fiche est proposé en annexe D.1.

Les appareils de mesure ont été équitablement répartis parmi les sections, de manière à ce que chaque section de mesure puisse être mesurée par un nombre équivalent d'appareil issus des deux constructeurs.

En pratique, chaque équipe est passée sur au moins 12 sections de mesure au cours des 3 sessions de mesure. La répartition des mesures en fonction des équipes, des sections et des sessions de mesure est donnée à la figure 2.14. Le nombre moyen de mesure par section est de 24 traduisant le fait que chaque équipe a mesuré le débit sur la moitié des sections.

Avant chaque série de mesure, l'équipe s'assure de la mise à l'heure de son ordinateur et du bon chargement des batteries. Un test système est demandé en début de chaque session de mesure et la calibration du compas a été demandée. Le nombre de transects valides a été initialement imposé à 8. En raison du temps de mesure trop long, ce nombre a été réduit à 6 (3 dans le sens aller, 3 dans le sens retour) pour les sessions 2 et 3 afin de permettre la réalisation des mesures par l'ensemble des participants. En principe, deux équipes sont présentes sur une même section de mesure, l'une réalisant la mesure et la seconde en attente de déploiement de son matériel. En cas d'engorgement des équipes sur une section de mesure, les référents en berge aiguillent les équipes en attente vers des sections libres.

Le paramétrage de l'appareil et le choix des coefficients d'extrapolation des vitesses et au niveau des berges sont laissés libres à l'opérateur, de même que la distance où se termine la mesure en rive droite et en rive gauche (non accessible). Bien que certains ADCP soient équipées de système de GPS, le dépouillement des résultats a été réalisé selon le suivi de fond (*bottom tracking*).

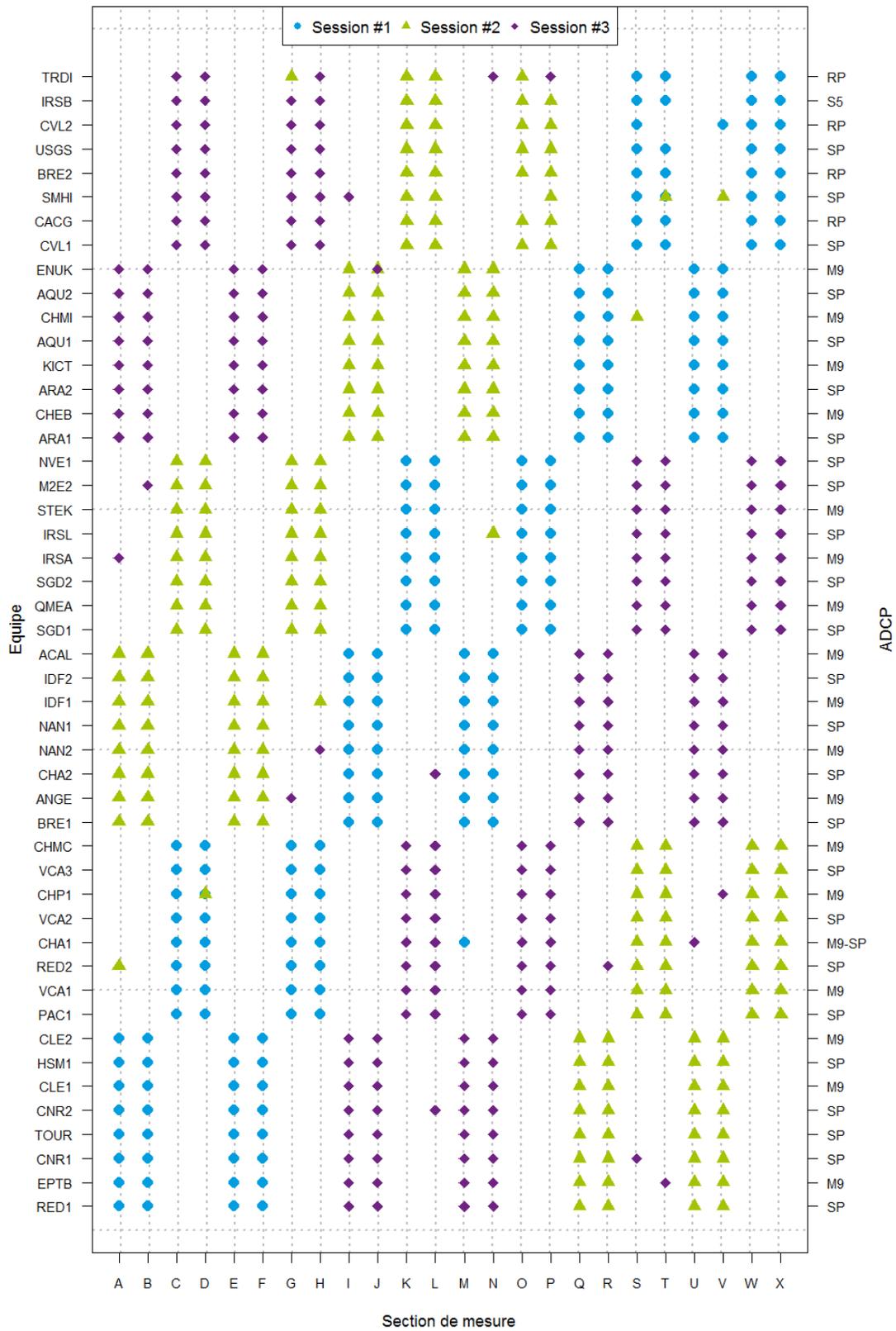


FIGURE 2.14 – Répartition des mesures des 48 équipes en fonction de la section et de la session de mesure (le matériel de mesure est reporté sur l'axe de droite).



3. Résultats

3.1 Analyse de la stabilité du débit

Le suivi limnimétrique a été assuré en trois points du site expérimental : au niveau des sections P et X ainsi qu'au niveau de la station EDF-DTG, en amont du seuil. En complément, un contrôle visuel de l'échelle limnimétrique (station hydrométrique EDF-DTG) a été assuré au cours des trois essais. Les hauteurs lues sont invariantes et cohérentes avec les valeurs issues du capteur VEGA. L'évolution de la hauteur d'eau au cours des deux jours de mesure en ces trois points est représentée à la figure 3.1. La figure 3.2 montre en détail le suivi limnimétrique pour les trois sessions de mesure.

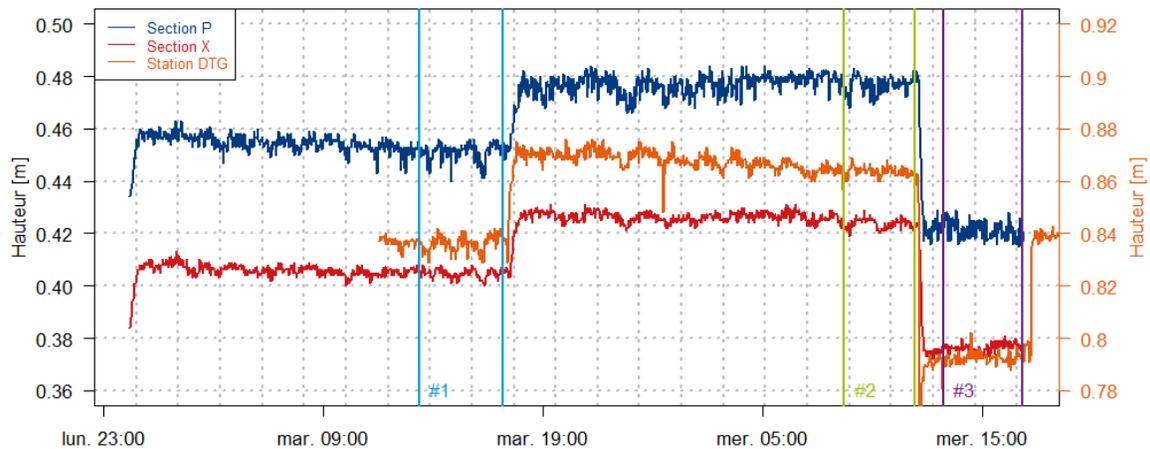


FIGURE 3.1 – Suivi de la hauteur d'eau au niveau de la station hydrométrique EDF-DTG et des deux capteurs limnimétriques placés en section P et X.

L'analyse des chroniques temporelles montre une stabilité acceptable de la hauteur d'eau au cours des trois sessions de mesure et au niveau des trois stations de suivi limnimétrique. La variation de hauteur d'eau est inférieure au centimètre au niveau de la section X et au niveau de la station EDF-DTG. On observe des variations de hauteur d'eau légèrement supérieures au niveau de la

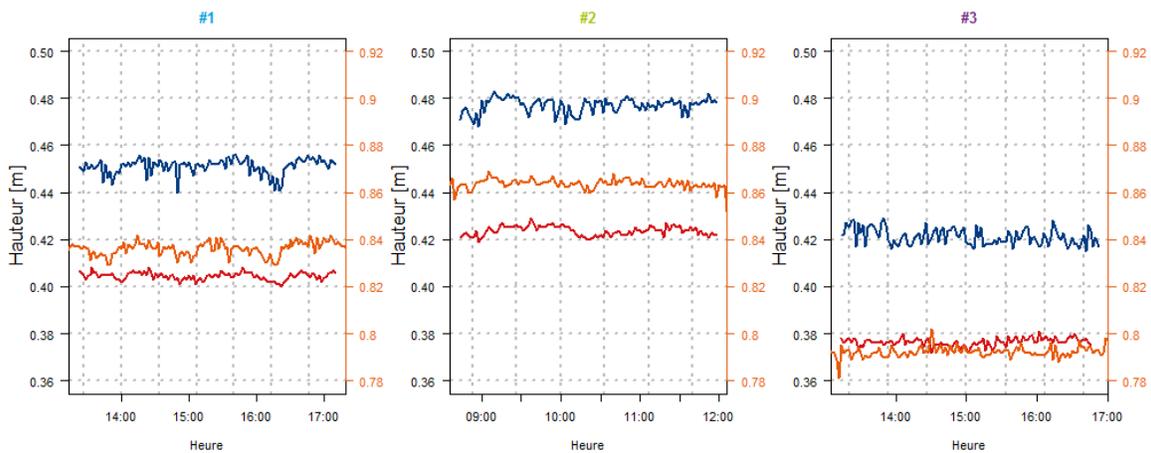


FIGURE 3.2 – Limnigrammes associés au trois sessions de mesure.

station P, tout en restant de l'ordre du centimètre. Ceci témoigne d'une sensibilité plus élevée à cette section. La stabilité du débit a donc été assurée sur l'ensemble des sections de jaugeage lors des trois sessions d'essai. On constate également que le palier de débit a été atteint sur toutes les sections sur l'intégralité des sessions de mesure. On note un temps de propagation inférieur à une heure.

Le tableau ci-dessous donne les statistiques estimées sur les hauteurs d'eau pour la station EDF-DTG.

TABLE 3.1 – Résumé statistique (valeur minimale, premier quartile, médiane, moyenne, troisième quartile, valeur maximale et écart-type) des hauteurs mesurées à la station hydrométrique, exprimées en m.

| Session | Min. | 1er Quartile | Médiane | Moyenne | 3eme Quartile | Max. | Ecart-type |
|---------|-------|--------------|---------|---------|---------------|-------|------------|
| # 1 | 0.829 | 0.834 | 0.836 | 0.836 | 0.838 | 0.842 | 0.003 |
| # 2 | 0.767 | 0.862 | 0.863 | 0.860 | 0.865 | 0.869 | 0.017 |
| # 3 | 0.788 | 0.791 | 0.792 | 0.793 | 0.793 | 0.802 | 0.002 |

3.2 Débits associés à la courbe de tarage

Le contrôle hydraulique de la station hydrométrique est assuré par le seuil (illustré à la figure 2.12). La figure 3.3 montre le tracé des courbes de tarage selon le tracé conventionnel EDF-DTG, la méthode GesDyn (Morlot, 2014; Morlot *et al.*, 2014) et la méthode BaRatin (Le Coz *et al.*, 2014) ainsi que l'intervalle de confiance associé (à 95%).

La liste des jaugeages utilisés pour le tracé des courbes de tarage est présentée à l'annexe E. Parmi eux, il est à noter que la quasi-totalité des jaugeages ont été réalisés au moyen d'ADCP de type StreamPro au niveau de la section de jaugeage FIXE (voir la figure 2.5). La comparaison des débits déduits des courbes de tarage avec les mesures par ADCP au cours des essais et en particulier les jaugeages StreamPro de l'équipe FIXE seront à nuancer.

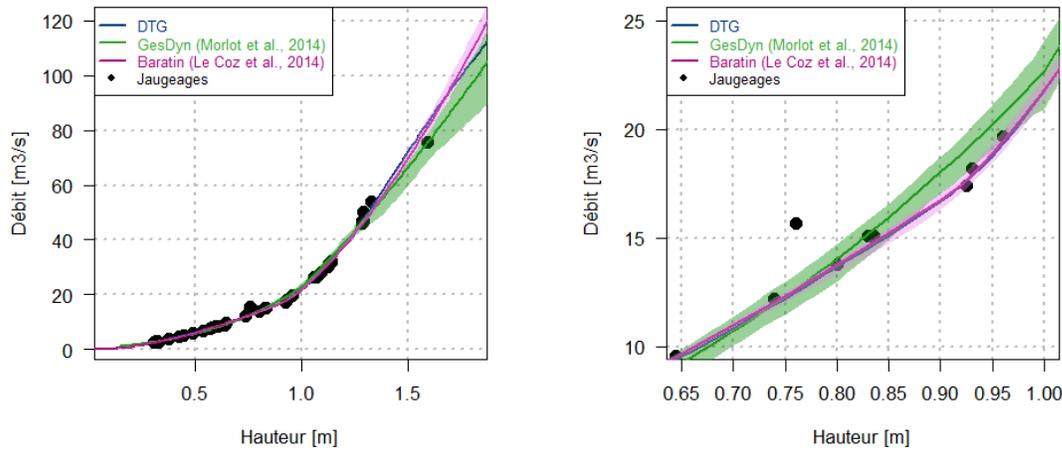


FIGURE 3.3 – Jaugeages et courbes de tarage (avec incertitude au niveau de confiance à 95%). A droite : zoom sur la zone d'intérêt. Des investigations complémentaires seront menées pour analyser les différences entre les courbes de tarage.

La figure 3.4 montre les chroniques de débit associées aux trois méthodes de tracé des courbes de tarage :

- Courbe de tarage en vigueur à la station hydrométrique EDF-DTG,
- Méthode de tracé dynamique GesDyn ,
- Méthode de tracé par inférence bayésienne BaRatin.

Les valeurs de débit associées aux courbes de tarage pour la hauteur d'eau moyenne mesurée par session sont exposées au tableau 3.2.

TABLE 3.2 – Débit moyen et intervalle de confiance (à 95%) issus des courbes de tarage pour la hauteur d'eau moyenne mesurée lors de chacune des sessions (l'incertitude associée à l'estimation de l'incertitude est notée entre parenthèses, au niveau de confiance de 95%).

| Session | Hauteur moyenne m | DTG m ³ /s | GesDyn (IC*) m ³ /s | BaRatin (IC*) m ³ /s |
|---------|----------------------|--------------------------|-----------------------------------|------------------------------------|
| # 1 | 0.84 | 14.81 | 15.57 (14.53 - 16.22) | 14.93 (14.04 - 15.77) |
| # 2 | 0.86 | 15.40 | 16.36 (15.35 - 17.02) | 15.53 (14.60 - 16.40) |
| # 3 | 0.79 | 13.43 | 13.69 (12.68 - 14.36) | 13.47 (12.70 - 14.24) |

Soit S_Q m³/s la sensibilité en débit de la station hydrométrique. Celle-ci représente la variation de débit qui occasionne une oscillation de niveau d'eau de 1 cm. La sensibilité estimée pour chaque session et selon les trois méthodes de tracé de courbe de tarage est présentée au tableau 3.3. Autour de la gamme de hauteur de 0.85 m, la sensibilité est de l'ordre de 0.30 m³/s/cm. On note que le dégrillage observé en session 2 (section 2.6.1) est du même ordre de grandeur.

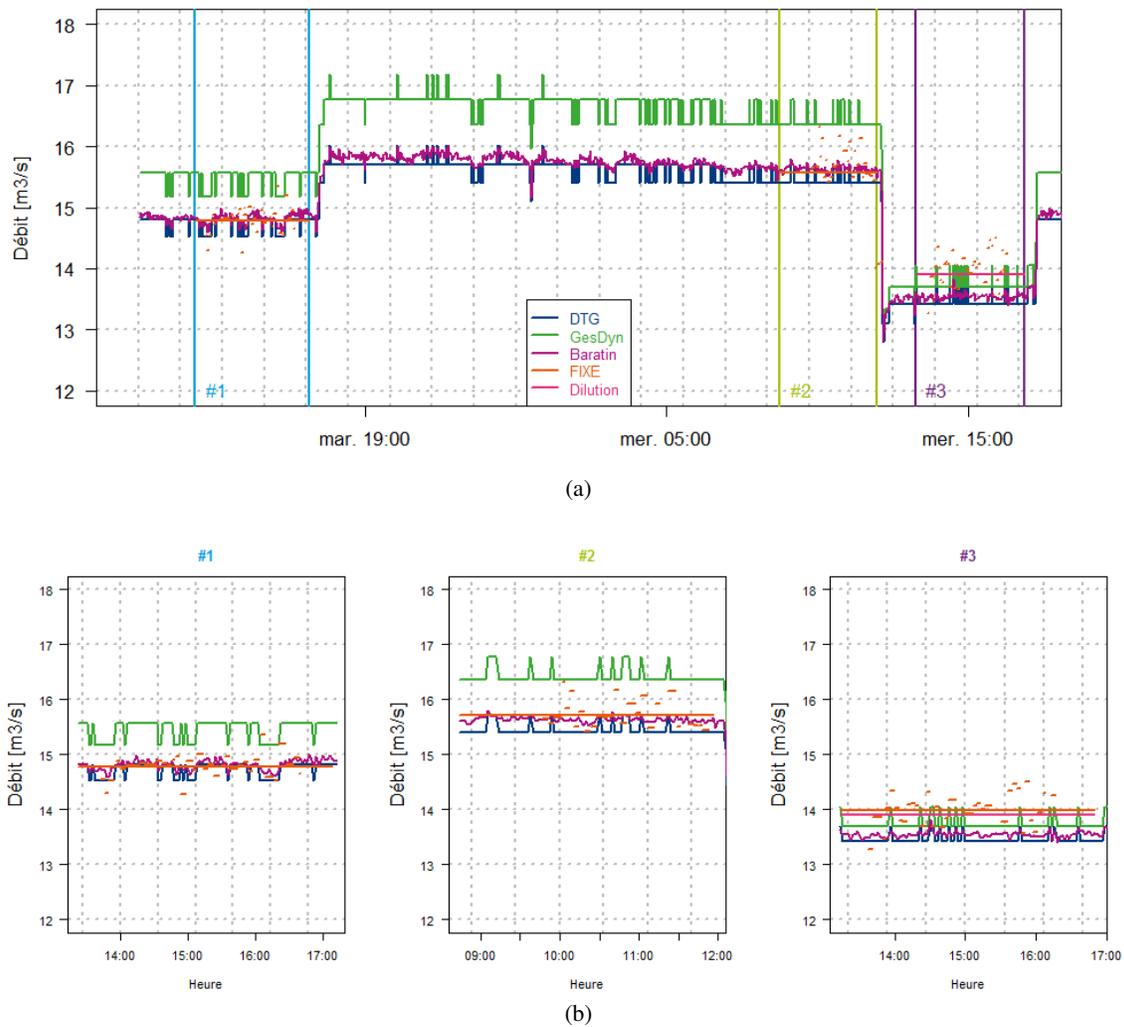


FIGURE 3.4 – Chroniques de débit estimé selon le barème EDF-DTG, la méthode GesDyn et la méthode BaRatin (a) sur l'ensemble des essais et (b) par session de mesure. Les mesures de débit effectuées par l'équipe FIXE (section 3.3.3) sont représentées en orange.

TABLE 3.3 – Sensibilité de la relation hauteur débit pour chacune des sessions, exprimée en $m^3/s/cm$.

| Session | DTG m^3/s | GesDyn m^3/s | BaRatin m^3/s |
|---------|----------------|-------------------|--------------------|
| # 1 | 0.29 | 0.39 | 0.29 |
| # 2 | 0.30 | 0.40 | 0.30 |
| # 3 | 0.30 | 0.36 | 0.29 |

3.3 Mesures de débit indépendantes

3.3.1 Mesure par dilution

Des jaugeages par injection globale à la fluorescéine (figure 2.13) ont été tentés au cours des trois sessions. En raison d'une distance de bon mélange inadéquate, les résultats n'ont pas été exploitables pour les sessions 1 et 2.

En revanche, un débit de $13.90 \text{ m}^3/\text{s}$ a été mesuré par dilution à la fluorescéine lors de la session 3. La masse de traceur injectée est de 18 g et la distance entre l'injection et les sondes : 800 m. Le résumé de la mesure est exposé à l'annexe F.

3.3.2 Mesures par ADCP stationnaire

L'équipe SCP a mesuré en continu et sur la même section le débit tout au long des trois séries d'essais à l'aide d'un ADCP de type Q-Liner. La section de mesure est située en amont du seuil (voir les figures 2.5 et C.1).

Les résultats sont consignés et confrontés aux valeurs de débit issues des courbes de tarage dans le tableau 3.4.

3.3.3 Mesures par ADCP en continu

De même, l'équipe FIXE a procédé à 35, 32 et 42 mesures respectivement au cours des sessions 1, 2 et 3. La section de mesure est située en amont du seuil (voir les figures 2.5 et C.1). Cette section constitue une bonne section de mesure. Le ratio de débit mesuré est en effet de l'ordre de 71% pour les trois sessions de mesure. Un exemple de profil latéral des vitesses est présenté à la figure 3.5. En raison de zones mortes (très faibles vitesses) au niveau des berges, la part du débit extrapolé en rive droite et en rive gauche est très faible ($\ll 1\%$), pour des distances aux berges de 0.5 m en rive gauche et 1 m en rive droite sur une largeur totale de 34 m.

La moyenne des débits mesurés pour chacune des sessions est donnée à titre indicatif dans le tableau 3.4 et sont reportées à la figure 3.4. Des investigations complémentaires seront menées notamment quant au choix des coefficients d'extrapolation de fond et de surface à l'aide du logiciel QRev. Les premiers tests montrent une diminution du débit (-2%) en raison d'un calage d'un coefficient de rugosité plus important.

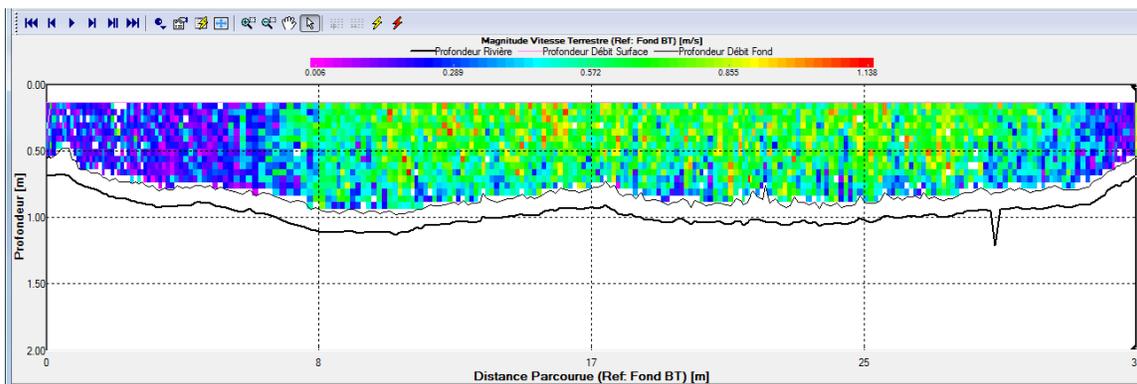


FIGURE 3.5 – Exemple de transect mesuré par l'équipe FIXE en session # 1 (extrait de WinRiver).

3.4 Synthèse des estimations de débit

Le tableau 3.4 présente une synthèse des estimations de débit au cours des trois sessions de mesure selon les trois méthodes de tracé des courbes de tarage, le jaugeage par dilution et les mesures en continu par les ADCP des équipes SCP et FIXE.

TABLE 3.4 – Synthèse des mesures indépendantes exprimée en m^3/s . * le nombre de mesures réalisées est mentionné entre parenthèses.

| Session | DTG m^3/s | GesDyn m^3/s | BaRatin m^3/s | Dilution m^3/s | SCP* m^3/s | FIXE* m^3/s |
|---------|----------------|-------------------|--------------------|---------------------|-----------------|------------------|
| # 1 | 14.81 | 15.57 | 14.93 | | 15.91 (4) | 14.78 (35) |
| # 2 | 15.40 | 16.36 | 15.53 | | 15.27 (3) | 15.72 (32) |
| # 3 | 13.43 | 13.69 | 13.47 | 13.90 | 14.45 (4) | 13.99 (42) |

3.5 Résultats des mesures ADCP par session

3.5.1 Résultats globaux par session

Le tableau 3.5 présente un résumé des principales statistiques en termes de débit pour les trois sessions de mesure (valeurs moyennes, écarts-types, valeurs minimales et maximales). Pour chaque session de mesure, l'écart-type des débits moyens est proche de $0.4 m^3/s$ (équivalent à une variation de 1 cm au niveau de la station hydrométrique). Cette dispersion homogène des débits mesurés est en accord avec la stabilité des hauteurs d'eau observée au cours des 3 séries d'essai (section 3.1).

TABLE 3.5 – Caractéristiques en termes de nombre de mesures et de transects, moyenne, écart-type, valeur minimale et maximales des débits estimées au cours des 3 sessions.

| Session | Mesures | Transects | Moyenne des débits m^3/s | Ecart-type m^3/s | Min m^3/s | Max m^3/s |
|---------|---------|-----------|-------------------------------|-----------------------|----------------|----------------|
| # 1 | 193 | 1345 | 14.85 | 0.44 | 13.52 | 16.32 |
| # 2 | 198 | 1149 | 15.63 | 0.49 | 13.85 | 17.00 |
| # 3 | 206 | 1247 | 13.81 | 0.42 | 12.30 | 15.02 |

Le tableau 3.6 propose la comparaison entre la moyenne des débits mesurés par l'ensemble des participants et les mesures indépendantes. On note que les écarts entre les mesures et les débits estimés par les courbes de tarage EDF-DTG et Baratin sont similaires et plus faibles que les écarts constatés avec les mesures de l'équipe SCP et les valeurs issues de la courbe de tarage GesDyn. Les écarts importants de l'équipe SCP peuvent s'expliquer par le choix inadéquat d'un coefficient d'extrapolation des vitesses trop lisse. Enfin, on note des écarts très faibles entre l'ensemble des mesures et les mesures réalisées par l'équipe FIXE. Cette confrontation ne permet pas d'identifier un biais de la technique de mesure puisque les mesures effectuées par l'équipe FIXE reposent sur la même méthodologie que celle des équipes réparties sur les autres sections de mesure. En revanche, le faible écart observé avec la mesure par dilution est rassurant.

TABLE 3.6 – *Ecart des estimations indépendantes de débit à la valeur de débit moyenne par session de mesure, exprimés en %.*

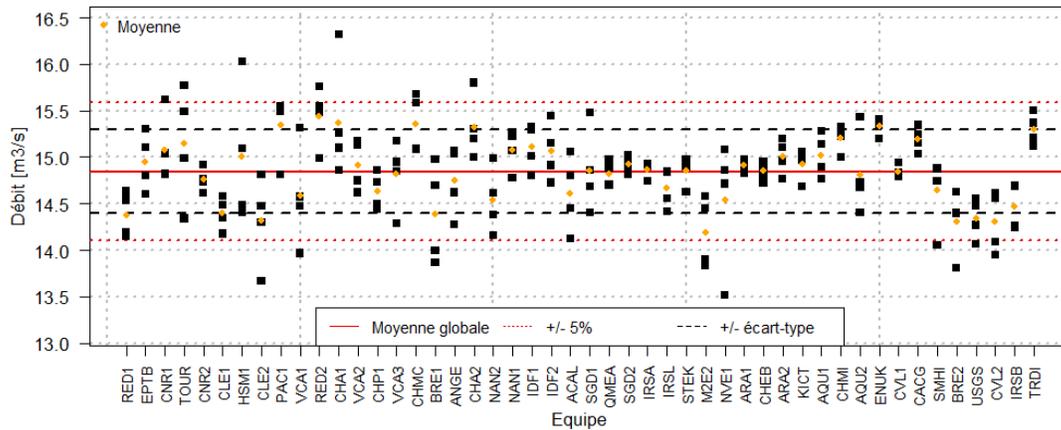
| Session | Moyenne des débits m ³ /s | DTG % | GesDyn % | BaRatin % | Dilution % | SCP % | FIXE % |
|---------|---|----------|-------------|--------------|---------------|----------|-----------|
| # 1 | 14.85 | -0.3 | -4.6 | +0.5 | | +7.1 | -0.4 |
| # 2 | 15.63 | -1.5 | -4.5 | -0.6 | | -2.3 | +0.6 |
| # 3 | 13.81 | -2.8 | +0.8 | -2.4 | +0.6 | +4.6 | +1.2 |

3.5.2 Résultats par équipe

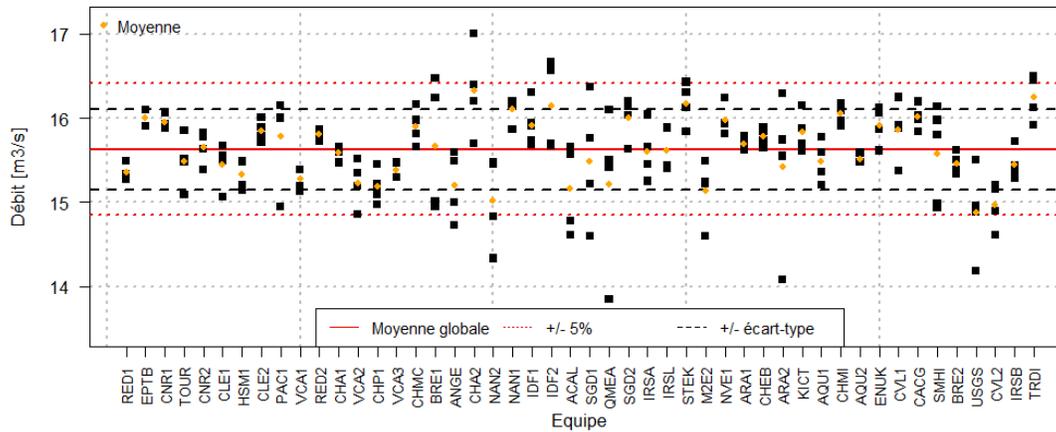
Les débits mesurés sont représentés en fonction de l'équipe pour chacune des sessions de mesure à la figure 3.6. On observe que la majorité des mesures se situe dans un intervalle compris à $\pm 5\%$ autour de la moyenne.

3.5.3 Résultats par section

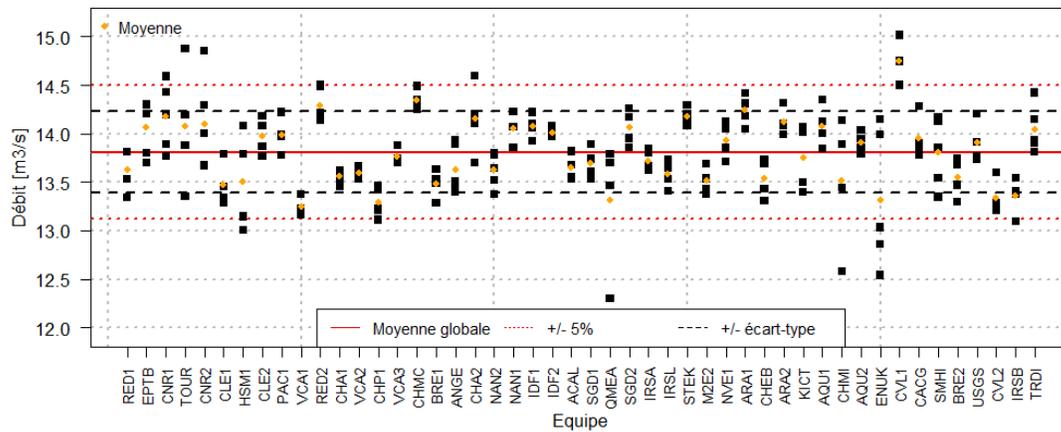
Les débits mesurés sont représentés en fonction de la section de mesure à la figure 3.7 pour chacune des sessions de mesure. Les sections les plus en aval et les plus amont semblent donner les valeurs de débit les moins dispersées.



(a) Session # 1

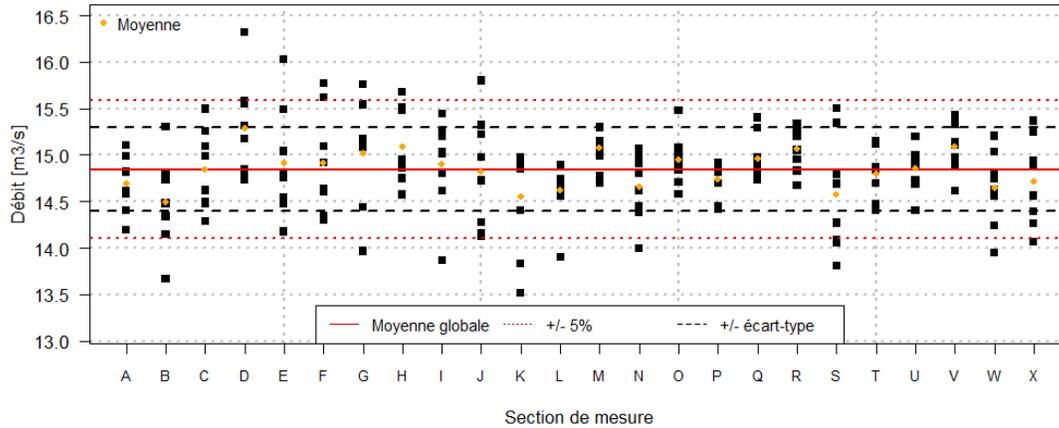


(b) Session # 2

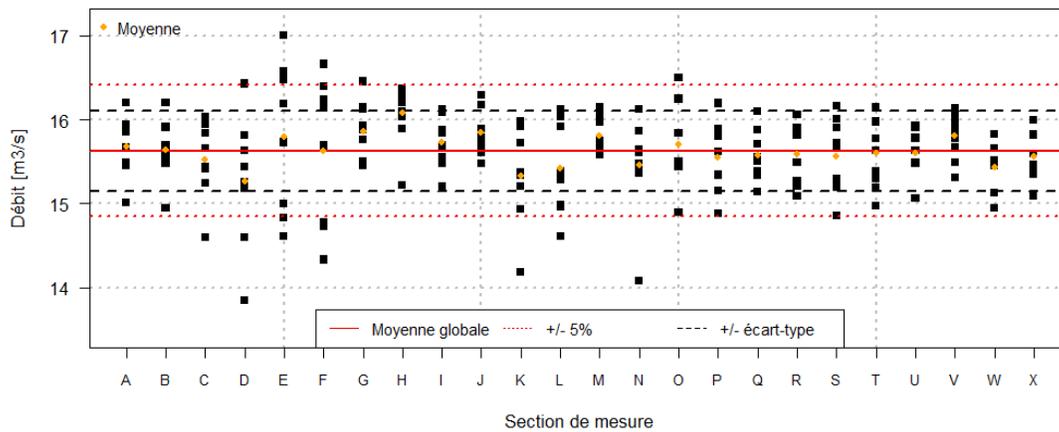


(c) Session # 3

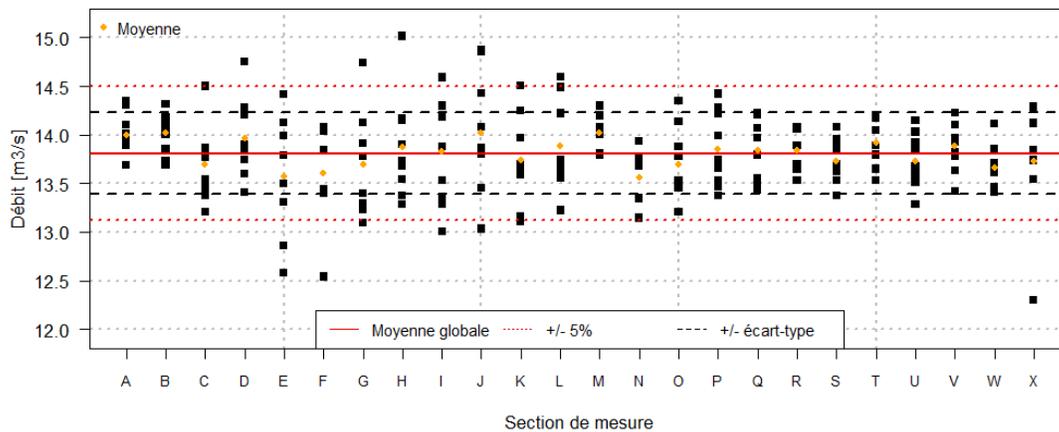
FIGURE 3.6 – Débits mesurés par les 48 équipes pour les sessions de mesure numéros 1 (a), 2 (b) et 3 (c).



(a) Session # 1



(b) Session # 2



(c) Session # 3

FIGURE 3.7 – Débits mesurés sur chacune des 24 sections pour les sessions de mesure numéros 1 (a), 2 (b) et 3 (c). La section A correspond à la section la plus en amont, la section X la plus en aval (voir la figure 2.5).

3.6 Résultats des mesures normalisées

Au cours des trois sessions de mesure, les débits moyens sont sensiblement différents (tableau 3.5) en raison d'une restitution différente du débit par la barrage-usine de Chauvan. La stabilité des débits au cours des trois sessions de mesure (même ordre de grandeur de variations et débits proches) permet néanmoins de normaliser les débits afin de traiter de manière homogène les résultats de débit toutes sessions confondues. Pour cela, on définit le débit normalisé $\widehat{Q}_{i,j,k}$ comme :

$$\widehat{Q}_{i,j,k} = Q_{i,j,k} - \left(\overline{Q}_k^{(i,j)} - \overline{Q}^{(i,j,k)} \right) \quad (3.1)$$

où $Q_{i,j,k}$ désigne la j -ième mesure de débit réalisée par la i -ième équipe lors de la k -ième session, $\overline{Q}_k^{(i,j)}$ représente la moyenne des mesures réalisées au cours de la session k et $\overline{Q}^{(i,j,k)}$ est la moyenne des débits toutes sessions confondues (soit $14.75 \text{ m}^3/\text{s}$).

Ces corrections sont possibles puisque la stabilité du débit est assurée (pas de dispersion plus forte des hauteurs ni des valeurs de débit entre les sessions) et parce que les écarts de débits moyens sont assez faibles pour qu'on puisse négliger les modifications des erreurs de mesure.

3.6.1 Résultats normalisés par équipe

Les résultats en termes de débits normalisés en fonction de l'équipe sont représentés à la figure 3.8. Le dépouillement homogène sous le logiciel QRev sera réalisé ultérieurement. Le calcul de nouveaux coefficients d'extrapolation des profils verticaux de vitesse pourra engendrer des différences significatives dans les résultats exposés ici (réduction possible du biais pour certaines mesures).

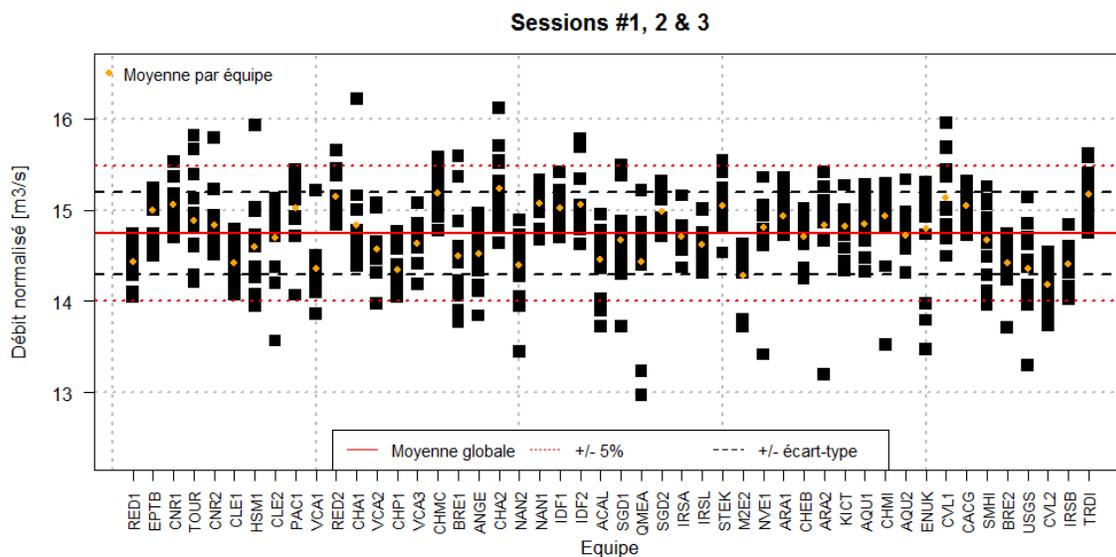


FIGURE 3.8 – Débits normalisés des 48 équipes de mesure (toutes sessions confondues).

3.6.2 Résultats normalisés par section

Les résultats en termes de débits normalisés en fonction de la section sont représentés à la figure 3.9.

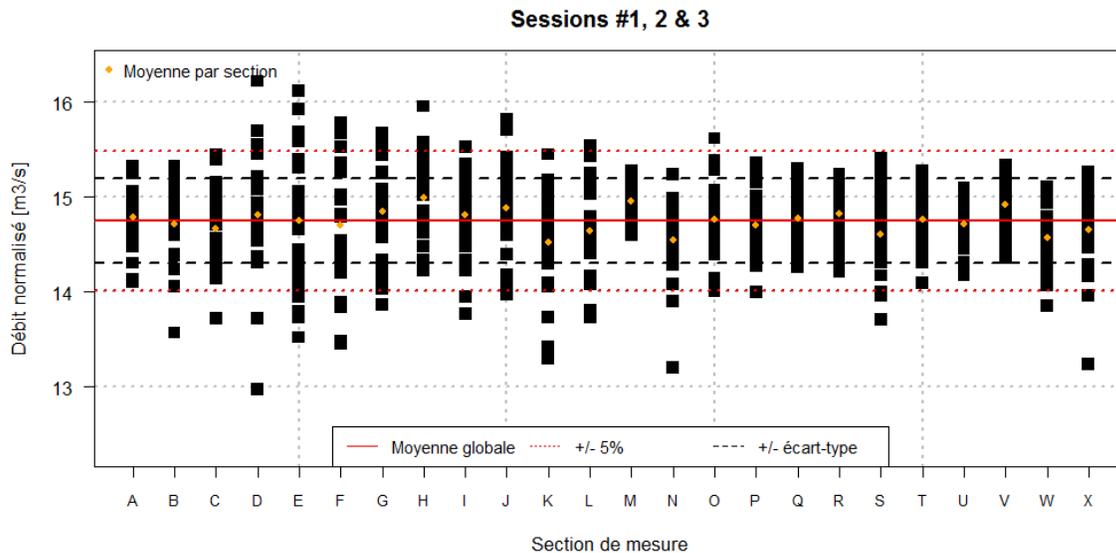


FIGURE 3.9 – Débits normalisés pour les 24 sections de mesure (toutes sessions confondues).

On note que les sections M et V sont les sections présentant les plus faibles dispersion des résultats alors que les sections E et D donnent les valeurs de débit les plus dispersées. Les valeurs moyennes des débits au niveau des sections B, E T et O sont les plus proches de la valeur moyenne toutes sections confondues (référence construite). Les statistiques en termes de dispersion et d'écart à la moyenne sont détaillées dans la section 4.1. On rappelle que le dépouillement sous le logiciel QRev pourra modifier les valeurs de débit exposées ici et modifier les conclusions exposées ici.

3.6.3 Ratios de débit mesuré par section de mesure

La figure 3.10 montre le ratio de débit mesuré (rapport du débit mesuré par le débit total) en fonction de la section de mesure. On observe que les sections de mesure permettant la plus grande exploration des vitesses sont les sections U, W, R et Q (classement des valeurs en fonction de la valeur médiane). La médiane des ratios oscille entre 0.57 et 0.67.

Bien que la gamme des ratios médians soit faible, on observe une corrélation entre la dispersion des valeurs de débits normalisés (figure 3.9) par rapport au ratio mesuré. Ainsi, les sections U et W, qui présentent un fort ratio mesuré, sont les sections pour lesquelles la dispersion des résultats de débit est faible. Ces sections ont été qualifiées comme bonnes (figure 2.9a). A l'inverse, la section E présente un ratio débit exploré faible et une dispersion forte des résultats de débits. Cette section a été évalué par les opérateurs comme la plus mauvaise section du site de mesure (figure 2.9b). En revanche, la section D, dont le ratio de débit mesuré est relativement élevé, présente une forte dispersion des valeurs de débit. Pour cette section, des investigations complémentaires seront menées. Il est possible que les choix des coefficients d'extrapolation au fond et en surface ne soient pas

adaptées à la configuration de l'écoulement à cette section. L'analyse *a posteriori* de la forme des profils verticaux des vitesses et le calcul du débit avec des coefficients d'extrapolation expertisés modifiera certainement les valeurs de débits estimés.

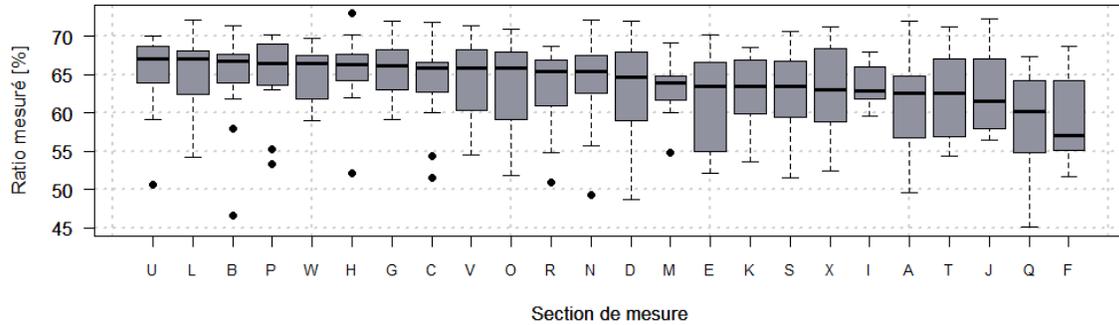
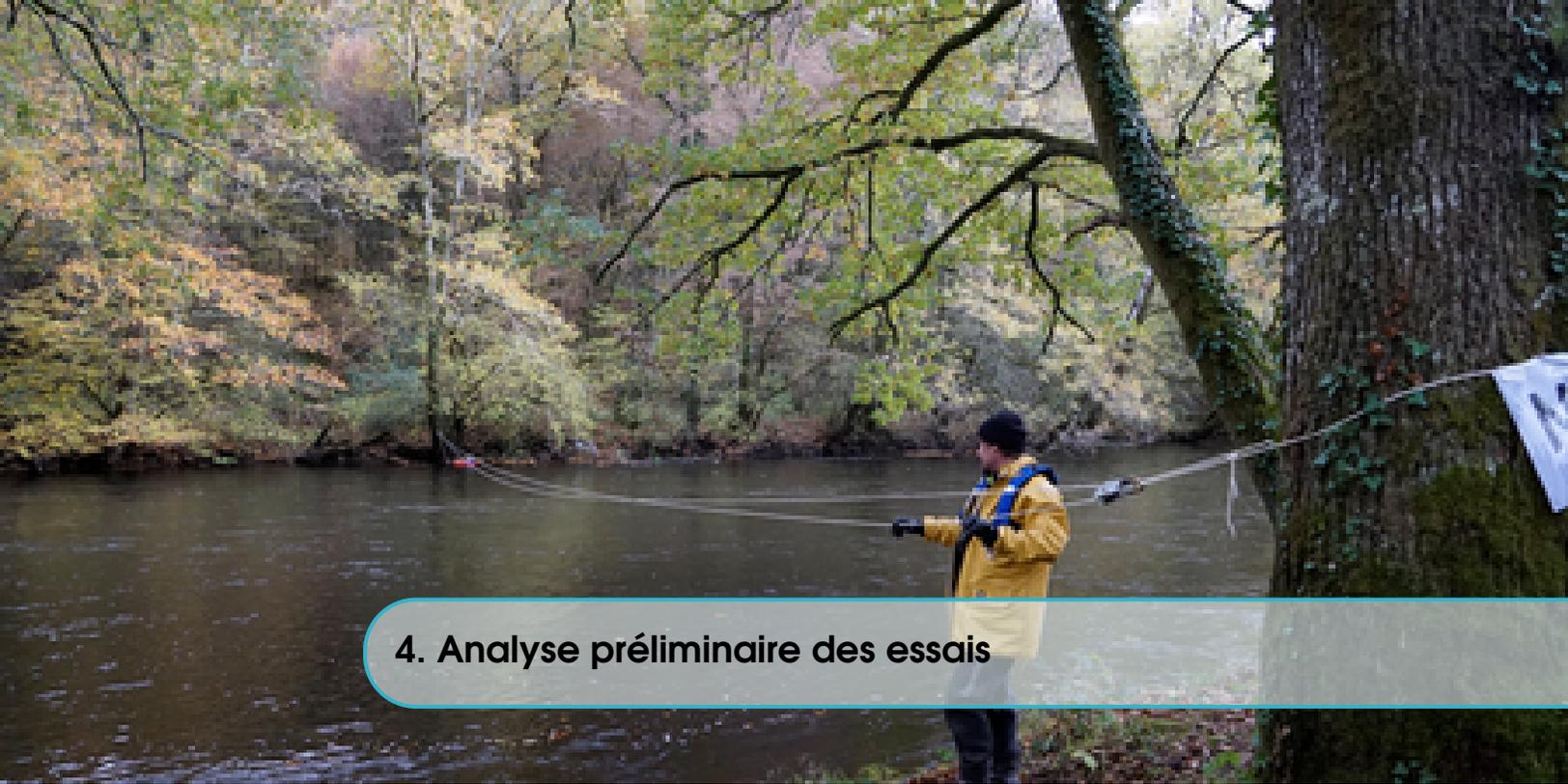


FIGURE 3.10 – Boîtes à moustaches représentant le ratio débit mesuré - débit total pour chaque section de mesure. (Les sections de mesures sont triées par ordre décroissant du ratio médian.)



4. Analyse préliminaire des essais

4.1 Analyse statistique

4.1.1 Dispersion des résultats par équipe

Soit $i = x + y$ avec x ($x = 1$ à 24) l'indice de la section de mesure et y l'indice de l'équipe de mesure (couple opérateurs-matériel, $y = 1$ à 48). On définit s_y , l'écart-type des valeurs de débit mesuré par l'équipe y comme :

$$s_y^2 = \frac{1}{n_y - 1} \sum_{y=1}^{n_y} \left(\widehat{Q_{x,y,j,k}} - \overline{\overline{Q_y}}^{x,j,k} \right)^2 \quad (4.1)$$

avec n_y le nombre de mesures réalisées par l'équipe y au cours de l'ensemble des essais (toutes sessions confondues) et $\widehat{Q_{x,y,j,k}}$ le débit normalisé correspondant (selon l'équation 3.1). En principe, n_y représente aussi le nombre de sections de mesure sur lesquelles l'équipe a réalisé une mesure. $\overline{\overline{Q_y}}^{x,j,k}$ représente la moyenne des débits normalisés mesurés par l'équipe y .

La figure 4.1 montre la dispersion des valeurs de débit normalisés en fonction de l'équipe de mesure. La dispersion des résultats est relativement faible pour l'ensemble des équipes. Il est à noter que la dispersion plus importante observée pour certaines équipes peut être dû au fait que ces équipes ont réalisé des mesures de débits sur des sections plus défavorables que les autres équipes. De plus, le traitement *a posteriori*, via notamment la modification des coefficients d'extrapolation, pourra modifier significativement ces résultats.

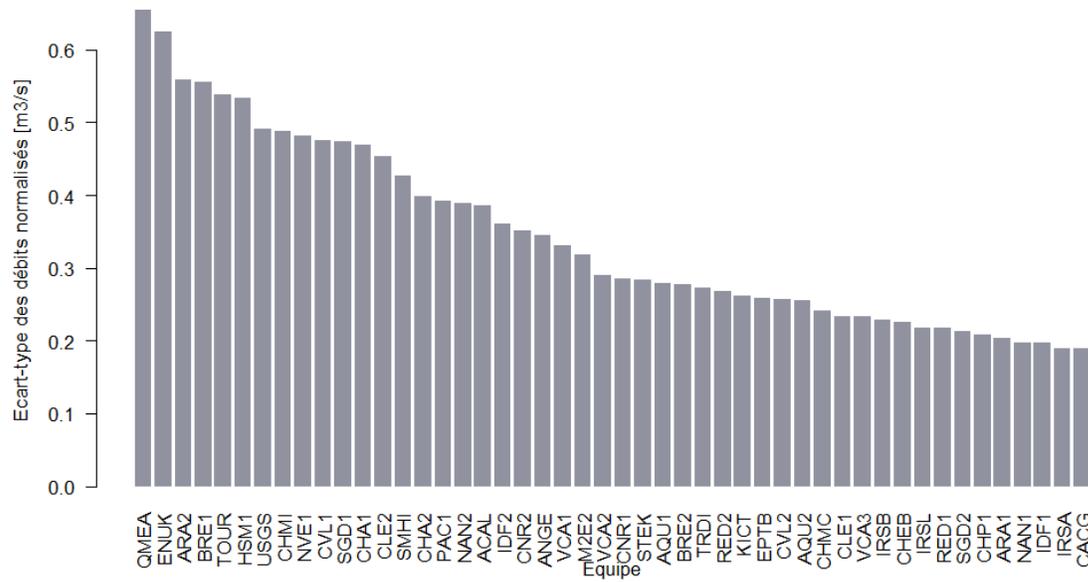


FIGURE 4.1 – Ecart-type des débits normalisés en fonction de l'équipe (triés par ordre décroissant).

4.1.2 Dispersion et écarts des résultats par section de mesure

Soient s_x et B_x tels que :

$$s_x^2 = \frac{1}{n_x - 1} \sum_{x=1}^{n_x} \left(\widehat{Q}_{x,y,j,k} - \overline{\overline{\overline{Q}}}_{x,j,k} \right)^2 \quad B_x = \overline{\overline{\overline{Q}}}_{(y,j,k)} - \overline{\overline{\overline{Q}}}_{(x,y,j,k)} \quad (4.2)$$

avec n_x le nombre de mesures réalisées au cours de l'ensemble des essais (toutes sessions confondues) à la section x et $\widehat{Q}_{x,y,j,k}$ le débit normalisé associé (selon l'équation 3.1). $\overline{\overline{\overline{Q}}}_{(y,j,k)}$ représente la moyenne des débits normalisés mesurés à la section x et $\overline{\overline{\overline{Q}}}_{(x,y,j,k)}$ la moyenne de tous les débits normalisés.

Les figures 4.2 et 4.3 montrent respectivement les écarts à la moyenne (B_x) et les écarts-types (s_x) des débits normalisés en fonction de la section de mesure (équations 4.2). La figure 4.2 semble montrer que les débits estimés à la section H sont biaisés (sous-estimés) tandis que la moyenne des débits normalisés à la section B est très proche de la moyenne de toutes les valeurs de débit. On note néanmoins que les écarts à la moyenne sont inférieurs à 2% et que le dépouillement *a posteriori* pourra modifier significativement ces résultats.

La figure 4.3 permet de mettre en évidence les sections de mesure donnant des résultats de débit les plus dispersés. Ainsi les sections E, D et F donnent les valeurs de débits les plus dispersés alors que la section M donne des valeurs très peu dispersés (écart-type inférieur à 0.200 m³/s). On note que la section E est la section pour laquelle le ratio des débits mesurés est le plus faible parmi toutes les sections de mesure (voir figure 3.10).



FIGURE 4.2 – Écarts à la moyenne des débits normalisés en fonction de la section de mesure (triés par ordre décroissant).

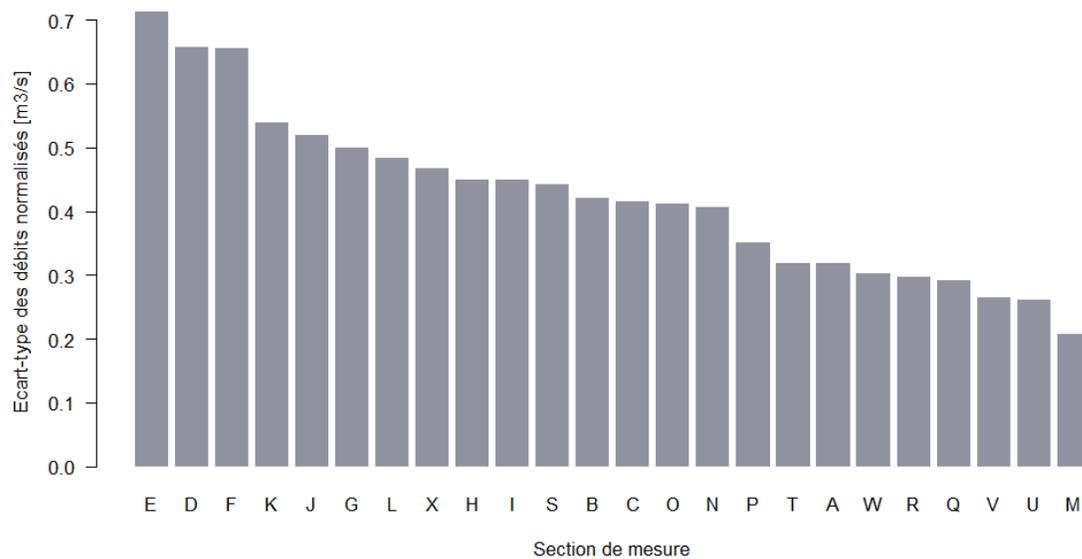


FIGURE 4.3 – Écart-type des débits normalisés en fonction de la section de mesure (triés par ordre décroissant).

4.2 Comparaison analyse qualitative – analyse objective

La figure 4.4 propose la confrontation du jugement attribué (pourcentage des votes "bons") à chaque section de mesure par l'ensemble des participants aux critères objectifs de dispersion (s_x , écart-type des débits par section) et de biais (médiane des écarts B_x à la moyenne globale par section).

On observe une bonne corrélation entre l'écart-type des débits normalisés et le jugement attribué par les équipes. Ainsi, plus une section a été évaluée comme mauvaise et plus la dispersion des mesures est importante. En revanche, le biais en débit (écart des mesures réalisées à une section par

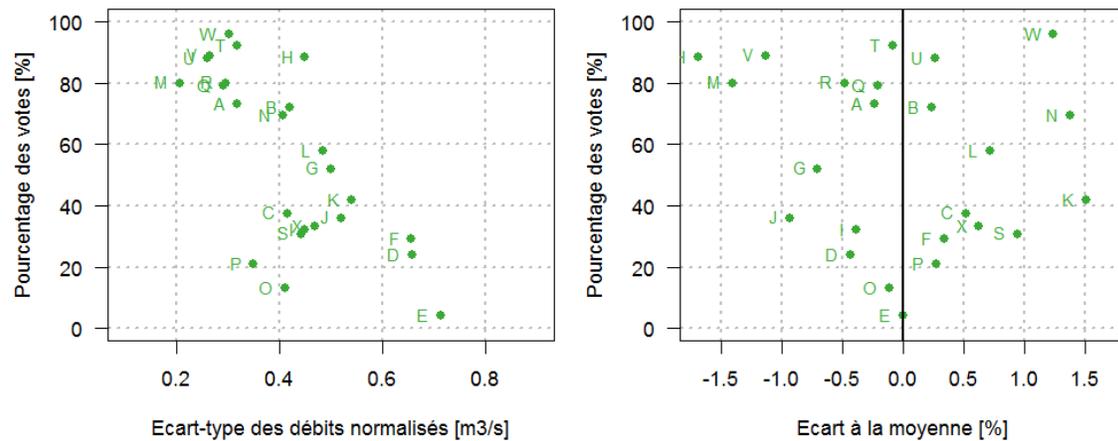


FIGURE 4.4 – Pourcentage des votes "bons" en fonction de l'écart-type des débits normalisés (à gauche) et en fonction de l'écart à la moyenne (à droite) pour chaque section de mesure.

rapport à la moyenne), observé par exemple à la section H, ne semble pas être pris en compte par l'évaluation de la qualité du site par les participants.

On rappelle que le traitement *a posteriori* des mesures par le logiciel QRev peut engendrer des modifications des valeurs de débit. Ainsi, il est probable que le calcul d'un nouveau coefficient d'extrapolation pour les profils verticaux de vitesse puisse réduire le biais observé pour certaines sections de mesure.

En revanche, on ne distingue pas de corrélation marquée entre le ratio mesuré et la qualité de la section de mesure évaluée par les opérateurs, comme illustré par la figure 4.5

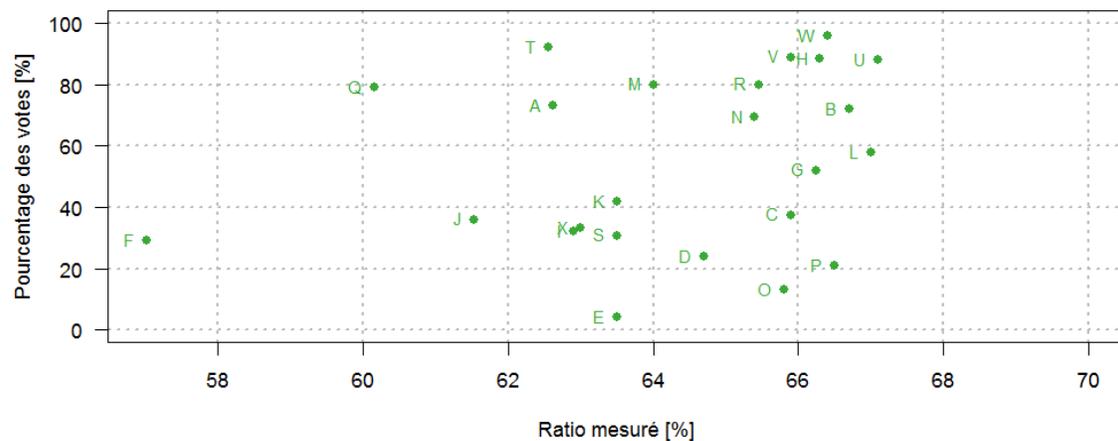


FIGURE 4.5 – Pourcentage des votes "bons" en fonction du ratio mesuré médian pour chacune des sections de mesure.

4.3 Analyse de l'incertitude selon les essais interlaboratoires

Le lecteur est invité à consulter l'annexe G et à se référer aux articles de Dramais *et al.* (2013), Blanquart (2013) et Le Coz *et al.* (2016) pour les détails relatifs à l'estimation de l'incertitude par la méthode des essais interlaboratoires. La figure G.1 résume les principales étapes de calculs.

4.3.1 Résultats basés sur les débits normalisés

On considère ici un laboratoire comme la combinaison de la section de mesure, du matériel utilisé (y compris le logiciel) et les opérateurs (incluant le choix des paramètres, l'impact de la vitesse de déplacement du flotteur, l'estimation des berges...). En appliquant les calculs d'incertitude à l'ensemble des mesures normalisées toutes sessions confondues, on peut annoncer une incertitude de l'ordre de $\pm 7.3\%$ (au niveau de confiance de 95%) pour une mesure réalisée avec 1 transect et dans les conditions de l'essai sur l'une des 24 sections du site de Chauvan et avec l'un des appareils utilisé au cours des essais (avec son paramétrage). Les équations G.4, G.5, G.6 et G.7 sont utilisées. L'incertitude sur le biais, notée $u(\hat{\delta})$ est estimée selon les équations G.9 et G.10 avec $p = 597$ mesures, $n = 6$ transects valides en moyennes et $u(Q_{ref}) = 1\%$.

Le nombre important de participants donne une intervalle de confiance, noté $U'(U'(Q))$, au niveau de confiance de 95%, très resserré autour de l'estimation de l'incertitude. La valeur d'incertitude est en effet comprise entre 6.9 et 7.5% (à 95%).

TABLE 4.1 – Nombre de transects, débit moyen, écarts-types de répétabilité et interlaboratoire, incertitude et intervalle de confiance associé (à 95%) pour un jaugeage réalisé avec 1 transect sur l'une de 24 sections.

| Nombre de mesures | Nombre de transects valides | Débit moyen m ³ /s | s_r % | s_L % | $U(Q)$ % | $U(Q)_{min}-U(Q)_{max}$ % |
|-------------------|-----------------------------|----------------------------------|------------|------------|-------------|------------------------------|
| 597 | 3799 | 14.75 | 2.1 | 3.0 | ± 7.3 | 6.9 - 7.5 |

En comparaison avec les résultats d'incertitude des précédentes intercomparaisons, la valeur d'incertitude semble cohérente puisque le site de mesure présentait des conditions de déploiement légèrement moins favorables.

La figure 4.6 donne l'incertitude (au niveau de confiance de 95%) d'une mesure par ADCP en fonction du nombre de transects réalisés et du nombre de laboratoires. L'incertitude pour un jaugeage réalisé avec 6 transects valides est de $\pm 6\%$ dans les conditions des essais. On constate que l'incertitude ne diminue pas si l'on passe de 6 à 10 transects de mesure. En revanche, si l'on estime le débit comme la moyenne des mesures réalisées par deux laboratoires (section de mesure, équipe et matériel différents) on peut baisser plus fortement l'incertitude. Des investigations complémentaires seront menées afin d'établir la stratégie qui permet de réduire le plus efficacement l'incertitude de mesure (faut-il mesurer le débit sur plusieurs sections avec un seul appareil ? sur une même section avec deux appareils ? *etc.*).

Il est à noter que l'incertitude varie d'une section à une autre comme l'a montré la dispersion des résultats observée précédemment (figure 4.3). Des investigations supplémentaires permettront de quantifier l'incertitude liée au choix de la section de mesure.

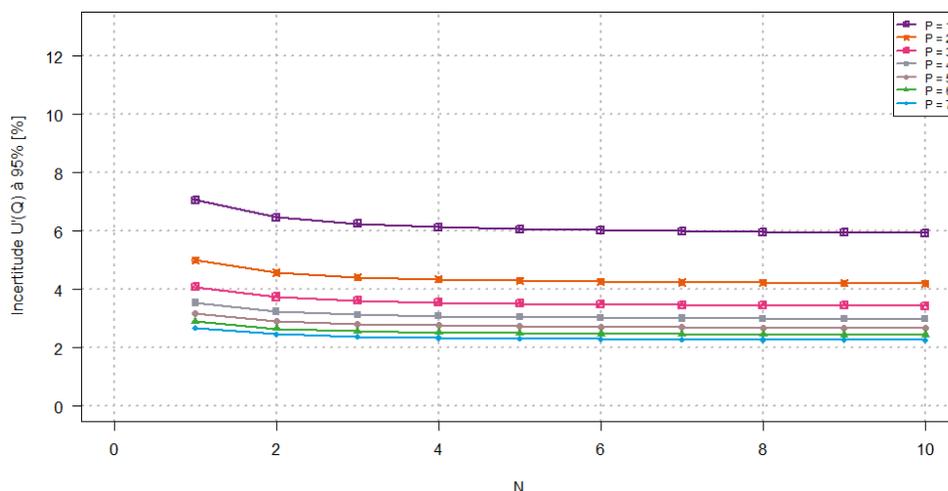


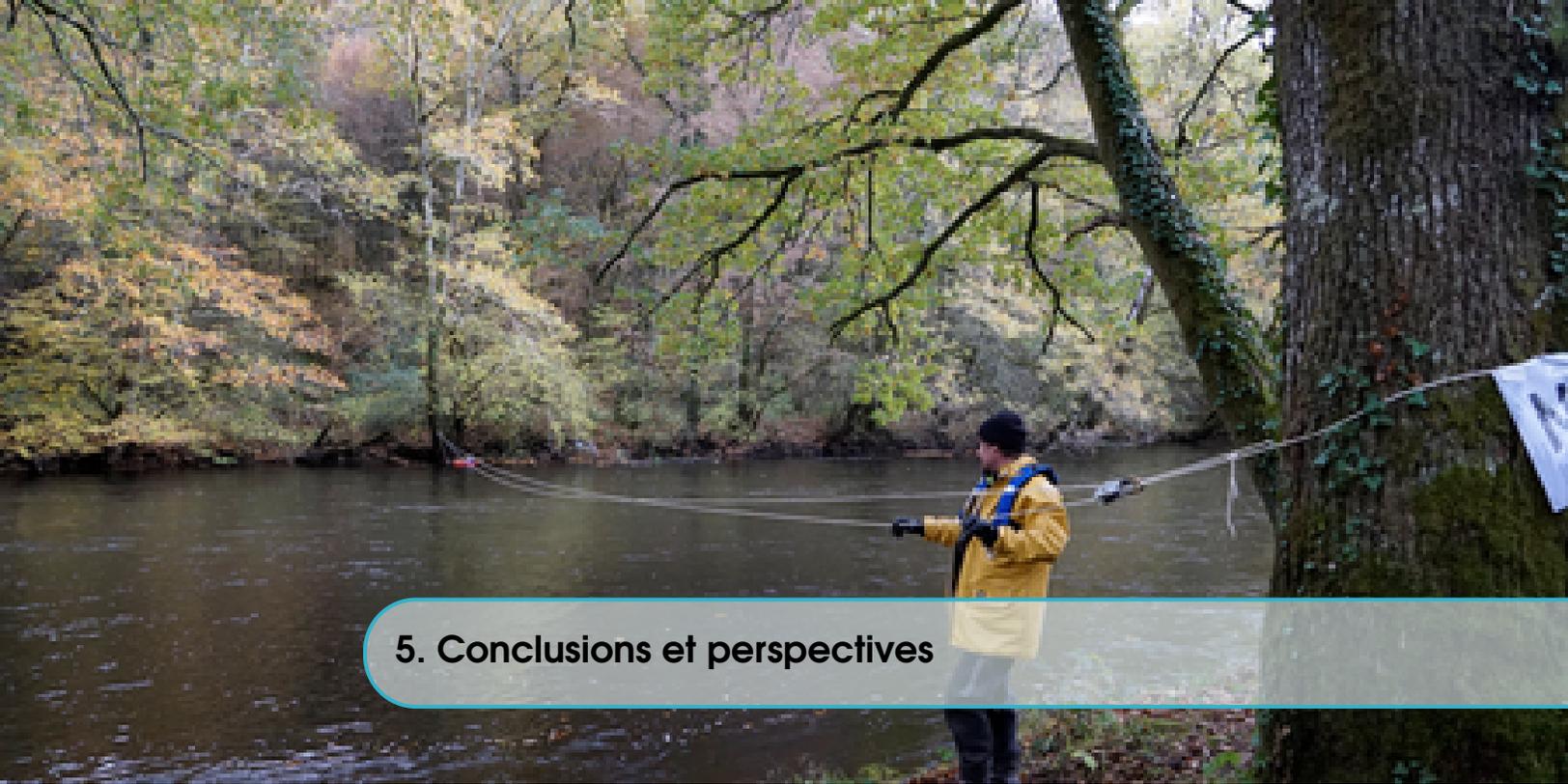
FIGURE 4.6 – Incertitudes sur la mesure de débit issue de la moyenne de N transects et p laboratoires (au niveau de confiance de 95%). Attention, ici, un laboratoire désigne la combinaison du matériel, des opérateurs et du choix de la section de mesure.

4.3.2 Incertitude selon le type de matériel (comparaison M9 et StreamPro)

Des tests ont été réalisés en comparant les résultats d'incertitude selon la méthode des essais interlaboratoires en différenciant les données issues des deux constructeurs (M9 pour SonTek et StreamPro pour Teledyne RDI). Les résultats montrent que les valeurs d'incertitude sont identiques pour les deux jeux de données (tableau 4.2). De plus les valeurs de débit moyen sont similaires (écart $\ll 1\%$) ce qui tend à démontrer l'absence de biais significatif entre constructeurs. Pour le moment, cette confrontation ne montre pas de biais significatifs entre les deux types d'instruments.

TABLE 4.2 – Nombre de transect, débit moyen, écarts-types de répétabilité et interlaboratoire, incertitude et intervalle de confiance associé (à 95%) pour deux types d'ADCP : StreamPro et M9.

| ADCP | Nombre de mesures | Nombre de transects valides | Débit moyen m^3/s | s_r % | s_L % | $U(Q)$ % | $U(Q)_{\min}-U(Q)_{\max}$ % |
|-----------|-------------------|-----------------------------|--------------------------------------|------------|------------|-------------|--------------------------------|
| StreamPro | 271 | 1727 | 14.81 | 2.2 | 2.9 | ± 7.4 | 6.8 - 7.7 |
| M9 | 227 | 1451 | 14.70 | 1.9 | 3.0 | ± 7.2 | 6.5 - 7.5 |



5. Conclusions et perspectives

Cette intercomparaison Chauvan 2016 s'est avérée un succès en termes d'organisation (et ce malgré la complexité du protocole imposé), de nombre de mesures réalisées (près de 600), de participation (50 équipes) et d'échanges techniques.

La stabilité du débit permet d'exposer des résultats en termes d'incertitude de l'ordre de $\pm 6\%$ (dans les conditions des essais et pour un jaugeage quelconque réalisé avec 6 transects valides sur l'une des 24 sections) et d'envisager des investigations supplémentaires afin d'estimer l'incertitude due au choix de la section de mesure.

Des travaux complémentaires seront menés après le traitement des mesures effectué à l'aide du logiciel QRev en collaboration avec l'USGS. Ce traitement permettra une analyse homogène des débits. Un calage automatique et expertisé des coefficients d'extrapolation des vitesses (au fond et en surface) seront également réalisés à l'aide de ce logiciel. Une classification des sections en travers en fonction des profil verticaux de vitesse pourra ainsi émerger. Les valeurs de débit issues de ces calages seront confrontées aux valeurs obtenues en utilisant les coefficients d'extrapolation par défaut (1/6). Les valeurs de débit estimées en utilisant le suivi de fond (*Bottom Track*) seront comparées à celles calculées en utilisant le positionnement GPS.

Les données complémentaires seront analysées, telles que, par exemple, la proportion de cellules et ensemble invalides (*BAD*), la composante d'erreur des vitesses (*error velocity*), les composantes verticales et latérales des vitesses, encore la qualité du suivi de fond ou encore le temps d'exposition par transect. La configuration et les paramètres définis par les opérateurs seront également étudiés.

Ensuite, les valeurs de débit issues du post-traitement QRev seront utilisées pour estimer l'incertitude selon les essais interlaboratoires. Les calculs d'incertitude seront également appliqués sur différents jeux de données pour estimer l'incertitude due à la section en travers. Par exemple, les calculs seront appliqués aux mesures réalisées sur chacune des 24 sections prises séparément (1 estimation de l'incertitude par section). Ces estimations seront confrontées à l'incertitude calculée

sur l'ensemble des données en considérant un laboratoire comme une section (alors qu'un l'estimation présentée dans le paragraphe 4.3.1 considère qu'un laboratoire est la combinaison de l'équipe d'opérateurs, de leur équipement et de la section de mesure). Cette étude pourra permettre d'établir des recommandations quant à la stratégie de mesure à adopter pour réduire l'incertitude.

D'autres recherches seront menées afin d'identifier des paramètres faisant le lien entre les caractéristiques du site de mesure et l'incertitude, et en particulier l'incertitude due à la section de mesure.

Enfin, l'estimation de l'incertitude interlaboratoire sera comparée aux valeurs d'incertitude fournies par les logiciels OURSIN, développé par CNR (France) (Pierrefeu *et al.*, 2017); QRev, de l'USGS (Oberg et Mueller, 2007); QUANT, Environment Canada (Moore *et al.*, 2016); QMsys (Muste *et al.*, 2012), ou RiverFlowUA, South Florida Water Management District (González-Castro *et al.*, 2016).

Ces méthodes reposent sur la propagation analytique des incertitudes selon le cadre du guide pour l'expression des incertitude ou GUM (*Guide to the expression of Uncertainty in Measurement*) (JCGM, 2008). Elles permettent ainsi d'estimer l'incertitude de chaque mesure.

La confrontation des résultats selon les méthodes analytiques et l'approche interlaboratoire permettra éventuellement de mettre en évidence la ou les méthodes les plus adaptées pour estimer l'incertitude. Dans le cas contraire, la confrontation mettra en évidence les pistes d'améliorations de chacune des méthodes.

A. Bonus

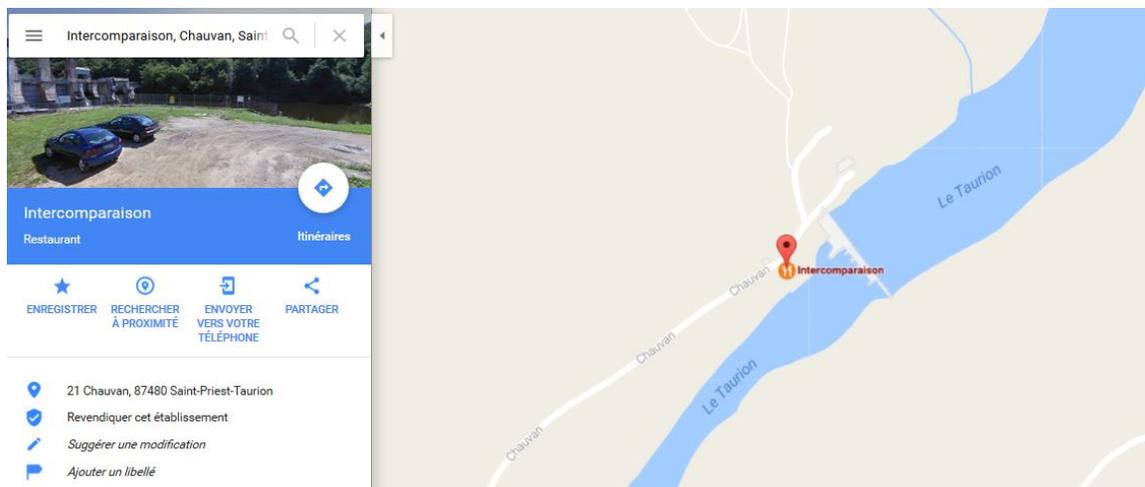


FIGURE A.1 – Depuis l'intercomparaison, un nouveau restaurant a ouvert (selon Google Maps), on y sert des produits régionaux venus de France et d'ailleurs. Les huîtres y sont bonnes! A quand l'inscription au guide Michelin?



FIGURE A.2 – Pratique et ergonomie pour les déplacements, le support pour ordinateur avec porte parapluie intégré (prototype, se renseigner auprès du constructeur).

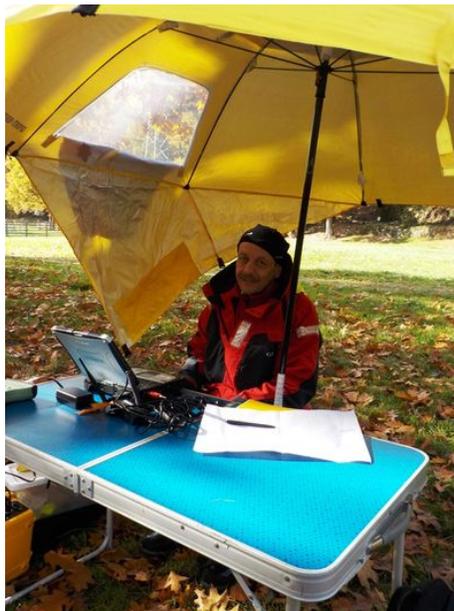


FIGURE A.3 – Le parapluie avec fenêtre, afin de voir s'il pleut encore dehors.



FIGURE A.3 – Intercomparaison de produits régionaux.



B. Présentation des participants

Les figures suivantes montrent les photos des participants.



ACAL



ACAL



ANGE



ANGE



AQU1

FIGURE B.1 – Photos des participants (Source : A. Despax).



AQU2



AQU2



ARA1



ARA2



BRE1



BRE2



CACG

FIGURE B.1 – (... suite) Photos des participants (Source : A. Despax).



FIGURE B.1 – (... suite) Photos des participants (Source : A. Despax).



CHMI



CHP1



CLE1



CNR1

FIGURE B.1 – (... suite) Photos des participants (Source : A. Despax).



CNR2



CVL1



CVL2



FIXE

FIGURE B.1 – (... suite) Photos des participants (Source : A. Despax).



ENUK



EPTB



HSM1



IDF1

FIGURE B.1 – (... suite) Photos des participants (Source : A. Despax).



IDF2



IRSA



IRSA



IRSB

FIGURE B.1 – (... suite) Photos des participants (Source : A. Despax).



KICT



M2E2



NAN1



IRSL



NAN2



QMEA

FIGURE B.1 – (... suite) Photos des participants (Source : A. Despax).



NVE1



PAC1



RED1



RED1

FIGURE B.1 – (... suite) Photos des participants (Source : A. Despax).



RED2



SMHI



SCP1



SGD1



SGD2

FIGURE B.1 – (... suite) Photos des participants (Source : A. Despax).



STEK



STEK



TOUR



TRDI



TRDI



TRDI



USGS

FIGURE B.1 – (... suite) Photos des participants (Source : A. Despax).



VCA1



VCA2



VCA3

FIGURE B.1 – (... fin) Photos des participants (Source : A. Despax).



FIGURE B.2 – Membres de l'équipe d'organisation : de haut en bas et de gauche à droite : David, Alexandre Hauet, Aurélien Despax, Jérôme Le Coz, David Besson, Guillaume Dramais et Arnaud Belleville.



C. Sections de mesure

C.1 Photographies amont/aval

Les photos suivantes présentent les 26 sections de mesure de l'amont vers l'aval.



Section A - Vue amont



Section A - Vue aval



Section B - Vue amont



Section B - Vue aval

FIGURE C.1 – Vue amont et aval des différentes sections de mesure (Source : A. Hauet).



Section C - Vue amont



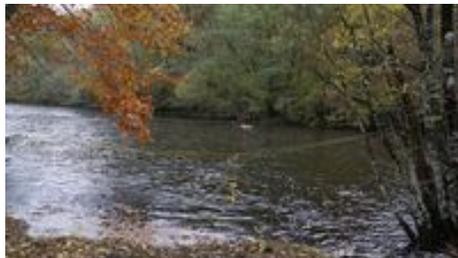
Section C - Vue aval



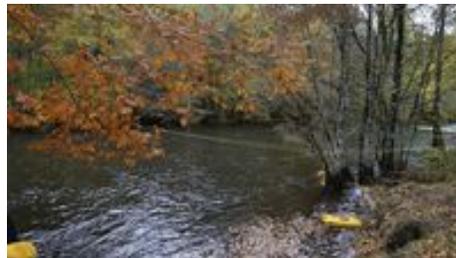
Section D - Vue amont



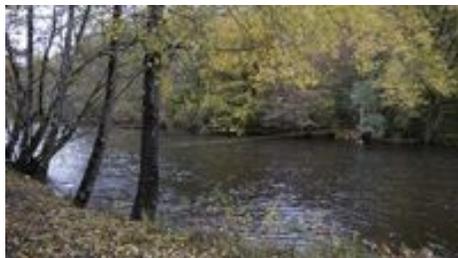
Section D - Vue aval



Section SCP - Vue amont



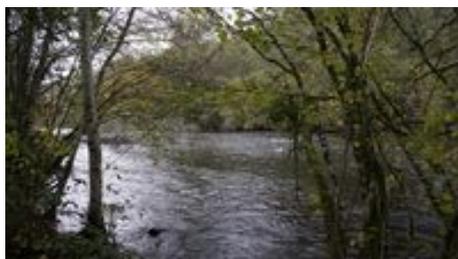
Section SCP - Vue aval



Section FIXE - Vue amont



Section FIXE - Vue aval



Section E - Vue amont



Section E - Vue aval

FIGURE C.1 – (...suite) Vue amont et aval des différentes sections de mesure (Source : A. Hauet).



Section F - Vue amont



Section F - Vue aval



Section G - Vue amont



Section G - Vue aval



Section H - Vue amont



Section H - Vue aval



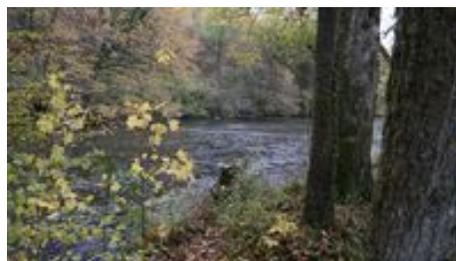
Section I - Vue amont



Section I - Vue aval



Section J - Vue amont



Section J - Vue aval

FIGURE C.1 – (...suite) Vue amont et aval des différentes sections de mesure (Source : A. Hauet).



Section K - Vue amont



Section K - Vue aval



Section L - Vue amont



Section L - Vue aval



Section M - Vue amont



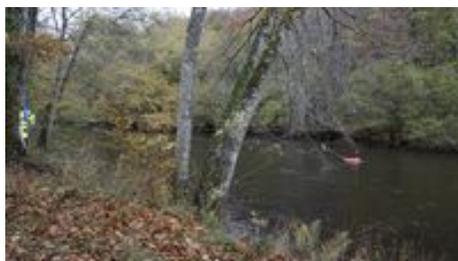
Section M - Vue aval



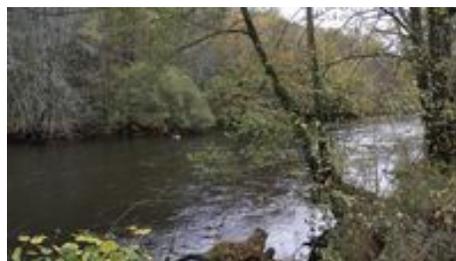
Section N - Vue amont



Section N - Vue aval



Section O - Vue amont



Section O - Vue aval

FIGURE C.1 – (...suite) Vue amont et aval des différentes sections de mesure (Source : A. Hauet).



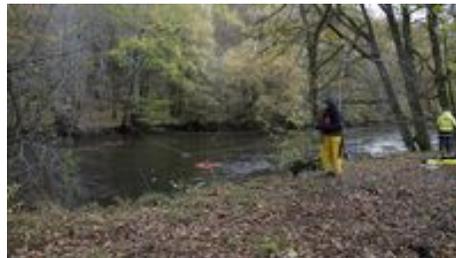
Section P - Vue amont



Section P - Vue aval



Section Q - Vue amont



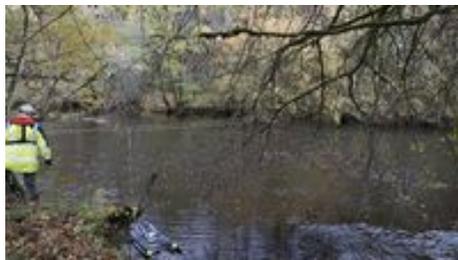
Section Q - Vue aval



Section R - Vue amont



Section R - Vue aval



Section S - Vue amont



Section S - Vue aval



Section T - Vue amont



Section T - Vue aval

FIGURE C.1 – (...suite) Vue amont et aval des différentes sections de mesure (Source : A. Hauet).



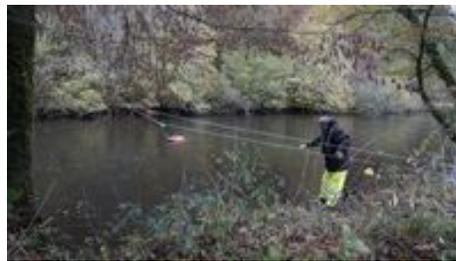
Section U - Vue amont



Section U - Vue aval



Section V - Vue amont



Section V - Vue aval



Section W - Vue amont



Section W - Vue aval



Section X - Vue amont



Section X - Vue aval

FIGURE C.1 – (...fin) Vue amont et aval des différentes sections de mesure (Source : A. Hauet).

C.2 Caractéristiques des sections de mesure

Les graphiques suivants (figure C.2) ont été obtenus à partir des données collectées par les ADCP. Ils permettent de donner un aperçu des caractéristiques géométriques et hydrauliques des sections de mesure. La largeur des sections de mesure est de l'ordre de 35 m (figure C.2a). Les aires estimées par section de mesure oscillent entre 15 et 35 m² (figure C.2b) pour des vitesses débitantes de l'ordre de 0.6 m/s (figure C.2c)

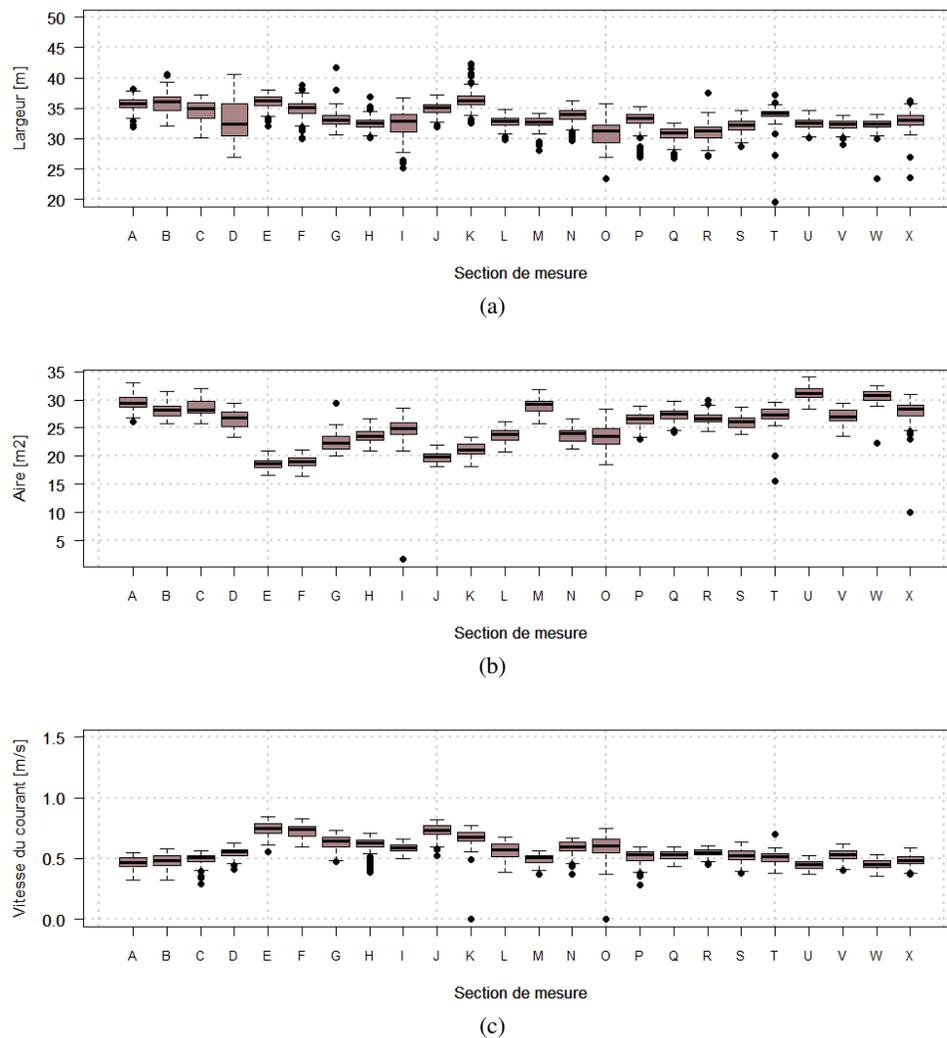


FIGURE C.2 – Distribution des (a) largeurs, (b) aires et (c) vitesses débitantes mesurées par section de mesure au cours des 3 séries d'essais.

D. Plan d'expérience

D.1 Fiches incident

Les référents de l'équipe d'organisation présents en berges consignent les problèmes et difficultés rencontrés au cours des mesures dans une fiche incident (figure D.1).

Intercomparaison GDH - Chauvan 2016
Fiche de suivi en berge

Opérateur en berge : David Bessow
Secteur : N-R

| Date / Heure début | Heure de fin | Transect | Equipe | Type d'incident | Conséquence |
|--------------------|--------------|----------|--------------|--|---|
| 8/11/16 | 13h52 | M | 22 | Missing samples | récupération fichiers Tote ABCP à posteriori |
| 8/11/16 13h53 | 14h12 | J | 24 | " " | fichiers reçus OK! |
| 8/11/16 | 14h47 | M | 24 | " " | PB batterie 14h58 + récupération données à faire |
| 8/11/16 15h34 | 15h50 | O | 37 | pb batterie | récupération faite OK pas de pb |
| 8/11/16 17h30 | 17h40 | O | organisation | changement profils décalé 2m en amont R. Moite | |
| 8/11/16 8h30 | 8h50 | TWXS | 12 | chgt ABCP (SP) dès le début de la manipulation (4h avant le mes) | |
| 8/11/16 15h30 | 16h35 | O | 16 | 5 profils / 6 valide | Mesure complétée ultérieurement 2 fichiers de résultats OK |
| 8/11 13h | 13h52 | M | 22 | Missing samples | récupération fichiers dans la tête ABCP à posteriori OK |
| 8/11 13h53 | 14h12 | J | 24 | " " | fichiers reçus / récupérer OK. |
| 8/11 | 14h47 | M | 24 | " " | problème batterie 14h58 récupération données à faire |
| 8/11 15h34 | 15h50 | O | 37 | problème batterie | récupération faite OK pas de problème |
| 8/11 17h30 | 17h40 | O | organisation | changement profils. décalé 2m en amont en R. Moite | |
| 8/11 8h30 | 8h50 | TWXS | 12 | changement ABCP (SP) dès le début de la manipulation (52) | |
| 8/11 15h30 | 16h35 | O | 16 | 5 profils / 6 valide | Mesure complétée ultérieurement 2 fichiers de résultats OK. |

Page .../...

FIGURE D.1 – Exemple de fiche incident.

D.2 Fiches de terrain

Avant chaque session de mesure une fiche terrain a été délivrée à chaque équipe de mesure (figure D.2). Cette fiche impose un plan de route à suivre avec le passage obligatoire par 4 sections de mesure. 4 sections supplémentaires sont proposées en "bonus". En plus de la fiche terrain distribué, l'équipe de mesure complète une version électronique. Les fiches terrain sont récoltées à la fin de chaque session de mesure et une nouvelle fiche est distribué en session suivante. L'équipe d'organisation collecte également les données brutes issues des ADCP ainsi qu'un résumé des mesures proposé par le logiciel du constructeur (F12 ou Summary).

| Fiche "PARCOURS" | | Organisme | | Opérateurs | | Instrument | | Support | | CHAUVAN 2016 - INTERCOMPARISON ADCP | | | | | | | |
|---------------------|--|-----------|--|---------------------|--|-------------------|--|-----------------------------|--|-------------------------------------|--|--------------------------------|--|-------------------------------------|--|--------------------------------------|--|
| Chercher une équipe | | CHR2 | | JANNIN MARTIN X | | StreamPro 232 | | | | | | | | | | | |
| Equipe 2 | | Profil | | Heure début [UTC+1] | | Heure fin [UTC+1] | | Nombre de transects valides | | Débit moyen [m ³ /s] | | Ecart-type [m ³ /s] | | Qualité du site [bon/moyen/mauvais] | | Ratio Débit mesuré / Débit total [%] | |
| 1ère demi-journée | | A | | 13:51 | | 14:10 | | 8 | | 14,76 | | 0,33 MOYEN | | | | 55 | |
| mardi 8 novembre | | B | | 14:54 | | 15:23 | | 9 | | 14,92 | | 0,58 MOYEN | | | | 58 | |
| après-midi | | E | | 16:00 | | 16:22 | | 8 | | 14,61 | | 0,27 BON | | | | 70 | |
| | | F | | 16:46 | | 17:01 | | 8 | | 14,73 | | 0,57 BON | | | | 68 | |
| | | K | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | L | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | O | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | P | | | | | | | | | | | | | | | |
| 2ème demi-journée | | V | | 08:59 | | 09:10 | | 6 | | 15,63 | | 0,33 BON | | | | 72 | |
| mercredi 9 novembre | | Q | | 09:29 | | 09:39 | | 6 | | 15,78 | | 0,11 BON | | | | 66 | |
| matin | | R | | 10:31 | | 10:42 | | 6 | | 15,39 | | 0,43 BON | | | | 70 | |
| | | U | | 11:11 | | 11:22 | | 6 | | 15,62 | | 0,36 BON | | | | 69 | |
| | | H | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | C | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | D | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | G | | | | | | | | | | | | | | | |

FIGURE D.2 – Exemple de fiche parcours.



E. Jaugeages réalisés à la station hydrométrique

Le tableau E.1 présente les jaugeages utilisés pour la construction des courbes de tarage (voir section 3.2). La majorité des jaugeages ont été réalisés au moyen d'ADCP de type StreamPro. Seul un jaugeage par ADCP (numéro 120) a été réalisé avec un ADCP de type RiverRay. Le modèle d'ADCP utilisé pour le jaugeage numéro 108, réalisé par un autre organisme que EDF-DTG, n'est pas précisé. Seul un jaugeage, à bas débit, a été réalisé au micro-moulinet sur perche.

Depuis 2015, les jaugeages par ADCP sont effectués systématiquement depuis la drisse à demeure installée en amont du seuil (section notée FIXE sur la figure 2.5). Certains jaugeages antérieurs à l'installation de cette drisse ont été réalisés à environ 2.5 kilomètres en aval, depuis le pont le routier situé en aval de la confluence avec la Vienne.

TABLE E.1 – Jaugeages réalisés à la station hydrométrique EDF-DTG de Chauvan depuis 2008. Les moyens des mesures SP, RR et MP désignent respectivement des mesures par ADCP StreamPro, ADCP RiverRay et micro-moulinet sur perche. NONDTG désigne un jaugeage réalisé par un organisme autre que EDF-DTG.

| Numéro | Hauteur m | Débit m ³ /s | Date | Moyen de mesure |
|--------|--------------|----------------------------|------------|-----------------|
| 82 | 0.76 | 15.7 | 18/03/2008 | SP |
| 83 | 0.32 | 2.82 | 19/05/2008 | SP |
| 84 | 0.43 | 4.84 | 19/05/2008 | SP |
| 85 | 0.645 | 9.57 | 19/05/2008 | SP |
| 86 | 0.925 | 17.4 | 20/05/2008 | SP |
| 87 | 1.07 | 26.6 | 20/05/2008 | SP |
| 88 | 0.54 | 6.63 | 22/07/2008 | SP |
| 89 | 0.8 | 13.8 | 23/12/2008 | SP |
| 90 | 0.6 | 8.25 | 09/07/2009 | SP |
| 91 | 0.32 | 2.76 | 17/11/2009 | SP |
| 92 | 1.09 | 28 | 17/02/2010 | SP |
| 93 | 1.125 | 30.3 | 02/06/2010 | SP |
| 94 | 1.14 | 32.3 | 07/12/2010 | SP |
| 95 | 0.57 | 7.53 | 09/02/2011 | SP |
| 96 | 0.585 | 8.09 | 29/06/2011 | SP |
| 97 | 0.32 | 2.62 | 13/07/2011 | SP |
| 98 | 0.31 | 2.42 | 29/09/2011 | SP |
| 99 | 0.83 | 15.1 | 17/01/2012 | SP |
| 100 | 1.06 | 26.4 | 13/03/2012 | SP |
| 101 | 0.93 | 18.2 | 10/04/2012 | SP |
| 102 | 0.325 | 2.85 | 05/06/2012 | SP |
| 103 | 0.33 | 2.74 | 31/07/2012 | MP |
| 104 | 0.74 | 12.2 | 28/08/2012 | SP |
| 105 | 0.33 | 2.74 | 25/09/2012 | SP |
| 106 | 0.31 | 2.47 | 23/10/2012 | SP |
| 107 | 0.61 | 8.61 | 20/11/2012 | SP |
| 108 | 1.59 | 75.6 | 06/02/2013 | NONDTG |
| 109 | 1.285 | 47 | 19/02/2013 | SP |
| 110 | 0.96 | 19.7 | 14/05/2013 | SP |
| 111 | 0.45 | 4.95 | 08/10/2013 | SP |
| 112 | 1.29 | 46.99 | 05/02/2014 | SP |
| 113 | 1.29 | 50.1 | 20/02/2014 | SP |
| 114 | 0.33 | 2.52 | 10/09/2014 | SP |
| 115 | 0.835 | 15.1 | 18/11/2014 | SP |
| 116 | 1.14 | 31.8 | 12/02/2015 | SP |
| 117 | 1.13 | 31.5 | 24/03/2015 | SP |
| 118 | 0.64 | 8.76 | 18/06/2015 | SP |
| 119 | 0.49 | 6.1 | 30/06/2015 | SP |
| 120 | 1.33 | 54 | 24/02/2016 | RR |
| 121 | 1.285 | 46.2 | 07/06/2016 | SP |
| 122 | 0.38 | 3.74 | 08/09/2016 | SP |



F. Mesure de débit par dilution

Mesure de débit

Station

| | | |
|-------------|------------------|-------------|
| ID | chauvan | Commentaire |
| Emplacement | intercomparaison | |
| Site | stade | |

Mesure

| | | |
|-------------------------|-----------------|--|
| Date/Heure | 09/11/2016 | Commentaire: Long car stockage temporaire dans le remous en aval du barrage. |
| Opérateurs | bouchet cordeau | |
| Quantité Traceur | 18 g | |
| Site d'injection | vanne barrage | |
| Distance de dissolution | 800 m | |
| Niveau d'eau | 0 cm | |

Débit

| | Débit [l/s] | Dév. [%] | Base [mV] | Max. [mV] | □ |
|---------------|-------------|----------|-----------|-----------|---|
| A | 14376 | 3.0 | 44.5-44.7 | 81.6 | |
| B | 13325 | -4.5 | 43.8-43.9 | 122.3 | |
| CA | 13877 | -0.5 | 46.8-46.3 | 137.2 | |
| CB | 14235 | 2.0 | 47.1-48 | 94.5 | |
| Moyenne [l/s] | 13953 | | | | |

Calibration

| | | | | |
|------------|-------------|-------------|-----------|--|
| Date/Heure | 08/11/2016 | 09:37:41 | | |
| | Coefficient | Corrélation | Base [mV] | |
| A | 0.028926 | 0.9999 | 54.1 | |
| B | 0.028141 | 0.9999 | 53.0 | |
| CA | 0.027054 | 0.9999 | 53.7 | |
| CB | 0.026972 | 0.9999 | 55.7 | |

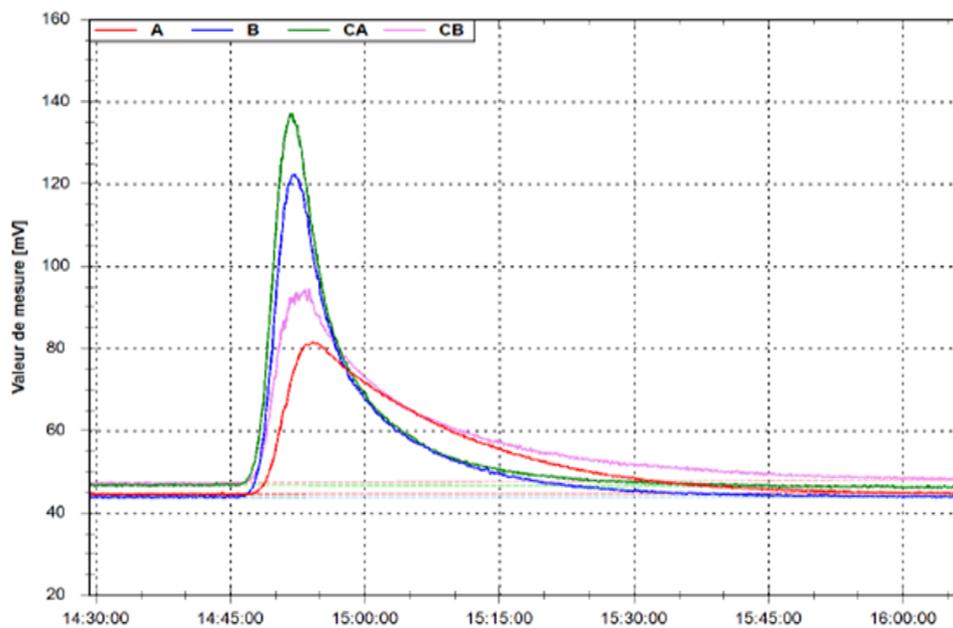
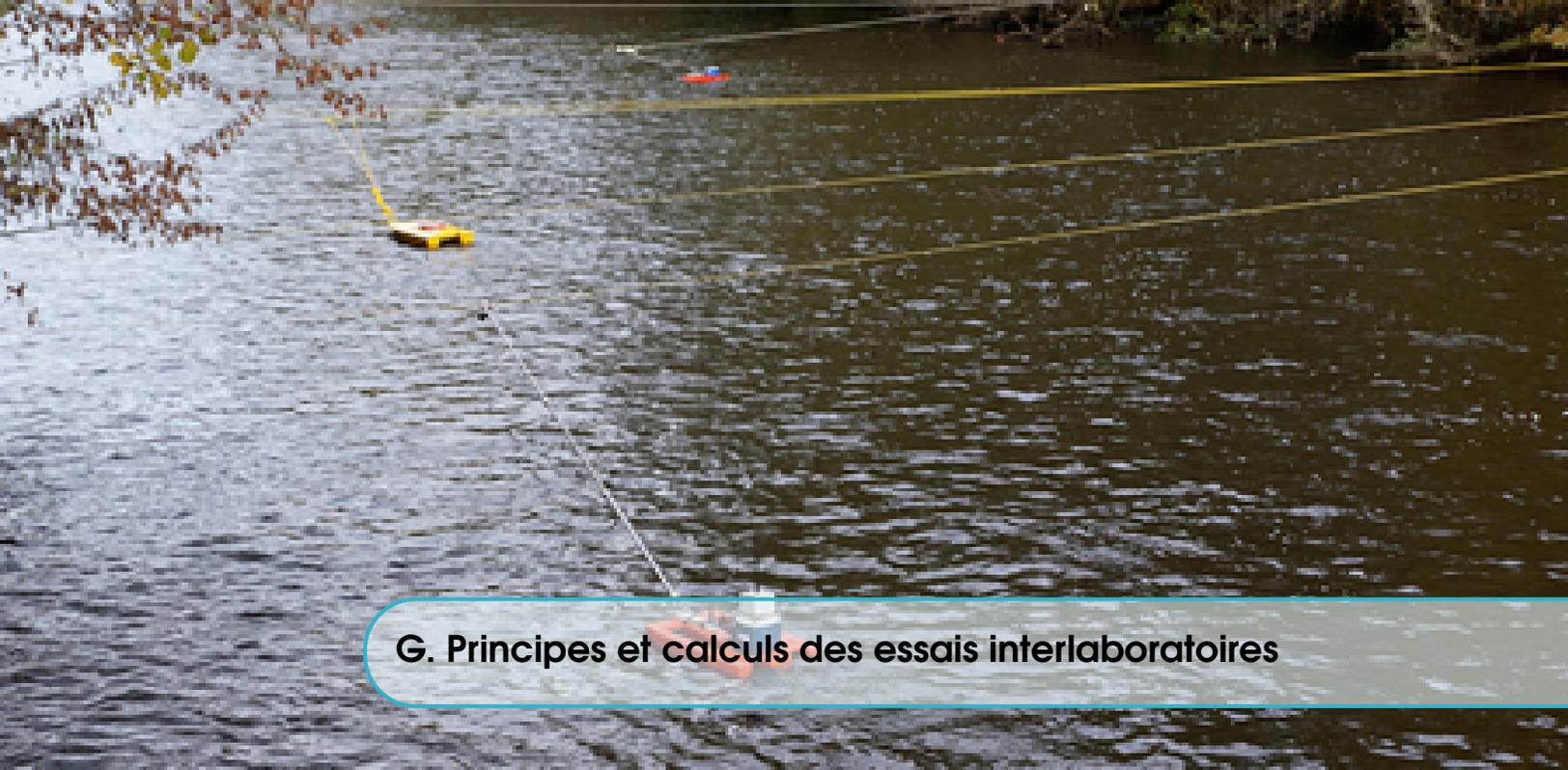


FIGURE F.1 – Résumé de la mesure par fluorescence.



G. Principes et calculs des essais interlaboratoires

Les essais interlaboratoires présentent un intérêt pour quantifier les incertitudes d'une **méthode de mesure** dans des conditions données (Blanquart, 2013). Ils sont généralement utilisés dans les domaines de la chimie ou de la biologie pour lesquels certains processus de mesure ne sont pas aisément modélisables. Cette méthode consiste à mesurer plusieurs fois une même grandeur (supposée constante et stable dans le temps) et par plusieurs laboratoires. Elle est encadrée par quatre référentiels normatifs :

- La norme ISO 5725–2 (ISO, 1994b)
- la norme ISO 21748 (ISO, 2005)
- la norme ISO 13528 (ISO, 2010)
- la norme ISO 5725–1 (ISO, 1994a)

La méthode se base sur le modèle général suivant (ISO, 1994b)¹ :

$$Q = \mu + \delta + B + \varepsilon + \sum c_i x_i \quad (\text{G.1})$$

où Q désigne le résultat expérimental (par exemple l'estimation du débit), μ est la valeur vraie du mesurande, δ dénote le biais de la méthode de mesure, B est la composante laboratoire du biais (erreur systématique), ε est l'erreur aléatoire de la mesure et $\sum c_i x_i$ constitue l'ensemble des sources d'erreur non quantifiées lors des essais interlaboratoires.

En se basant sur l'utilisation d'une seule méthode de mesure et en établissant un protocole commun (c'est-à-dire que certaines sources d'erreur ne s'expriment pas), on peut simplifier l'équation G.1 en :

$$Q = m + B + \varepsilon \quad (\text{G.2})$$

où l'on considère que m est la moyenne de l'ensemble des résultats de l'essai, soit une approximation de la valeur vraie du mesurande μ dans l'équation G.1 et B le biais de la méthode de mesure.

1. Les notations utilisées sont issues des normes présentées ici, elles diffèrent des notations classiquement utilisées en mathématiques.

Les termes B et ε peuvent être considérés comme des réalisations de variables aléatoires suivant respectivement une loi normale d'écart-type σ_L et σ_r , en faisant l'hypothèse que les variables ne sont pas corrélées. Le terme m étant supposé avoir une variance nulle puisque sa valeur est constante, l'additivité des variances permet d'estimer la variance du résultat (l'écart-type de reproductibilité, noté s_R) à partir des écarts-types empiriques de répétabilité (s_r) et interlaboratoires (s_L) tel que :

$$s_R^2 = s_r^2 + s_L^2 \quad (\text{G.3})$$

Soient $i = 1, \dots, p$ et $k = 1, \dots, n_i$ les indices respectifs du laboratoire (ou participant) et de la répétition de la mesure. L'écart-type de répétabilité, s_r , est calculé à partir des écarts-types empiriques s_i des n_i répétitions de la mesure $Q_{i,k}$ donnée par chaque participant i , selon l'équation suivante :

$$s_r^2 = \frac{\sum_{i=1}^p (n_i - 1) s_i^2}{\sum_{i=1}^p (n_i - 1)} \quad \text{avec} \quad s_i^2 = \frac{1}{n_i - 1} \sum_{k=1}^{n_i} (Q_{i,k} - \bar{Q}_i)^2 \quad (\text{G.4})$$

où \bar{Q}_i désigne la moyenne des k répétitions de mesure du laboratoire i , Q_i .

Lorsque les mesures ne sont répétées que deux fois (cas où $n_i = 2$), l'écart-type est estimé comme suit : $s_i = |Q_{i,2} - Q_{i,1}|/\sqrt{2}$.

L'estimation de la variance interlaboratoires, s_L^2 , qui caractérise la dispersion des résultats moyens entre les laboratoires, est calculée comme :

$$s_L^2 = \frac{s_d^2 - s_r^2}{\bar{n}} \quad \text{avec} \quad s_d^2 = \frac{1}{p-1} \sum_{i=1}^p n_i (\bar{Q}_i - Q_{\text{moy}})^2 \quad \text{et} \quad \bar{n} = \frac{1}{p-1} \left[\sum_{i=1}^p n_i - \frac{\sum_{i=1}^p n_i^2}{\sum_{i=1}^p n_i} \right] \quad (\text{G.5})$$

Lorsque $s_d < s_r$, on pose $s_L = 0$. Q_{moy} désigne la moyenne de l'ensemble des mesures (toutes répétitions et tous laboratoires confondus).

La norme ISO 5725 (ISO, 1994a) fournit une description très détaillée quant au traitement des résultats des essais et propose des tests statistiques à appliquer pour vérifier l'homogénéité et la cohérence des résultats de mesure (il s'agit notamment des statistiques h et k de Mandel).

La norme ISO 13528 (ISO, 2010) permet enfin d'exprimer l'incertitude-type combinée $u(Q)$ à partir de s_R comme :

$$U(Q) = k \sqrt{s_R^2 + u^2(\hat{\delta})} = k \sqrt{s_L^2 + s_r^2 + u^2(\hat{\delta})} \quad (\text{G.6})$$

avec k , le facteur d'élargissement et $u(\hat{\delta})$ l'incertitude sur l'estimation du biais de la technique de mesure.

Cas de la moyenne de plusieurs mesures

Dans le cas des jaugeages par ADCP, une mesure de débit, notée $Q^{N,P}$, est en fait considéré comme la moyenne des N mesures (ou transects) réalisées par chacun des P appareils. Typiquement, un jaugeage est obtenu comme la moyenne de $N = 4 - 6$ transects successifs mesuré à l'aide de $P = 1$ appareil.

Il est possible d'estimer l'incertitude $U(Q^{N,P})$ d'une mesure déterminée comme la moyenne de N transects successifs réalisés par P appareils (Le Coz *et al.*, 2016) comme suit :

$$U(Q^{N,P}) = k \sqrt{\frac{s_r^2}{NP} + \frac{s_L^2}{P} + u^2(\hat{\delta})} \quad (\text{G.7})$$

Incertitude sur le biais de la technique de mesure

Le biais de la méthode de mesure δ peut être estimé par comparaison avec une mesure de référence dont l'incertitude $u(\hat{\delta})$ devrait être au moins 3 à 10 fois plus petite que la technique de mesure étudiée (Le Coz *et al.*, 2016). Cela se traduit par l'équation G.8.

$$\hat{\delta} = Q_{\text{mean}} - Q_{\text{ref}} \quad (\text{G.8})$$

Si les erreurs de la méthode de mesure de référence sont indépendantes de celles de la méthode de mesure testée, alors on peut écrire :

$$u^2(\hat{\delta}) = u^2(Q_{\text{mean}}) + u^2(Q_{\text{ref}}) \quad (\text{G.9})$$

Selon la norme ISO 21748(ISO, 2010), l'incertitude $u^2(Q_{\text{mean}})$ peut être estimée en considérant les n répétitions de mesure de chacun des p laboratoires durant les essais, soit :

$$u(\hat{\delta}) = \sqrt{\frac{s_r^2}{np} + \frac{s_L^2}{p} + u^2(Q_{\text{ref}})} \quad (\text{G.10})$$

Incertitude sur l'estimation de l'incertitude

Les différents écarts-types représentées par la lettre s (s_r et s_L) représentent des estimations des écarts-types théoriques σ_r et σ_L , en raison des nombres limités de participants p et de répétitions n des mesures. La norme ISO 5725-1 (ISO, 1994a) propose de calculer une valeur notée A qui permet de déclarer que l'écart-type estimé (s) peut se trouver dans un intervalle $\pm A$ autour de l'écart-type vrai (σ) avec une certaine probabilité P .

L'intervalle de confiance (à 95%) associé à l'estimation de l'incertitude (soit l'incertitude de l'incertitude) a été calculé sur l'ensemble des essais. L'équation G.11 conduit à l'estimation de l'intervalle de confiance autour de 2σ , selon l'équation G.12 (Despax *et al.*, 2014; Le Coz *et al.*, 2016)

$$A_R = 1.96 \sqrt{\frac{p[1 + n(\gamma^2 - 1)]^2 + (n-1)(p-1)}{2\gamma^4 n^2 (p-1)p}} \quad (\text{G.11})$$

où $\gamma = \sigma_R / \sigma_r \approx s_R / s_r$.

L'incertitude $U(Q)$ est alors encadrée par :

$$2\sigma_R(1 + A_R) < U(Q) < 2\sigma_R(1 - A_R) \quad (\text{G.12})$$

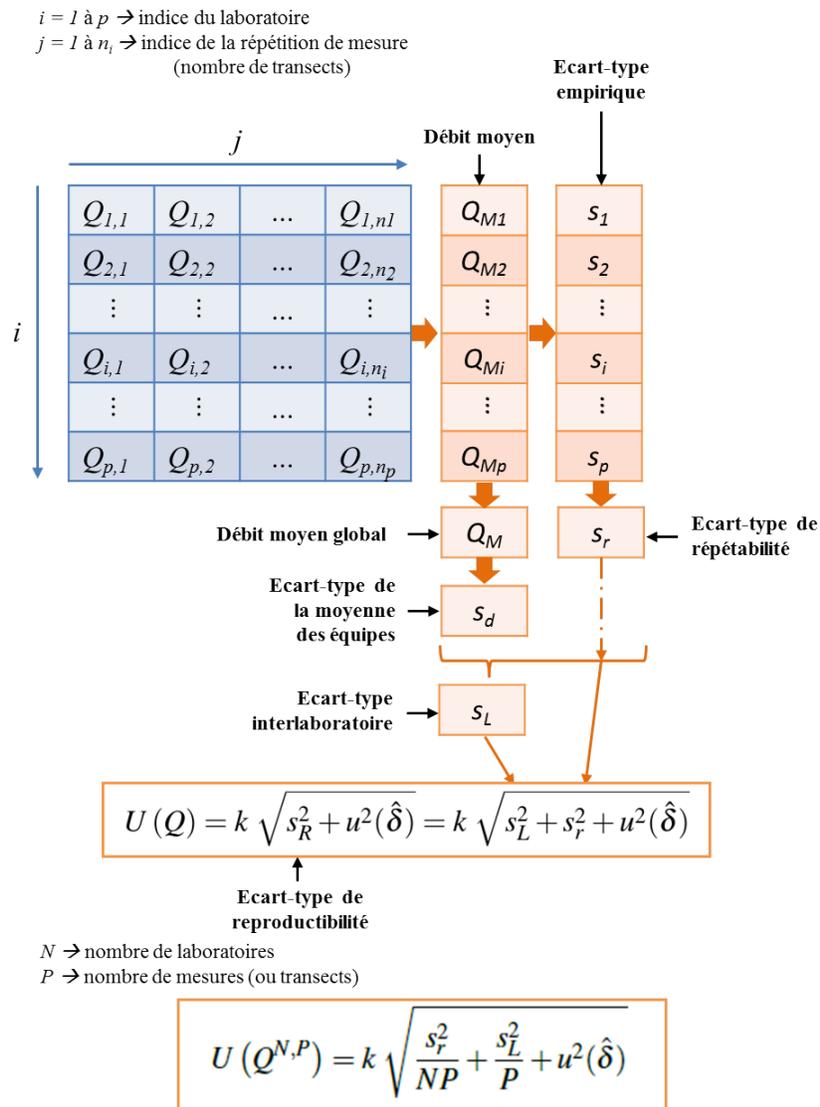


FIGURE G.1 – Schéma des principales étapes de calcul pour l'estimation de l'incertitude selon les essais interlaboratoires.



Bibliographie

- ATMANE, D. (2012). Les essais interlaboratoires en hydrométrie : analyse des campagnes de mesures réalisées et amélioration du protocole. Mémoire de fin d'études. université de nancy.
- BLANQUART, B. (2013). Panorama des méthodes d'estimation des incertitudes de mesure. *La Houille Blanche*, 6:9–15.
- DESPAX, A., DRAMAIS, G. et HAUET, A. (2014). Comparaison de mesures du débit des petits cours d'eau par courantomètres sur perche. Journées d'intercomparaison des 15, 16 et 17 octobre 2013. Rapport d'essais, Groupe Doppler. 54 p.
- DESPAX, A., FAVRE, A.-C., BELLEVILLE, A., HAUET, A., LE COZ, J., DRAMAIS, G. et BLANQUART, B. (2016). Field inter-laboratory experiments versus propagation methods for quantifying uncertainty in discharge measurements using the velocity-area method. *In Proceedings of River Flow 2016, Saint-Louis, USA*. 7 p.
- DRAMAIS, G., BLANQUART, B. et LE COZ, J. (2011). Comparaison de méthodes de mesure du débit des petits cours d'eau. Journées d'intercomparaison des 17 et 18 mai 2011. Rapport d'essais. 53 p.
- DRAMAIS, G., BLANQUART, B., LE COZ, J., PIERREFEU, G., HAUET, A., ATMANE, D. et POBANZ, K. (2013). Les essais interlaboratoires en hydrométrie : méthodologie et cas d'applications. *SHF, Colloque Hydrométrie 2013, Paris*. 10 p.
- EVERARD, N. (2007). ADCP Regatta (2007) River Severn at Bewdley 21st August 2007. Rapport d'essais, UK Environment Agency. 12 p.
- EVERARD, N. (2009). ADCP Regatta (2009) River Severn at Bewdley 4th June 2009. Rapport d'essais, UK Environment Agency. 30 p.
- GONZÁLEZ-CASTRO, J., BUZARD, J. et MOHAMED, A. (2016). Riverflowua—a package to estimate total uncertainty in adcp discharge measurements by fotse—with an application in hydrometry. *In River Flow 2016*, pages 715–723. CRC Press.

- HAUET, A., LE COZ, J., SEVREZ, D., DRAMAIS, G., HÉNAULT, F., PERRET, C., PIERREFEU, G., POBANZ, K. et THOLLET, F. (2012). Intercomparaison ADCP sur le canal de La Gentille (12-16/09/2011). [adcp intercomparison in the gentille canal (2011/09/12-16)]. Rapport d'essais, Groupe Doppler. 62 p.
- ISO (1994a). ISO 5725-1 :1994 - Exactitude (justesse et fidélité) des résultats et méthodes de mesure – Partie 1 : Principes généraux et définitions. 29 p.
- ISO (1994b). ISO 5725-2 :1994 - 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. 55 p.
- ISO (2005). ISO 13528 :2005 - Statistical methods for use in proficiency testing by interlaboratory comparisons. 66 p.
- ISO (2010). ISO 21748 :2010 - 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. 38 p.
- JCGM (2008). Evaluation of measurement data - Guide to the expression of uncertainty in measurement. Guide 100, BIPM. 132 p.
- LE COZ, J., BLANQUART, B., POBANZ, K., DRAMAIS, G., PIERREFEU, G., HAUET, A. et DESPAX, A. (2016). Estimating the uncertainty of streamgauging techniques using in situ collaborative interlaboratory experiments. *Journal of Hydraulic Engineering*, 7(142):04016011.
- LE COZ, J., RENARD, B., BONNIFAIT, L., BRANGER, F. et LE BOURSICAUD, R. (2014). Combining hydraulic knowledge and uncertain gaugings in the estimation of hydrometric rating curves : A Bayesian approach. *Journal of Hydrology*, 509:573–587.
- LE COZ, J., SAYSSET, G. et PIERREFEU, G. (2009). Régate ADCP Vézère 2009. Rapport d'essais, Groupe Doppler. 14 p.
- MOORE, S. A., JAMIESON, E. C., RAINVILLE, F., RENNIE, C. D. et MUELLER, D. S. (2016). Monte carlo approach for uncertainty analysis of acoustic doppler current profiler discharge measurement by moving boat. *Journal of Hydraulic Engineering*, page 04016088.
- MORLOT, T. (2014). *La gestion dynamique des relations hauteur-débit des stations d'hydrométrie et le calcul des incertitudes associées. Un indicateur de gestion, de qualité et de suivi des points de mesure*. Thèse de doctorat, Université de Grenoble, Grenoble. 293 p.
- MORLOT, T., PERRET, C., FAVRE, A.-C. et JALBERT, J. (2014). Dynamic rating curve assessment for hydrometric stations and computation of the associated uncertainties : Quality and station management indicators. *Journal of Hydrology*, 517:173–186.
- MUELLER, D. S. (2013). extrap : Software to assist the selection of extrapolation methods for moving-boat adcp streamflow measurements. *Computers & Geosciences*, 54:211–218.
- MUELLER, D. S. (2016). Qrev—software for computation and quality assurance of acoustic doppler current profiler moving-boat streamflow measurements—user's manual. Rapport technique, US Geological Survey.

-
- MUSTE, M., LEE, K. et BERTRAND-KRAJEWSKI, J.-L. (2012). Standardized uncertainty analysis for hydrometry : a review of relevant approaches and implementation examples. *Hydrological Sciences Journal*, 57(4):643–667.
- OBERG, K. et MUELLER, D. S. (2007). Validation of streamflow measurements made with acoustic Doppler current profilers. *Journal of Hydraulic Engineering*, 133(12):1421–1432.
- PIERREFEU, G., BERTHET, T., LE BOURSICAUD, R., BOMPART, P., TRIOL, T. et BLANQUART, B. (2017). OURSIN : OUtil de Répartition deS INcertitudes de mesure de débit par ADCP mobile. *SHF, Colloque Hydrométrie 2017, Lyon*. 17 p.
- POBANZ, K., LE COZ, J., HAUET, A., T., F., LONGEFAY, Y. et PIERREFEU, G. (2015). Intercomparaison ADCP/SVR sur le Rhône à l’aval du barrage de Génissiat, 25 au 28 septembre 2012. Rapport d’essais, Groupe Doppler Hydrométrie. 40 p.
- POBANZ, K., LE COZ, J. et PIERREFEU, G. (2011). Intercomparaison ADCP sur le Rhône à l’aval du barrage de Génissiat (12-15/10/2010). Rapport d’essais, Groupe Doppler. 59 p.
- TEREK, B. et NIMAC, N. (2008). Interkomparacijsko mjerenje protoka akustickim Doppler (ADCP) protokomjerima. Rapport d’essais.

REMERCIEMENTS

Nous remercions l'ensemble des participants, français et étrangers, pour leur mobilisation à cette campagne de mesure. Nous remercions l'ensemble de l'équipe organisatrice, les personnels d'EDF-DTG mobilisés pour le déploiement des drisses et en particulier Alexandre Hauet, véritable chef d'orchestre, pour l'organisation sans faille et le bon déroulement des essais. Merci également à l'exploitant d'avoir permis la réalisation des essais. Enfin cette étude ne pourrait pas avoir lieu sans l'appui du SCHAPI (conventions SRNH 2016 et 2017) et de EDF-DTG qui assurent le financement du post-doctorat consacré à l'analyse et le traitement des données récoltées. Merci enfin au Groupe Doppler Hydrométrie pour les échanges scientifiques qu'il permet aux utilisateurs d'ADCP.