



HAL
open science

**Rapport d'essai : Comparaison de mesures du débit des
petits cours d'eau par courantomètres sur perche.
Journées d'intercomparaison des 15, 16 et 17 octobre
2013**

A. Despax, Guillaume Dramais, A. Hauet

► **To cite this version:**

A. Despax, Guillaume Dramais, A. Hauet. Rapport d'essai : 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 de recherche] irstea. 2014, pp.54. hal-02599950

HAL Id: hal-02599950

<https://hal.inrae.fr/hal-02599950v1>

Submitted on 16 May 2020

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

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

30/06/2014

Rapport d'essai :
Comparaison de mesures du débit
des petits cours d'eau par
courantomètres sur perche.
Journées d'intercomparaison des
15, 16 et 17 octobre 2013.

Despax, A.^{1,2}, Dramais, G.³, Hauet, A.¹

¹ EDF-DTG, Développement Mesures Méthodes, Grenoble

² LTHE, Grenoble

³ Irstea, Unité de recherche Hydrologie-Hydraulique, Lyon





Les participants à la comparaison au droit de la station du Mas du pré sur le Durzon (Aveyron)

Merci à tous les participants et leurs responsables, qui contribuent en permettant ces essais à l'amélioration de la maîtrise des processus de mesure.

Contenu

1. Introduction	4
2. Définition des objectifs de la comparaison	5
3. Programme des essais	5
4. Matériels et méthodes	6
4.1 Courantométrie sur perche	6
4.2 Les sites de mesure	7
4.2.1 Le Cernon	7
4.2.2 Le Durzon	8
4.3 Nomenclature des équipes et des fichiers de données	8
4.4 Méthode d'analyse et interprétation par la méthode des comparaisons interlaboratoires	10
4.4.1 Cadre général	10
4.4.2 Déroulement du calcul	10
4.5 Méthode d'évaluation de l'incertitude de mesure par les méthodes ISO 748 et Q+	13
4.5.1 Le calcul de la norme ISO 748	13
4.5.2 La méthode généralisée Q+	14
5. Résultats et discussion	18
5.1 Mesures sur le Cernon à Saint Georges de Luzençon	18
5.1.1 Site de mesure	18
5.1.2 Stabilité du débit	18
5.1.3 Jaugeage par dilution de sel	19
5.1.4 Jaugeage par ADCP	20
5.1.5 Résultats des deux séries de jaugeages sur le Cernon	21
5.2 Mesures sur le Durzon à Nant	23
5.2.1 Site de mesure	23
5.2.2 Stabilité du débit	23
5.2.3 Jaugeage par dilution de sel	25
5.2.4 Jaugeage par ADCP	29
5.3 Impact du protocole de jaugeage et de dépouillement	31
5.3.1 Résultats des 6 séries de jaugeages sur le Durzon	32
5.4 Application des méthodes de calcul d'incertitudes aux cas du Cernon et du Durzon	35

5.4.1 Application des méthodes ISO 748 et Q+ (méthodologie GUM)	35
5.4.2 Application de la méthode d'intercomparaison	37
5.4.3 Synthèse des résultats d'incertitude	49
5.4.4 Lien avec Aix 2011	50
6. Conclusion générale	51
7. Bibliographie	52

1. Introduction

Le réseau mesure d'Irstea est un groupe de travail qui rassemble des métrologues de différentes équipes dans des ateliers thématiques. L'atelier « débitmétrie liquide » a entrepris sur le modèle du Groupe Doppler Hydrométrie d'organiser des campagnes d'intercomparaison de mesure des débits. Le principe de ces essais étant de rassembler plusieurs équipes et de mesurer simultanément le débit d'un cours d'eau en utilisant la même méthode. L'originalité de ces essais est de s'intéresser aux petits cours d'eau avec des courantomètres sur perche, une première campagne de mesure a eu lieu en mai 2011 sur deux cours d'eau provençaux : l'Ouvèze et le Toulourenc [Dramais et al., 2011]. L'analyse statistique a été réalisée selon les normes en vigueur [ISO 5725-2]. Les résultats en termes d'incertitude de mesure dans les conditions d'écoulement du jour sur l'Ouvèze et le Toulourenc sont de $\pm 16\%$. Ce résultat peut paraître élevé par rapport à l'expérience des jaugeurs et aux valeurs admises empiriquement (10 %) [Charte de l'hydrométrie, 1998], mais il met en évidence la difficulté de jauger les petits débits. Les approches analytiques du calcul d'incertitude pour un jaugeage, proposés par la norme ISO 748 ou la méthode généralisée Q+ [Le Coz et al., 2012], donnent des résultats d'incertitudes de mesure plus faibles.

Fort de cette première campagne de mesure une seconde a été organisée sur deux cours d'eaux Aveyronnais le Cernon et le Durzon. Cet essai organisé en collaboration avec l'équipe Développement Méthodes et Mesure d'EDF-DTG avait pour ambition :

- D'appliquer la méthode de comparaison interlaboratoire pour le calcul des incertitudes de mesure sur des cours d'eau différents de 2011 ;
- De confronter l'analyse par comparaison interlaboratoire avec les calculs d'incertitude Q+ et ISO 748 ;
- D'identifier un effet de site en prenant un tronçon de cours d'eau compliqué morphologiquement et l'autre plus « académique » pour quantifier cette influence.

Quatre groupements d'Irstea étaient présents (Antony, Bordeaux, Montpellier, Lyon). Trois établissements extérieurs au réseau ont participé activement : EDF DTG (Electricité de France, Division Technique Générale), la DREAL PACA et la SCP (Société du Canal de Provence). 13 équipes de jaugeurs ont pu confronter leurs instruments de mesure (courantomètres sur perche mécaniques, électromagnétiques et acoustiques) lors de ces essais.

Ce rapport reprend des éléments du protocole, les résultats des essais, les méthodes de calcul pour interpréter les résultats dans le respect des normes en vigueur. Il est une contribution pour une meilleure maîtrise du processus de mesure de débit au courantomètre sur perche, technique de jaugeage à surface libre la plus répandue pour les petits cours d'eau.

2. Définition des objectifs de la comparaison

- Quantifier une enveloppe de la performance métrologique de la méthode de jaugeage au courantomètre sur perche (quantification de la reproductibilité).
- Calcul des incertitudes de chaque jaugeage par la méthode ISO 748 et la méthode généralisée Q+ [Le Coz et al., 2012].

Remarques :

- La comparaison n'a pas pour objet de déterminer l'aptitude des équipes à mettre en œuvre une méthode spécifiée, mais à quantifier la performance d'une méthode.

- Il n'existe pas de méthode « de référence », présentant une traçabilité à un étalon national en termes de « débit » (certains équipements peuvent être étalonnés en « vitesse » mais aucun ne l'est en débit) ; la valeur de référence devra être calculée sur la base des résultats expérimentaux obtenus.

3. Programme des essais

Lundi 14 octobre : Accueil des équipes.

Mardi 15 – matin : Jaugeages sur le Cernon à Saint Georges de Luzençon. Méthode ISO 748 à 3 points, jaugeages à 20 verticales répétés deux fois (séries a et b).

Mardi 15 – après midi : Tests de méthodes différentes : jaugeages sur le Durzon à Nant. Méthode ISO 748 à 3 points avec 20 verticales (série c), puis un jaugeage avec protocole libre (série d).

Mercredi 16 – matin : Nouvelle campagne d'essai sur le Durzon à Nant. Méthode ISO 748 à 3 points, deux mesures à 15 verticales (séries e et f), puis de nouveau deux jaugeages à 15 verticales en changeant la répartition des équipes sur les transects (séries g et h).

Mercredi 16 – après midi : Dépouillement en salle, export des données au format Q+ puis dépouillement avec le code Q+, dépouillement de la série « protocole libre » par les logiciels maison (Barême, Jasmine, feuille de calcul) et exploitation des résultats.

Jeudi 17 :

- Présentation des premiers résultats et débriefing de la campagne de mesure (G. Dramais, A. Hauet) ;
- Méthode Q+ (A. Despax, EDF DTG) ;
- Calcul du coefficient de vitesse (N. Avisse, Irstea Lyon) ;
- Jaugeage par dilution au sel et stations de mesures Doppler fixe (C. Chaumont, Irstea Antony) ;
- Présentation du Parc des Grands Causses, des actions liées à l'eau. (L. Danneville).

4. Matériels et méthodes

Remarque générale :

Le protocole a été choisi pour que l'intercomparaison soit exploitable en fonction des méthodes proposées par les normes en vigueur [ISO 748 et ISO 5725-2]. Les options retenues pour ce protocole ne correspondent pas forcément aux pratiques des uns et des autres. Il était cependant indispensable pour l'intérêt du test que chaque équipe respecte un protocole commun durant la comparaison. Il est nécessaire de bien cadrer les essais pour obtenir des résultats exploitables.

4.1 Courantométrie sur perche

Les essais de courantométrie sur perche sont réalisés en rivière naturelle, sur deux sites présentant des débits et des morphologies différentes.

Le protocole minimal a été défini de manière à conjuguer deux objectifs :

- Faciliter le traitement statistique des résultats selon la norme 5725 ;
- Permettre des traitements complémentaires pour mettre en évidence l'influence de la qualité des sections et les conséquences de l'utilisation du protocole proposé par la norme ISO 748 vis-à-vis des protocoles « maison ».

Le protocole défini est le suivant, quasi identique pour les deux sites :

- Chaque équipe met en œuvre un équipement unique sur un transect défini ;
- Chaque équipe réalise des jaugeages simultanés, alternés (un dans le sens rive droite vers la rive gauche, un en sens inverse) ;
- Les équipes étant positionnées à proximité les unes des autres, elles réalisent les jaugeages de préférence en quinconce pour réduire l'influence sur les équipes situées en aval ;
- Le nombre de verticales à réaliser est défini pour chaque série (sauf pour la série d) ;
- Le nombre de points par verticale est défini (3 si la hauteur d'eau le permet, 1 point sinon). La répartition des points de vitesses sur chaque verticale sera 20, 40 et 80 % de la profondeur (au dessus du fond), de façon à permettre l'application des formules algébriques de la norme ISO 748. Un jaugeage « libre » sur le Durzon permettra aux équipes d'appliquer les protocoles en vigueur dans leur établissement ;
- La durée de moyennage des mesures de vitesse sur chaque point (« temps d'exposition ») est fixée à 30 secondes ;
- Chaque équipe fournit les résultats sous deux formes :
 - Les valeurs « brutes » des mesures, sous un format compatible avec l'application développée sur le progiciel R ;

- Les valeurs de débit selon son propre outil de dépouillement (dans le cas du jaugeage libre).

Pour s'assurer de la constance du débit au cours des jaugeages, la hauteur d'eau à la station hydrométrique la plus proche est enregistrée et des mesures complémentaires de débit (ADCP et dilution au sel) sont réalisées.

4.2 Les sites de mesure

4.2.1 Le Cernon



Figure 1 : Le Cernon à saint Georges de Luzençon

La station de Saint Georges de Luzençon est une station de mesure d'EDF DTG suivie en continu et jaugeée régulièrement par l'équipe de Toulouse. Le Cernon (Figure 1) est alimenté par des sources karstiques principalement.

4.2.2 Le Durzon



Figure 2 : Le Durzon à Nant

La station hydrométrique de Nant (figure 2) est une station de mesure du parc des Grand Causses suivie en continu par l'équipe du parc régional (station du Mas du pré). L'alimentation de la rivière est principalement karstique ce qui donne un débit très stable dans le temps. Le lit est fixe et un rail métallique est installé au niveau de la station pour le contrôle des bas débits.

4.3 Nomenclature des équipes et des fichiers de données

Pour bien identifier les instruments et les équipes il est important de donner un code qui permette de différencier toutes les mesures lors du post-traitement.

Le nom des équipes est défini comme ceci :

ADV_1_ILY (ADV flowtracker N° 1, équipe d'Irstea Lyon.)

Code	Type d'instrument
ADC	Courantomètre acoustique (Ott)
ADV	Vélocimètre acoustique Flowtracker (Sontek)
FLO	Courantomètre électromagnétique Flomate (Marsh Mac Birney)
FLS	Courantomètre électromagnétique Flowsens (Seba)
MOU	Moulinet hydrométrique C31 (Ott)
NAU	Courantomètre électromagnétique Nautilus (Ott)
STR	Profileur de courant Streampro 2400 kHz sur flotteur (RDI Instruments)

Tableau 1 : nomenclature des instruments déployés

Certains services ayant plusieurs instruments du même type, ce code trigramme est suivi du n° d'instrument puis du trigramme désignant l'organisme selon le Tableau 2.

Code	Organisme
ILY	Irstea : Institut national de recherche en sciences et technologies pour l'Environnement et l'Agriculture. Groupements de Lyon (LY), Antony (AN), Montpellier (MO), Bordeaux (BX).
IAN	
IMO	
IBX	
DRE	DREAL : Direction régionale de l'environnement de l'aménagement et du logement
EDF	Electricité de France Direction Technique Générale (Grenoble, Toulouse, Brive)
SCP	Société du Canal de Provence

Tableau 2 : Code correspondant à l'établissement

Le nom de fichier est précédé de la première lettre du cours d'eau mesuré (C pour Cernon et D pour Durzon) et la dernière lettre s'incrémente en fonction de l'ordre des jaugeages (de a à h).

Le code du premier jaugeage sur le Cernon (série a) pour l'équipe déployant l'ADV de Lyon sera donc : C_ADV_1_ILY_a.

Nom de l'équipe	Constitution de l'équipe	N° de série de l'instrument
FLO_1_IBX	G. Jan, R. Le Boursicaud	2000194
FLO_1_ILY	L. Liger, R. Le Boursicaud	41460
FLO_1_IAN	C. Chaumont, N. Avisse	2007149
ADV_1_ILY	F. Thollet	P 1464
ADV_1_IMO	C. Dejean	P 2524
ADC_1_SCP	P. Phandong	250165
ADC_2_SCP	C. Parre	224010
FLS_1_DRE	S. Valencia, O. Martin	<i>Non renseigné</i>
MOU_1_EDF	A. Despax, T. Lopez	Moulinet C2112358 - Hélice 141512
ADC_1_EDF	J. Kowalski	<i>Non renseigné</i>
NAU_1_EDF	Q. Staquet, A. Belleville	<i>Non renseigné</i>
MOU_2_EDF	D. Sevrez, W. Labordere	<i>Non renseigné</i>
MOU_3_EDF	R. Trosselier, T Morlot	Moulinet C2132279 - Hélice 1141514

Tableau 3 : Les équipes

4.4 Méthode d'analyse et interprétation par la méthode des comparaisons interlaboratoires

4.4.1 Cadre général

Les essais interlaboratoires peuvent avoir trois objectifs différents :

- Attribuer une valeur consensuelle à une caractéristique (par exemple, calculer avec une incertitude réduite le débit d'une rivière en l'absence de mesure de référence raccordée aux étalons internationaux) ;
- Déterminer la performance d'une méthode, c'est cet objectif qui est suivi dans cette étude ;
- Déterminer l'aptitude d'un laboratoire ou d'un instrument, c'est-à-dire leur conformité à des spécifications données.

4.4.2 Déroulement du calcul

L'exploitation et l'analyse des résultats des essais interlaboratoires vont permettre d'évaluer expérimentalement l'incertitude de la méthode de mesure dans les conditions de mesure de la comparaison.

Pour les essais interlaboratoires en hydrométrie présentés dans ce travail, trois référentiels normatifs ont été utilisés :

- Les normes ISO 5725-1 [ISO, 1994a] et ISO 5725-2 [ISO, 1994b] ont pour objectif de quantifier les performances de la méthode, en termes de répétabilité et de reproductibilité ;
- La norme ISO 21748 [ISO, 2010] permet de traduire les résultats précédents en termes d'incertitude de mesure ;
- La norme ISO 13528 [ISO, 2005] permet de déterminer l'incertitude associée au débit de référence calculé sur l'ensemble des laboratoires. Cette démarche ne permet pas de déterminer une caractéristique de performance des laboratoires d'un point de vue général.

Les hypothèses nécessaires à l'application des deux premières normes sont les suivantes :

- Les résultats expérimentaux sont obtenus dans des conditions dans lesquelles les principales composantes d'erreur ont la possibilité de s'exprimer ;
- Les résultats sont indépendants les uns des autres et les erreurs de mesure suivent une loi de distribution gaussienne (ou à défaut au moins unimodale) ;
- La norme ISO 5725-2 fait l'hypothèse que la répétabilité est identique pour toutes les équipes et, dans une moindre mesure, que le nombre d'essais par débit est identique pour toutes les équipes.

Les principales étapes de calcul sont les suivantes (tous les calculs sont détaillés dans les documents de l'ISO et il est possible de les implémenter dans un tableur [Atmane, 2012], c'est cet outil qui est utilisé dans cette étude) :

- Recueil et mise en forme des données ;
- Examen des valeurs ;
- Calcul des statistiques de Mandel pour examen visuel de l'homogénéité des résultats
- Détection des valeurs aberrantes (mise en œuvre des tests de Grubbs et Cochran), ces tests sont facultatifs mais peuvent être réalisés en cas de doute suite à l'examen des résultats des statistiques de Mandel ;
- Ensuite il convient de calculer les différents écart-types de répétabilité (s_r), interlaboratoire (s_L) et de reproductibilité (s_R).

La variance de répétabilité s_r est obtenue par la formule suivante :

$$s_r^2 = \frac{\sum_{i=1}^P (n_i - 1) s_i^2}{\sum_{i=1}^P (n_i - 1)} \quad (1)$$

Avec i l'indice de l'équipe, s_i l'écart type expérimental et n_i le nombre de répétition des mesures de débit $Q_{i,k}$ fournies par chaque équipe, k étant l'indice de la mesure. Dans le cas où $n_i = 2$, les documents normatifs indiquent que l'écart type expérimental est donné par :

$$s_i = \frac{|Q_{i,2} - Q_{i,1}|}{\sqrt{2}} \quad (2)$$

La variance interlaboratoire s_L est obtenue par la formule :

$$s_L^2 = \frac{s_d^2 - s_r^2}{N} \quad (3)$$

Avec N le nombre moyen de mesures fournies par équipe.

L'écart type de la moyenne des équipes s_d est donné par :

$$s_d^2 = \frac{1}{P-1} \sum_{i=1}^P n_i (\bar{Q}_i - Q_{mean})^2 \quad (4)$$

Pour P instruments de mesure.

La variance de reproductibilité est obtenue par :

$$s_R^2 = s_L^2 + s_r^2 \quad (5)$$

avec s_L^2 la variance interlaboratoire qui caractérise la dispersion des débits moyens entre les équipes,

et s_r^2 la variance de répétabilité qui caractérise la dispersion des débits répétés pour une équipe autour de sa propre moyenne.

Si les hypothèses sont respectées, et en particulier si toutes les sources d'erreur ont pu s'exprimer au cours de la comparaison, alors on peut écrire que l'estimation de l'incertitude associée à une observation issue de l'essai interlaboratoire traité est :

$$u(Q_{1,1}) = s_R \quad (6)$$

avec $Q_{1,1}$ le résultat expérimental fourni par un laboratoire et pour une observation.

Ce qui conduit à l'expression de l'incertitude élargie ($k = 2$) :

$$U(Q_{1,1}) = 2 \cdot s_R \quad (7)$$

Les différents écarts-types représentés par la lettre s sont des estimations dont les valeurs vraies σ ne sont pas connues. 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 la l'écart-type de vrai (σ) avec une certaine probabilité P :

$$P \left[-A < \frac{s-\sigma}{\sigma} < +A \right] = P \quad (8)$$

Pour un niveau de probabilité de 95 % les équations proposées dans la norme 5725-1 [ISO, 1994a] sont les suivantes :

Pour la répétabilité :

$$A = A_r = 1,96 \sqrt{\frac{1}{2p(n-1)}} \quad (9)$$

Pour la reproductibilité :

$$A = A_R = 1,96 \sqrt{\frac{p[1+n(\gamma^2-1)]^2+(n-1)(p-1)}{2\gamma^4 n^2 (p-1)p}} \quad (10)$$

Avec :

- p , le nombre de laboratoires ;
- n , le nombre de résultats d'essai au sein de chaque laboratoire ;
- $\gamma = \sigma_R / \sigma_r$, rapport de l'écart-type de reproductibilité à l'écart-type de répétabilité.

4.5 Méthode d'évaluation de l'incertitude de mesure par les méthodes ISO 748 et Q+

4.5.1 Le calcul de la norme ISO 748

La norme NF EN ISO 748 est adaptée au jaugeage par exploration des vitesses au courantomètre et préconise une propagation des erreurs de mesure, en distinguant les composantes aléatoire et systématique.

Le calcul d'un débit par la méthode d'exploration des vitesses est la somme des débits des sous sections j . A chaque sous-section j est affectée une largeur b_i , une profondeur d_i et une vitesse v_i . Le calcul du débit peut s'exprimer sous la forme suivante :

$$Q = \sum_{i=1}^m b_i d_i v_i \quad (11)$$

L'incertitude-type composée relative de la mesure est donnée par la norme ISO 748 :

$$u^2(Q) = u_s'^2 + u_m'^2 + \frac{\sum_{i=1}^m (b_i d_i v_i)^2 (u_{b,i}^2 + u_{d,i}^2 + u_{v,i}^2)}{\left(\sum_{i=1}^m b_i d_i v_i \right)^2} \quad (12)$$

Pour un nombre de verticales $m > 10$ et un nombre de points n fixe par verticale, si les débits partiels à travers les sous-sections sont approximativement égaux, et si on considère que les composantes d'incertitudes sont approximativement égales d'une verticale à l'autre, alors on peut simplifier le calcul comme suit :

$$u^2(Q) = u_s'^2 + u_m'^2 + \frac{1}{m} \left(u_b'^2 + u_d'^2 + u_p'^2 + \frac{1}{n} (u_c'^2 + u_e'^2) \right) \quad (13)$$

avec les composantes d'incertitude suivantes :

- u'_m : incertitude due au nombre limité m de verticales qui correspond à l'erreur d'intégration transversale de d et v ;
- u'_s : incertitude systématique résiduelle après le meilleur étalonnage des instruments de mesure des vitesses, des largeurs et des profondeurs ;
- u'_b : incertitude due à la mesure des largeurs entre verticales ;
- u'_d : incertitude due à la mesure des tirants d'eau sur les verticales ;
- u'_p : incertitude due au nombre de points limité sur la verticale qui correspond à l'erreur d'intégration verticale de v ;
- u'_c : incertitude due aux erreurs aléatoires sur la vitesse (erreur instrumentale) ;
- u'_e : incertitude due au temps limité d'exposition du courantomètre (erreur environnementale liée aux fluctuations de l'écoulement).

Cette méthode de calcul d'incertitude validée par l'ISO est remise en question depuis quelques années par la communauté de l'hydrométrie [Charte Qualité de l'hydrométrie, 1998], en effet le résultat du calcul est principalement conditionné par le terme u'_m sur le nombre de verticales, ce qui n'est pas satisfaisant. D'autres lacunes apparaissent dans ce calcul (zones de débit extrapolées, valeurs « forfaitaires » issues de mesures expérimentales anciennes [LeCoz et al., 2012 ; Despax, 2013]). Cependant il est intéressant d'appliquer ce calcul pour le comparer aux résultats obtenus par les autres méthodes d'évaluation des incertitudes de mesure des jaugeages par exploration du champ des vitesses.

4.5.2 La méthode généralisée Q+

La méthode Q+ est une approche généralisée du calcul d'incertitude des jaugeages par exploration du champ des vitesses au courantomètre. C'est une alternative à la méthode proposée dans la norme ISO 748 tout en restant conforme au cadre de l'analyse d'incertitude du GUM. Cette méthode propose quelques améliorations de calcul afin de pallier certains problèmes de la norme ISO 748.

En limitant la forte dépendance du calcul d'incertitude au nombre de verticale, cette nouvelle méthode permet de nuancer les sources d'erreur d'un jaugeage. Cette méthode alternative a été proposée par Le Coz et al. [2012 et 2013] afin de mieux prendre en compte les extrapolations des vitesses et la répartition des verticales sur la largeur de la section de jaugeage.

L'incertitude type composée est donnée par l'équation 14 :

$$u^2(Q) = u_s^2 + \frac{\sum Q_i^2 \left[u^2(B_i) + u^2(D_i) + u^2_p(V_i) + u^2_m(D_i) + u^2_m(V_i) + \frac{1}{n_i} [u^2_c(V_i) + u^2_{exp}(V_i)] \right]}{(\sum Q_i)^2} \quad (14)$$

Puisque $u^2(B_i)$ et $u^2(D_i)$ sont constants, on peut simplifier l'équation 14 en l'équation 15 :

$$u^2(Q) = u_s^2 + \frac{u^2(B_i) + u^2(D_i)}{N_{verticales}} + \frac{\sum Q_i^2 \left[u^2_p(V_i) + u^2_m(D_i) + u^2_m(V_i) + \frac{1}{n_i} [u^2_c(V_i) + u^2_{exp}(V_i)] \right]}{(\sum Q_i)^2} \quad (15)$$

Avec :

- n_i : nombre de points de mesure sur la verticale i ;
- Q_i : débit partiel, exprimé en m^3/s , calculé sur la verticale i ;
- u_s : composante d'incertitude provenant des erreurs systématiques résiduelles sur l'étalonnage des instruments de mesure des vitesses, des largeurs et des profondeurs ;
- $u_m(D_i)$: erreur d'intégration transversale sur la profondeur. Ce terme est estimé en se basant sur l'amplitude maximale de la variation de la section mouillée. Les cas

extrêmes sont évalués à l'aide d'une pente transversale du fond traduisant l'irrégularité du fond définie par l'utilisateur au travers d'un angle α . Son estimation reste arbitraire et repose sur l'effet des irrégularités du fond (mouilles ou blocs). L'illustration de cet angle est présentée sur la Figure 3 ;

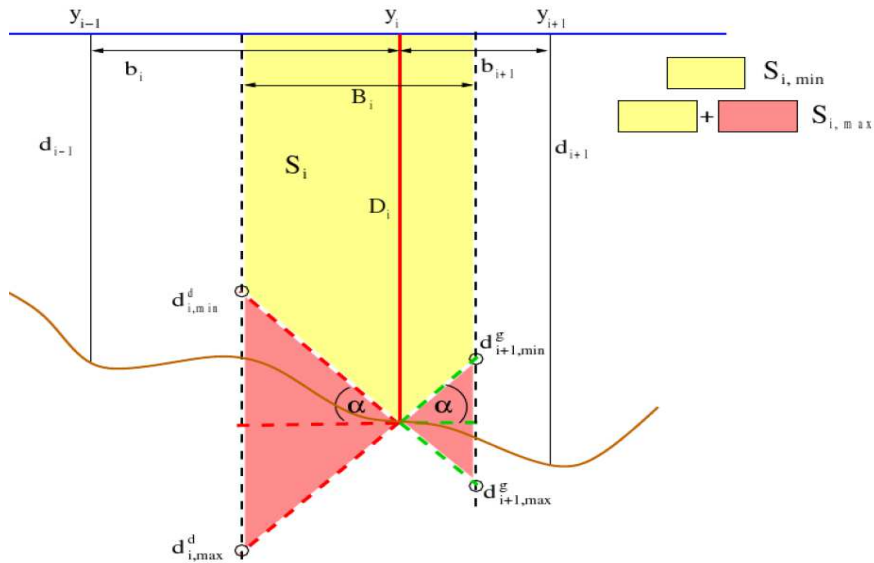


Figure 3 : Amplitude maximale de la surface mouillée en fonction de l'angle α (source : Le Coz)

- $u_m(V_i)$: erreur d'intégration transversale sur la vitesse. Ce terme est estimé en se basant sur les profils de profondeur extrêmes calculés précédemment et le nombre de Froude ($= v/\sqrt{g \times h}$, avec g , constante gravitationnelle, v et h respectivement la vitesse moyenne et la hauteur au niveau de la verticale considérée) est supposé varier linéairement entre deux verticales de mesure ;
- $u(B_i)$: terme d'erreur aléatoire sur les mesures de largeur ;
- $u(D_i)$: terme d'erreur aléatoire sur les mesures de profondeur ;
- $u_p(V_i)$: terme d'erreur du au nombre limité de points de mesures ponctuelles sur la verticale i (intégration verticale des profils unitaires). Contrairement au calcul d'incertitude proposé dans la norme ISO 748, ce terme prend en compte de manière explicite les erreurs d'interpolation sur la zone explorée ainsi que les erreurs d'extrapolation en surface et au fond. Ce terme est notamment estimé à partir des scénarios extrêmes d'extrapolation ;
- $u_c(V_i)$: terme d'erreur aléatoire sur les mesures de vitesses ponctuelles à cause des limites du courantomètre ;
- $u_{exp}(V_i)$: terme d'erreur aléatoire sur les mesures de vitesses ponctuelles à cause de la moyenne temporelle des fluctuations turbulentes sur le temps d'exposition.

La nouvelle méthode développée permet de séparer la composante d'incertitude due au nombre de verticales (u_m) en deux composantes d'incertitude liées à l'intégration des profondeurs ($u_m^2(D_i)$) (prise en compte de la complexité morphologique de la section

mouillée) et à l'intégration des vitesses ($u_m^2(V_i)$). Les extrapolations des vitesses sont explicitement prises en compte.

Cette nouvelle méthodologie conserve cependant quelques inconvénients de la norme ISO748 :

Les termes $u_c(V_i)$ et $u(V_i)_{exp}$ sont toujours calculés à partir de valeurs informatives tabulées dans l'annexe E de la norme ISO 748. Elles sont issues d'études empiriques non documentées, certainement spécifiques au type d'instrument utilisé et aux conditions des essais. Ces termes sont obtenus à partir d'interpolations en loi puissance des tables de l'annexe E. Ces termes sont calculés à partir des vitesses moyennes de chacune des sous-sections au lieu d'utiliser les valeurs ponctuelles des vitesses ;

Les valeurs conseillées pour les termes u_s , $u(B_i)$ et $u(D_i)$ sont généralement utilisées par défaut. Il conviendrait à nouveau d'estimer ces composantes d'incertitude à partir des résultats d'étalonnage, de vérification ou d'inter-comparaison des instruments utilisés.

Le nouvel inconvénient provient alors de l'estimation de l'angle alpha utilisé dans le calcul des termes $u_m(D_i)$ et $u_m(V_i)$. Cet angle est fixé de manière arbitraire et reste à l'appréciation du jaugeur alors que le calcul d'incertitude peut être très sensible à sa valeur, si le rapport largeur sur profondeur de la section est élevé. On voit sur la figure 4 que l'incertitude augmente fortement avec l'angle retenu pour certains jaugeages (exemple : Station de Pont de la Joux).

Influence de l'angle alpha pour différentes stations

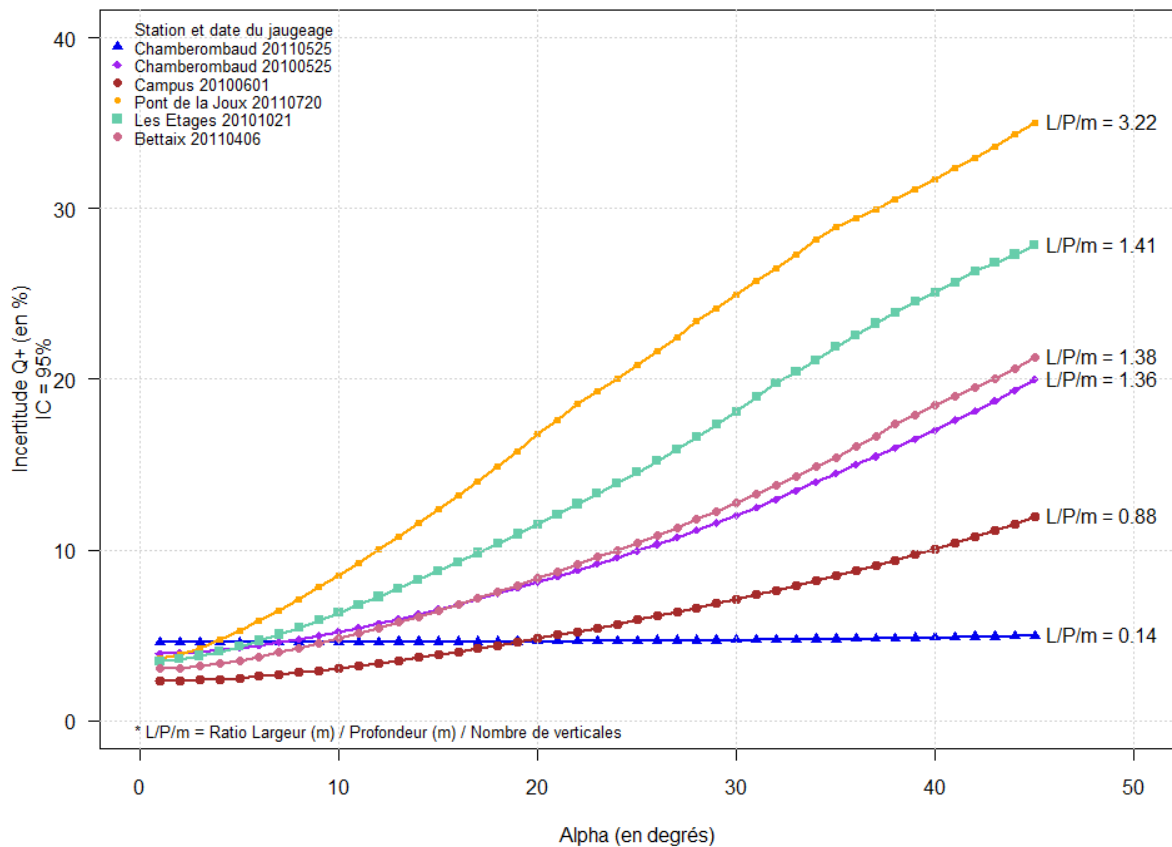


Figure 4 : Influence de l'angle de variation de la bathymétrie sur 6 jaugeages

La variation de l'incertitude est d'autant plus marquée que le ratio Largeur/Profondeur/Nombre de verticales est élevé. Le calcul de l'aire de la surface mouillée est en effet moins sensible pour les rivières peu larges et dont le nombre de verticales est grand. La figure 4 illustre également la difficulté de fixer un angle alpha pour une station où sont réalisés régulièrement des jaugeages. L'exemple des deux jaugeages réalisés à la station hydrométrique de Chamberombaud (triangles bleus et losanges violets) montre que la sensibilité à l'angle alpha est très différente pour les deux jaugeages. Ceci s'explique par le fait que la section de mesure est très étroite et régulière dans le cas bleu (canal maçonné) tandis qu'elle est plus complexe et large dans le cas violet (section naturelle) puisque ces deux jaugeages ont été effectués à des débits différents.

Note :

On précise que, par la suite, les résultats d'incertitude sont tous exprimés à un intervalle de confiance à 95 %. Sous l'hypothèse d'une distribution gaussienne de l'incertitude, cela correspond à deux écarts-types (facteur d'élargissement $k = 2$) autour de la moyenne.

5. Résultats et discussion

5.1 Mesures sur le Cernon à Saint Georges de Luzençon

5.1.1 Site de mesure

La Figure 5 présente la localisation des différents moyens de jaugeage déployés sur le Cernon.

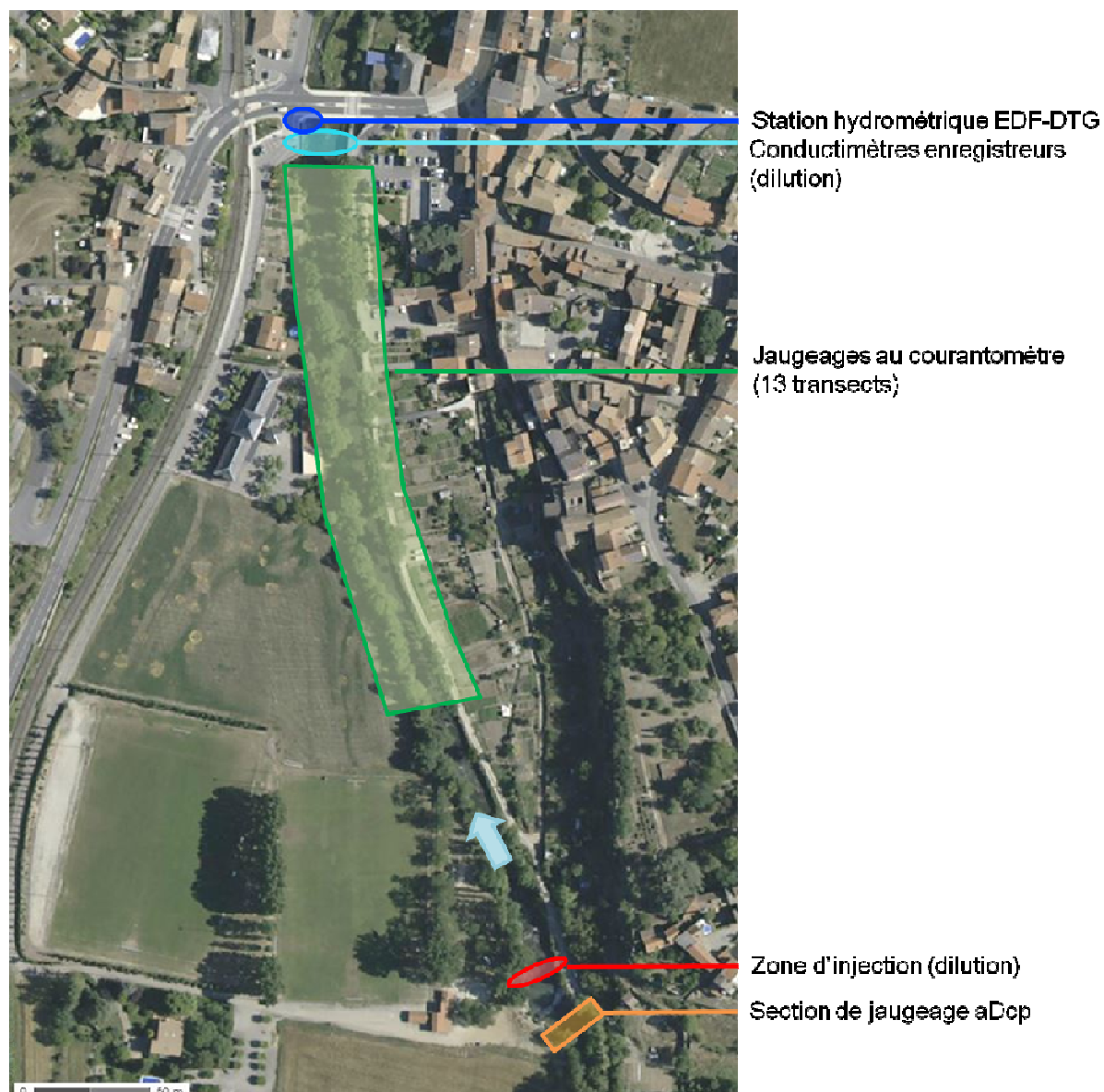


Figure 5 : Localisation des sections de jaugeage du Cernon à Saint Georges de Luzençon

5.1.2 Stabilité du débit

La qualité d'un jaugeage et la réussite d'un essai d'intercomparaison dépendent de la stabilité du débit au cours des mesures.

La stabilité du débit a été suivie par l'enregistrement des hauteurs d'eau par une station hydrométrique située au niveau de la dernière section de mesure de l'intercomparaison. La

station limnimétrique est gérée par EDF-DTG. Les équipes situées près de la station limnimétrique ont effectué des lectures régulières de la hauteur d'eau à l'échelle. Le relevé limnimétrique est présenté sur la figure 6.

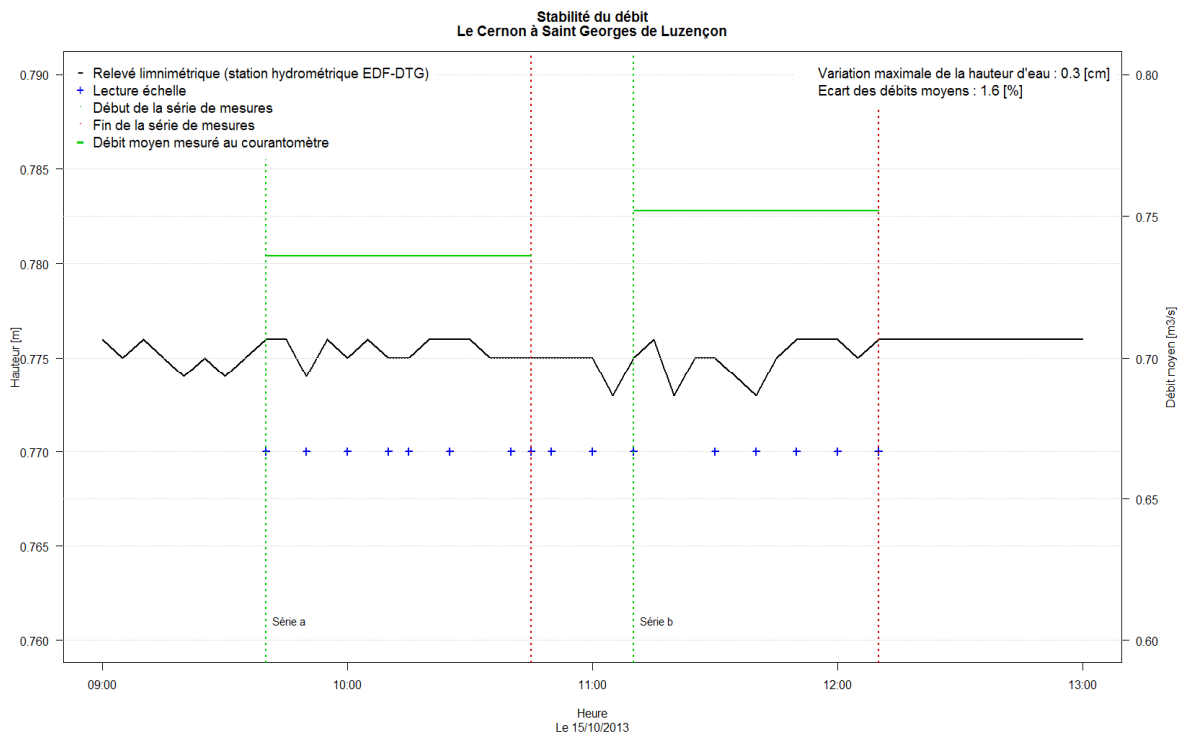


Figure 6 : Stabilité du débit sur le Cernon

Au cours de la matinée d'essai sur le Cernon, la variation maximale de la hauteur d'eau n'a été que de 0,3 cm. Les contrôles visuels permettent de confirmer la stabilité de la hauteur d'eau au cours des jaugeages. Le limnimètre ne semble par ailleurs que peu décalé (décalage observé de 5mm).

La moyenne des jaugeages de la serie a est de $0,736 \text{ m}^3/\text{s}$, et $0,752 \text{ m}^3/\text{s}$ pour la série b. L'écart des débits moyens entre ces deux séries n'est que de 1,5 %.

5.1.3 Jaugeage par dilution de sel

Un jaugeage par dilution de sel par la méthode de l'injection instantanée (aussi appelée méthode par intégration ou méthode globale) est tenté malgré une distance de mélange assez courte (200 m) pour des conditions de mélange peu favorables (pas assez de turbulences). La masse injectée est de 5 kg, deux conductimètres enregistreurs (un Salinomadd et un Delta Ohm) sont placés respectivement en rive droite et gauche sur la même section de la rivière. Les signaux sont représentés sur la figure 7.

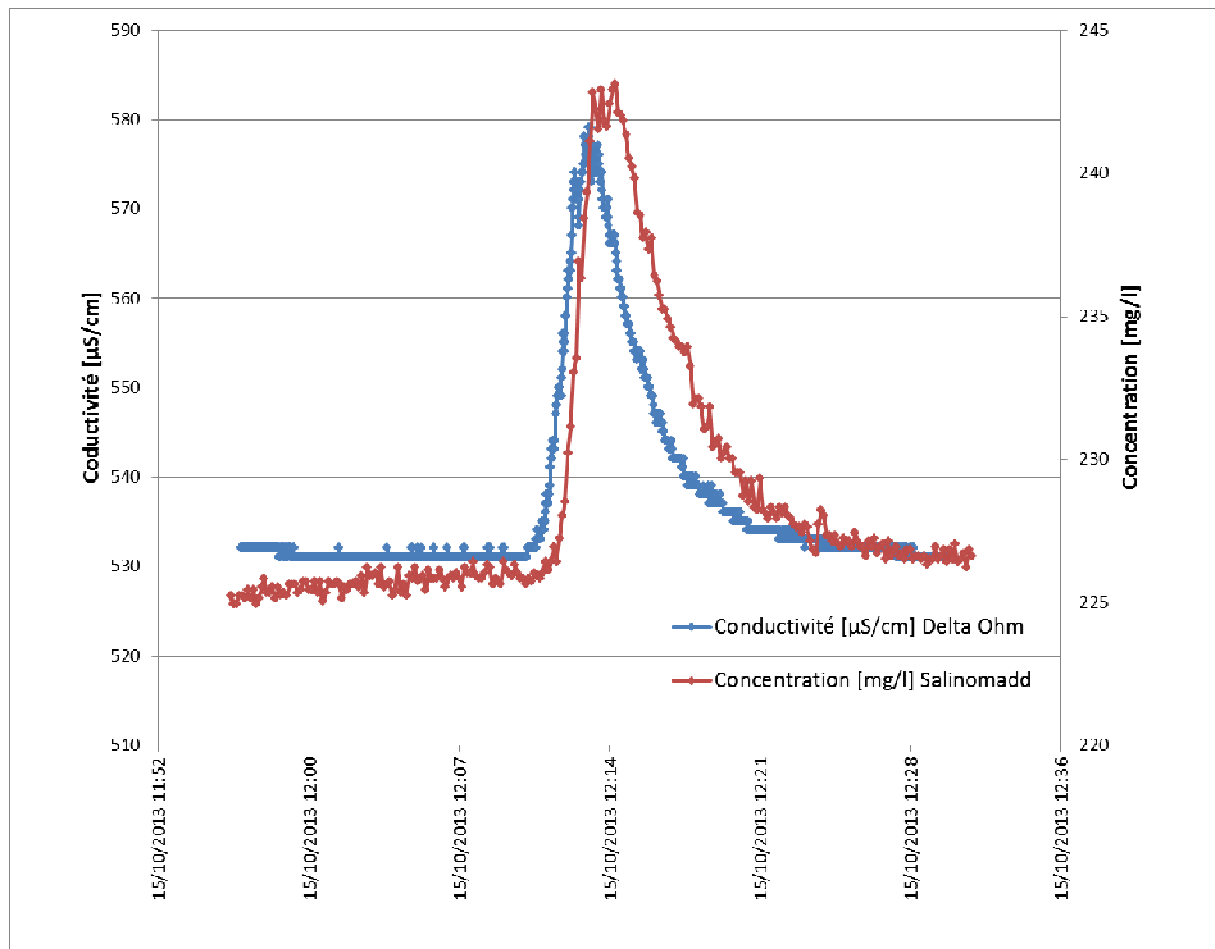


Figure 7 : Traçage au sel sur le Cernon

Le salinomadd donne un débit de $0,892 \text{ m}^3/\text{s}$. En exploitant le signal du conductimètre Delta Ohm on obtient un débit de $0,834 \text{ m}^3/\text{s}$ soit une différence de 6 % entre les 2 mesures. La moyenne de ces deux mesures $0,863 \text{ m}^3/\text{s}$ comparée à la moyenne des jaugeages à la perche de la série b, montre une surestimation de 15 % de la dilution. Une telle surestimation est le signe d'un nuage plus concentré au centre de l'écoulement (mauvais mélange) entre l'injection et la section de mesure.

Nous sommes donc dans une configuration pour laquelle la condition de bon mélange n'est pas respectée, ce qui entraîne des jaugeages par dilution de sel inexploitable.

5.1.4 Jaugeage par ADCP

Un jaugeage par ADCP a été réalisé à environ 300 m en amont de la zone de mesure des courantomètres sur perche, en amont d'un seuil important. Ce seuil permet un rehaussement du niveau d'eau et donc une mesure ADCP correcte. La mesure a été réalisée avec un ADCP RDI StreamPro, pendant la série d'intercomparaison b. Un exemple de transect de mesure est présenté en figure 8.

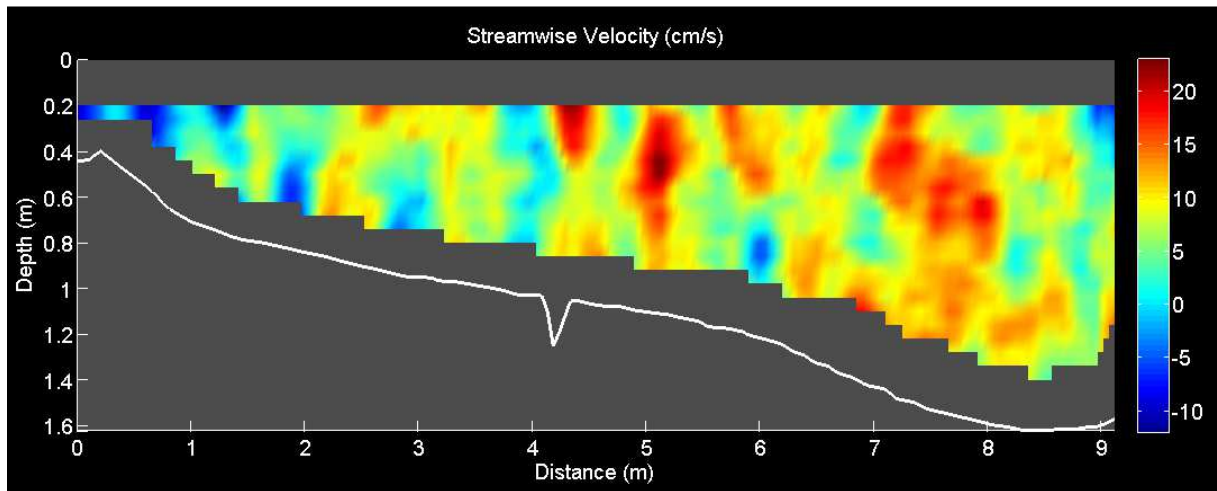


Figure 8 : exemple de transect de mesure ADCP sur le Cernon.

Le débit est calculé à partir de 6 traversées ADCP. On obtient un débit de $0,748 \text{ m}^3/\text{s}$, avec un écart type sur moyenne de 5 % ($\pm 0,037 \text{ m}^3/\text{s}$).

5.1.5 Résultats des deux séries de jaugeages sur le Cernon

La figure 9 présente les débits mesurés par les différentes équipes réparties sur les transects 1 (amont) à 13 (aval) pour les deux séries de jaugeage (a et b) du Cernon le 15/10/2013 au matin.

Résultat des mesures Cernon - Jaugeages a et b

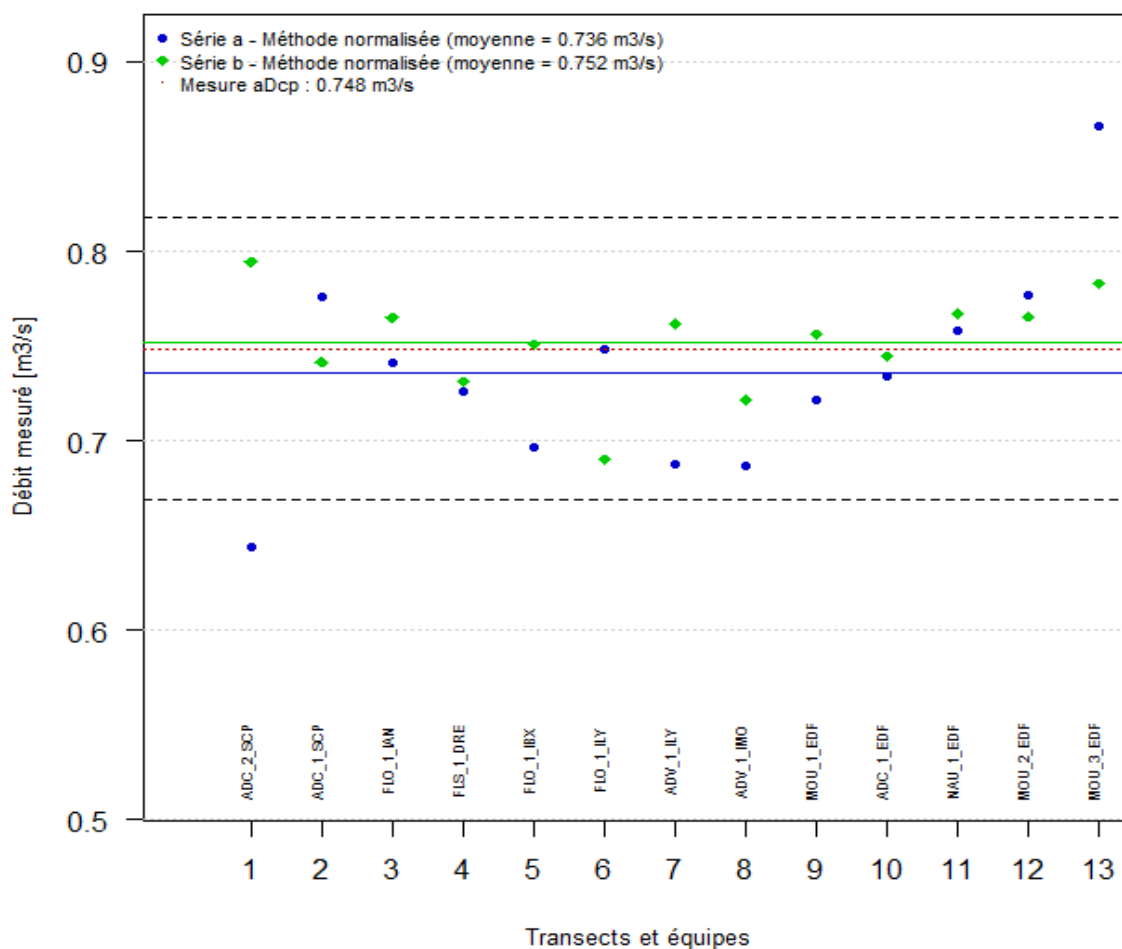


Figure 9 : Mesures à la perche sur le Cernon

La moyenne des débits de la série a est de $0,736 \text{ m}^3/\text{s}$, celle de la série b est de $0,752 \text{ m}^3/\text{s}$.

On remarque (Figure 9) que deux points de la série a de jaugeages sortent de l'enveloppe des 10 % autour de la moyenne (transects 1 et 13).

Le débit moyen entre les deux séries augmente de 1,5 % alors qu'aucune variation nette du débit n'a été observée. Cet écart peut être dû à une phase d'apprentissage et d'appropriation de la méthode de jaugeage par les équipes. On constate en effet que l'écart-type des débits mesurés est plus fort pour la série a ($\sigma = 0,055$) que pour la série b ($\sigma = 0,027$). A titre de comparaison, on observe généralement au cours des régates ADCP, telle que celle de la Vézère en 2009 [Le Coz et al., 2009], des performances sont significativement moins bonnes sur les premières séries. Ceci peut être dû à la découverte d'un site inhabituel et à des conditions opératoires contraintes (timing, positionnement).

La dispersion des résultats de la série a est cependant principalement due aux équipes situées sur les transects 1 et 13 puisque l'écart-type de la série a sans les transects 1 et 13 n'est que de 0,032.

Alors que l'équipe MOU_3_EDF semble surestimer les débits du Cernon lors du jaugeage a, les séries suivantes de jaugeages sur le Durzon par l'équipe MOU_3_EDF ne montrent pas de tendance systématique à surestimer le débit. Aucun effet d'équipe à surestimer systématiquement le débit ne peut être décelé ici.

Pour l'équipe ADC_2_SCP située sur le premier transect, on ne peut pas conclure quant à une sous-estimation systématique du débit puisqu'un problème matériel a eu lieu à la suite des deux premiers jaugeages. Pour ces raisons, on exclura cette équipe dans l'analyse de l'incertitude dans le cadre de la comparaison interlaboratoire.

Le jaugeage réalisé à l'aDcp, de $0,748 \text{ m}^3/\text{s}$ ($\pm 0,037 \text{ m}^3/\text{s}$), donne un débit cohérent à la moyenne des débits mesurés de la série b.

5.2 Mesures sur le Durzon à Nant

5.2.1 Site de mesure

La Figure 10 présente la localisation des différents moyens de jaugeages déployés sur le Durzon.

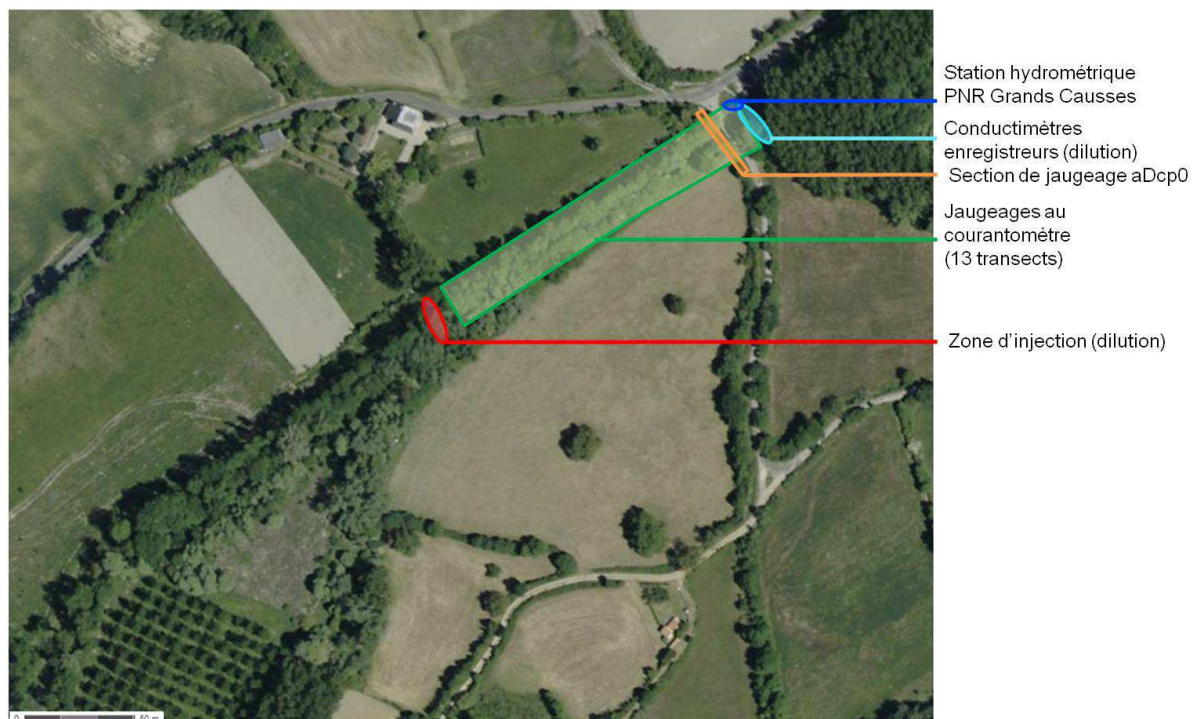


Figure 10 : Localisation des sections de jaugeage du Durzon à Nant

5.2.2 Stabilité du débit

La stabilité du débit du Durzon a été suivie par l'enregistrement des hauteurs d'eau par une station hydrométrique portable Mini Diver 0-20 m (Schlumberger) située au niveau de la dernière section de mesure de l'intercomparaison juxtaposée à la station hydrométrique du parc naturel des grands Causses. Les équipes situées près de la station limnimétrique ont

effectué des lectures régulières de la hauteur d'eau à l'échelle. Le relevé limnimétrique a eu lieu uniquement lors de la matinée du 16/10/2013 et est présenté sur la figure 11.

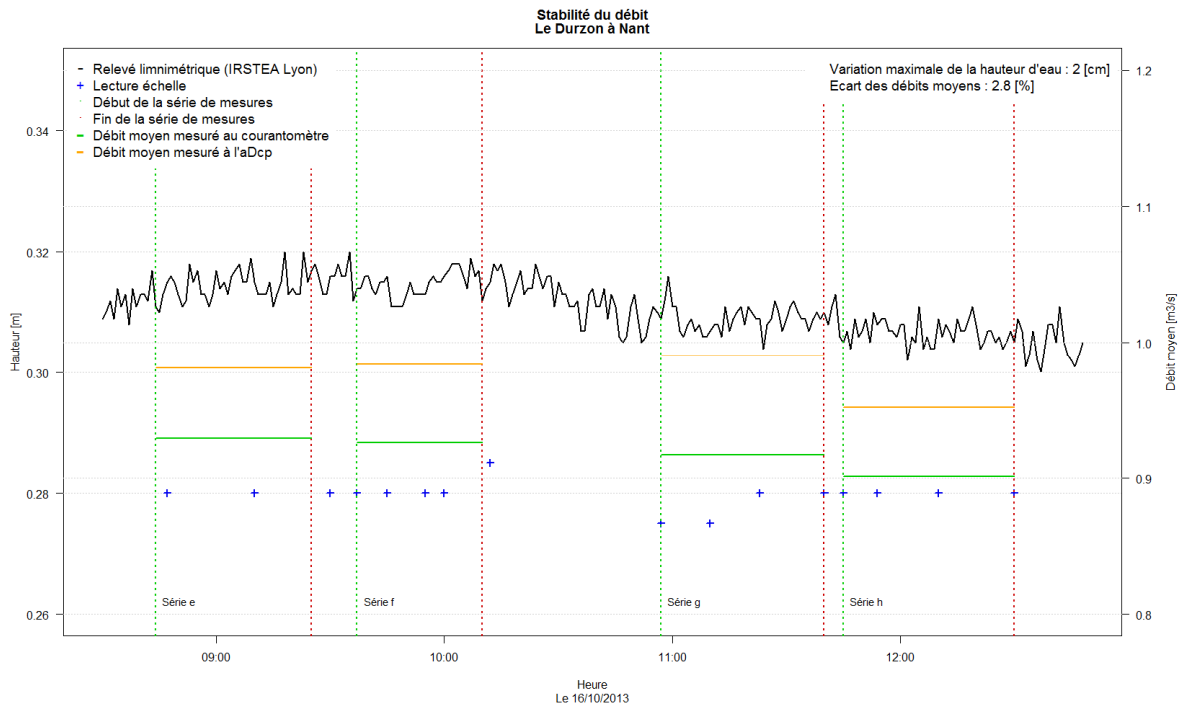


Figure 11 : Stabilité du débit sur le Durzon

Au cours de la matinée d'essai sur le Durzon, la variation maximale de la hauteur d'eau a été de 2 cm entre le début et la fin des mesures. Les contrôles visuels n'ont pas permis d'observer une baisse significative de la hauteur d'eau. La légère variation observée sur l'enregistrement peut être due à la compensation barométrique du capteur mini Diver ce qui expliquerait que les contrôles visuels n'ont pas permis de la détecter. Cependant la dernière série de débit est un peu inférieure aux autres ce qui pourrait confirmer une légère baisse du débit.

L'écart des débits moyens entre la série e et la série h est de 2,8 %. Cette faible diminution confirme la baisse de la hauteur d'eau observée par le limnimètre.

5.2.3 Jaugeage par dilution de sel

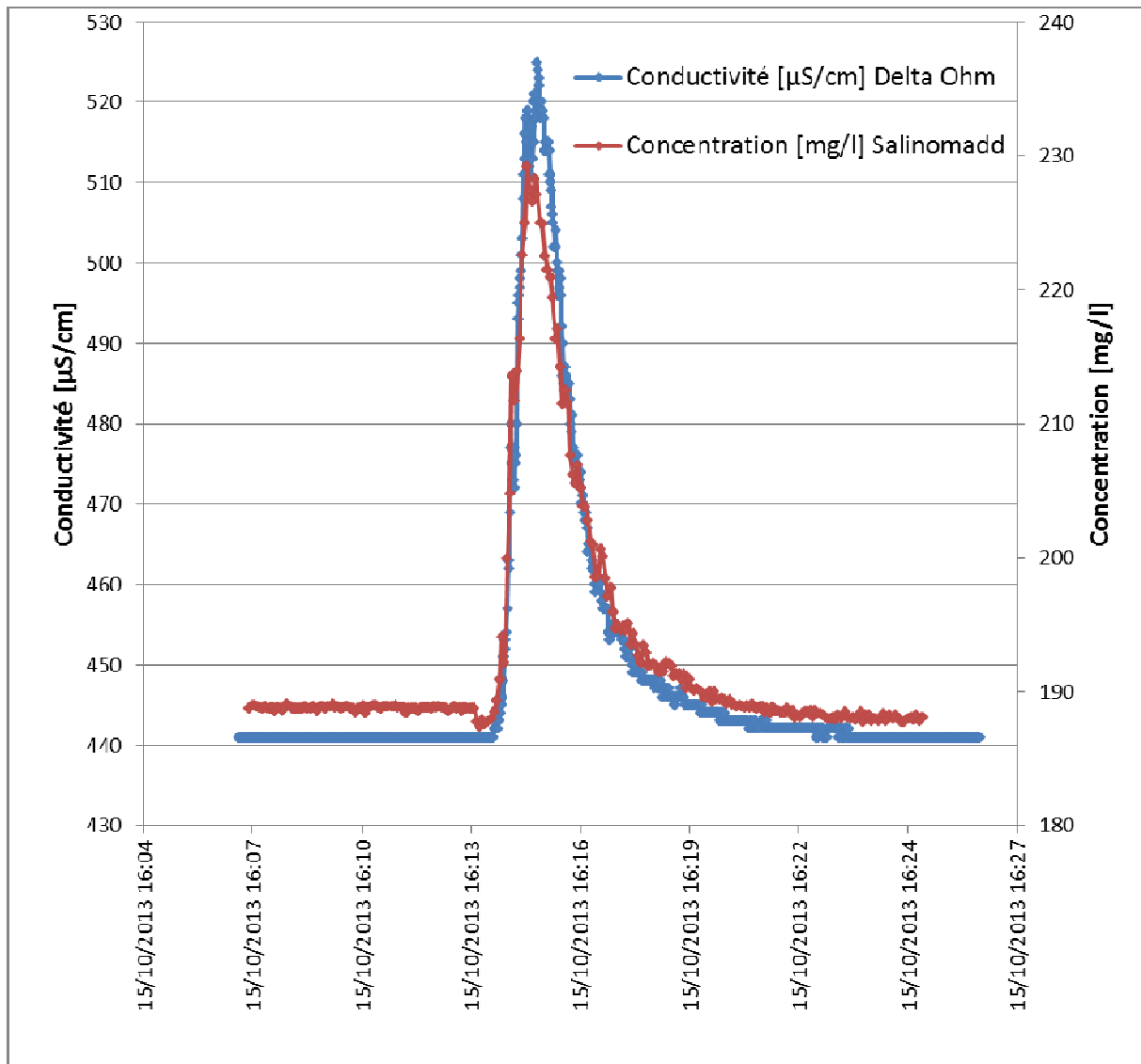


Figure 12 : « Série c & d » Traçage au sel sur le Durzon - 15/10/2013

Un jaugeage par dilution de sel par la méthode de l'injection instantanée est effectué malgré une distance de mélange assez courte (200 m) les conditions de mélanges sont meilleures que sur le Cernon (écoulement homogène et rapide qui commence par un radier assez turbulent). La masse injectée est de 5 kg, deux conductimètres enregistreur (un Salinomadd et un Delta Ohm) sont placés respectivement en rive droite et gauche sur la même section de la rivière. Les signaux sont représentés sur la figure 12.

Le Salinomadd calcule une valeur de débit dès que le niveau de base de concentration en sel de la rivière est atteint suite au passage du nuage salin, le Salinomadd enregistre directement une concentration en sel. Le conductimètre Delta Ohm HD2106.2 permet un

enregistrement fin des variations de conductivité électrique. A partir de là deux méthodes peuvent être utilisées pour transformer le signal en concentration en sel (ce qui est nécessaire pour le calcul du débit). Soit on réalise une gamme de calibration avec l'instrument, et une quantité de sel connue diluée successivement jusqu'à encadrer les valeurs observées durant le jaugage [LeCoz et al, 2011]. Soit on utilise la relation de proportionnalité décrite dans la norme ISO 9555-2 sur l'utilisation des traceurs chimiques pour le jaugage. C'est cette deuxième méthode que nous avons utilisée dans cette étude.

Le salinomadd donne un débit de $1,060 \text{ m}^3/\text{s}$. En exploitant le signal du conductimètre Delta Ohm on obtient un débit de $1,026 \text{ m}^3/\text{s}$ soit une différence de 3 % entre les 2 mesures, ce qui nous rassure sur la condition de bon mélange. La moyenne de ces deux mesures, $1,043 \text{ m}^3/\text{s}$, qui, comparée à la moyenne des mesures ADCP effectuées à quelques mètres en amont ($0,973 \text{ m}^3/\text{s}$, moyenne pour les séries c et d) donne un écart de 7 %.

Le lendemain, 16/10/2013, deux traçages sont réalisés (Figures 13 et 14) avec un débit équivalent, en prenant la même distance d'injection et la même quantité de sel. Un troisième conductimètre (WTW 3310) est ajouté en rive gauche, le conductimètre Salinomadd est placé en rive droite et le Delta Ohm au centre de l'écoulement.

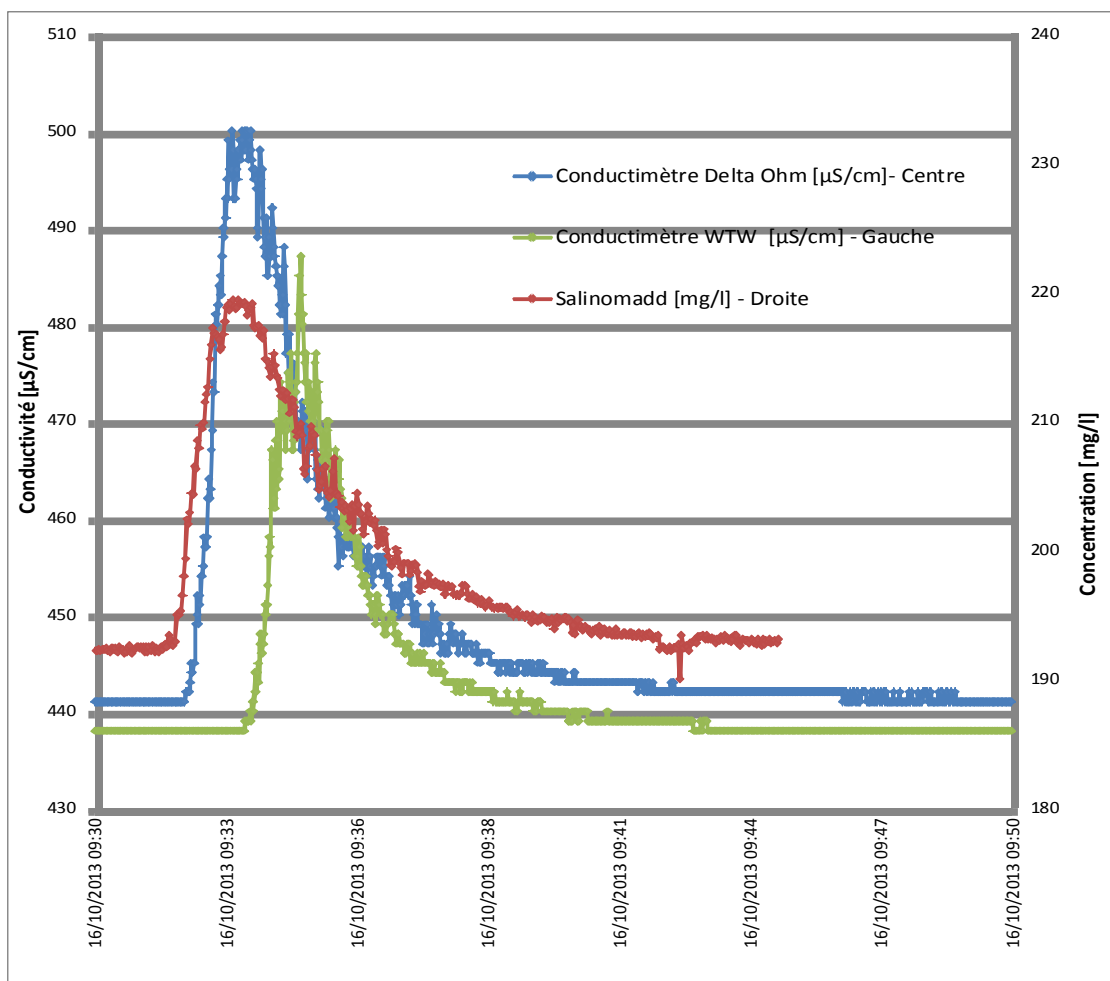


Figure 13 : « Série e & f » Traçage au sel sur le Durzon – 16/10/2013

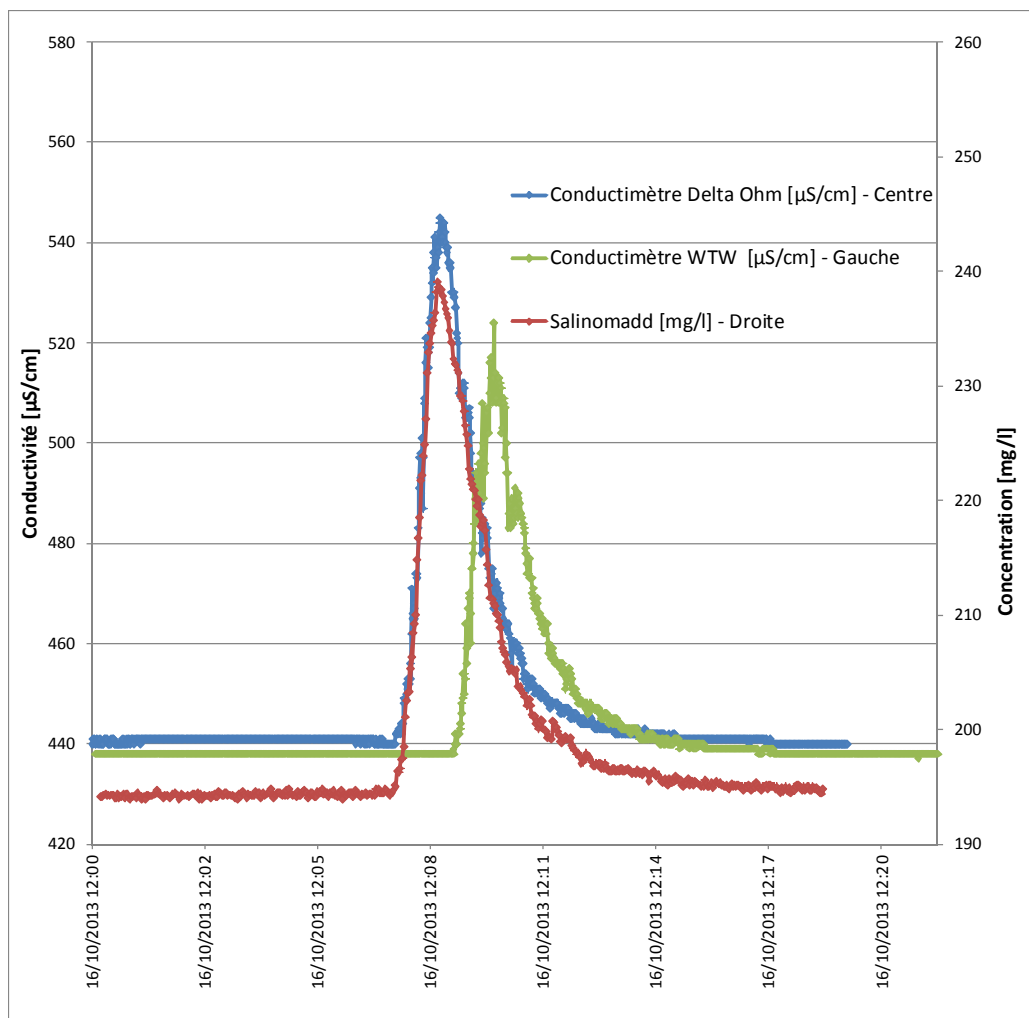


Figure 14 : « Série g & h »Traçage au sel sur le Durzon – 16/10/2013

Tableau 4 : Débit calculé pour les jaugeages par dilution de sel

	Série e & f (m ³ /s)	Série g & h (m ³ /s)
Salinomadd	0,873	0,918
Conductimètre Delta Ohm	0,946	0,859
Conductimètre WTW	1,682	1,167
Moyenne	1,167	0,981
Ecart à la moyenne des perches	+ 26 %	+ 6 %

Tableau 5 : Débit calculé pour les jaugeages par dilution de sel

	Série e & f (m ³ /s)	Série g & h (m ³ /s)
Salinomadd	0,873	0,918
Conductimètre Delta Ohm	0,946	0,859
Moyenne	0,909	0,889
Ecart à la moyenne des perches	-2 %	-4 %

Les résultats de ces deux traçages donnent des résultats surprenants par rapport aux mesures du 15/10/2013. Le troisième conductimètre placé en rive gauche pose problème, les valeurs calculées de débit sont supérieures aux mesures des deux autres appareils (ce qui suggère deux possibilités :

- Un mauvais mélange : ce conductimètre placé en rive ne voit pas passer tout le nuage ce qui donne une surestimation du débit ;
- Une défaillance de l'appareil ou une dérive de l'étalonnage, qui est peu probable, le matériel étant neuf et testé en laboratoire.

Si on retire du jeu de données les résultats du conductimètre WTW les écarts à la moyenne des jaugeages à la perche sont plus faibles (2 à 4 %). Si on le laisse dans le jeu de données les écarts sont plus importants + 26 % et + 6 %). Lors d'une prochaine campagne de mesure sur ce site des distances de mélange supérieures seront testées.



Figure 15 : Injection et section de mesure du jaugeage par dilution

5.2.4 Jaugeage par ADCP

Des jaugeages ADCP ont été réalisés pendant toutes les séries de mesure du Durzon (séries c à h). Les mesures ADCP ont été réalisées avec un appareil RDI StreamPro. Afin d'avoir une hauteur d'eau suffisante, les mesures ont été conduites sous le pont du Mas du prés, dans la zone de mesure des courantomètres sur perche. Une série de 20 transects a été réalisée pour chaque série d'intercomparaison. La figure 16 illustre un transect ADCP.

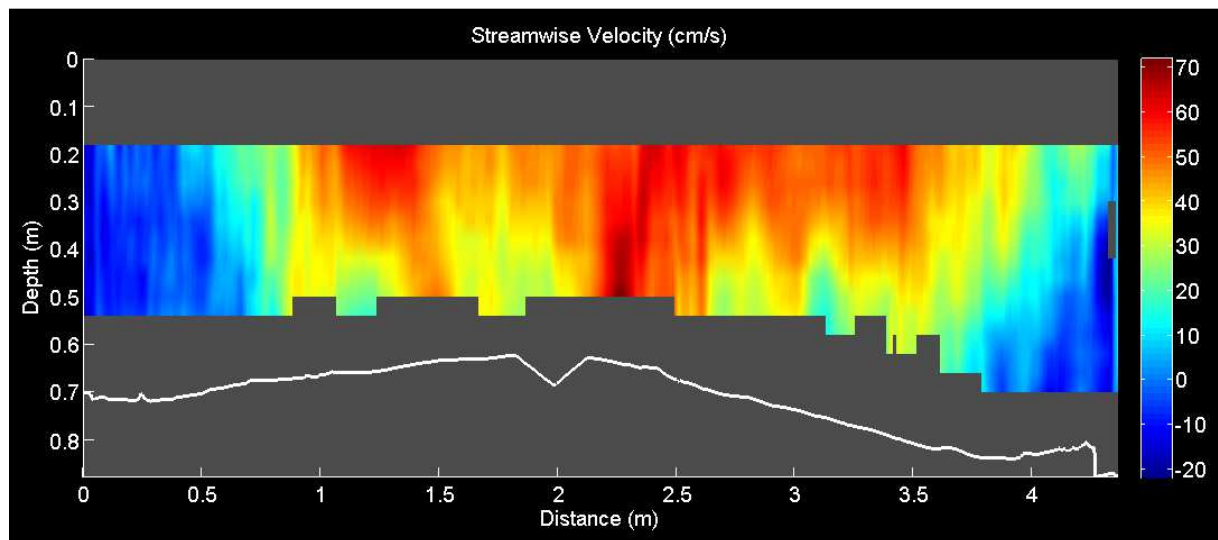


Figure 16 : transect de mesure ADCP sur le Durzon

Le Tableau 6 et la Figure 17 résument les résultats des mesures ADCP pour les séries c à h.

Tableau 6 : Résultats des mesures ADCP pour les séries c à h

Série	Débit ADCP moyen (m ³ /s)	Débit courantomètre moyen (m ³ /s)	Écart (%)
c	0,947	0,926	2.3
d	1,000	0,964	3.7
e	0,981	0,929	5.6
f	0,984	0,926	6.3
g	0,990	0,917	8
h	0,952	0,901	5.7

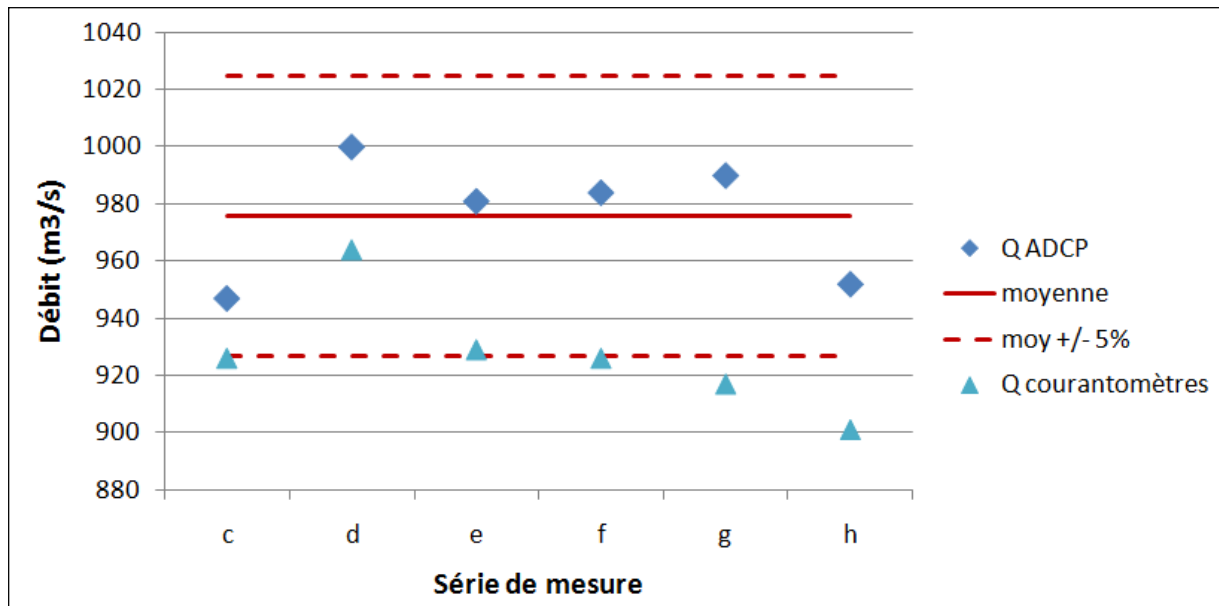


Figure 17 : Mesures ADCP vs. mesures courantomètres pour les séries c à h

On remarque un biais entre l'ADCP et les courantomètres. L'ADCP donne des résultats systématiquement supérieurs aux courantomètres, de +5 % en moyenne. Afin de garantir une hauteur d'eau suffisante pour la mesure ADCP, le déploiement s'est réalisé sous le Pont du Mas du Prés. Ce pont impose une contraction importante de l'écoulement, et un surcreusement local, la largeur passant de 6 m en amont du pont à 5 m sous le pont, et la profondeur moyenne passant de 0,5 m environ en amont du pont à 0,80 m sous le pont. Ce changement local de la morphologie modifie le comportement de l'écoulement, et crée des turbulences importantes sous le pont. Les profils verticaux de vitesses sont très chahutés, comme illustré en Figure 18 où les mesures ADCP sont représentées en fonction de leur profondeur et de leur vitesse adimensionnalisées. On constate une dispersion très importante des profils verticaux de vitesse. Il en résulte que l'extrapolation des zones non mesurées en surface et au fond, par ADCP est incertaine. L'ADCP ne peut donc pas être utilisé comme mesure de référence, son incertitude étant du même ordre de grandeur que celle des mesures au courantomètre. Néanmoins, les mesures répétées dans les mêmes conditions, à l'ADCP, sont un bon indicateur de l'évolution du débit pendant les essais. La Figure 17 montre que, en prenant une incertitude de 5 % sur les mesures ADCP, il n'est pas possible d'affirmer que le débit a varié pendant les essais des séries c à h. Cela confirme la bonne stabilité du débit sur les séries c à h.

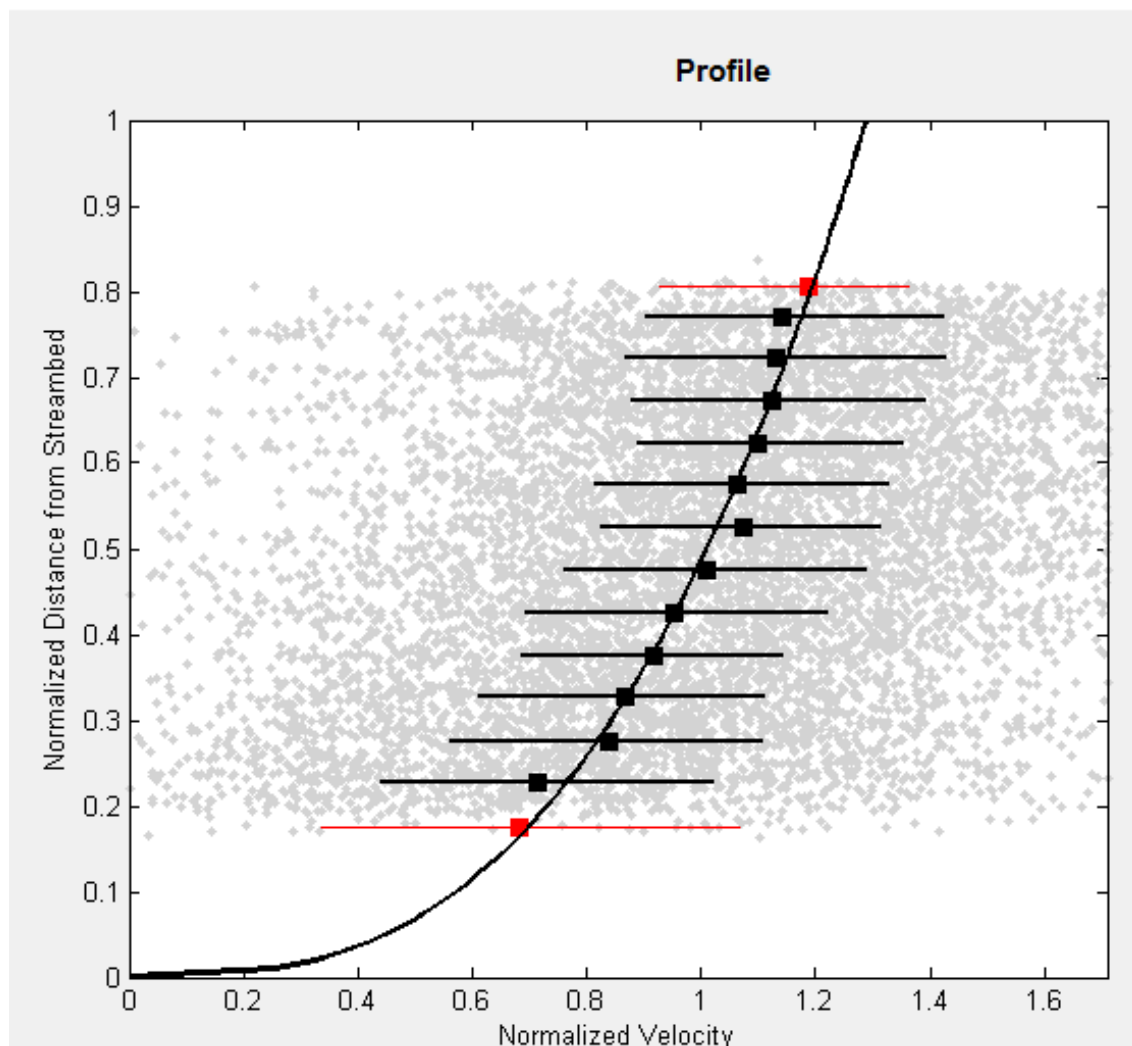


Figure 18 : Vitesse ADCP adimensionnée, en fonction des hauteurs adimensionnées. Les carrés représentent les médianes et les barres noires les écart-types par tranche de profondeur.

5.3 Impact du protocole de jaugeage et de dépouillement

La série d, au protocole libre, permet de comparer les jaugeages avec le protocole de l'intercomparaison (15 ou 20 verticales) et les jaugeages « tels que les auraient fait les équipes en conditions opérationnelles » (protocole libre).

Comme illustré dans le Tableau 7, les équipes ont choisi de réaliser entre 10 et 16 verticales, et entre 3 et 5 points de mesure par verticale.

Les jaugeages ainsi réalisés ont été dépouillés avec une routine de calcul normalisée, sous R, et avec les logiciels maison de chaque participant. Le Tableau 7 montre que les valeurs de débit sont très proches ($0,972 \text{ m}^3/\text{s}$ pour les logiciels maison contre $0,964 \text{ m}^3/\text{s}$ pour le logiciel normalisé, soit une différence inférieure à 1 %). Pour certaines équipes, la différence peut monter jusqu'à 5 %.

Tableau 7 : Impact du protocole de jaugeage et du logiciel de dépouillement

Transect	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	Total
Nb verticales	12	14	12	16	11	11	15	13	14	14	15	12	10	
Débit logiciel maison (m ³ /s)	0,951	0,953	1,045	1,079	0,954	0,977	0,889	0,965	1,000	0,926	0,940	0,995	0,958	0,972
Débit logiciel normalisé (m ³ /s)	0,901	0,929	0,987	1,079	0,974	0,971	0,908	0,968	1,013	0,926	0,978	0,974	0,929	0,964
Moyenne débit (m ³ /s)	0,926	0,941	1,016	1,079	0,964	0,974	0,899	0,967	1,007	0,926	0,959	0,984	0,944	
Ecart (m ³ /s)	0,050	0,024	0,058	0,000	0,020	0,006	0,019	0,003	0,013	0,000	0,038	0,021	0,029	
Ecart / moyenne (%)	5,43	2,51	5,74	0,01	2,09	0,59	2,07	0,32	1,33	0,02	3,94	2,18	3,05	

On peut noter également que les valeurs de débit calculées avec le protocole libre sont plus élevées qu'avec le protocole de l'intercomparaison. Alors que la moyenne des séries c à h est de 0,927 m³/s, la moyenne de la série d (0,964 m³/s) est supérieure de 4 %.

Il est possible que cet écart provienne des conditions de contraintes imposées par le protocole à 3 points par verticale. En effet, il n'est pas à exclure des erreurs de positionnement des 3 points sur la verticale par des équipes n'ayant pas l'habitude de ce protocole.

5.3.1 Résultats des 6 séries de jaugeages sur le Durzon

La figure 19 présente les débits mesurés par les différentes équipes pour les séries de jaugeages (de la série c à la série h) du Durzon.

Résultats des mesures par équipe Durzon – Jaugeages c à h

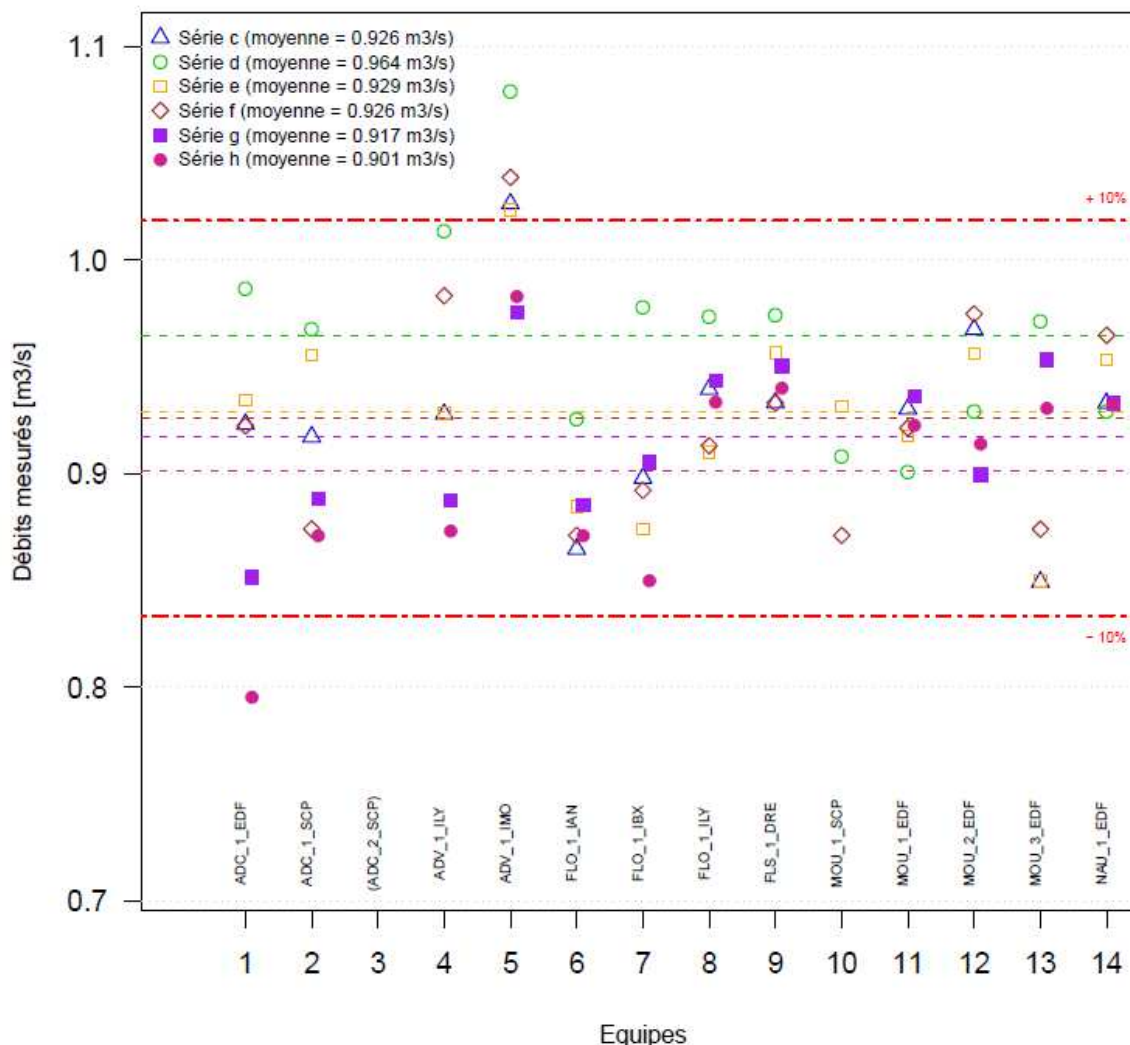


Figure 19 : Répartition par équipe des jaugeages à la perche sur le Durzon

Le débit moyen jaugé au cours des séries c à h est de 0,926 m3/s. L'écart-type des débits moyens est de 2 %. On constate que les jaugeages c à f de l'équipe ADV_1_IMO surestiment de plus de 10 % le débit moyen observé par les différentes équipes. Au cours des mesures g et h la surestimation est moins significative. Au vu des résultats de cette équipe lors des deux premiers jaugeages sur le Cernon, on ne peut pas conclure sur une surestimation systématique du débit par cette équipe.

On note cependant que le protocole imposé (15 verticales) n'a pas été respecté au cours des jaugeages g et h par l'équipe ADV_1_IMO. On exclura donc uniquement ces deux derniers jaugeages de l'analyse d'incertitude.

On note l'absence de résultats pour l'équipe ADC_2_SCP en raison d'un problème matériel qui a été remplacé ensuite par l'équipe MOU_1_SCP.

La figure 20 présente les débits mesurés au cours des séries de jaugeages c à h du Durzon classés par transect.

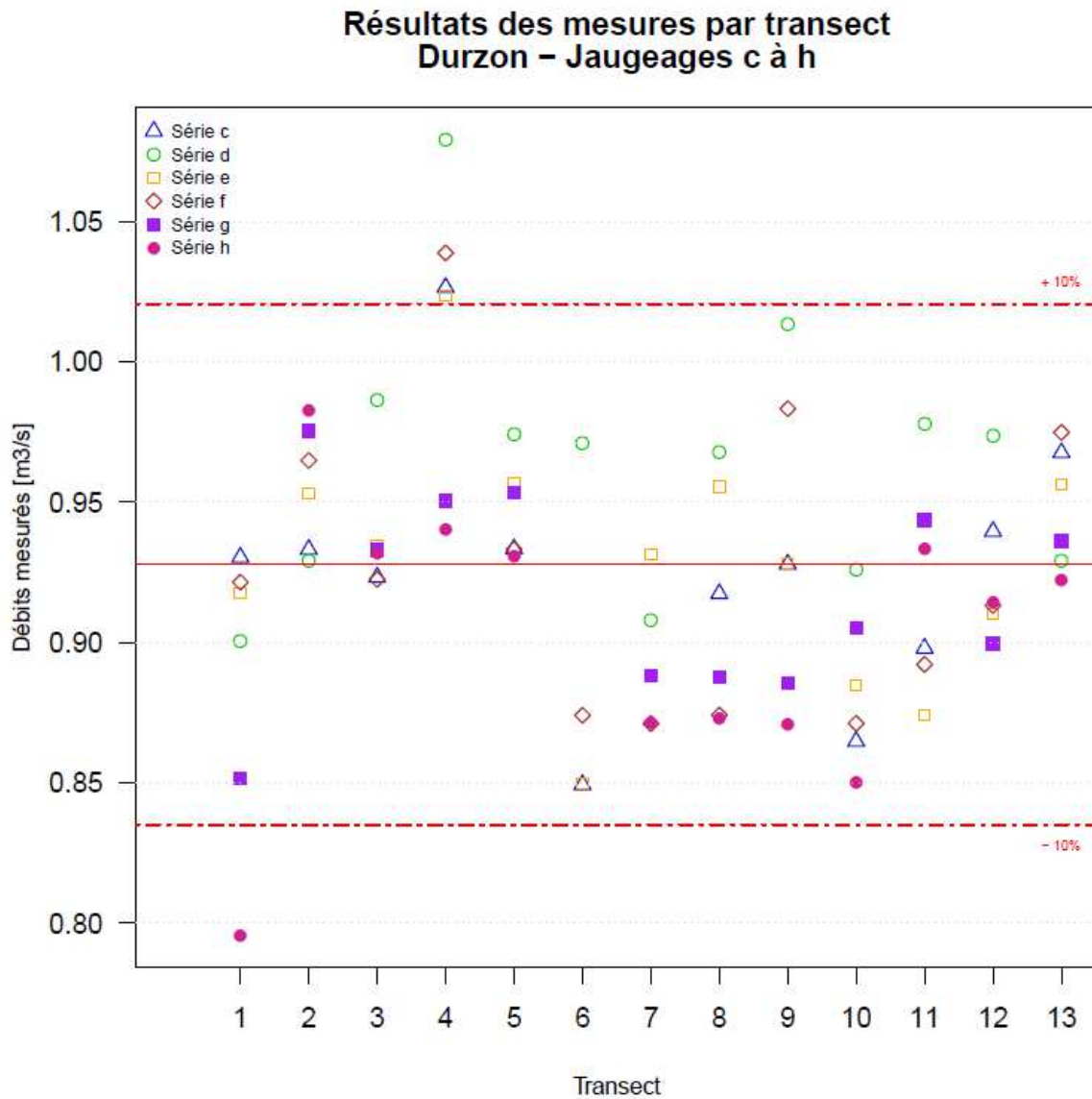


Figure 20 : Répartition des jaugeages par transect sur le Durzon

Le changement de transect de mesure par les équipes permet de conclure qu'il n'y a pas d'effet de site.

Tableau 8 : Résultats des mesures au courantomètre pour les séries c à h (m³/s)

Transect	Série c	Série d	Série e	Série f	Série g	Série h	
1	0,930	0,901	0,918	0,921	0,852	0,796	
2	0,933	0,929	0,953	0,965	0,975	0,983	
3	0,923	0,987	0,934	0,922	0,933	0,932	
4	1,026	1,079	1,023	1,039	0,950	0,940	
5	0,933	0,974	0,957	0,933	0,953	0,931	
6	0,849	0,971	0,850	0,874			
7		0,908	0,931	0,871	0,888	0,871	
8	0,917	0,968	0,955	0,874	0,888	0,873	
9	0,928	1,013	0,928	0,983	0,886	0,871	
10	0,865	0,926	0,885	0,871	0,905	0,850	
11	0,898	0,978	0,874	0,892	0,943	0,934	
12	0,940	0,974	0,910	0,913	0,900	0,914	
13	0,968	0,929	0,956	0,975	0,936	0,923	Total
Moyenne (m³/s)	0,926	0,964	0,929	0,926	0,917	0,901	0,927
Ecart-type (m³/s)	0,0453	0,0480	0,0442	0,0522	0,0364	0,0505	

5.4 Application des méthodes de calcul d'incertitudes aux cas du Cernon et du Durzon

5.4.1 Application des méthodes ISO 748 et Q+ (méthodologie GUM)

Les méthodes de calcul d'incertitude de la norme ISO 748 et Q+ ont été appliquées à l'ensemble des jaugeages réalisés. Un angle alpha de 10° a été choisi pour le calcul de l'incertitude selon la méthode Q+ (la sensibilité à la variation de l'angle alpha est présentée au paragraphe 5.4.3). La distribution des valeurs obtenues est reportée sur le graphique ci-dessous.

Incertitude calculée (norme ISO 748 et méthode Q+) par série de jaugeage

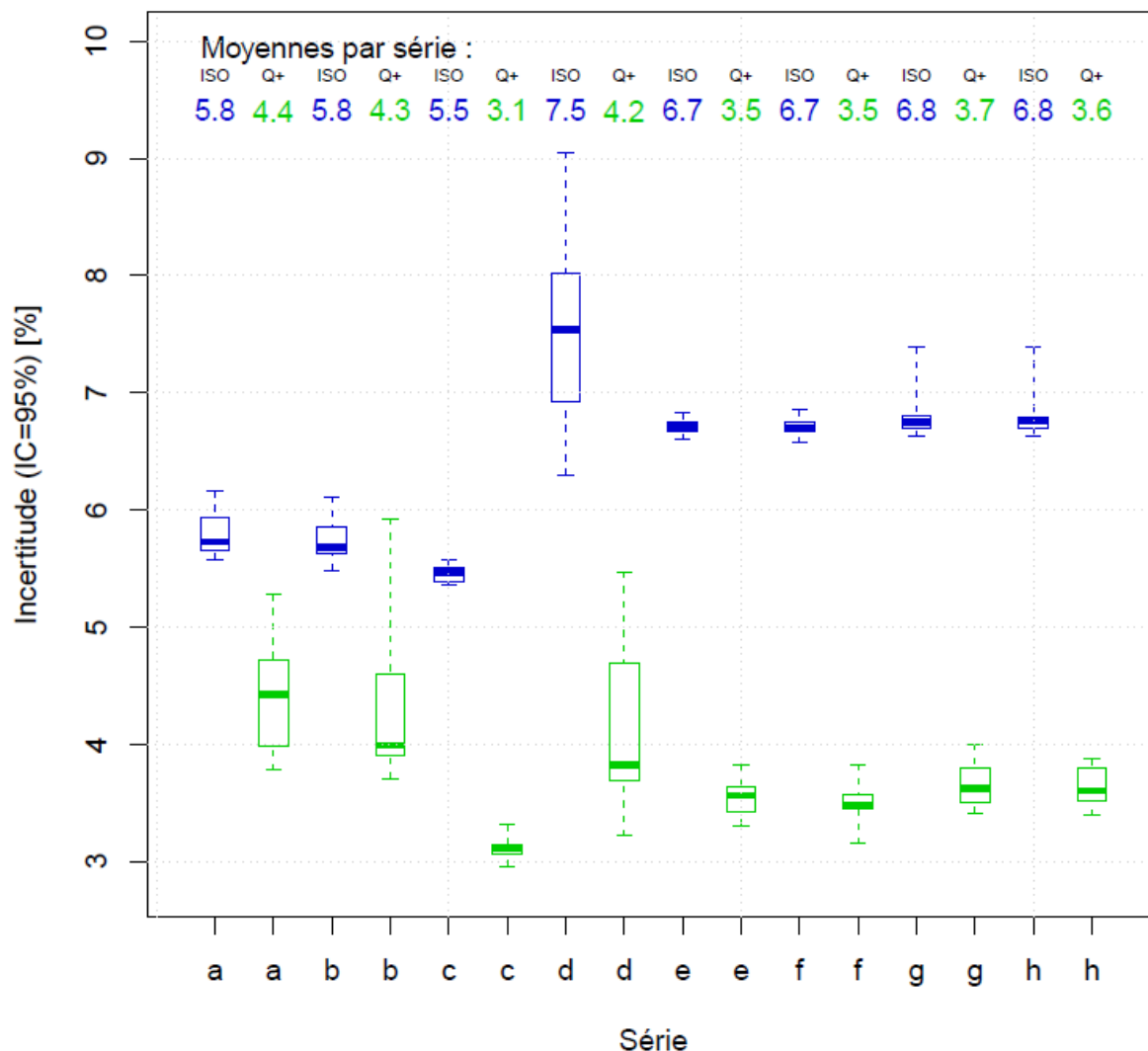


Figure 21 : Incertitude moyenne par série de jaugeage

On constate sur la figure 21 que le calcul d'incertitude selon la norme ISO 748 est très dépendant du nombre de verticales malgré la diversité des sections de jaugeage. L'incertitude moyenne de la série c est de 5,5 % pour 20 verticales contre 6,7 % en moyenne sur les séries e à f. La dispersion des valeurs d'incertitude de la série d est due au protocole laissé libre. Les jaugeages ont en effet été réalisés avec entre 10 et 16 verticales. L'augmentation de l'incertitude moyenne entre les séries {e,f} et {g,h} est dû aux jaugeages g et h de l'équipe ADV_1_IMO comportant 13 verticales au lieu de 15.

La dispersion résiduelle observable sur les incertitudes calculées selon la norme ISO 748 s'explique quant à elle aux gammes de vitesses ponctuelles mesurées. En effet le seul autre terme d'erreur qui s'exprime dans le calcul d'incertitude est le terme d'erreur $u_{c,e}$ du aux

mesures des vitesses ponctuelles (les termes u_s , u_{BD} et u_p restent invariants). Ce terme est en effet très sensible aux faibles vitesses mesurées.

Les résultats obtenus en appliquant la méthode généralisée Q+ sont plus nuancés et la dispersion des résultats reflète la diversité des profils de section de mesure.

Tableau 9 : Description des sections et incertitudes

	Nombre de verticales	Incertitude ISO 748 (moyenne)	Largeurs mesurées [min – max]	Profondeurs maximales observées [min – max]	Incertitude Q+ (moyenne)
Série c	20	5,45 %	5,1 – 7	0,37 – 0,69	3,1 %
Série d	10 à 16 (libre)	7,55 %	4,7 – 7	0,38 – 0,77	4,2 %
Série e	15	6,71 %	4,8 – 6,9	0,37 – 0,69	3,5 %
Série f	15	6,71 %	4,8 – 6,9	0,37 – 0,69	3,5 %
Série g	15	6,79 %	5,5 – 6,6	0,34 – 0,65	3,6 %
Série h	15	6,79 %	5,6 – 6,6	0,34 – 0,56	3,6 %

Remarque : on observe une différence entre la largeur mini mesurée à la série f et la série g car la section la plus étroite (transect n°6) n'a pas été jaugée au cours de ces deux séries (MOU_1_SCP a abandonné)

5.4.2 Application de la méthode d'intercomparaison

Les relations précédentes (paragraphe 4.4.2) sont appliquées aux résultats issus du dépouillement normalisé (application R) des données brutes fournis par les équipes.

Les jaugages suivants n'ont pas été pris en compte dans l'analyse :

- Jaugeages a et b de l'équipe ADC_2_SCP (problème de matériel remplacé par MOU_1_SCP) ;
- Jaugeages g et h de l'équipe MOU_1_SCP (non réalisés) ;
- Jaugeages g et h de l'équipe ADV_1_IMO (non respect du protocole).

Les valeurs calculées figurent dans le tableau 10 :

Tableau 10 : Résultats de débit pour tous les jaugeages de la campagne (dépouillement normalisé) sauf séries c et d

Equipe	Cernon (m ³ /s)		Durzon (m ³ /s)			
	a	b	e	f	g	h
ADC_1_EDF	0,734	0,766	0,934	0,922	0,852	0,796
ADC_1_SCP	0,776	0,765	0,955	0,874	0,888	0,871
ADV_1_ILY	0,688	0,721	0,928	0,983	0,888	0,873
ADV_1_IMO	0,687	0,744	1,023	1,039	rejeté	rejeté
FLO_1_IAN	0,741	0,731	0,885	0,871	0,886	0,871
FLO_1_IBX	0,696	0,690	0,874	0,892	0,905	0,850
FLO_1_ILY	0,749	0,762	0,910	0,913	0,943	0,934
FLS_1_DRE	0,726	0,751	0,957	0,933	0,950	0,940
MOU_1_EDF	0,711	0,739	0,918	0,921	0,930	0,914
MOU_1_SCP	ADC_2_SCP (défaut)	ADC_2_SCP (défaut)	0,931	0,871	non jaugé	non jaugé
MOU_2_EDF	0,777	0,783	0,956	0,975	0,900	0,914
MOU_3_EDF	0,866	0,794	0,850	0,874	0,953	0,931
NAU_1_EDF	0,758	0,767	0,953	0,965	0,933	0,932
Nombre de participants	12		13		11	

Les moyennes et écarts-types par cellule sont calculées dans le Tableau 11, puis les statistiques h et k de Mandel dans le Tableau 12 :

Tableau 11: Moyenne et écart type par équipe pour tous les jaugeages de la campagne sauf séries c et d

Equipe	Moyennes (m ³ /s)			Ecart-types (m ³ /s)		
	Cernon (a et b)	Durzon (e et f)	Durzon (g et h)	Cernon (a et b)	Durzon (e et f)	Durzon (g et h)
ADC_1_EDF	0,75	0,93	0,82	0,022	0,009	0,040
ADC_1_SCP	0,77	0,91	0,88	0,008	0,057	0,012
ADV_1_ILY	0,70	0,96	0,88	0,024	0,039	0,010
ADV_1_IMO	0,72	1,03		0,041	0,011	
FLO_1_IAN	0,74	0,88	0,88	0,007	0,009	0,010
FLO_1_IBX	0,69	0,88	0,88	0,004	0,013	0,039
FLO_1_ILY	0,76	0,91	0,94	0,009	0,002	0,007
FLS_1_DRE	0,74	0,94	0,95	0,018	0,017	0,007
MOU_1_EDF	0,72	0,92	0,92	0,020	0,003	0,012
MOU_1_SCP		0,90			0,043	
MOU_2_EDF	0,78	0,97	0,91	0,004	0,013	0,010
MOU_3_EDF	0,83	0,86	0,94	0,050	0,017	0,016
NAU_1_EDF	0,76	0,96	0,93	0,006	0,008	0,001
Moyenne	0,75	0,93	0,91			
Ecart-type des moyennes	0,039	0,047	0,029			
Effectif	12	13	11			

Tableau 12 : Statistique h et k de Mandel

Equipe	Statistiques k			Statistiques h		
	Cernon (a et b)	Durzon (e et f)	Durzon (g et h)	Cernon (a et b)	Durzon (e et f)	Durzon (g et h)
ADC_1_EDF	0,08	0,03	-2,08	3,42	1,25	6,86
ADC_1_SCP	0,63	-0,28	-0,60	1,15	8,40	2,06
ADV_1_ILY	-1,13	0,63	-0,58	3,60	5,71	1,76
ADV_1_IMO	-0,84	2,31		6,18	1,58	
FLO_1_IAN	-0,28	-1,10	-0,64	1,09	1,39	1,78
FLO_1_IBX	-1,44	-0,98	-0,65	0,66	1,86	6,75
FLO_1_ILY	0,23	-0,35	0,95	1,40	0,30	1,19
FLS_1_DRE	-0,22	0,39	1,13	2,66	2,41	1,23
MOU_1_EDF	-0,59	-0,17	0,51	3,05	0,40	2,04
MOU_1_SCP		-0,58			6,23	
MOU_2_EDF	0,89	0,85	0,12	0,62	1,92	1,80
MOU_3_EDF	2,24	-1,46	1,04	7,66	2,52	2,75
NAU_1_EDF	0,43	0,71	0,79	0,92	1,20	0,10

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

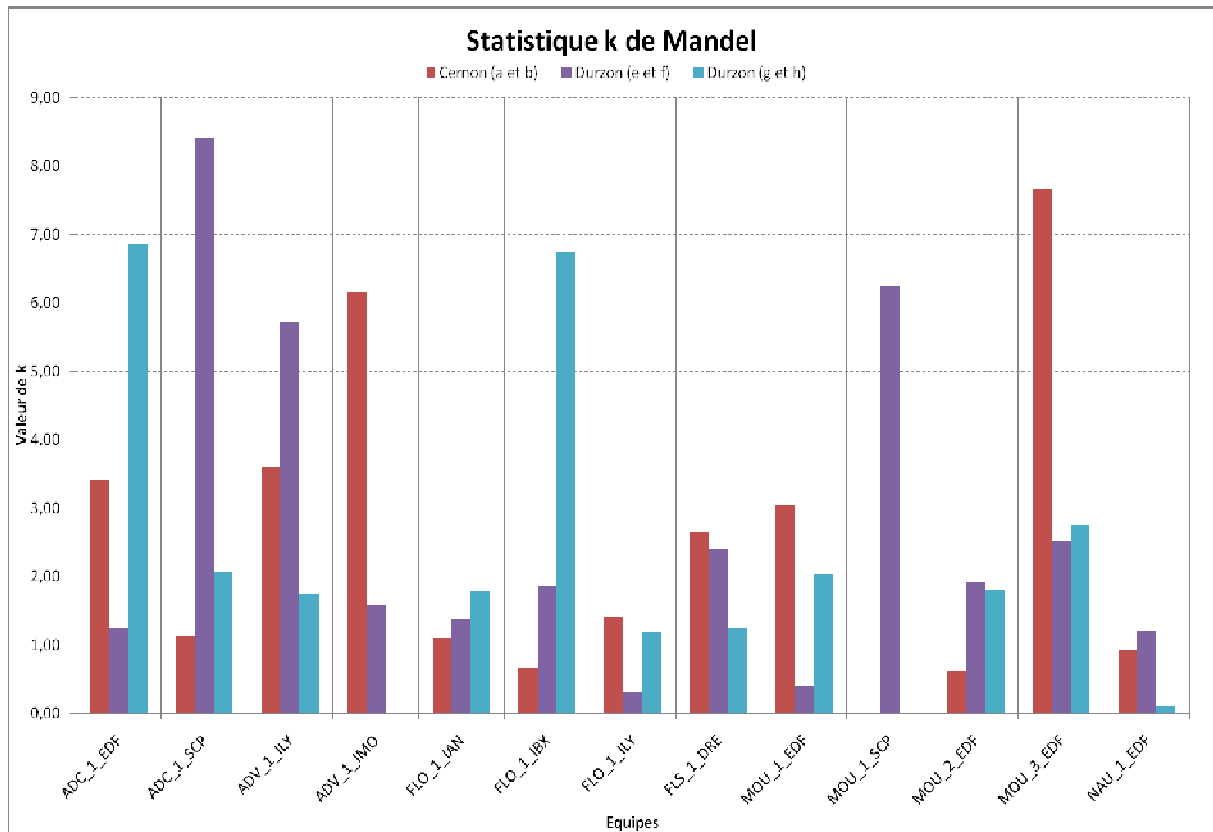


Figure 22 : Histogramme de la statistique k de Mandel par équipe

La figure 22 montre que les équipes ont des dispersions très différentes d'un débit à l'autre. On peut remarquer que les équipes FLO_1_IAN, FLO_1_ILY, MOU_2_EDF et NAU_1_EDF présentent des dispersions assez faibles pour les 3 débits. Aucun matériel ne semble avoir une dispersion systématiquement faible.

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

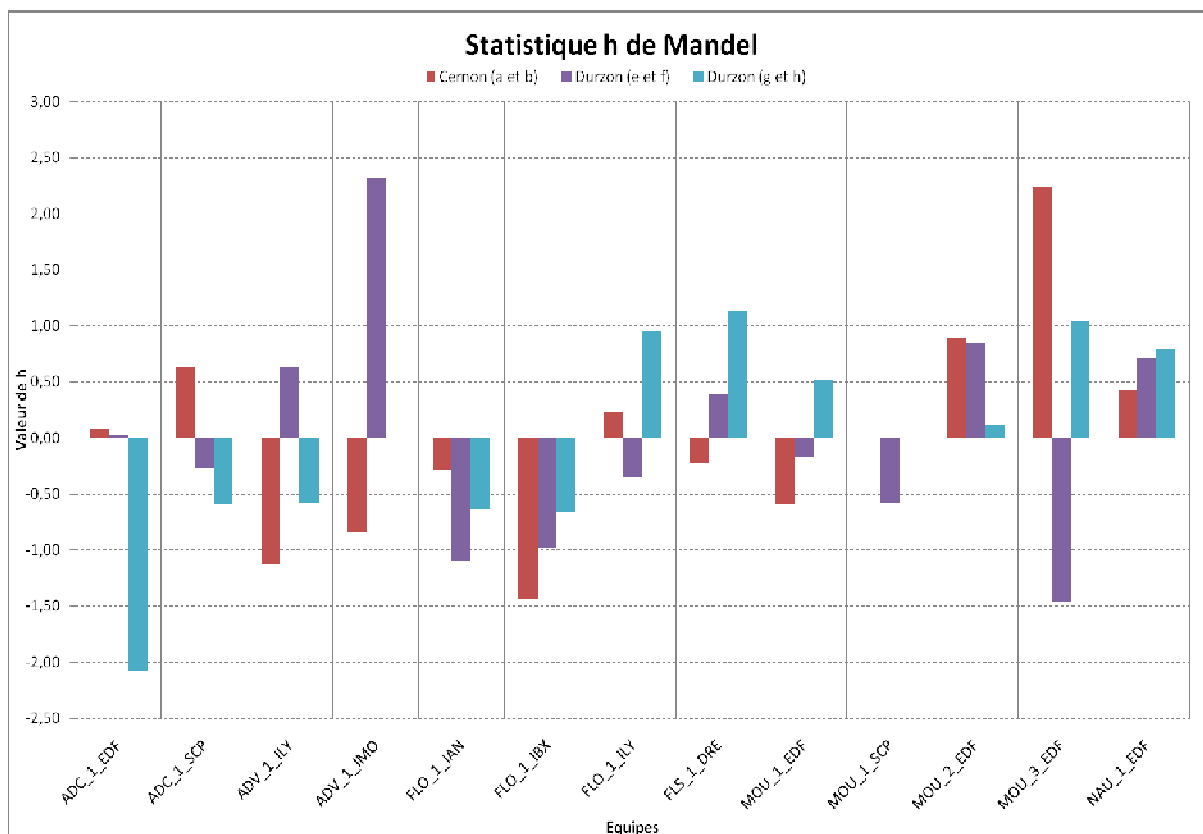


Figure 23 : Histogramme de la statistique h de Mandel par équipe

L'examen du graphique de la statistique h (figure 23) montre que 4 équipes ont une erreur systématique de même sens pour les trois débits. Ce sont les quatre équipes présentant une faible dispersion sur les trois débits (voir graphique de la statistique k de Mandel).

Aucune équipe ne présente une erreur systématique de même sens et de forte amplitude. Les valeurs de h extrêmes ne sont pas concentrées sur une seule équipe mais sont obtenues pour trois équipes (ADC_1_EDF, ADV_1_IMO, MOU_3_EDF).

Les examens statistiques k et h ont également été conduits sur les données de débit et classés selon la position des sections de mesure (transects). Les graphiques obtenus sont présentés ci-dessous et ne permettent pas d'exclure un transect de l'étude.

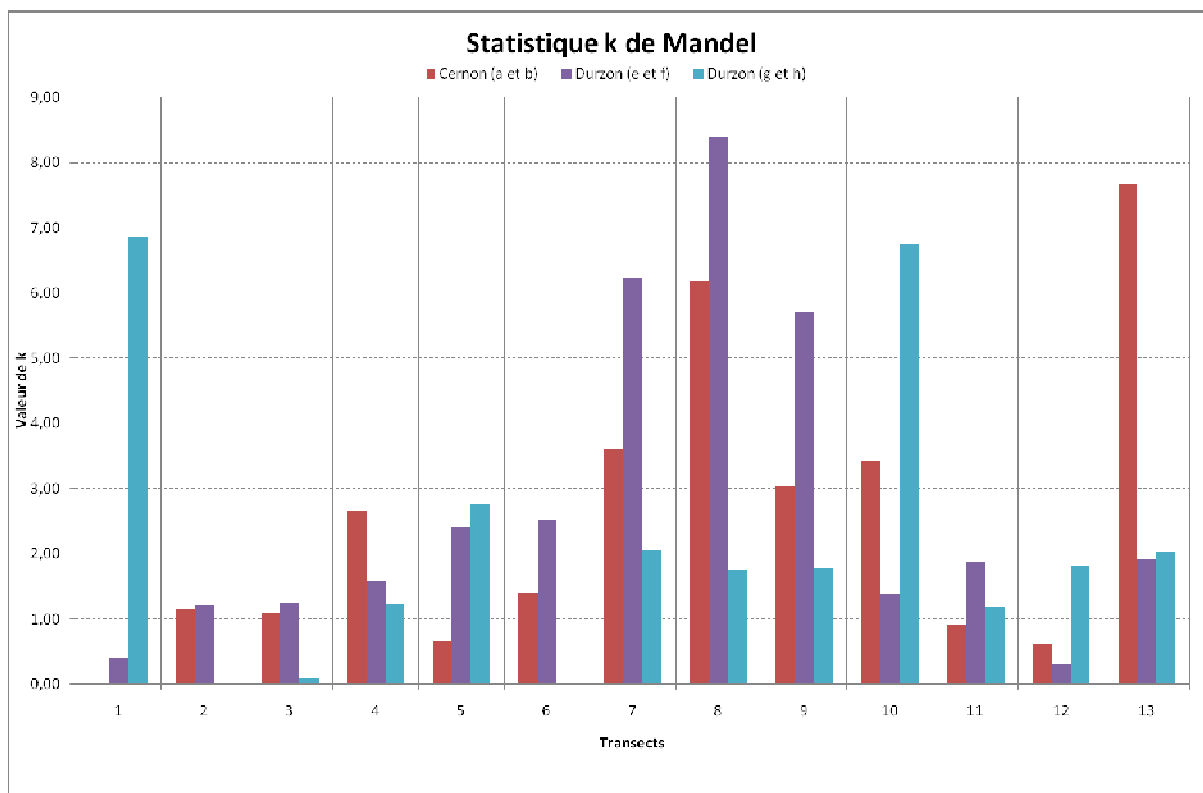


Figure 24 : Histogramme de la statistique k de Mandel par transect

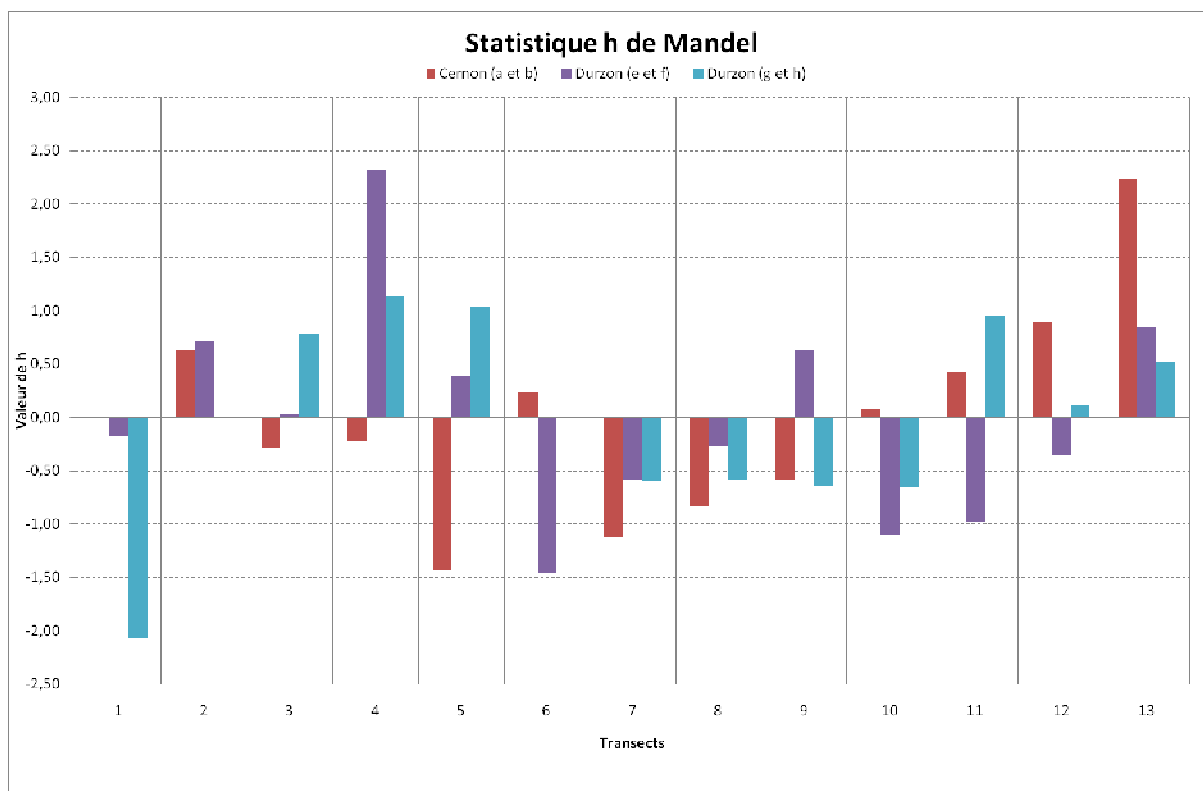


Figure 25 : Histogramme de la statistique h de Mandel par transect

A l'issue de cet examen des statistiques k et h de Mandel, aucune équipe (figures 22 et 23) ni aucun transect (figure 24 et 25) ne présente un comportement très différent des autres. De

plus, les tests statistiques de détection de valeurs aberrantes (Grubbs et Cochran) ne permettent pas d'exclure certaines valeurs. Les calculs sont donc poursuivis avec les équipes retenues.

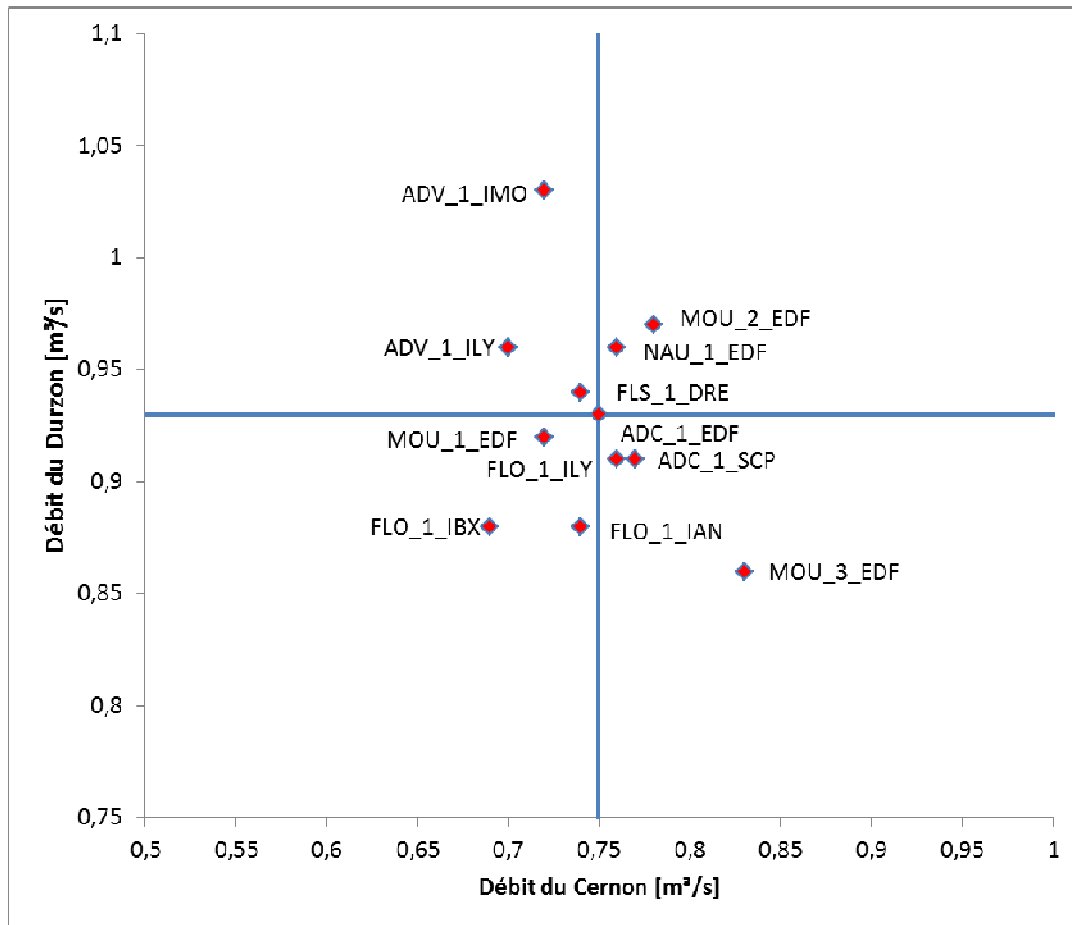


Figure 26 : Graphique de Youden (ab vs. ef)

Le graphique de Youden (figures 26 à 28) permet de visualiser si les équipes présentent une erreur systématique constante pour les deux débits, ce qui permet de retrouver sous une autre présentation les observations de la statistique h quand on dispose de deux niveaux.

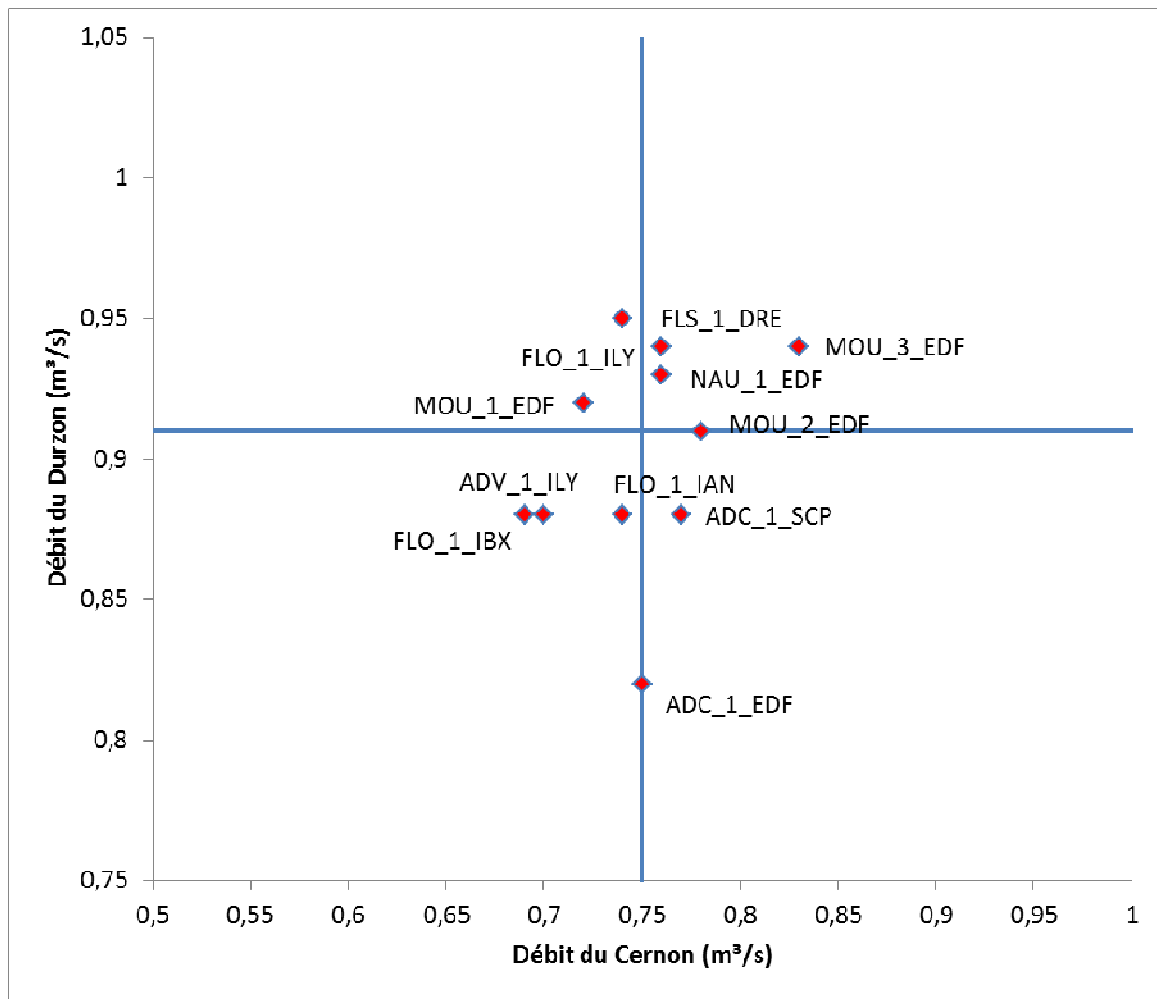


Figure 27 : Graphique de Youden (ab vs. gh)

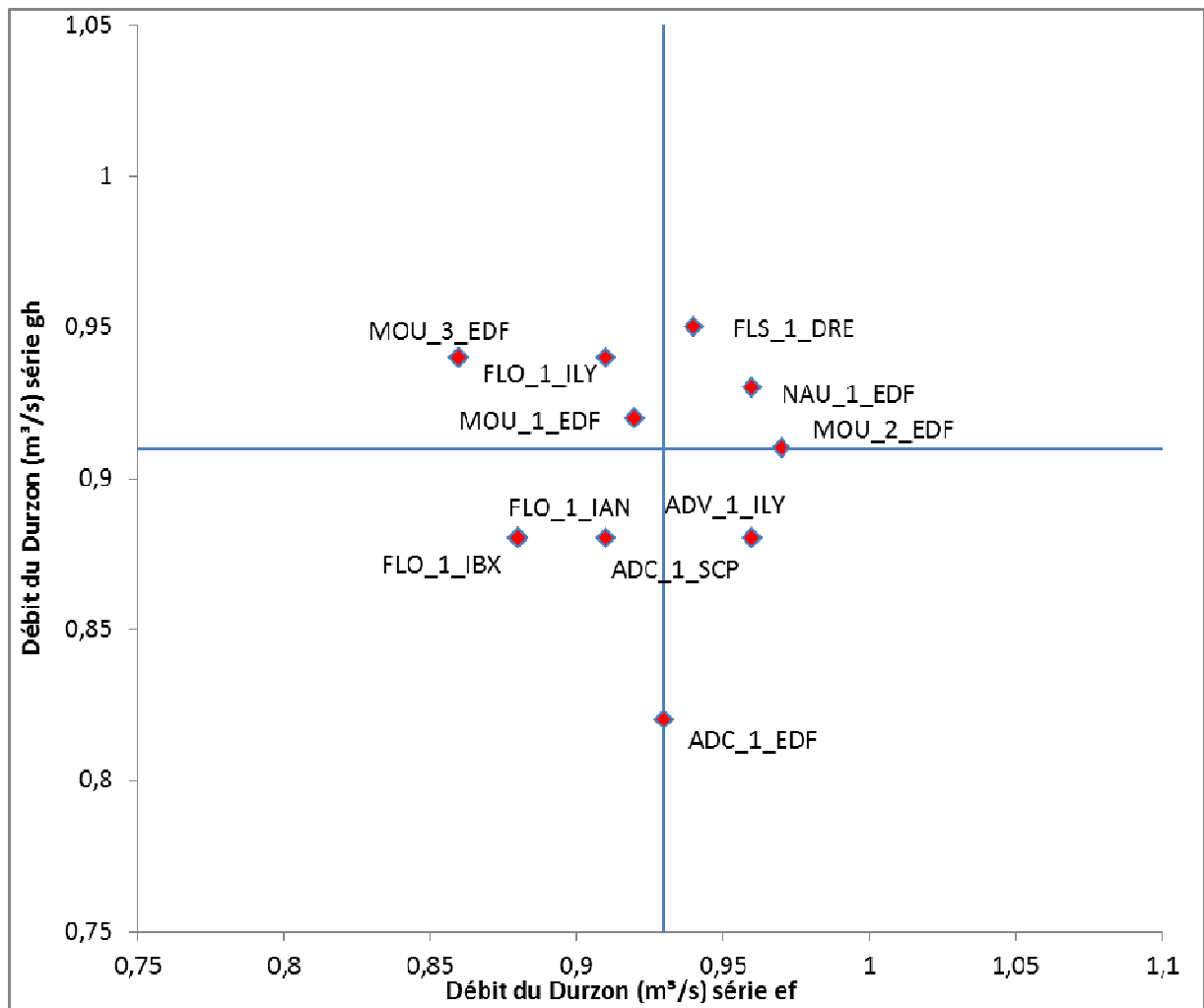


Figure 28 : Graphique de Youden (série ef vs. gh)

Interprétation des graphiques de Youden (figures 26 à 28) : les équipes dont les résultats sont sur la diagonale principale ont une erreur systématique de même sens pour les différents sites et différents niveaux. Les erreurs sont variables, seule l'équipe FLO_1_IBX sous-estime les débits systématiquement ce qui sera à surveiller, le même instrument n'avait pas montré cette tendance lors des essais d'Aix en 2011.

Les relations (6) à (10) sont appliquées et les résultats sont présentés dans le tableau ci-dessous :

Tableau 13 : variances calculées

		Cernon	Durzon	
		Séries a et b	Séries e et f	Séries g et h
Variance de répétabilité	s_r^2 [(m ³ /s) ²]	5,202E-04	6,079E-04	3,679E-04
Variance	s_d^2 [(m ³ /s) ²]	2,762E-03	4,027E-03	2,888E-03
Variance interlaboratoire	s_L^2 [(m ³ /s) ²]	1,121E-03	1,710E-03	1,260E-03
Variance de reproductibilité	s_R^2 [(m ³ /s) ²]	1,641E-03	2,317E-03	1,628E-03

Tableau 14 : écart-types absolus

		Cernon	Durzon	
		Séries a et b	Séries e et f	Séries g et h
Ecart-type de répétabilité	s_r [m ³ /s]	0,0228	0,0247	0,0192
Ecart-type interlaboratoire	s_L [m ³ /s]	0,0335	0,0413	0,0355
Ecart-type de reproductibilité	s_R [m ³ /s]	0,0405	0,0481	0,0403

Tableau 15 : écart-types relatifs et incertitude

		Cernon	Durzon	
		Séries a et b	Séries e et f	Séries g et h
Ecart-type de répétabilité	s_r [%]	3,05	2,66	2,13
Ecart-type interlaboratoire	s_L [%]	4,48	4,46	3,93
Ecart-type de reproductibilité	s_R [%]	5,42	5,19	4,47
Incertitude élargie (k=2)	U	11 %	10 %	9 %
Encadrement de l'incertitude U (IC = 95 %)	$[U_{\min} - U_{\max}]$ $2s_R/(1+A_R)$ $2s_R/(1-A_R)$	8 % - 17 %	8 % - 16 %	6 % - 15 %

Les écarts-types de répétabilité sont de l'ordre de 2 % à 3 % pour les deux débits mesurés sur le Cernon et le Durzon, tandis que les écarts-types interlaboratoires sont de l'ordre de 4 %. L'écart-type de reproductibilité est d'environ 5 % ce qui conduit à une incertitude élargie (à 95 %) de l'ordre de 9 % à 11 %. A cette incertitude élargie on peut associer en suivant les préconisations de la norme ISO 5725-1 (relation 7) un intervalle de confiance ($U_{\min} - U_{\max}$) qui va dépendre du nombre d'équipes et du nombre de répétitions réalisées, cet intervalle va augmenter si l'on réduit le nombre d'équipes mais peut aussi diminuer si l'on multiplie les répétitions.

Pour des mesurages ultérieurs réalisés dans des conditions semblables, selon la méthode mise en œuvre au cours de la comparaison, les équipes ayant participé à cette comparaison peuvent annoncer une incertitude de mesure de l'ordre de ± 10 % (à 95 %).

Il est cependant important de préciser que toutes les sources d'incertitude n'ont pas pu s'exprimer au cours de l'intercomparaison (nombre de verticales, nombre de points par verticales...) et que des erreurs supplémentaires ont pu être introduites par le protocole imposé notamment en raison du faible nombre de répétition des mesures. On citera par exemple l'importance des perturbations de l'écoulement induites par la présence dans l'eau et en amont des opérateurs sans pour autant pouvoir quantifier avec précision cet impact. L'analyse des données ADC issues du jaugeage le plus en amont et d'un jaugeage en aval a cependant montré que la perturbation de l'écoulement due à la présence d'opérateurs dans le lit de la rivière ne semble pas modifier significativement les oscillations de la vitesse au cours du temps.

5.4.3 Synthèse des résultats d'incertitude

	Série	ISO [%]	ISO (moyenne) [%]	Qplus [%]	Qplus (moyenne) [%]	Interlabo- ratoire [%]
Cernon	a	5,79	5,8	4,41	4,4	10,9
	b	5,76		4,32		
Durzon	c	5,45		3,12		
	d	7,55		4,20		
	e	6,71	6,7	3,53	3,5	10,4
	f	6,71		3,51		
	g	6,79	6,8	3,65	3,7	8,9
	h	6,79		3,64		

Tableau 16 : Valeurs d'incertitude (exprimées en pourcentage au niveau de confiance 95 %)

On constate à nouveau que l'incertitude calculée selon la norme ISO748 est fortement dépendante du nombre de verticales. On obtient une incertitude de 5,7 % environ pour 20 verticales contre 6,8 % pour 15 verticales, et ce, quelque soit la section de jaugeage.

Le calcul issu de la méthode généralisée Q+ est moins sensible au nombre de verticales et semble mieux prendre en compte la diversité des sections. Alors que le nombre de verticales est resté inchangé entre les 2 premiers jaugeages du Cernon (séries a et b) et le premier jaugeage du Durzon (série c), la diminution de l'incertitude de 4,4 % sur le Cernon à 3,5 % sur le Durzon est due à la diminution de la largeur du cours d'eau (de 11m à 6m) et donc du ratio L/P/m (Largeur/Profondeur/Nombre de verticales). Le calcul d'incertitude de cette méthode reste très sensible à l'angle alpha choisi et dont l'influence est proportionnelle au ratio L/P/m. Les jaugeages en rouge de la figure 29 (NAU_1_EDF_b, ADC_1_EDF_a, ADC_1_EDF_d, FLS_1_DRE_d et MOU_2_EDF_d) présentent les ratios L/P/m les plus élevés (1,2 environ) et sont les plus sensibles à l'angle alpha choisi. A l'inverse, les jaugeages dont le ratio L/P/m est le plus faible (en vert) sont les moins sensibles à l'angle alpha.

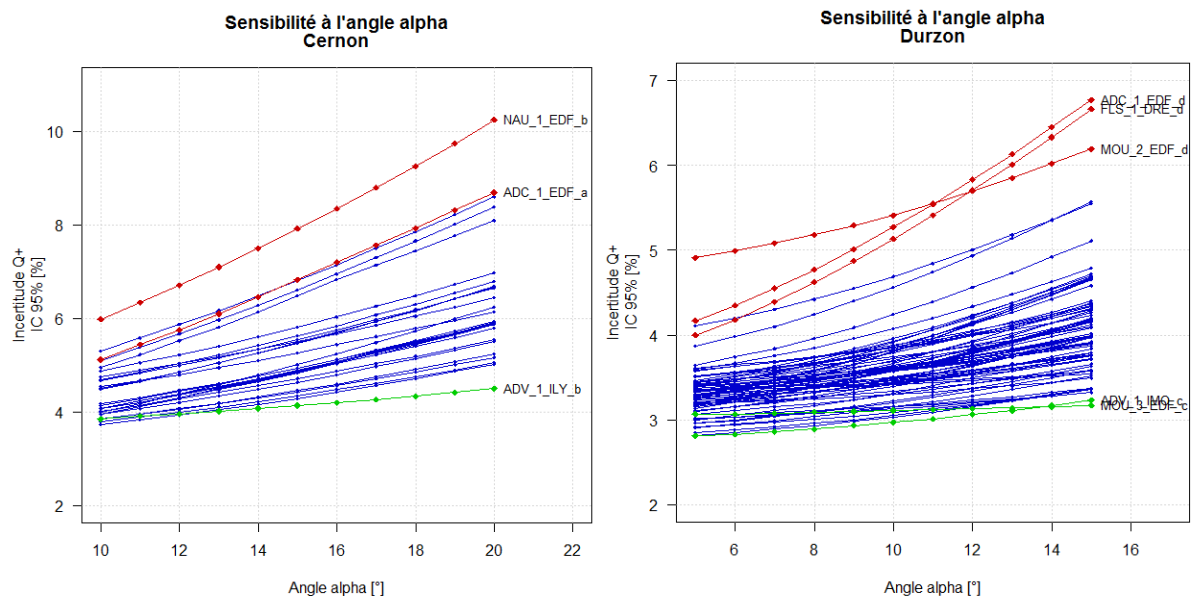


Figure 29 : Sensibilité à l'angle alpha pour les jaugeages du Cernon et du Durzon

Compte-tenu de l'hétérogénéité des sections de jaugeages du Cernon, il est difficile de fixer un angle alpha unique pour tous les jaugeages des séries a et b. On note par exemple que la largeur des sections de jaugeage varie entre 8,40 m et 15,70 m.

Le tableau ci-dessous présente les valeurs d'incertitude pour différentes valeurs d'angle possibles sur le Cernon et le Durzon.

a.	Cernon			b.	Durzon		
Angle α	Minimum	Moyenne	Maximum	Angle α	Minimum	Moyenne	Maximum
10°	3,7 %	4,4 %	6,0 %	5°	2,8 %	3,6 %	4,9 %
15°	4,1 %	5,3 %	7,9 %	10°	3,0 %	3,6 %	5,4 %
20°	4,5 %	6,5 %	10,3 %	15°	3,2 %	4,1 %	6,8 %

Tableau 17 : Valeurs d'incertitude Q+ pour différentes valeurs de l'angle alpha (a) : Cernon, (b) : Durzon

Le calcul d'incertitude de l'intercomparaison est quant à lui indépendant du nombre de verticales. Les valeurs de 11 % et de 10 % obtenues pour les jaugeages du Cernon et pour la première répétition de jaugeages du Durzon sont fortement influencées par les valeurs extrêmes mesurées au cours des séries de jaugeages. Ainsi l'absence de l'équipe ADV_1_IMO, qui avait tendance à surestimer le débit du Durzon, à la dernière répétition de jaugeage semble se traduire par une baisse de l'incertitude calculée de 10 % à 9 %.

Sur l'ensemble des résultats, on constate que les valeurs d'incertitude issues des calculs selon la méthodologie du GUM sont deux fois plus faibles que les valeurs d'incertitude de l'interlaboratoire.

5.4.4 Lien avec Aix 2011

L'incertitude interlaboratoire calculée lors de l'intercomparaison d'Aix en 2011 était de l'ordre de 15 % à 16 % sur l'Ouvèze et le Toulourenc tandis que l'incertitude interlaboratoire annoncée sur le Cernon et le Durzon n'est que de l'ordre de 10 %. Au cours des deux

intercomparaisons on observe que l'écart-type de répétabilité est plus faible que l'écart-type interlaboratoire.

Une variation de débit prononcée avait été remarquée lors de l'intercomparaison d'Aix et pourrait être à l'origine de la forte incertitude annoncée par rapport à celle calculée lors de l'intercomparaison de Nant. L'impact de la variation du débit est cependant difficile à évaluer.

6. Conclusion générale

L'application des méthodes traditionnelles de propagation d'incertitude aux jaugeages de l'intercomparaison illustre les limites de la norme ISO748 et de la méthode Q+. Le calcul de la norme ISO748 est ainsi fortement dépendant du nombre de verticale. Si la méthode Q+ permet de mieux en prendre en compte la répartition des verticales sur la largeur de la section, le calcul d'incertitude reste très sensible au choix de l'angle alpha quand la largeur du cours d'eau augmente. Les résultats obtenus avec la méthode Q+ semblent également sous-estimer l'incertitude par rapport à celle attendue « à dire d'expert ». Ainsi l'incertitude obtenue sur le Cernon n'est que de 4,4 % alors que la variabilité des sections de jaugeages sur ce site aurait laissé supposer une incertitude plutôt proche de 10 %. Des travaux complémentaires devront être menés afin de chercher à comprendre l'écart entre l'incertitude obtenue par des méthodes par propagation et celle 10 % obtenue en intercomparaison. Cet écart peut notamment provenir d'une mauvaise quantification d'un ou plusieurs termes élémentaires d'incertitude aléatoire des méthodes traditionnelles.

Le calcul d'incertitude Q+ met en évidence le fait que le Cernon est un site plus « incertain » pour le jaugeage par exploration des vitesses. L'application du calcul de la norme ISO 748 sur le Durzon (jaugeages à 20 verticales puis 15 verticales) montre bien que l'incertitude est conditionnée par le nombre de verticales.

Le calcul d'incertitude proposé par la norme ISO 5725 a pu être appliqué au cours de 3 séries de 2 jaugeages sur deux sites différents. L'écart entre les valeurs d'incertitude issues des essais d'intercomparaison entre les deux sites est faible (11 % sur le Cernon contre environ 9 à 10 % sur le Durzon). L'intercomparaison n'a donc pas pu mettre en évidence un effet flagrant de site entre les deux tronçons de rivière présentant pourtant des morphologies différentes (sections de jaugeages variées et irrégulières sur le Cernon et sections plus régulières sur le Durzon). Cependant l'écart est quasi négligeable et l'effet de site aurait peut-être pu être mieux mis en évidence en effectuant plus de répétitions, ceci aurait permis également de réduire l'intervalle de confiance sur l'incertitude calculée.

Enfin, la comparaison n'a pas eu pour objet de déterminer la performance des équipes à réaliser un jaugeage au courantomètre mais la cohérence des résultats entre les différents organismes tout au long des essais ainsi qu'avec les mesures complémentaires est rassurante.

Si les essais interlaboratoires ont permis de confirmer que les calculs d'incertitudes de la norme ISO748 et de la méthode Q+ ont des limites en l'état, il est important de souligner que le faible nombre de répétitions de mesure (uniquement 2) rend certainement le résultat de l'incertitude interlaboratoire peu robuste d'un point de vue statistique et que des analyses complémentaires devront être menées.

Il est également nécessaire de rappeler que les résultats mentionnés ne sont valables que dans les conditions expérimentales décrites précédemment et que le protocole imposé n'a pas pu permettre d'exprimer toutes les sources d'erreur (influence du nombre de verticales, influence du nombre de points, choix du temps d'exposition...).

Il serait ainsi utile, en vue de prochains essais interlaboratoires, de procéder à un nombre plus grand de répétitions de jaugeages (afin d'améliorer l'estimation de l'erreur de répétabilité s_r) quitte à ne se concentrer que sur un seul site de mesure. Il serait également intéressant de travailler sur la justesse de chacune des méthodes de jaugeage pour affiner l'écart-type interlaboratoire (s_L) en disposant de plus d'équipes avec un même type de matériel. Enfin, l'effet opérateur s'exprime lors des intercomparaisons et il serait intéressant de le quantifier lors d'une prochaine campagne puisqu'il est difficile de l'estimer par d'autres méthodes.

Ces essais contribuent à une meilleure analyse du calcul d'incertitude pour les jaugeages au courantomètres et complètent les travaux qui sont conduits actuellement afin d'aboutir à une méthode plus robuste et reconnue par la communauté des hydromètres.

7. 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.

Charte Qualité de l'hydrométrie, code de bonnes pratiques (1998). Ministère de l'environnement.

<http://www.eaufrance.fr/IMG/pdf/Charte-fr.pdf>

Despax, A., (2013) Incertitudes relatives aux données de débit. Mémoire de fin d'études. Université Montpellier 2.

Dramais, G., Blanquart, B., Le Coz, J., (2011) Rapport d'essai : Comparaison de méthodes de mesure du débit des petits cours d'eau. Journées d'intercomparaison des 17 et 18 mai 2011. Irstea Lyon.

Dramais, G., Blanquart, B., Le Coz, J., Pierrefeu, G., Hauet, A., Atmane, D., Pobanz, K., (2013) Les essais interlaboratoires en hydrométrie : Méthodologie et cas d'applications. Congrès SHF : «Hydrométrie 2013», Paris, 15-16 mai 2013.

<http://hal.archives-ouvertes.fr/docs/00/83/78/47/PDF/ly2013-pub00038466.pdf>

ISO 748 (2009) Hydrométrie : Mesurage du débit des liquides dans les canaux découverts au moyen de moulinets ou de flotteurs.

ISO 5725-1 (1994) Exactitude (justesse et fidélité) des résultats et méthodes de mesure - Partie 1 : Principes généraux et définitions.

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.

ISO 5725-5 (1998) Exactitude (justesse et fidélité) des résultats et méthodes de mesure - Partie 5 : Méthodes alternatives pour la détermination de la fidélité d'une méthode de mesure normalisée.

FD ISO/TS 21748 (2004) 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.

NF ISO 13528 (2005) Méthodes statistiques utilisées dans les essais d'aptitude par comparaisons interlaboratoires.

Le Coz J., Saysset G., Pierrefeu G. (2009) - Régate ADCP 1, 3-4-5/02/2009, Vézère au pont de Garavet (Allasac, Corrèze), rapport technique (Groupe Doppler).

Le Coz J., Camenen B., Peyrard X., Dramais G. (2012) Uncertainty in open-channel discharges measured with the velocity–area method. *Flow Measurement and Instrumentation* 26 18–29, doi:10.1016/j.flowmeasinst.2012.05.001

Le Coz J., Bechon P-M., Camenen B., Dramais G. (2013) Quantification des incertitudes sur les jaugeages par exploration du champ des vitesses. Congrès SHF : «Hydrométrie 2013», Paris, 15-16 mai 2013.