



HAL
open science

Comparaison de méthodes de mesure du débit des petits cours d'eau. Journées d'intercomparaison des 17 et 18 mai 2011

Guillaume Dramais, B. Blanquart, Jérôme Le Coz

► To cite this version:

Guillaume Dramais, B. Blanquart, Jérôme Le Coz. Comparaison de méthodes de mesure du débit des petits cours d'eau. Journées d'intercomparaison des 17 et 18 mai 2011. [Rapport Technique] irstea. 2011, pp.53. hal-02596693

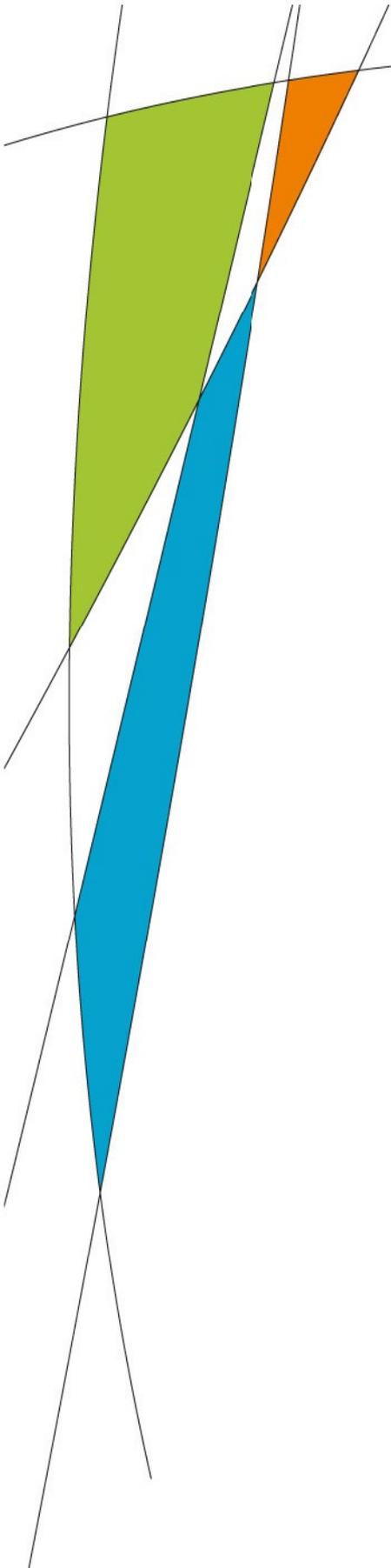
HAL Id: hal-02596693

<https://hal.inrae.fr/hal-02596693>

Submitted on 15 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.



Rapport d'essai :

Comparaison de méthodes
de mesure du débit des petits
cours d'eau.
Journées d'intercomparaison
des 17 et 18 mai 2011.

décembre 2011

G. Dramais¹, B. Blanquart², J. Le Coz¹

¹UR Hydrologie – Hydraulique

Équipe Métrologie

Groupement de Lyon

3 bis quai Chauveau CP 220

69336 Lyon Cedex 09

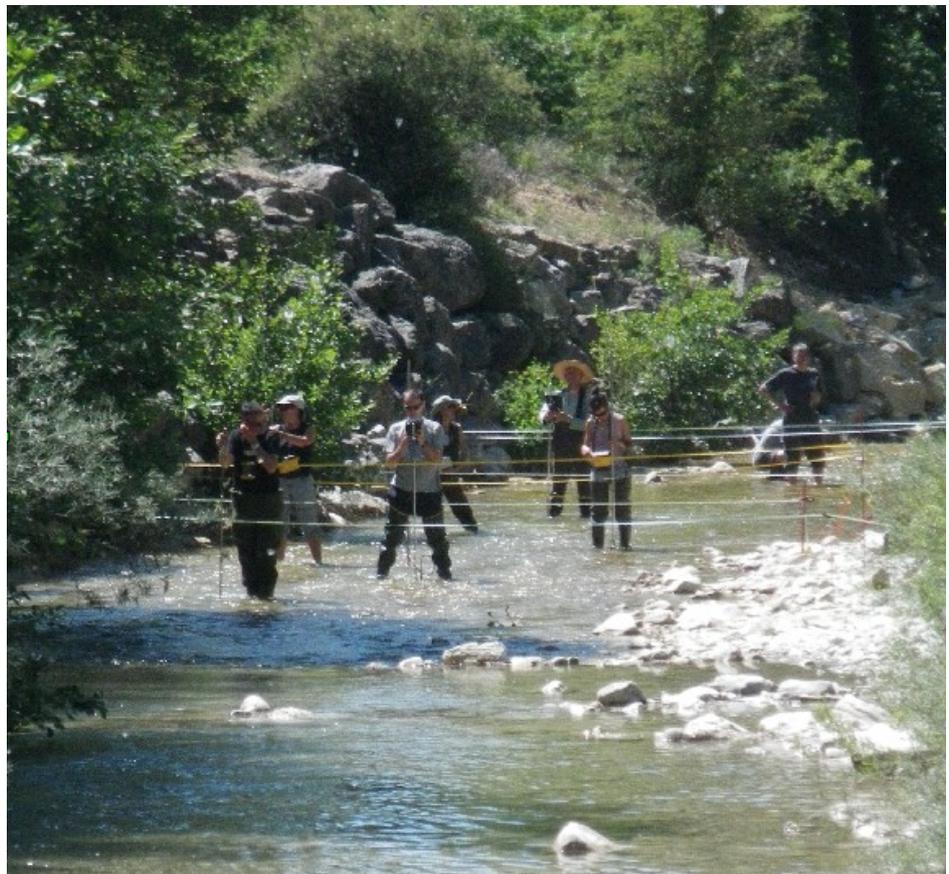
²Conseil et Formation en Métrologie

16 rue de la Brûlée

54600 Villers les Nancy



L'Ouvèze à Entrechaux



Le Toulourenc à Malaucène (Veaux)



Participants aux journées d'essai

(Cemagref d'Aix-en-Provence, Antony, Lyon, Montpellier, Bordeaux, Société du Canal de Provence, Direction Régionale de l'Environnement de l'aménagement et du Logement Provence Alpes Côte d'Azur et Service de Préviation des crues Grand Delta)

Une pensée pour Marc Magnani et ses proches. Hydromètre de la société du Canal de Provence, il fut l'un des premiers inscrits à ce séminaire mais il n'aura malheureusement pas pu partager ce moment avec nous.

Merci à tous les participants de ces essais pour leur enthousiasme et leur participation active. Merci à Évelyne Langlois et Pascal Di Maiolo pour leur aide logistique. Merci au réseau mesure et à Bernard Chastan pour le département Eaux du Cemagref d'avoir soutenu financièrement ces essais.

Table des matières

1. Introduction.....	6
2. Définition des objectifs de la comparaison.....	6
3. Programme des essais.....	7
4. Organisation des essais.....	8
4.1. Courantométrie sur perche.....	8
4.2. Mesures en canal.....	9
5. Les sites.....	9
6. Les équipes.....	11
6.1. Nom des équipes et des fichiers de données.....	11
6.2. Répartition des équipes.....	12
7. Saisie et mise en forme des données.....	12
8. Données expérimentales.....	13
8.1. Ouvèze à Entrechaux le 17 mai.....	13
8.2. Le Toulourenc à Malaucène.....	21
8.3. Canal de provence à Pourrières le 18 mai.....	27
9. Méthode d'analyse et interprétation.....	29
9.1. Objectif.....	29
9.2. Hypothèses	29
9.3. Méthode	30
9.4. Procédure de calcul détaillée.....	30
9.5. Application.....	33
9.6. Conclusion.....	38
10. Enseignements & recommandations.....	38
11. Conclusion.....	40
12. Bibliographie.....	41

1. Introduction

Le réseau mesure du Cemagref est un groupe de travail qui rassemble des métrologues de différentes équipes dans des ateliers thématiques. L'atelier « débitmétrie liquide à surface libre » a entrepris d'organiser une campagne d'intercomparaison de mesures des débits en petit cours d'eau. Cet essai a eu lieu en mai 2011 au groupement d'Aix en Provence du Cemagref. L'objectif était d'évaluer les incertitudes de mesure d'une méthode de déploiement de courantomètres sur perche mécaniques, électromagnétiques et acoustiques (Doppler).

Les résultats issus des mesures simultanées de 11 équipes, sur l'Ouvèze et le Toulourenc, sont exploités suivant des méthodes normalisées. Les trois jours d'essais ont permis d'alterner les mesures, leur analyse et des séquences d'échanges et de formation. Ce séminaire qui a compté 25 participants, a favorisé les échanges, notamment avec des services extérieurs qui s'étaient joints aux agents Cemagref (DREAL PACA, SPC GD, Société du Canal de Provence).

Ce rapport reprend des éléments du protocole, les résultats des essais, le cheminement statistique pour interpréter les résultats dans le respect des normes en vigueur et donne des perspectives à ce travail. Il peut être une base pour reproduire ce type de campagnes d'essais et permettre ainsi de progresser dans la maîtrise de la qualité des données expérimentales en hydrométrie.

2. Définition des objectifs de la comparaison

La campagne de comparaison de mesure de débit instantané (ou « jaugeage ») présentée ici concerne deux « techniques » d'exploration du champ des vitesses :

- jaugeage avec des courantomètres sur perche : courantomètres mécaniques (moulinets), électromagnétiques et acoustiques Doppler (ADV, ADC).
- jaugeage avec des « profileurs » acoustiques Doppler, type ADCP StreamPro/RioGrande ou Q-Liner, déployés selon la méthode mobile ou verticale par verticale (méthode stationnaire).

Les objectifs de la comparaison sont les suivants :

- Tester l'équivalence des méthodes de courantométrie sur perche d'une part et des méthodes ADCP StreamPro/RioGrande et Q-Liner d'autre part, et quantifier une enveloppe de la performance métrologique de ces méthodes (quantification de la reproductibilité).
 - *le cas échéant, cette comparaison peut mettre en évidence le biais d'une méthode ou d'un type d'instruments.*
- Échanger entre les équipes et former les équipes aux différents équipements et méthodes de traitement (en particulier sur les spécifications de la norme ISO 748)
 - *en complément des jaugeages destinés à l'analyse statistique, des démonstrations de techniques complémentaires ont été réalisées (camions-jaugeurs, dilution à la rhodamine WT et fluorimètres de terrain, flotteurs, etc.)*

Notes :

- S'agissant d'une première comparaison pour la plupart des équipes concernées, l'objectif premier était de favoriser les échanges et les aspects pédagogiques, tout en permettant une exploitation métrologique des résultats. La comparaison n'a pas eu pour objet de déterminer l'aptitude des équipes à mettre en œuvre une méthode spécifiée, ni à quantifier la performance d'une méthode en particulier, ni à imposer un protocole unique de mesure et de dépouillement.
- 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

Mardi 17

Une journée de mesure en rivière naturelle (Ouvèze à Entrechaux puis Toulourenc à Malaucène l'après midi). Matériel testé : courantomètres sur perche (mesures complémentaires ADCP, dilution, flotteurs)

Mercredi 18

- Matin :

8h-10h Présentations : Incertitudes ISO 748 et méthode Q+, Logiciel SCP pour les Q Liner, logiciels de dépouillement (G. Dramais, J. Le Coz, L. Duffar)

10h-12h transfert et dépouillement des données de la veille.

- Après midi :

Mesures en canal béton (Canal de Provence à Pourrière) Profileurs et courantomètres Doppler (mesures complémentaires camion jaugeur) cette série de mesure ne sera pas analysée aussi finement que celles de la veille car les conditions de mise en œuvre des instruments ne sont pas les mêmes et le débit pas complètement stabilisé.

Jeudi 19

- Matin :

Présentation : Intérêt et exploitation des intercomparaisons en métrologie (B. Blanquart), premiers dépouillements des essais du mardi

- Après-midi :

Discussion sur les résultats et les méthodes de mesures et de dépouillement. Récupération des dernières données, debriefing.

4. Organisation des essais

Le protocole a été choisi pour que l'intercomparaison soit exploitable en fonction des méthodes proposées par les normes en vigueur. 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 différents (dans un rapport de 1 à 4 environ).

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 (dans le logiciel Q+) pour mettre en évidence l'influence des formules de traitement (formules algébriques, intégration en trapèzes avec prise en compte de la rugosité au fond, méthode japonaise, etc.) ou du nombre de points (1, 2 ou 3 points par verticale).

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

- Chaque équipe met en œuvre un équipement unique sur un transect défini (pas d'inversion des équipes ou des équipements sur un transect donné, et ce pour les deux sites).
- Chaque équipe réalise deux jaugeages (un dans le sens rive droite-> 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 (fixé à 15, plus les deux verticales de rives) et doit être respecté (car le même jaugeage servira ensuite à réaliser les traitements complémentaires)

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.

La durée de moyennage des mesures de vitesse sur chaque point (« temps d'exposition ») est fixée à 30 secondes.

- Chaque équipe fournit le résultat sous deux formes :
 - les valeurs de débit selon son propre outil de dépouillement (une valeur pour le sens RG-> RD, une valeur pour le sens RD->RG)

- les valeurs « brutes » des mesures, sous un format compatible avec l'application Q+ (spécifié plus loin), dans laquelle elles seront retraitées par la suite de façon homogène pour les traitements complémentaires.
- 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 (ADCP sur l'Ouvèze et dilution sur le Toulourenc, éventuellement flotteurs) sont réalisées.

4.2. Mesures en canal

Les mesures sont réalisées sur le canal de Provence, avec 4 profileurs, un courantomètre acoustique par verticales successives et deux camions jaugeurs, avec un débit stabilisé.

Chaque équipe réalise des jaugeages, dans les conditions d'utilisation classiques de chaque équipement, pendant la durée du palier stabilisé par la téléconduite de la SCP. Ces essais ne sont pas intégrés à l'exploitation statistique.

5. Les sites

Les sites en rivière naturelle sur l'Ouvèze et le Toulourenc sont situés à proximité de deux stations du SPC sur les communes d'Entrechaux et de Malaucène. Les sites sont uniformes mais peuvent nécessiter quelques petits aménagements pour supprimer des singularités locales. Le débit du canal de Provence à Pourrière est régulé par une loi d'ouvrage hydraulique et le débit est stabilisé pendant les essais. Ce canal est trapézoïdal en béton et végétalisé par endroits.

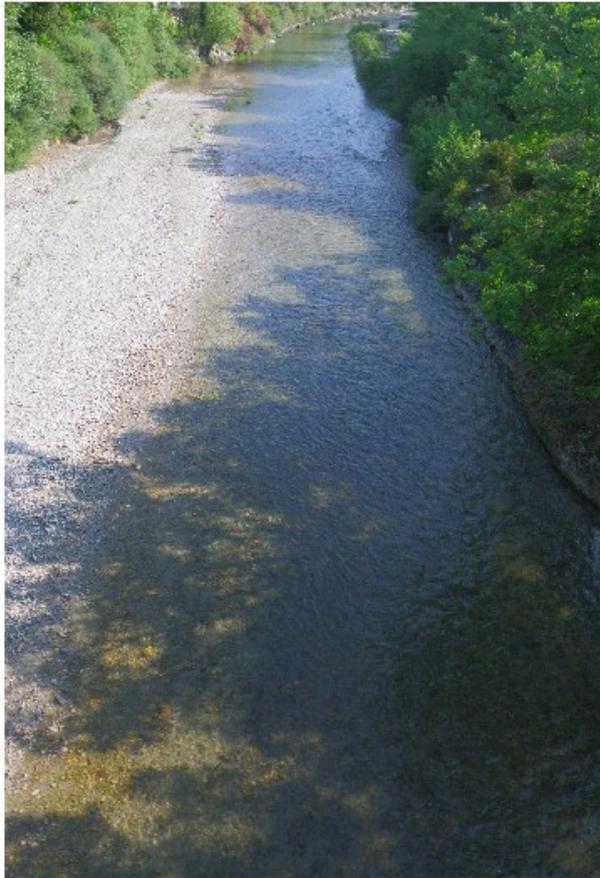


Fig. 1 : L'Ouvèze à Entrechaux



Fig. 2 : Le Toulourenc à Veaux



Fig. 3 : Le canal de Provence à Pourrière

6. Les équipes

Pour bien identifier les instruments et les équipes il est important de donner un code qui permette par la suite de retravailler sur les données.

6.1. Nom des équipes et des fichiers de données

Le nom des équipes est défini comme ceci :

NAU_1_CLY (Nautilus N° 1, équipe du Cemagref de Lyon.)

Code	Type d'instrument	Fournisseur
NAU	Courantomètre électromagnétique Nautilus sur perche	Ott
MOU	Moulinet hydrométrique sur perche	Ott
ADV	Vélocimètre acoustique Flowtracker sur perche	Sontek
ADC	Courantomètre acoustique sur perche	Ott
FLO	Courantomètre électromagnétique Flomate sur perche	Marsh Mac Birney
FLU	Fluorimètre	Albillia
STR	Profileur de courant Streampro 2400 kHz sur flotteur	RDI
RIO	Profileur de courant Rio Grande 1200 kHz sur flotteur	RDI
QLI	Profileur Q-liner sur flotteur	Ott
CAM	Camion jaugeur équipé	Equipementier (Industron & Nominal) – Mesure (Ott)

Ce code trigramme est suivi du n° d'instrument en effet certains services ont plusieurs instruments du même type.

Tab. 1 : Modèles d'instruments utilisés

- Le nom du fichier de données correspondant à un jaugeage
 - O_03_NAU_1_CLY_a (Jaugeage sur l'Ouvèze sur le transect 03 avec le Nautilus N° 1 par l'équipe du Cemagref de Lyon, mesure a.)
 - Première lettre de la rivière (O pour Ouvèze, T pour Toulourenc, C pour Canal de

provence)

- _N° de transect en partant de l'amont _trigramme correspondant à l'instrument (NAU pour Nautilus, FLO pour Flowmate, MOU pour moulinet, ADC, ADV, STR, QLI, CAM)
- _trigramme de l'équipe (pour les équipes Cemagref C suivi de deux lettres du centre régional, DRE, SCP, SPC)

Code	Organisme
CEM	Cemagref : Institut national de recherche en sciences et technologies pour l'Environnement et l'Agriculture. Groupements de Lyon (LY), Antony (AN), Montpellier (MO), Aix-en-Provence (AX), Bordeaux (BX).
DRE	DREAL : Direction régionale de l'environnement de l'aménagement et du logement
SCP	Société du Canal de Provence
SPC	SPC GD : Service de Prévision des Crues Grand Delta

Tab. 2 : Les différents acteurs des essais

_a ou _b pour différencier le premier et le second jaugeage sur le même cours d'eau par la même équipe.

Ce nom est rappelé sur les fiches de terrain et sera le nom donné au fichier de saisie correspondant.

6.2. Répartition des équipes

Sur l'Ouvèze puis le Toulourenc : les opérateurs seuls déploient des instruments enregistreurs (ADC et ADV), des binômes déploient des instruments nécessitant une saisie manuelle.

Note : Une équipe est affectée à des mesures complémentaires, Streampro sur l'Ouvèze et le Toulourenc. Une mesure par traçage à la rhodamine WT est effectué sur le Toulourenc.

7. Saisie et mise en forme des données

Les données sont renseignées sur les fiches de terrain et les heures sont indiquées en heure d'été (TU+2), il est demandé à chaque équipe de signaler sur les fiches les verticales mesurées sous l'influence du sillage de l'équipe amont.

Pour faciliter l'exploitation automatisée dans le logiciel Q+, la saisie informatique des jaugeages à la perche est effectuée dans un format prédéfini permettant l'exploitation rapide des données.

8. Données expérimentales

8.1. Ouvèze à Entrechaux le 17 mai

8.1.1. Répartition des équipes

Transect	Nom de l'équipe	Constitution de l'équipe	N° de série
x	STR_1_CLY	J. Le Coz, Y Le Coarer, G. Almansa	854
1	MOU_1_SPC	C. Delcourt, N Montel Dulac	Hélice Ott (47597-2)
2	ADV_1_CLY	F. Thollet	P 1464
3	FLO_1_CAX	M. Tolsa, V Raymond	Hyax IV
4	FLO_1_CBX	Y. Gwilherm, S. Moreira	2000194
5	NAU_1_DRE	L. Liger + V. Vassal	224010
6	ADV_1_CMO	C. Dejean	P 2524
7	MOU_1_DRE	F. Roman + S. Valencia	Hélice Ott (23370)
8	FLO_2_CAN	A. Guerin, C. Chaumont	2007149
9	FLO_1_CAN	A. Zahm, P. Ansart,	2005703
10	ADC_2_SCP	P. Phandong	250165
11	ADC_1_SCP	C. Parre	224010

Tab. 3 : Répartition des équipes sur les transects

Deux jaugeages sont réalisés par chacune des équipes conformément au protocole :

- Premier jaugeage : Heure de début 11 h 15 pour les perches, fin à 12 h 17
- Deuxième jaugeage : Heure de début 12 h 21 pour les perches , fin à 13 h 10

8.1.2. Mesures complémentaires

8.1.2.1 Débit

Deux séries de jaugeages ADCP et deux jaugeages rapides à deux courantomètres (protocole utilisé par l'équipe Hydrobiologie d'Aix-en-Provence) sont réalisés en parallèle du test d'intercomparaison. Les transects se situent en amont du tronçon du test d'intercomparaison (Figures 4 & 5).

Des essais de mesures par flotteurs (clémentines) sont réalisés après les séries de jaugeage entre les transects 2 et 6.

Capteur	Valeur complémentaire (m ³ /s)	Déploiement	Heure TU+2	Commentaire
STR_1_CLY	1,17	Drisses + maintien du capteur par un opérateur à l'aval	10:46 – 10:59	6 traversées, transect sur le tronçon de la comparaison (0,318 m ³ /s mesuré soit 27 % de débit mesuré)
STR_1_CLY	1,28	Drisses + maintien du capteur par un opérateur à l'aval	11:27 – 11:37	6 traversées, transect amont du tronçon de comparaison (0,550 m ³ /s mesuré soit 43 % débit mesuré) Rq pour SPC GD c'est un meilleur tronçon de jaugeage ADCP.
FLO_2_CAX FLO_1_CLY	1,09	Protocole Yann Le Coarer – (moyenne sur 10s pour description rapide et 2 capteurs simultanés)	12:00 – 12:20	10 verticales à deux courantomètres. Même section que le STR_1_CLY (amont du site principal, (fig. 5))
FLO_2_CAX FLO_1_CLY	0,88	Protocole Yann Le Coarer – (moyenne sur 10s pour description rapide)	12:28-12:47	Section plus proche du tronçon de l'intercomparaison. 19 verticales à deux courantomètres.
Flotteur	1,19	Protocole simplifié (ONEMA-Cemagref)	13:15 – 13:25	4 verticales, 16 mesures
FLO_1_CAX	0,97	Protocole V. Raymond – (moyenne sur 10s pour description rapide)	12:56 – 13:16	Mesure réalisée après les deux séries de jaugeages sur le transect 3. 15 verticales
Courbe de tarage	1,5 – 1,6			Courbe de tarage mal connue pour les faibles débits (déjà identifié par SPC GD)

Tab. 4 : Mesures complémentaires sur l'Ouvèze

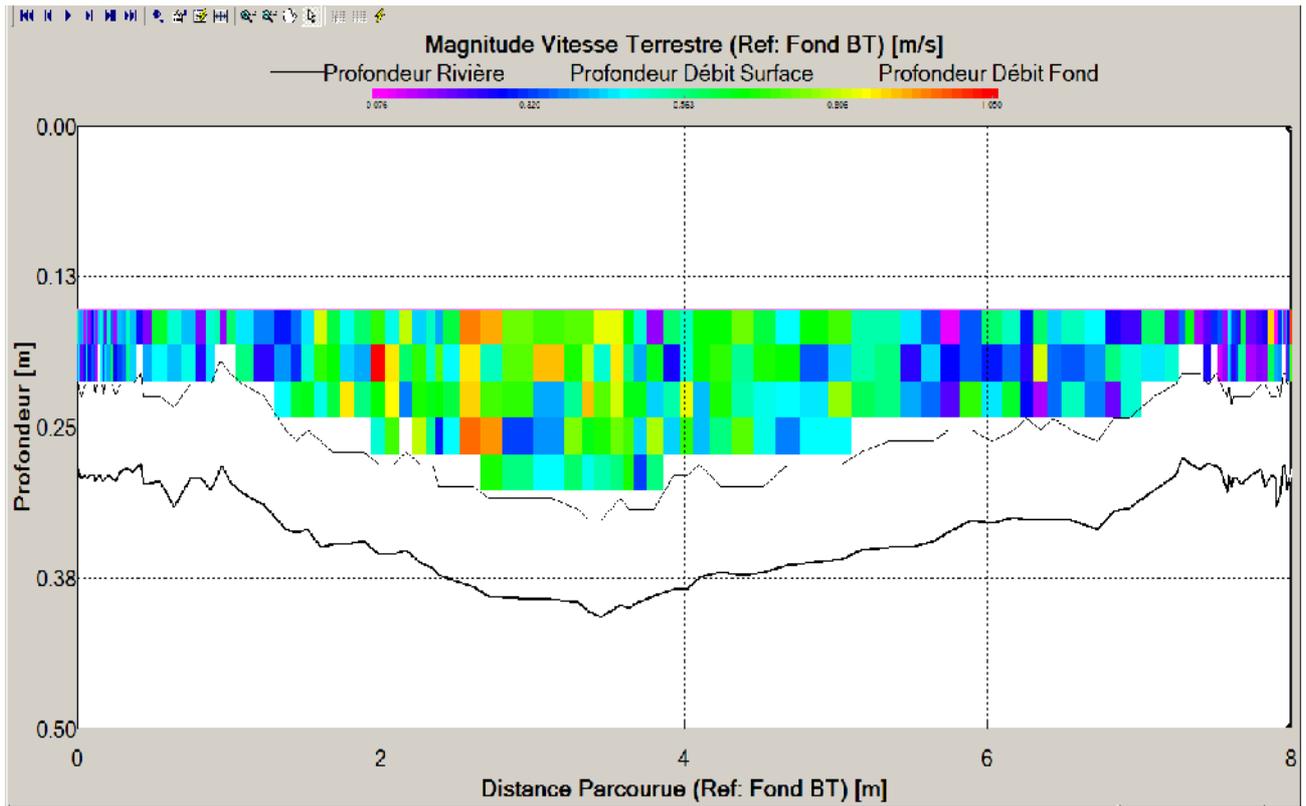


Fig. 4: STR_1_CLY Déploiement sur le tronçon de la comparaison

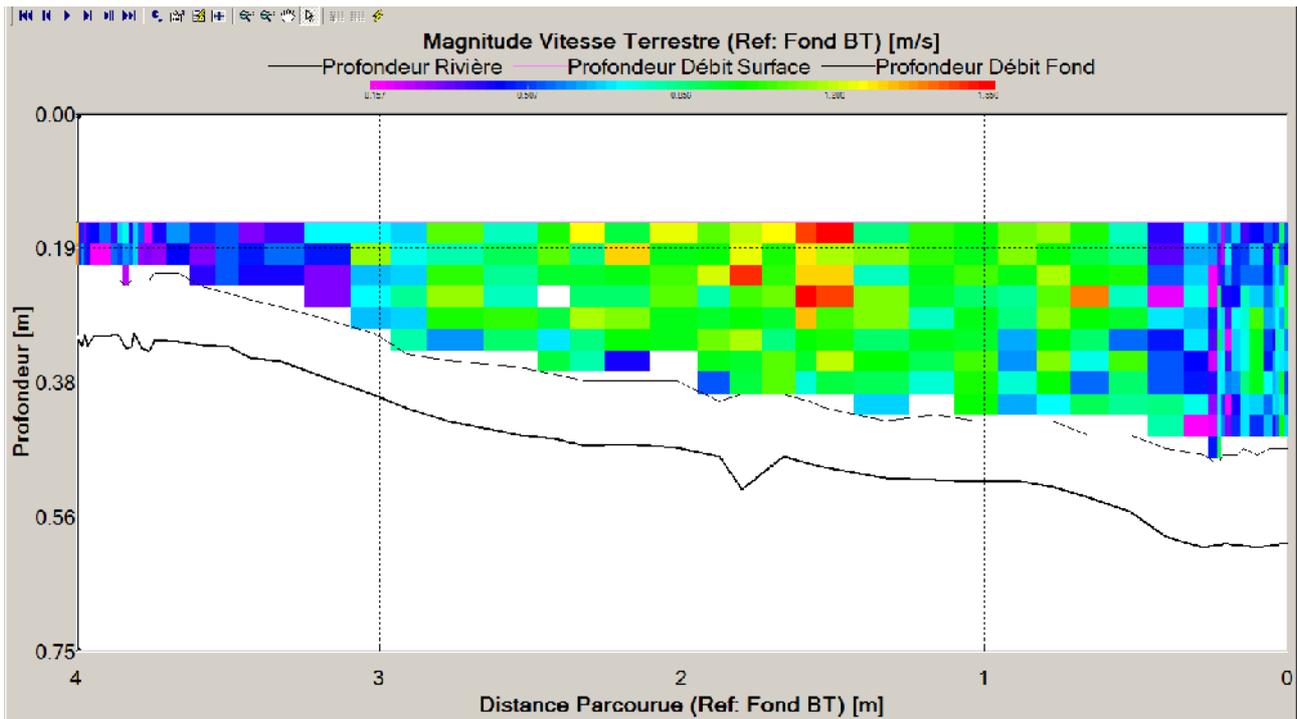


Fig. 5 : STR_1_CLY Déploiement sur un tronçon à l'amont du site

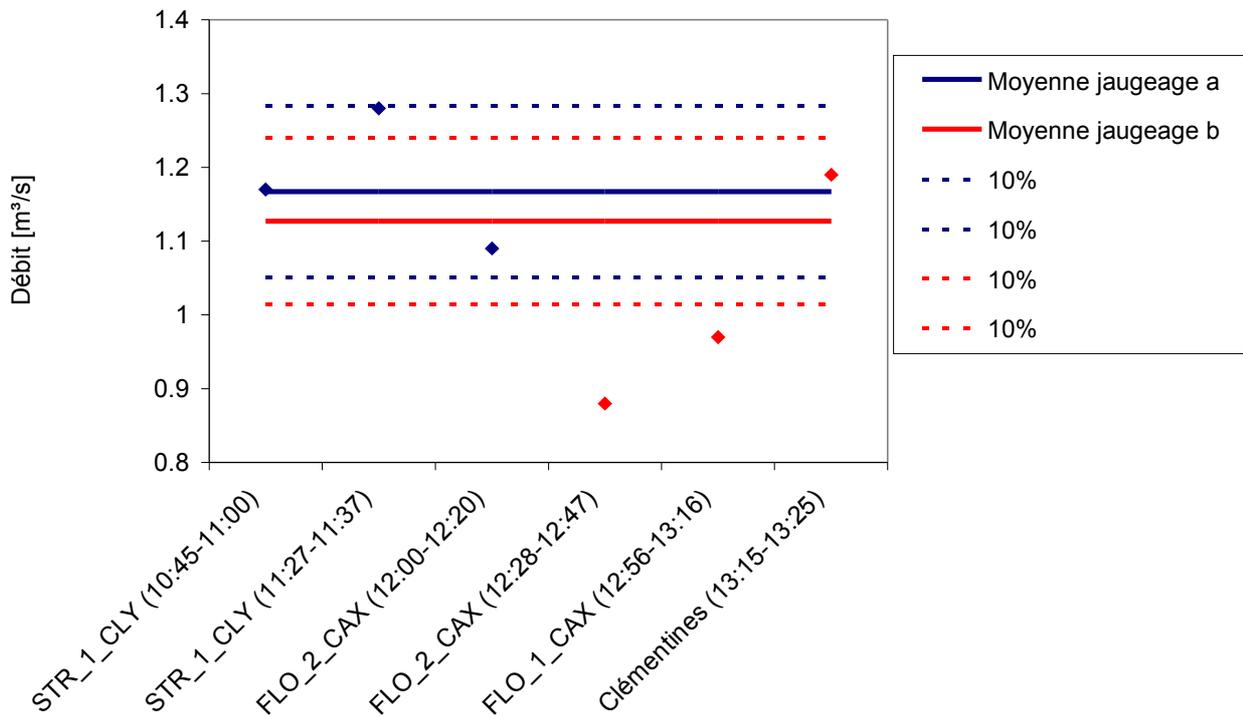


Fig. 6 : Mesures complémentaires de débit sur l'Ouvèze

Les mesures complémentaires (Tab. 4 & Fig.6) comparées à la moyenne des mesures des équipes sont intéressantes, les mesures ADCP sont dans l'enveloppe de 10 % autour de la valeur moyenne

du premier jaugeage, cependant le second jaugeage à l'ADCP Streampro (STR_1_CLY (11:27-11:37)) se situe juste 10 % au dessus de la moyenne du premier jaugeage ce qui est plutôt décevant mais pas étonnant au vu de la section et de la proportion de débit réellement mesurée par l'ADCP. On remarque que les mesures au courantomètre par les méthode rapides (moyenne sur 10 secondes avec un ou deux instruments) ont tendance à induire une sous-estimation du débit. La mesure au flotteur réalisée entre 2 transects de la comparaison donne des résultats cohérents, la géométrie des sections est issue des mesures réalisées à la perche. Le temps de passage des flotteurs entre les deux transects est mesurée au chronomètre. L'écart à la moyenne pour le jaugeage au flotteur est de 6 %, ce résultat est cohérent dans une configuration d'écoulement appropriée. Le protocole de mesure au flotteur peut être utilisé pour mesurer une valeur approximative du débit lorsque les conditions d'écoulement sont uniformes et régulières.

8.2.1.2 Suivi de la hauteur d'eau sur l'Ouvèze

La hauteur d'eau est enregistrée par une station de mesure (de crue) placée au niveau des derniers transects de la comparaison. La hauteur d'eau pendant les essais baisse de 4 mm entre le début et la fin. Le limnimètre est peut être décalé de +5 mm (Fig.7).

Des équipes différentes font la lecture de l'échelle en début de deuxième jaugeage, avec une lecture à 15,8 cm et l'autre à 16,5 cm. Lors d'un prochain test, il serait intéressant de faire lire l'échelle à tous les opérateurs pour estimer l'importance de l'erreur de lecture de l'opérateur.

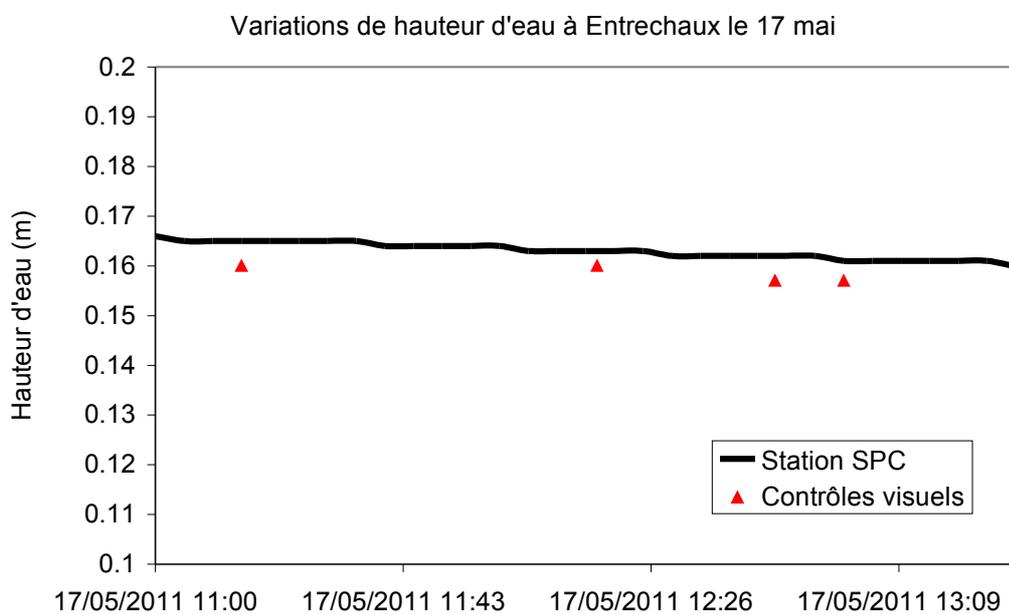


Fig. 7 Variations des hauteur d'eau sur l'Ouvèze

8.2.1.3 Mesures au distancemètre laser

Un contrôle de la largeur du cours d'eau mesurée au décimètre à ruban par chacune des équipes est réalisé avec un télémètre laser (Leica +/- 1,5mm). Les écarts (Tab. 5) vont jusqu'à 67 cm, soit 6 % de la largeur. L'une des équipes utilise un piquet support intermédiaire qui évite au ruban décimètre de plier, ce dispositif est simple à mettre en place.

Transect	Mesure disto (m)	Largeur mouillée déterminée par les équipes (m)	Écart (m)	Écart (%)
1	x	9,5	x	x
2	8,89	8,60 - 8,75	0,29	+3,37
3	8,81	9,2	-0,39	-4,24
4	9,78	9,7	0,08	+0,82
5	10	9,7	0,3	+3,09
6	x	10,9	x	x
7	10,97	10,7	0,27	+2,52
8	10,99	10,95	0,04	+0,37
9	11,77	11,1	0,67	+6,04
10	10,8	11	-0,2	-1,82
11	11,35	11,35	0	0

Tab. 5 : Mesure de la largeur au miroir

Les résultats obtenus par cette mesure de largeur au télémètre ne mettent pas en évidence que le ploiement du ruban est un problème pour cette largeur de cours d'eau. En effet la plupart des écarts sont inférieurs à 3 % et sont plutôt surestimés au télémètre laser.

8.1.3 Résultats des deux séries de jaugeages sur l'Ouvèze

Les résultats présentés sur la figure 8 sont issus des jaugeages réalisés par les 11 équipes et dépouillés selon la méthode algébrique à 3 points de la norme ISO 748. On remarque que certains points sortent de l'enveloppe des 10 % (transects 3 et 6). La baisse de la moyenne entre les deux

séries confirme la baisse de débit observée à l'échelle. Sur le transect 3, le débit est sous-estimé sur les deux séries. Cet effet n'est pas observé sur le Toulourenc donc pas systématique (ni lié à l'opérateur, ni à l'instrument) et est peut-être dû à un transect défavorable.

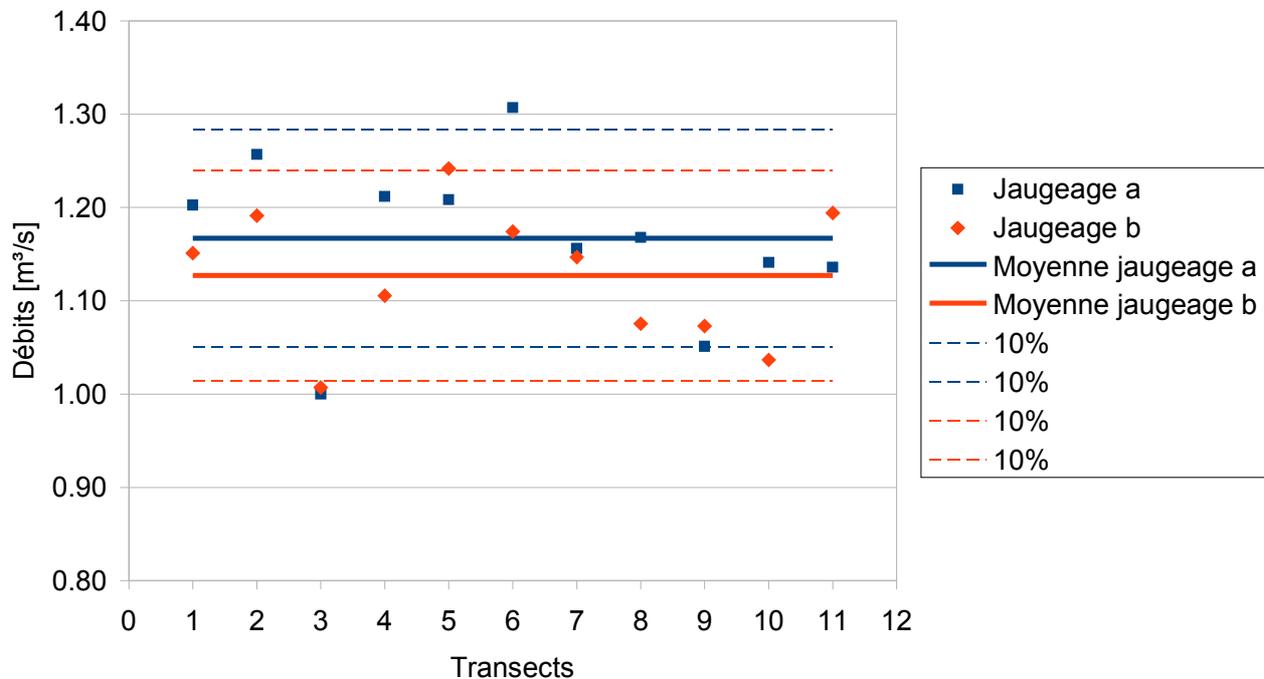


Fig. 8 : Jaugeages sur l'Ouvèze, dépouillements à 3 points (Norme ISO 748)

D'autres méthodes de dépouillement sont testées, l'objectif étant de montrer l'influence de certains paramètres (nombre de points par verticale, nombre et distribution des verticales, etc.), en traitant un même jeu de données de plusieurs manières différentes. L'objectif est d'identifier quelles peuvent être les stratégies de mesure dans une situation donnée (selon les caractéristiques de la section, ou les conditions hydrauliques rencontrées, vaut-il mieux privilégier un grand nombre de verticales ou un grand nombre de points par verticale, ou une durée de mesure limitée ?). Ces dépouillements sont effectués avec le Logiciel Q+ du Cemagref. Les 9 traitements retenus sont :

- traitement « normal » en trois points (formule algébrique selon ISO 748) ;
- traitement en 2 points (formule algébrique selon ISO 748) ;
- traitement en 1 point (formule algébrique selon ISO 748) ;
- traitement 3 points utilisant le coefficient m de rugosité (intégration en trapèzes, avec $m=2$ soit $k=0,67$); ce traitement correspond au dépouillement du logiciel Barème utilisé par les DREAL et SPC. Cette valeur de k est inférieure à la gamme indiquée par la norme ISO 748.
- traitement 3 points utilisant le coefficient m de rugosité (intégration en trapèzes, $m=6$ soit $k=0,86$). Cette valeur de k est moins rugueuse, c'est un cas classique indiqué par la norme

ISO 748.

- traitement selon la méthode japonaise (formule algébrique à 3 points selon ISO 748, une verticale de mesure sur 2 est convertie en verticale de bathymétrie avec interpolation de la vitesse) .
- traitement selon la méthode japonaise (formule algébrique à 3 points selon ISO 748, deux verticales de mesure sur 3 sont converties en verticales de bathymétrie avec interpolation de la vitesse) .
- traitement selon la formule algébrique à 3 points selon ISO 748, une verticale de mesure sur 2 est supprimée.
- traitement selon la formule algébrique à 3 points selon ISO 748, deux verticales de mesure sur 3 sont supprimées.

En annexe 1 sont représentés les différents dépouillements. Le retrait d'information avec la méthode japonaise entraîne une légère baisse du débit moyen et une dispersion plus forte lorsque que l'on élimine 1 verticale sur 2 et encore plus quand on enlève 2 verticales sur 3. La dispersion est plus forte lorsqu'on enlève les verticales japonaises (verticale avec donnée de profondeur totale uniquement). On passe alors à des jaugeages à 10 et 6 verticales pour 17 mesurées (on garde systématiquement les deux premières de chaque côté de la rivière).

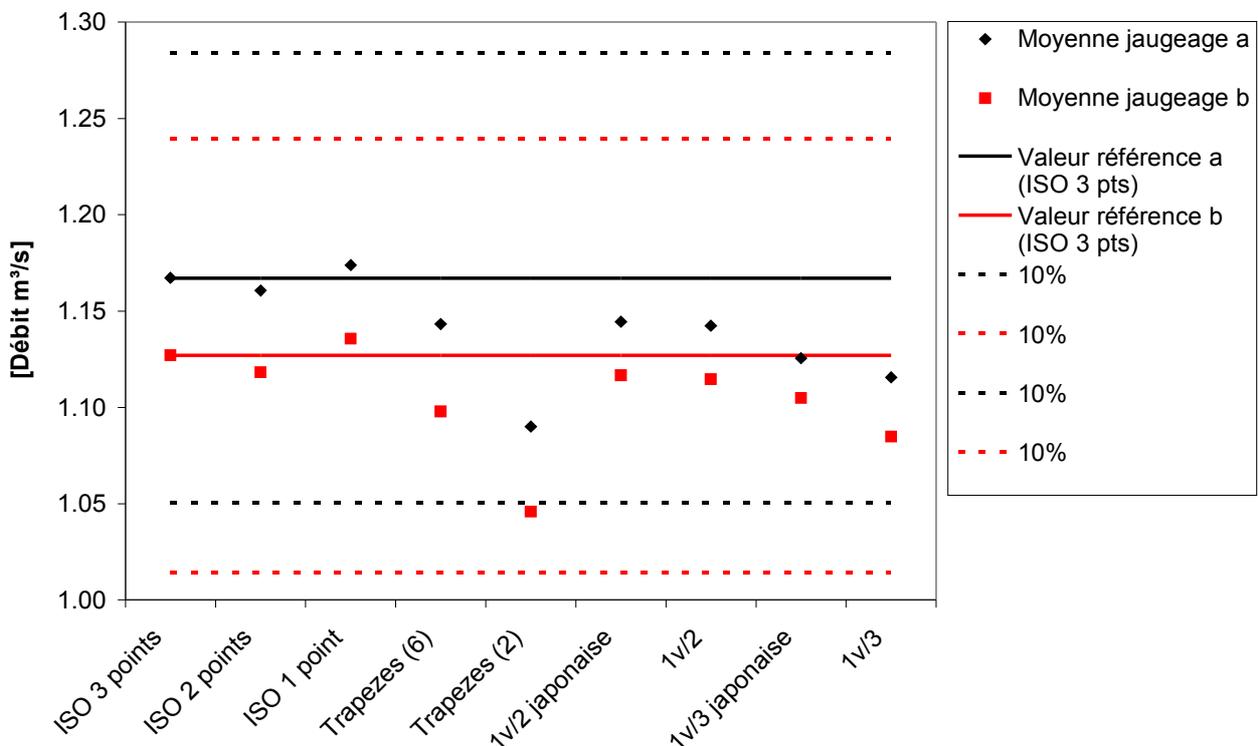


Fig. 9 : Moyenne des débits en fonction de la méthode de dépouillement sur l'Ouvèze

Si on observe les moyennes des 11 transects en fonction de la méthode de dépouillement, on remarque (Fig. 9) que les mesures issues des différents dépouillements sont assez fidèles à la mesure de référence :

- Les méthodes algébriques de la norme ISO à 2 et 3 points donnent des résultats très proches de la valeur de référence.
- Pour les dépouillement par la méthode des trapèzes, le nombre de points est insuffisant pour appliquer cette méthode (selon la norme ISO 748), on remarque l'influence du coefficient m sur les résultats. Pour $m=2$ ($k=0.67$) on a une forte sous estimation. Pour $m=6$, l'écart est moins fort.
- Lorsqu'on enlève des verticales ($1v/2$), on observe peu d'écart à la moyenne, sans différence entre le retrait direct ou la méthode japonaise.
- Lorsqu'on enlève plus de verticales ($1v/3$), on observe des écarts plus important, qui sont minimisés par la méthode japonaise.

8.2. Le Toulourenc à Malaucène

8.2.1 Répartition des équipes

Transect	Nom de l'équipe	Constitution de l'équipe	N° de série
8'	FLU_1_CLY	G. Dramais	517
1	MOU_1_SPC	C. Delcourt, N Montel Dulac	Hélice Ott (47597-2)
2	ADV_1_CLY	F. Thollet	P 1464
3	FLO_1_CAX	M. Tolsa, V Raymond*	Hyax IV
4	FLO_1_CBX	Y. Gwilherm, S. Moreira*	2000194
5	NAU_1_DRE	L. Liger + V. Vassal	224010
6	ADV_1_CMO	C. Dejean	P 2524
7	MOU_1_DRE	F. Roman + S. Valencia	Hélice Ott (23370)
8	FLO_2_CAN	A. Guerin, C. Chaumont	2007149
	STR_1_CLY	J. Le Coz, Y Le Coarer, G. Almansa	854
9	FLO_1_CAN	A. Zahm, P. Ansart,	2005703
10	ADC_2_SCP	P. Phandong	250165
11	ADC_1_SCP	C. Parre	224010

*Changement d'opérateur

Tab. 6 : Répartition des équipes sur le Toulourenc

Les équipes sont placées dans le même ordre que sur l'Ouvèze avec les mêmes capteurs, sur deux tronçons. Les deux tronçons ont le même faciès et sont distants de 50 m.

8.2.2 Mesures complémentaires

8.2.2.1 Débit

- Mesures ADCP

Contrôle de stabilité par mesure de débit en continu avec un ADCP Streampro entre les 2 tronçons (transects 1-8 et 9-11).

Capteur	Valeur complémentaire (m ³ /s)	Déploiement	heure TU+2	Commentaire
STR_1_CLY	0,35	Idem Ouvèze	15:25:30	Moyenne de 6 traversées, 30% de débit mesuré
STR_1_CLY	0,37	Idem Ouvèze	15:39:50	Moyenne de 6 traversées, 30% de débit mesuré
STR_1_CLY	0,36	Idem Ouvèze	15:51:11	Moyenne de 6 traversées, 30% de débit mesuré
FLU_1_CLY	0,36	Injection méthode globale	16:00:00	Mesure par traçage à la rhodamine WT
STR_1_CLY	0,39	Idem Ouvèze	16:11:23	Moyenne de 6 traversées, 30% de débit mesuré
STR_1_CLY	0,37	Idem Ouvèze	16:20:24	Moyenne de 6 traversées, 30% de débit mesuré
STR_1_CLY	0,38	Idem Ouvèze	16:28:37	Moyenne de 6 traversées, 30% de débit mesuré
STR_1_CLY	0,38	Idem Ouvèze	16:37:43	Moyenne de 6 traversées, 30% de débit mesuré
Courbe de tarage	0,478-0,581			Courbe de tarage mal connue pour les faibles débits (déjà identifié par SPC GD). Comme pour l'Ouvéze il s'agit d'une station d'alerte de crue, insensible et instable à bas débit (pas d'ouvrage de contrôle à bas débit).

Tab. 7 : Mesures complémentaires sur le Toulourenc

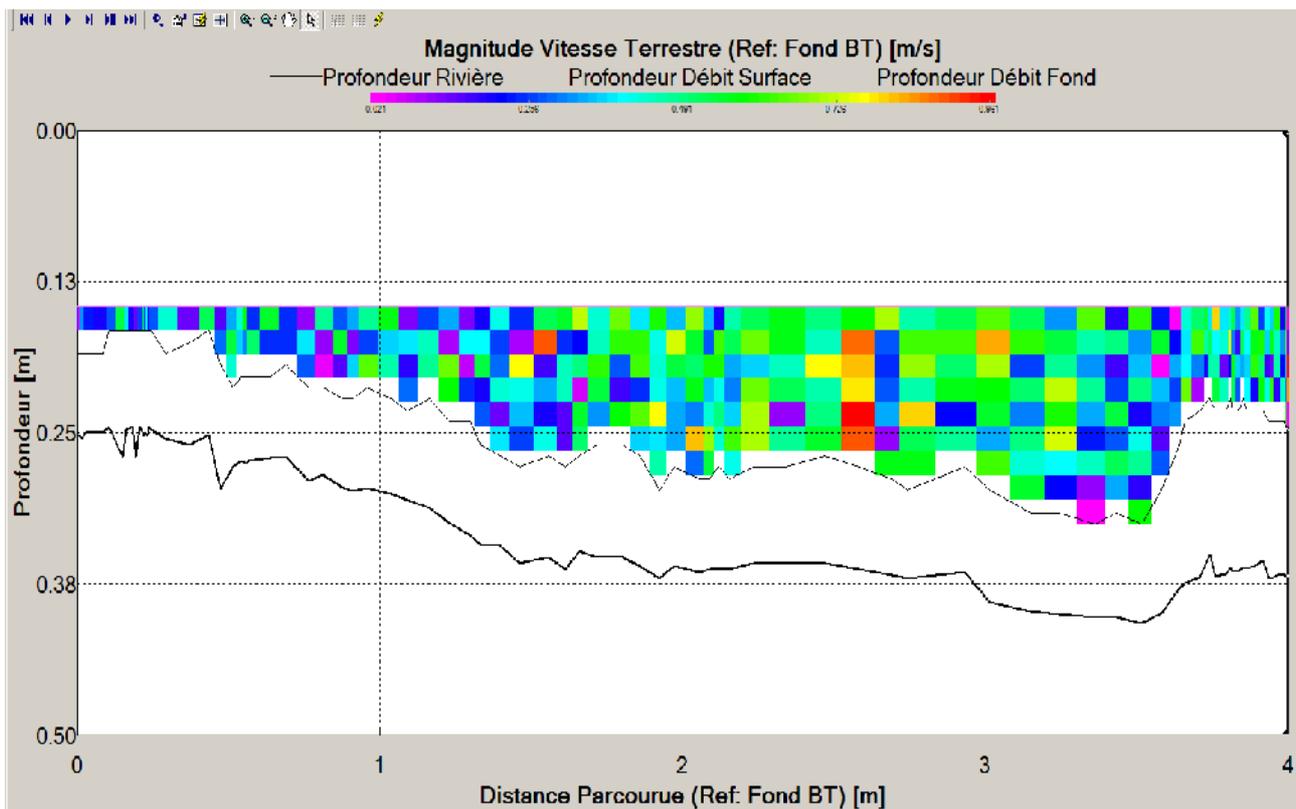


Fig. 10 : Transect ADCP sur le Toulourenc

La figure 10 représente la section de mesure ADCP qui est très peu profonde (40 cm maximum), mais la mesure est possible. Cependant seulement 30 % de la section est mesurée, les coefficients d'extrapolation doivent donc être finement ajustés.

- Mesures par dilution

Un jaugeage par traçage à la rhodamine est réalisé à la fin de la première série de jaugeages. Le fluorimètre utilisé est un fluorimètre Albillia GGUN.

12,5 ml de rhodamine WT sont injectés à 15:52 en amont du site de mesure. Le jaugeage dure 20 minutes. Le signal de concentration est enregistré 150 m en aval du point d'injection. Le fluorimètre 517 est placé dans la veine rapide en rive droite, le débit obtenu est de 360 l/s. Le jaugeage est dépouillé avec le logiciel Fluo d'Albillia. La figure 11 montre le signal de fluorescence mesuré. L'intégration de ce signal pendant la durée de passage du nuage et la masse de traceur injecté nous permettent de calculer le débit selon la formule de dilution.

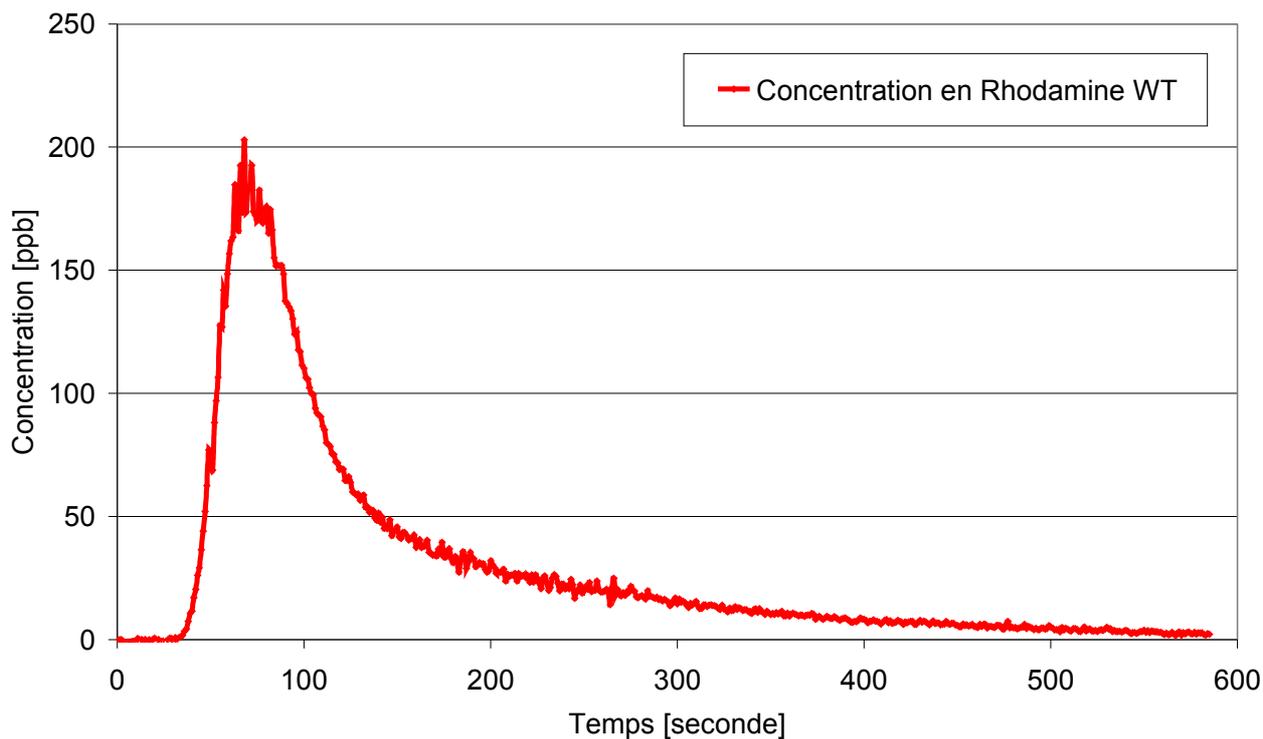


Fig. 11 : Évolution du signal de fluorescence sur le Toulourenc (pseudo ppb)

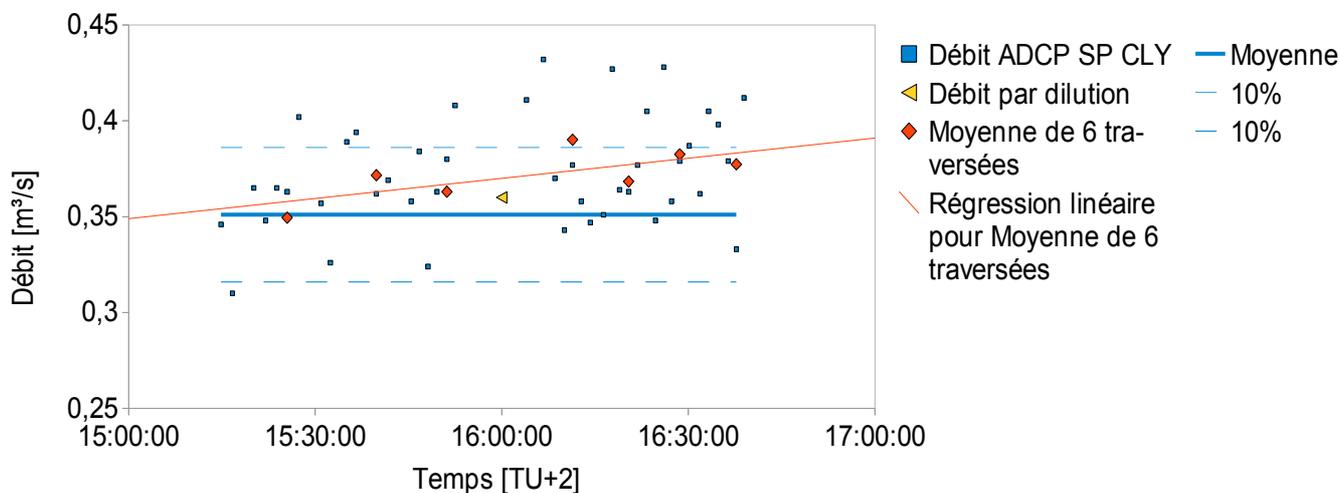


Fig. 12: Evolution du débit et mesures complémentaires sur le Toulourenc

La figure 12 illustre le bon accord entre les mesures complémentaires et la moyenne des mesures au courantomètre sur perche.

- La moyenne des jaugeages ADCP est 5,7 % au dessus de la moyenne des jaugeages au courantomètre.
- Les mesures ADCP sont un dispersées transect par transect, cela n'est pas surprenant pour ce genre de mesures. On observe une très légère tendance à la hausse pendant le temps du test,

celle-ci n'est pas confirmée par les valeurs à l'échelle ni par les jaugeages à la perche.

- Les moyennes de six transects successifs sont dans l'enveloppe des 10 % autour de la moyenne de tous les débits ADCP (non représenté sur la figure), on remarque une tendance du débit à la hausse, celle-ci n'est pas détectée par le limnigraphe, ni par les contrôles visuels.
- Nous sommes dans les bonnes conditions d'utilisation de la méthode par dilution de traceur. Le jaugeage par dilution s'écarte de -2,8 % de la moyenne des jaugeages ADCP et de +2,5 % de la moyenne des jaugeages au courantomètre.

8.2.2.2 Suivi de la hauteur d'eau sur le Toulourenc

La hauteur d'eau est enregistrée par une station de mesure placée en amont des transects de la comparaison (Figure 13). La hauteur d'eau pendant les essais baisse de 1 mm entre le début et la fin. Les contrôles visuels par le même opérateur sont sur-estimés de 7 à 14 mm, l'échelle est très peu lisible dans cette zone. Le contrôle a pu être perturbé par la présence de baigneurs qui ont pu modifier les écoulements.

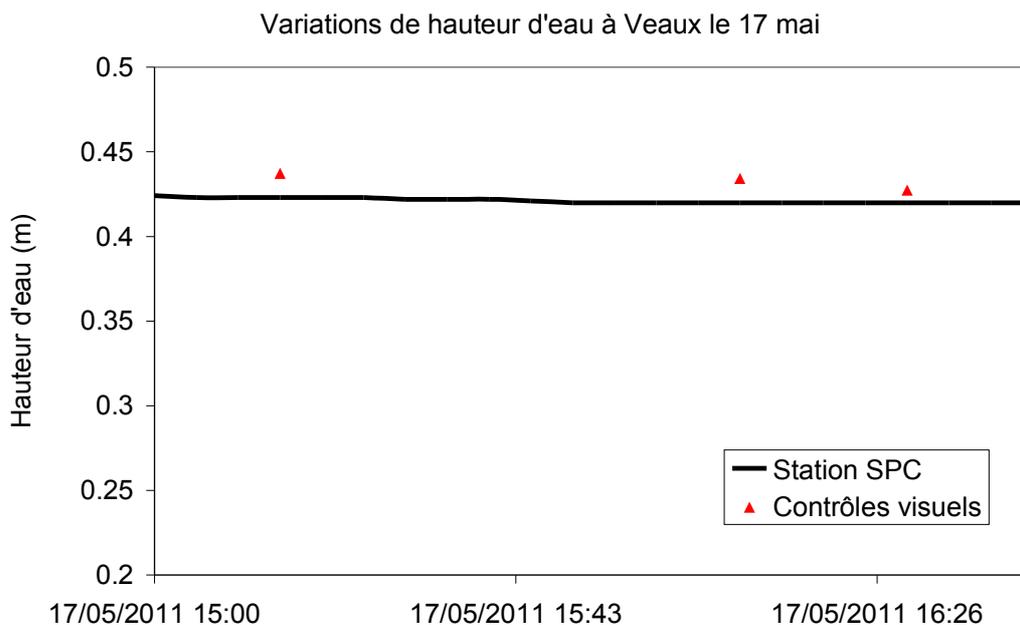


Fig. 13 : Suivi de la hauteur d'eau sur le Toulourenc

8.2.3 Résultats des deux séries de jaugeages sur le Toulourenc

Les résultats présentés sur la figure 14 sont issus des jaugeages réalisés par 10 équipes et dépouillés selon la méthode algébrique à 3 points de la norme ISO 748 (l'équipe N°1 est écartée de l'étude car elle ne respecte pas le protocole imposé). On remarque que certains points sortent de l'enveloppe des 10 % (transects 2 et 4) peut-être à cause de transects défavorables. La baisse de la moyenne entre les deux séries est très faible.

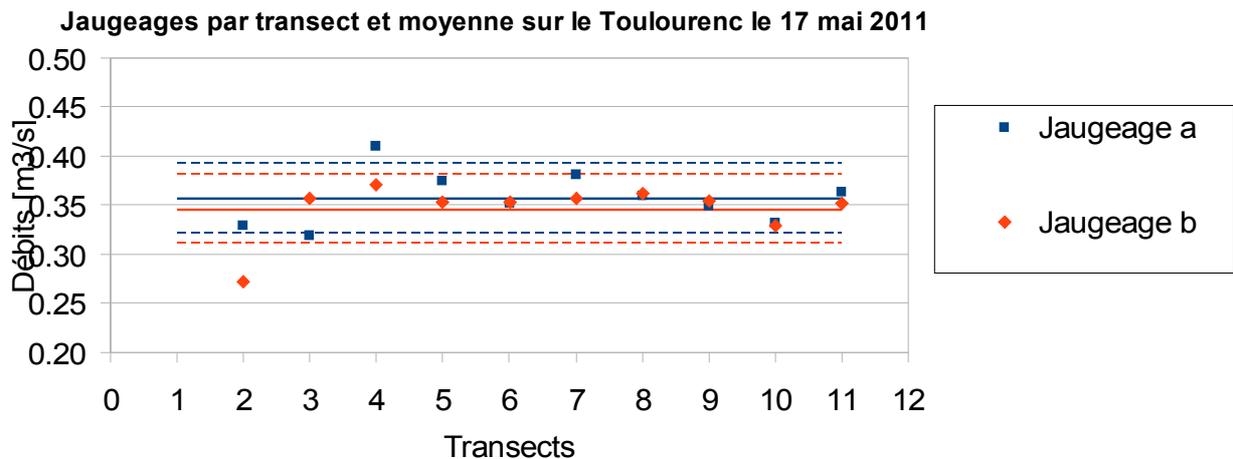


Fig. 14 : Jaugeages sur le Toulourenc, dépouillements à 3 points (Norme ISO 748)

En annexe 2 sont représentés les différents dépouillements. Le retrait d'information avec la méthode japonaise entraîne une légère baisse du débit moyen et une dispersion plus forte lorsque que l'on élimine 1 verticale sur 2 et encore plus quand on enlève 2 verticales sur 3. La dispersion est encore plus forte lorsqu'on enlève les verticales japonaises (verticale avec donnée de profondeur totale uniquement) on passe alors à des jaugeages à 10 et 6 verticales pour 17 mesurées (on garde systématiquement les deux première de chaque côté de la rivière).

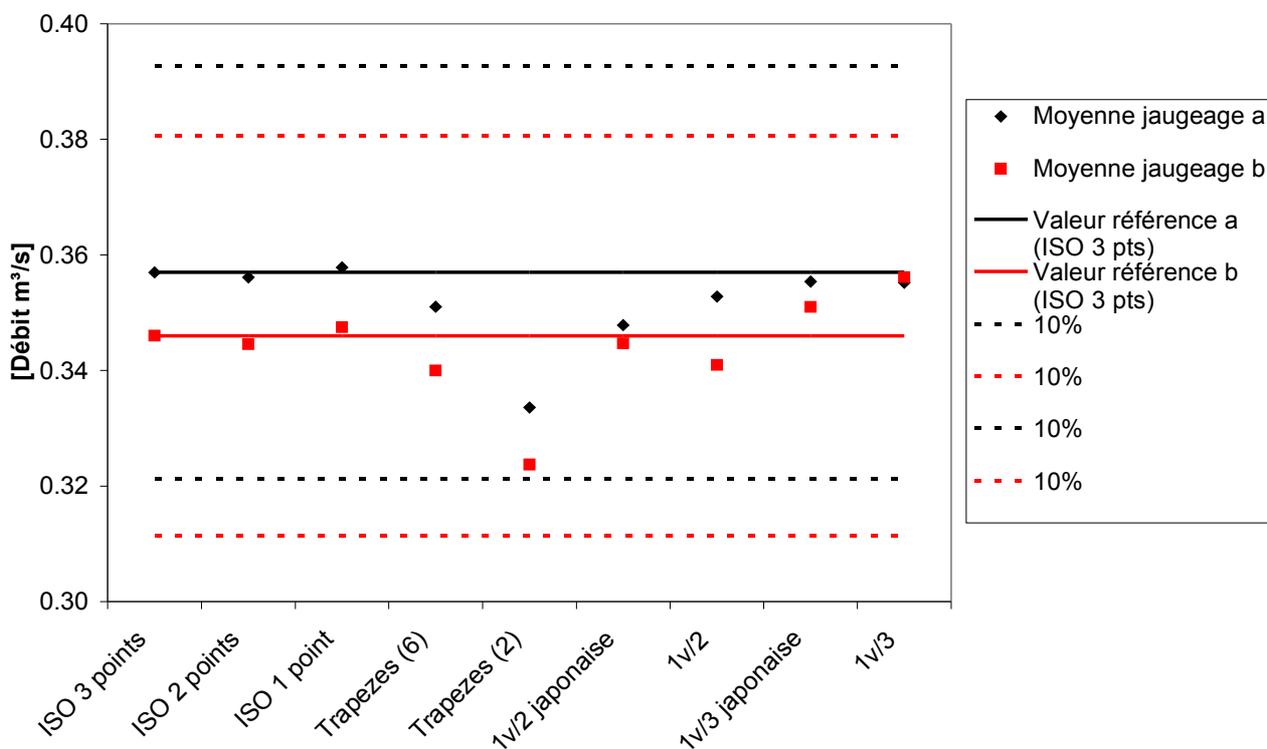


Fig. 15 : Moyenne des débits en fonction de la méthode de dépouillement sur le Toulourenc

Si on observe les moyennes des 10 transects en fonction de la méthode de dépouillement on remarque (Fig. 15) que les mesures issues des différents dépouillements sont comme pour le cas de l'Ouvèze assez fidèles à la mesure de référence :

- Les méthodes algébriques de la norme ISO à 2 et 3 points donnent des résultats très proches de la valeur de référence.
- Pour les dépouillement par la méthode des trapèzes le nombre de points est insuffisant pour appliquer cette méthode (selon la norme ISO 748), on remarque l'influence du coefficient m sur les résultats. Pour m=2 (k=0.67) on a une forte sous estimation. Pour m=6 l'écart est moins fort.
- L'amélioration apportée par la méthode japonaise est moins évidente dans le cas du Toulourenc.

8.3. Canal de provence à Pourrières le 18 mai

8.3.1 Répartition des équipes

Transect	Capteur	Constitution de l'équipe	Déploiement	N° Série
1	C_RIO_1_CLY	G. Dramais, S. Moreira, A Guerin	Trimaran OS	3953
2	C_STR_1_CLY	F. Thollet, L. Liger, C. Chaumon	Petit catamaran OS	854
3	C_STR_1_SPC	C. Delcourt, G. Yann, A Zahm	Trimaran OS	/
4	C_QLI_1_CMO	C. Dejean, M. Tolsa	Catamaran Ott	/
5	C_QLI_1_SCP	C. Parre, P. Phandong, Y. Le Coarer	Catamaran Ott	/
6	C_STR_1_DRE	V. Vassal, F. Roman, S. Valencia	Trimaran OS	1055
7	C_CAM_1_SPC	G. Almansa, N. Montel-Dulac	Point par point puis intégration	Industron / C31
7	C_CAM_1_DRE	V. Vassal, F. Roman, S. Valencia	Point par point	Nominal Ingenierie / C31

Tab. 8 : Equipes & instruments mis en place sur le canal de Pourrières

8.3.2 Résultats

Capteur	Débit moyen (m ³ /s)	Commentaire
<i>Télégestion canal</i>	4,00	<i>Mesure non prise en compte dans la moyenne</i>
C_RIO_1_CLY	3,56	Moyenne de 29 transects (4 jaugages)
C_STR_1_CLY	3,27	Moyenne de 21 transects (3 jaugages)
C_STR_1_SPC	3,39	Moyenne de 34 transects (5 jaugages)
C_QLI_1_CMO	x	Problème alimentation et communication
C_QLI_1_SCP	3,64	Moyenne de 2 jaugages complets
C_STR_1_DRE	3,5	Moyenne de 24 transects
C_CAM_1_SPC	3,45	Moyenne de 2 jaugages complets (point par point et intégration)
C_CAM_1_DRE	3,28	Jaugeage point par point en fin de palier stabilisé
C_Flotteurs	3,09	<i>Mesure non prise en compte car réalisée à 17h30 après la fin du palier stabilisé</i>
Moyenne	3,48	

Tab. 9 : Mesures sur le canal de Pourrières

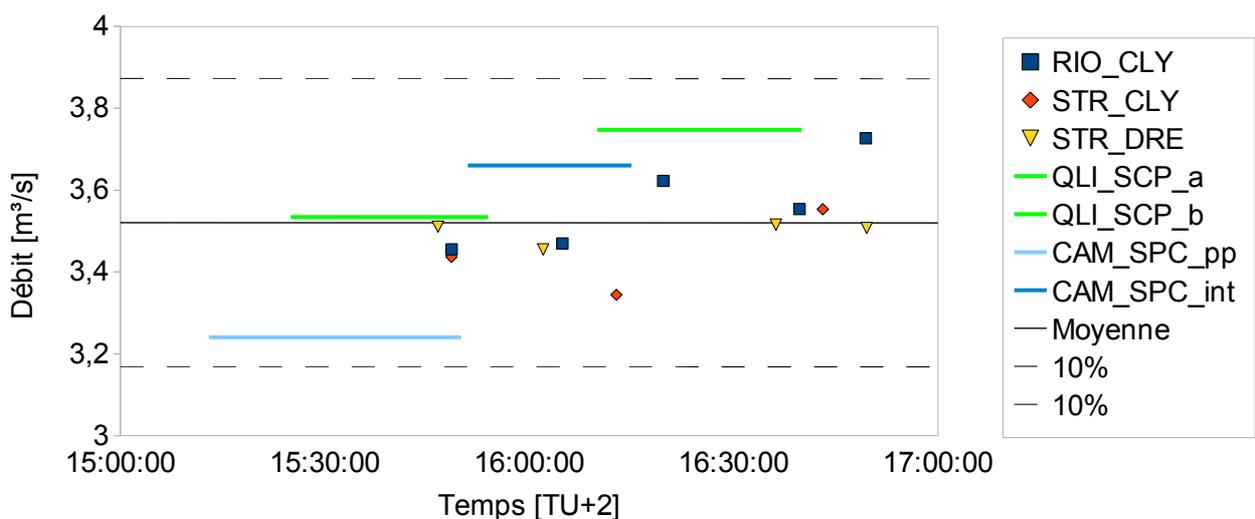


Fig. 16: Évolution du débit du canal de Provence le 18 mai 2011

Les points ADCP (STR et RIO) de la figure 16 sont des moyennes de 6 transects conformément aux bonnes pratiques (Groupe Doppler). La moyenne du tableau 9 est calculée à partir des lots de 6 transects ADCP et des autres jaugeages, elle est de $3,48 \text{ m}^3/\text{s}$.

Les jaugeages au Q-Liner et les jaugeages au camion jaugeur sont représentés par des segments sur la figure 16 en fonction de la durée du jaugeage.

Tous les jaugeages sont dans l'enveloppe de 10 % autour de la moyenne de toutes les mesures. Les très bonnes conditions de mesures (section trapézoïdale, débit stable) nous permettent de faire une comparaison très intéressante des différents moyens de mesure.

Les essais réalisés sur le canal de Pourrières sont intéressants toutefois ils ne seront pas exploités dans la section suivante. Il est cependant rassurant que des technologies de mesure différentes déployées chacune avec son protocole propre sur un même tronçon donnent des résultats si proches.

9. Méthode d'analyse et interprétation

9.1. Objectif

L'objectif de la comparaison est de déterminer l'incertitude des mesures de débit réalisées par courantométrie, en s'appuyant sur les résultats de la comparaison des résultats obtenus par 11 équipes, sur deux sites présentant chacun un débit différent.

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

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

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

9.2. Hypothèses

Les hypothèses nécessaires à l'application de ces deux 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.

9.3. Méthode

Les principales étapes de calcul de la norme ISO 5725-2 sont les suivantes :

- Recueil et mise en forme des données
- Examen des valeurs
 - Calcul des statistiques h et k de Mandel
 - Détection des valeurs aberrantes (mise en œuvre des tests de Grubbs et Cochran¹)
- Calcul de l'écart-type de répétabilité
- Calcul de l'écart-type inter-laboratoire
- Calcul de l'écart-type de reproductibilité

Ces étapes sont détaillées dans le paragraphe suivant, puis l'application aux valeurs observées lors de la campagne de comparaison est réalisée au paragraphe 9.5.

9.4. Procédure de calcul détaillée

La variance des données expérimentales est composée de la variance de répétabilité et de la variance interlaboratoire, selon le modèle de décomposition de la variance suivant :

$$y = \bar{\delta} + B + \varepsilon \quad (1)$$

avec

- y est le résultat expérimental fourni par une équipe² ;
- $\bar{\delta}$ est la valeur de référence ;
- B est le biais de l'équipe, dont la variance est notée S_L^2 ;
- ε est l'erreur aléatoire, supposée suivre une loi normale centrée sur 0 et de variance égale pour toutes les équipes, notée S_r^2 .

Notations

- i est l'indice de l'équipe, de 1 à p (p est le nombre total d'équipes) ;
- j est l'indice du "niveau", de 1 à q ($q = 2$ est le nombre total de "niveaux" de la

¹ Ces tests n'ont pas de caractère obligatoire ; d'autres tests peuvent être réalisés, à l'initiative de l'équipe en charge de l'analyse statistique et en accord avec les participants.

² Dans ce rapport, la notion d' "équipe" correspond à la notion de "laboratoire" de la norme 5725-2.

comparaison, c'est à dire les valeurs nominales des débits) ;

- k est l'indice du résultat, de 1 à n_{ij} (n_{ij} est le nombre de résultats de l'équipe i au niveau j : ici, $n_{ij}=2$ pour toutes les équipes et tous les niveaux).

1/ Calcul des moyennes par cellule (5725-2 : § 7.2.9)

Pour chaque cellule (une cellule est l'ensemble des résultats d'une équipe pour un débit donné), la moyenne est calculée par la formule :

$$\bar{y}_{ij} = \frac{1}{n_{ij}} \sum_{k=1}^2 y_{ijk} \quad (1)$$

2/ Calcul des dispersions par cellule (5725-2 : § 7.2.10)

Pour chaque cellule, le nombre de valeurs par cellule étant de 2, l'écart-type est calculé par :

$$s_{ij} = \frac{|y_{ij2} - y_{ij1}|}{\sqrt{2}} \quad (2)$$

Note : pour un nombre de valeurs supérieur à 2, l'écart-type est calculé par la formule classique de l'écart-type expérimental.

3/ Calcul de la statistique h par cellule (5725-2 : § 7.3.1.1)

Pour chaque cellule, la statistique h de Mandel est calculée par :

$$h_{ij} = \frac{\bar{y}_{ij} - \bar{y}_j}{\sqrt{\frac{1}{p_j - 1} \sum_{i=1}^{p_j} (\bar{y}_{ij} - \bar{y}_j)^2}} \quad (3)$$

4/ Calcul de la statistique k par cellule (5725-2 : § 7.3.1.2)

Pour chaque cellule, la statistique k de Mandel est calculée par :

$$k_{ij} = s_{ij} \frac{\sqrt{p_j}}{\sum_{k=1}^2 s_{ij}^2} \quad (4)$$

5/ Représentation graphique des statistiques h et k

Les statistiques h et k sont des statistiques de cohérence, destinées avant tout à un examen graphique, en vue d'identifier rapidement des laboratoires présentant un comportement commun à plusieurs niveaux, en termes de justesse (statistique h) ou en termes de dispersion (statistique k).

6/ Calcul de la moyenne générale (5725-2 : § 7.4.4)

La moyenne générale de chaque niveau est calculée par :

$$\hat{m} = \bar{y}_j \quad (5)$$

7/ Calcul de la variance de répétabilité (5725-2 : § 7.4.5.1)

La variance de répétabilité est obtenue par la formule :

$$s_{rij}^2 = \frac{\sum_{i=1}^p (n_{ij} - 1) s_{ij}^2}{\sum_{i=1}^p (n_{ij} - 1)} \quad (6)$$

Ici, avec $n_{ij}=2$ pour toutes les valeurs de i et j ,

$$s_{rj}^2 = \frac{\sum_{i=1}^p s_{ij}^2}{p} \quad (6)$$

8/ Calcul de la variance interlaboratoire (5725-2 : § 7.4.5.2)

La variance interlaboratoire est :

$$s_{Lj}^2 = \frac{s_{dj}^2 - s_{rj}^2}{\bar{n}_j} \quad (7)$$

avec :

$$s_{dj}^2 = \frac{1}{p-1} \sum_{i=1}^p n_{ij} (y_{ij} - \bar{y}_j)^2 \quad (8)$$

$$\bar{n}_j = 2 \quad (9)$$

Notes :

- ici, $\bar{n}_j=2$ car le nombre de résultats fournis par les équipes est égal à 2 pour tous les niveaux. Dans certains cas, les n_{ij} étant différents, \bar{n}_j n'est pas entier (voir formule complète dans l'ISO 5725-2).
- si le calcul conduit à une valeur négative de la variance interlaboratoire s_{Lj}^2 (variance de répétabilité inférieure à la variance des moyennes des laboratoires), alors cette dernière est forcée égale à zéro.

9/ Calcul de la variance de reproductibilité (5725-2 : § 7.4.5.5)

$$s_R^2 = s_L^2 + s_r^2 \quad (10)$$

10/ Estimation de l'incertitude associée à une observation (21748 : § 5.3.2)

Si les hypothèses sont respectées, en particulier si toutes les sources d'erreur ont pu s'exprimer au cours de la comparaison, alors on peut écrire :

$$u(y) = s_R \quad (11)$$

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

$$U(y) = 2 \cdot s_R \quad (12)$$

9.5. Application

Les relations précédentes sont appliquées aux résultats fournis par les équipes sur l'Ouvèze et le Toulourenc, avec la méthode “3 points” qui constitue la méthode de référence dans le cadre de cette comparaison.

Les valeurs mesurées figurent dans le tableau 10 et la figure 17 ci-dessous.

	Ouvèze		Toulourenc	
	1 ^{ère} mesure	2 ^{ème} mesure	1 ^{ère} mesure	2 ^{ème} mesure
O_01_MOU_1_SPC	1,203	1,151		
O_02_ADV_1_CLY	1,257	1,191	0,329	0,272
O_03_FLO_1_CAX	1,000	1,007	0,319	0,357
O_04_FLO_1_CBX	1,212	1,106	0,411	0,371
O_05_NAU_1_DRE	1,209	1,242	0,374	0,353
O_06_ADV_1_CMO	1,307	1,174	0,352	0,353
O_07_MOU_1_DRE	1,156	1,147	0,381	0,357
O_08_FLO_2_CAN	1,168	1,076	0,359	0,363
O_09_FLO_1_CAN	1,051	1,073	0,349	0,355
O_10_ADC_2_SCP	1,141	1,037	0,332	0,329
O_11_ADC_1_SCP	1,136	1,194	0,363	0,352

Tab. 10: Tableau des mesures : débits en m³/s

L'équipe n°1 n'ayant pas fourni de résultat pour le Toulourenc, il a été décidé de ne pas prendre en compte ses résultats et de ne tenir compte que de 10 équipes ($p=10$).

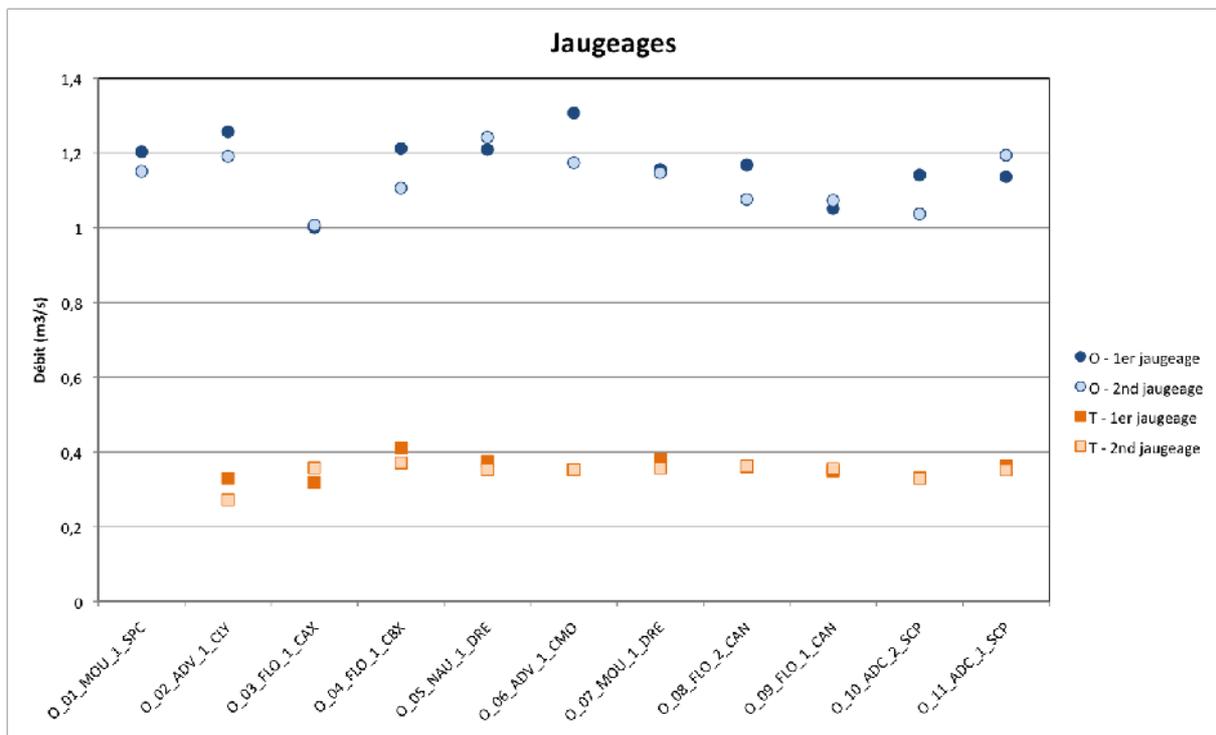


Fig. 17: Jaugeages réalisés sur l'Ouvèze (ronds bleus) et le Toulourenc (carrés oranges)

Les moyennes et écarts-types par cellule sont calculés dans le tableau 11, puis les statistiques h et k de Mandel dans le tableau 12.

	Moyennes		Ecart-types	
	Ouvèze	Toulourenc	Ouvèze	Toulourenc
O_02_ADV_1_CLY	1,22	0,30	0,047	0,040
O_03_FLO_1_CAX	1,00	0,34	0,005	0,027
O_04_FLO_1_CBX	1,16	0,39	0,075	0,028
O_05_NAU_1_DRE	1,23	0,36	0,023	0,015
O_06_ADV_1_CMO	1,24	0,35	0,094	0,001
O_07_MOU_1_DRE	1,15	0,37	0,006	0,017
O_08_FLO_2_CAN	1,12	0,36	0,065	0,003
O_09_FLO_1_CAN	1,06	0,35	0,016	0,004
O_10_ADC_2_SCP	1,09	0,33	0,074	0,002
O_11_ADC_1_SCP	1,17	0,36	0,041	0,008
<i>Moyenne</i>	1,144	0,352		
<i>Ecart-type des moyennes</i>	0,077	0,024		

Tab. 11: Moyennes et écarts-types par cellule : débits en m^3/s

	Statistique h		Statistique k	
	Ouvèze	Toulourenc	Ouvèze	Toulourenc
O_02_ADV_1_CLY	1,04	-2,09	2,75	6,58
O_03_FLO_1_CAX	-1,83	-0,56	0,29	4,39
O_04_FLO_1_CBX	0,19	1,62	4,42	4,62
O_05_NAU_1_DRE	1,06	0,49	1,37	2,43
O_06_ADV_1_CMO	1,25	0,04	5,54	0,12
O_07_MOU_1_DRE	0,10	0,71	0,37	2,77
O_08_FLO_2_CAN	-0,29	0,39	3,83	0,46
O_09_FLO_1_CAN	-1,07	0,02	0,92	0,69
O_10_ADC_2_SCP	-0,72	-0,86	4,33	0,35
O_11_ADC_1_SCP	0,27	0,24	2,42	1,27

Tab. 12: Statistiques h et k

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 essentiel de détecter si une ou plusieurs équipes présentent une variabilité notablement supérieure aux autres, ce qui pourrait indiquer la présence d'erreurs aléatoires importantes au sein de ces équipes.

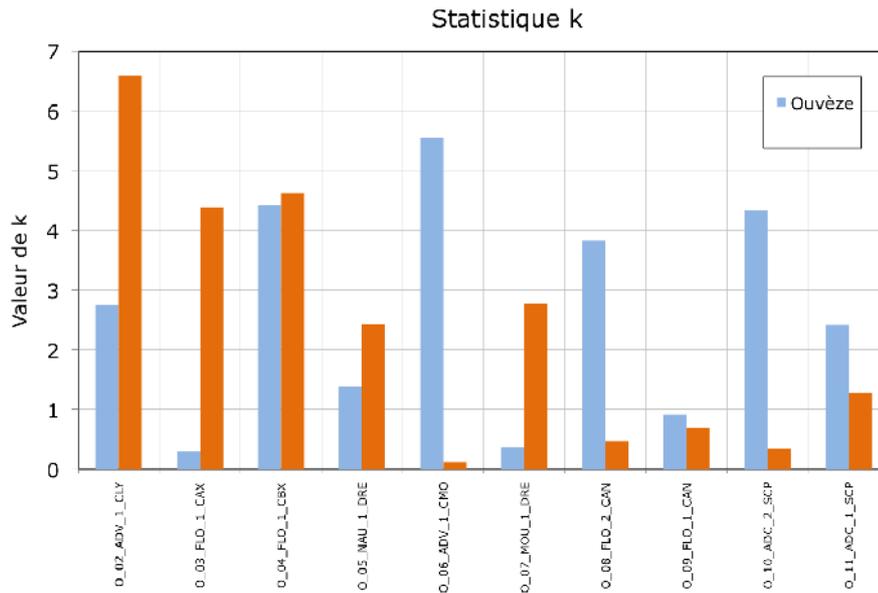


Fig. 18 : Statistique k

Le graphique (Fig. 18) montre que les équipes ont des dispersions qui peuvent être très différentes d'un débit à l'autre, mais qu'aucune équipe n'a un comportement très différent des autres (hormis peut être l'équipe 09_FLO_1_CAN qui présente une dispersion très faible pour les deux débits).

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

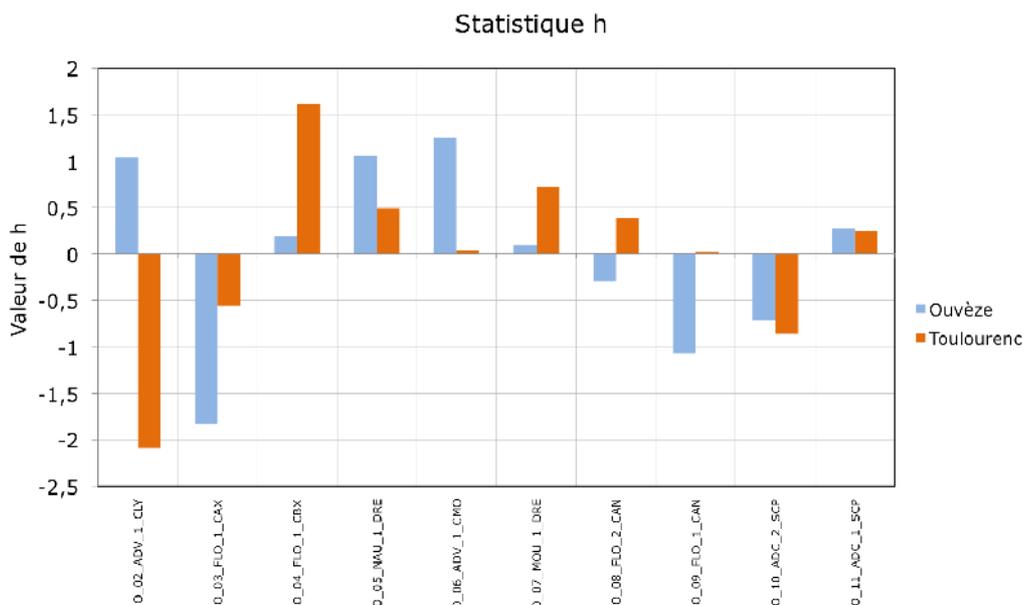


Fig 19 : Statistique h

L'examen du graphique de la statistique h (Fig. 19) montre que 7 équipes ont une erreur systématique de même sens pour les deux débits, à l'exception des équipes 2, 8 et 9. Les valeurs de h extrêmes ne sont pas concentrées sur une seule équipe mais sont obtenues pour trois équipes (n°2, 3 et 4).

A l'issue de cet examen des statistiques h et k , aucune équipe ne présente un comportement très différent des autres, susceptible de conduire à des tests statistiques de détection de valeurs aberrantes. Les calculs sont donc poursuivis avec les 10 équipes.

Les relations (6) à (10) sont appliquées (tableau 13) :

	en $(m^3/s)^2$	Ouvèze	Toulourenc
Variance de répétabilité	s_r^2	$2,88.10^{-3}$	$3,75.10^{-4}$
Variance s_d	s_d^2	$1,18.10^{-2}$	$1,19.10^{-3}$
Variance interlaboratoire	s_L^2	$4,45.10^{-3}$	$4,08.10^{-4}$
Variance de reproductibilité	s_R^2	$7,34.10^{-3}$	$7,83.10^{-4}$

Tab. 13 : Variances

Les écarts-types sont calculés (tab. 14 et fig. 20) et rapportés à la valeur moyenne du débit.

		Ouvèze		Toulourenc	
		(m^3/s)	%	(m^3/s)	%
Ecart-type de répétabilité	s_r	0,054	4,7%	0,019	5,5%
Ecart-type interlaboratoire	s_L	0,067	5,8%	0,020	5,7%
Ecart-type de reproductibilité	s_R	0,086	7,5%	0,028	8,0%
Incertitude élargie (k=2)	U	0,17	15 %	0,06	16 %

Tab. 14: Résultats

Ecart-types en fonction du débit

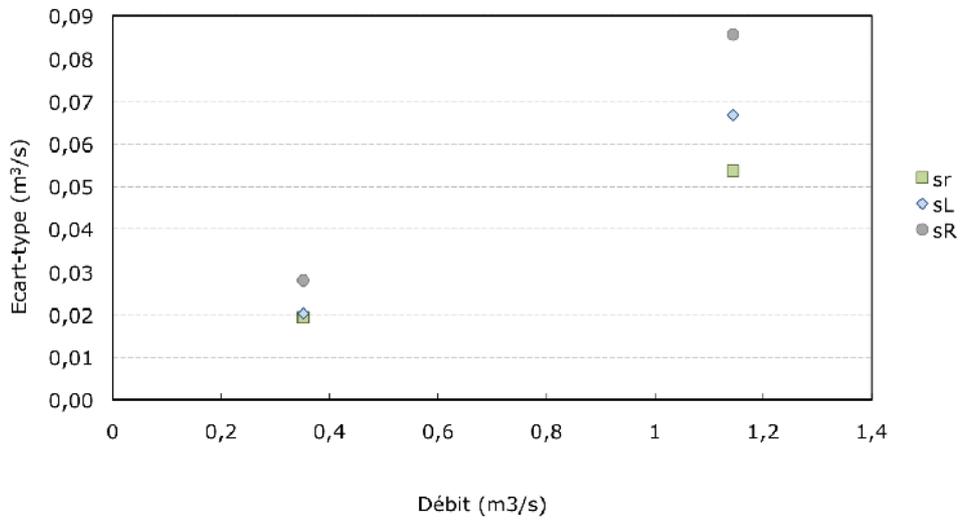


Fig. 20 : Répétabilité (s_r), Interlaboratoire (s_L) et
Reproductibilité (s_R) en fonction du débit

Le **graphique de Youden** (fig. 21) 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.

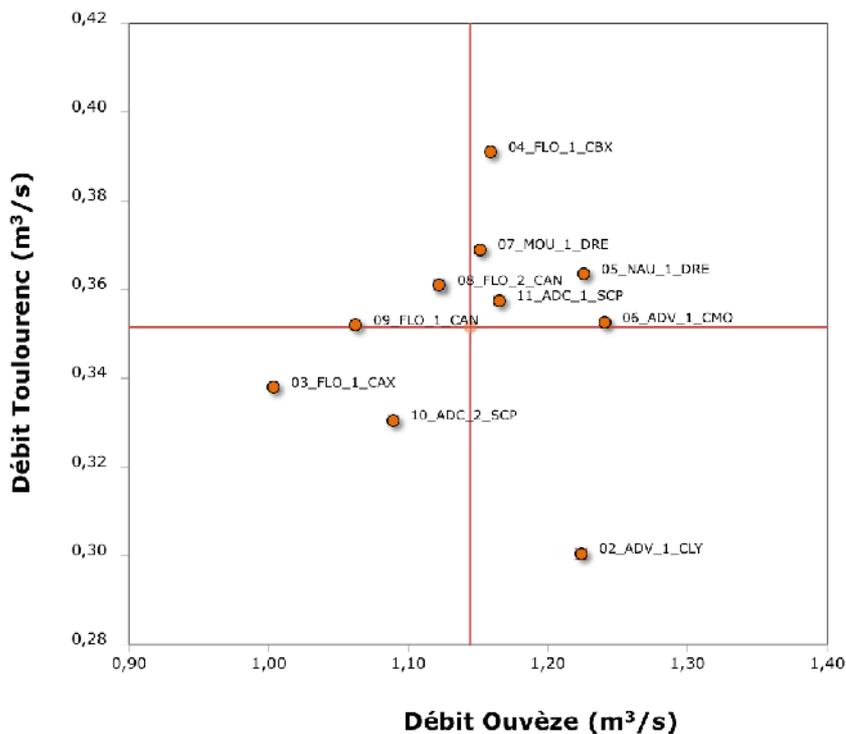


Fig. 21: Graphique de Youden

Interprétation du graphique de Youden (Fig. 21) : les équipes dont les résultats sont sur la diagonale principale ont une erreur systématique de même sens pour les deux sites.

Ici, la majorité des équipes présentent une erreur de même signe, à l'exception de l'équipe 02_ADV_1_CLY, qui surestime le débit mesuré sur l'Ouvèze mais sous-estime le débit du Toulourenc et, dans une moindre mesure, de l'équipe 08_FLO_1_CAN qui sous-estime le débit de l'Ouvèze mais sur-estime celui du Toulourenc. Il y a peut être des raisons à chercher pour expliquer ces écarts (transects défavorables, hauteur d'eau trop faible sur le Toulourenc, erreur de manipulation de l'instrument...)

D'autres graphiques de Youden peuvent être tracés, comme par exemple la valeur de la 2^{ème} mesure en fonction de la 1^{ère}, pour chaque site. Ces tracés peuvent mettre en évidence une dérive du mesurande au cours de la comparaison, ce qui est le cas pour l'Ouvèze (confirmé par l'enregistrement

9.6. Conclusion

Le premier résultat de cette comparaison est de montrer que les traitements statistiques de la norme 5725-2 sont applicables sans contraintes particulières aux résultats de courantométrie sur perche, et plus généralement aux débits mesurés en rivière.

Un second résultat, qui en découle directement, est qu'il est possible d'assigner une incertitude élargie aux mesures de débit réalisées par courantométrie sur perche.

Les écarts-types de répétabilité sont de l'ordre de 5 % pour les deux débits mesurés (Ouvèze et Toulourenc), tandis que les écarts-types interlaboratoires sont de l'ordre de 6 %, ce qui conduit à un écart-type de reproductibilité de 7,5 % à 8 %, donc à une incertitude élargie (à 95 %) de l'ordre de 15 à 16 %.

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 $\pm 16\%$ (à 95 %). Cette valeur d'incertitude est pénalisée par la variation de débit sur l'Ouvèze entre les jaugeages a et b, l'impact de cette variation est cependant difficile à évaluer.

10. Enseignements & recommandations

Ce type de campagne de mesure est très riche au niveau des enseignements sur la méthode de mesure, le déploiement des instruments et sur les pratiques de chacun.

Il faut retenir quelques recommandations pratiques :

- Les heures et fuseau horaire sont des données très importantes qui sont parfois négligées mais qui peuvent entraîner de graves confusions.
- Si l'on regarde en détail les fiches de terrain où il était demandé d'identifier les verticales

influencées par l'équipe amont, on s'aperçoit sans pouvoir le quantifier que les profils de vitesses sont affectés. Lors de prochains essais il faut privilégier des tronçons plus longs, permettant des écarts entre équipes plus importants (> 7m).

- Le test de la méthode japonaise (meilleure description de la géométrie, retrait de verticales de vitesses) montre qu'une information de vitesse moins fine est suffisante pour obtenir un résultat cohérent. Lors d'évènements de crues ou sur les cours d'eau qui varient rapidement il peut donc être intéressant de pratiquer cette méthode.
- Le moyennage sur 30 secondes des points de vitesses est confirmé comme étant très important. Lors des essais de moyennage sur 10 secondes sur l'Ouvèze on observe une sous-estimation du débit par rapport aux autres méthodes, qui n'est pas compensée par un nombre accru de points. Pour gagner du temps et obtenir une valeur approximative du débit, la méthode des flotteurs peut être mise en œuvre.
- Lors d'un jaugeage par exploration des vitesses (moulinet, couranto EM, ADV/AC), on multiplie la vitesse perpendiculaire au transect de mesure par la sous-section pour obtenir le débit. Les courantomètres sur perche doivent donc être alignés **PERPENDICULAIREMENT AU DÉCAMÈTRE** et non alignés sur la direction de l'écoulement. Les courantomètres sont autocomposants, c'est-à-dire que dans certaines limites ils mesurent correctement la projetée de la vitesse réelle sur leur axe longitudinal :

* courantomètre mécanique : les hélices sont plus ou moins "autocomposantes", voire pas du tout, souvent dans une limite d'angle d'incidence de 5 à 10° max (cf. spécifications)

* courantomètre électromagnétique : théoriquement autocomposants à 360° . Attention tout de même aux effets de sillage indésirables, pas conseillé d'excéder 45° d'incidence.

* courantomètre acoustiques Doppler : l'ADV est a priori autocomposant à 360° (Attention tout de même aux effets de sillage indésirables.)

l'ADC également mais le volume vu par les faisceaux sera très variable, et l'incertitude sera vraisemblablement dégradée lorsqu'il s'écarte de l'axe longitudinal.

Ceci est valable pour des montages sur perche.

Sur câble, le saumon s'aligne justement sur l'écoulement. Il est alors nécessaire de mesurer l'angle écoulement/transect (angle de dérive) pour projeter la vitesse et calculer le débit.

L'ADCP en mode bateau mobile (Ref. bottom-track) projette dans son propre repère les vitesses normales à chaque ensemble, c'est-à-dire à chaque déplacement élémentaire.

L'ADCP en mode stationnaire (Ref. None, verticale par verticale) va mesurer des vitesses orientées soit dans son repère (faisceau n°3) soit par rapport au nord du compas. Il faut donc lui indiquer l'orientation du transect de jaugeage dans ces repères.

- Plusieurs échanges ont eu lieu durant ce séminaire au sujet de l'étalonnage des courantomètres en vitesses. L'étalonnage de courantomètres en bassins découverts

rectilignes est encadré par la norme ISO 3455. Une passerelle sur laquelle sont fixés les capteurs se déplace à vitesse connue au dessus d'un bassin, plusieurs vitesses sont testées et permettent l'étalonnage. L'étalonnage n'est valable que pour le montage du courantomètre utilisé pour les essais. Quelques laboratoires en Europe proposent ce type d'étalonnage. Il n'est cependant actuellement pas facile ou trop cher de faire étalonner nos instruments dans ces laboratoires. Certains essais ont été réalisés en laboratoire par les équipes du Cemagref de Lyon (Lebarbu, 2009 en bassin de carène) ou d'Antony (Chaumont, 2011 en canal à écoulement libre). Suite à ce séminaire l'équipe de la DREAL PACA a mis au point et expérimente une procédure de contrôle mensuel *in situ* des vitesses de ses courantomètres.

11. Conclusion

Ce premier séminaire d'intercomparaison de mesures de débit des petits cours d'eau nous apporte des éléments pour mieux cerner les éléments clés à travailler pour affiner ce genre d'essais. L'analyse statistique réalisée selon les normes en vigueur donne un cadre pour reproduire ce type d'essais. Les résultats en terme 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%), mais il met en évidence la difficulté de jauger les petits débits. Ce résultat, associé à ceux des prochaines campagnes réalisées par le Groupe Mesure ou d'autres organisations, dans des conditions différentes à des débits différents, permettront, par consensus entre les métrologues et les jaugeurs, de donner une incertitude de mesure à la méthode de mesure des débits par exploration du champ des vitesses par courantométrie sur perche.

12. Bibliographie

Chaumont, C., Guerin, A., Comparaison 2010 des courantomètres FLO-MATE 2000 de l'unité de recherche HBAN, 2011.

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

ISO 5725-2 : Exactitude (justesse et fidélité) des résultats et méthodes de mesure - Partie 2 : Méthode de base pour la détermination de la répétabilité et de la reproductibilité d'une méthode de mesure normalisée, décembre 1994.

ISO 5725-5 : 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, octobre 1998.

FD ISO/TS 21748 : Lignes directrices relatives à l'utilisation d'estimations de la répétabilité, de la reproductibilité et de la justesse dans l'évaluation de l'incertitude de mesure, juin 2004.

NF ISO 13528 : Méthodes statistiques utilisées dans les essais d'aptitude par comparaisons interlaboratoires, décembre 2005.

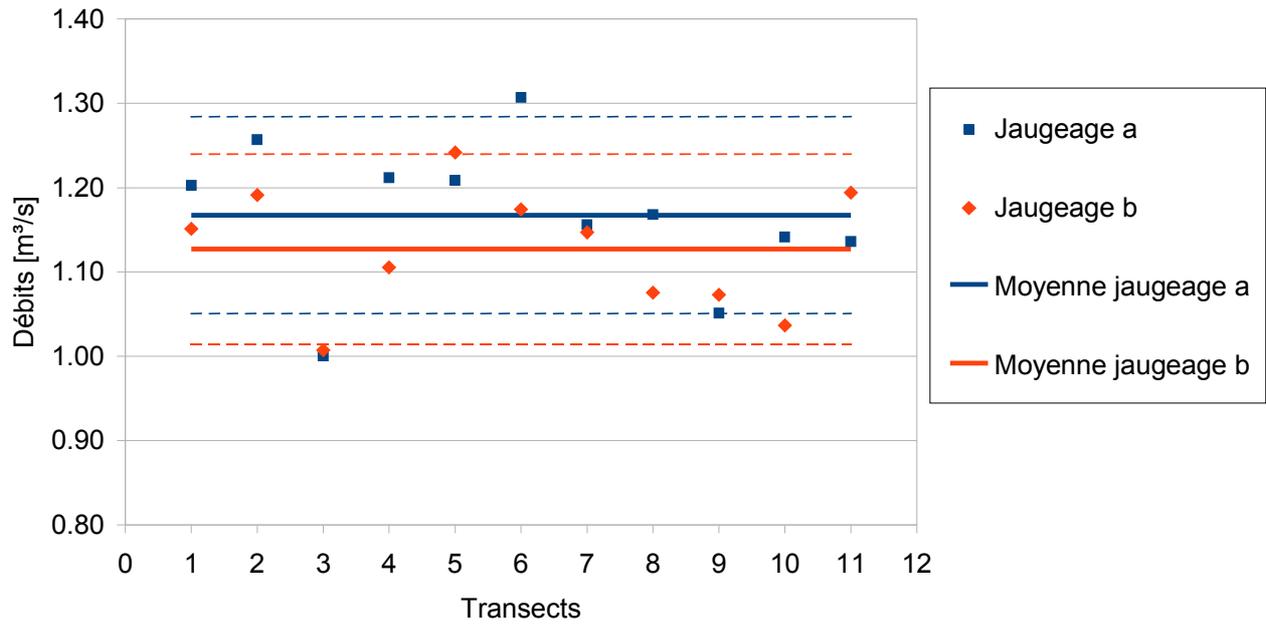
ISO 3455. Hydrométrie : Étalonnage des moulinets en bassins découverts rectilignes. Norme internationale, 2007.

Le Barbu, E., Dramais, G., Le Coz, J., Contrôle de courantomètres dans un bassin de carène. Rapport d'essais. Cemagref de Lyon, 2008.

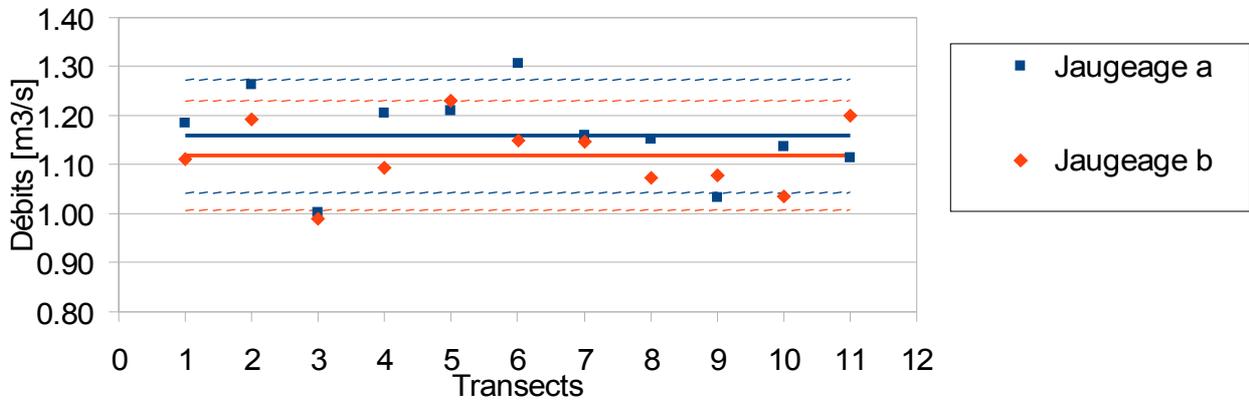
ANNEXE 1

Jaugeages sur l'Ouvèze suivant les différents dépouillements

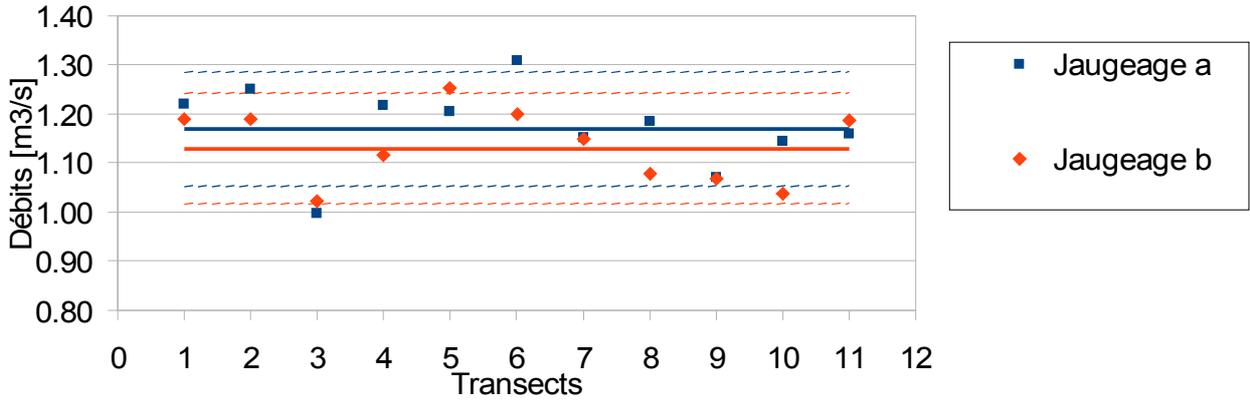
Jaugeages par transect et moyenne sur l'Ouvèze
Dépouillement 3 points ISO 748



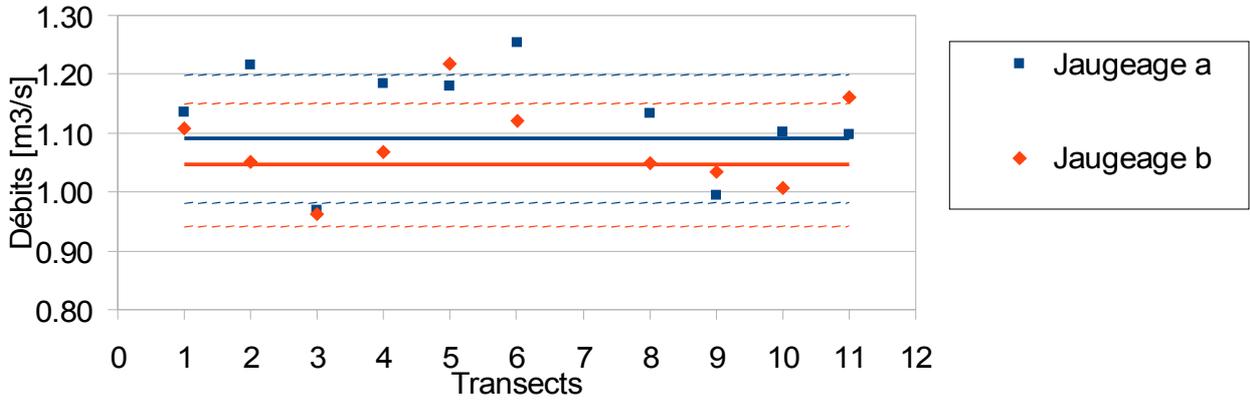
Jaugeages par transect et moyenne sur l'Ouvèze
Dépouillement 2 points ISO 748



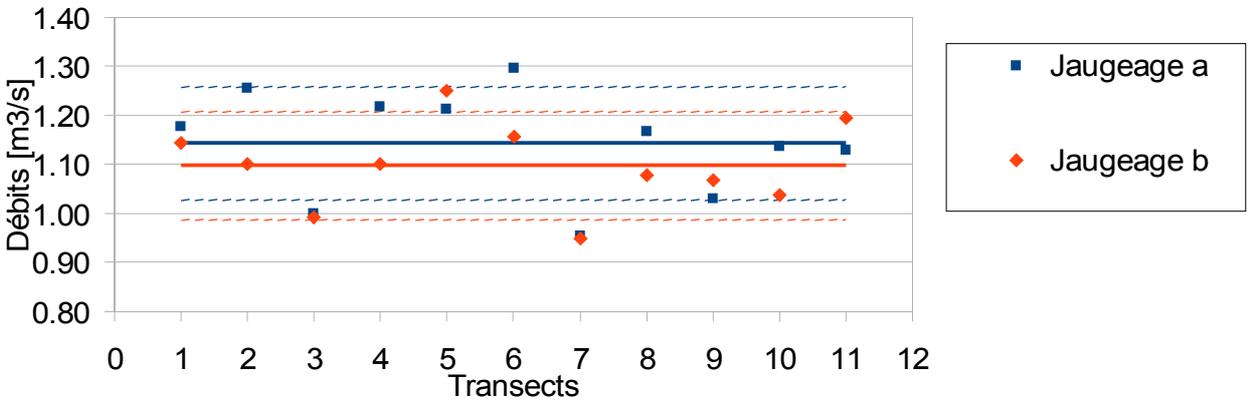
Jaugeages par transect et moyenne sur l'Ouvèze
Dépouillement 1 point ISO 748



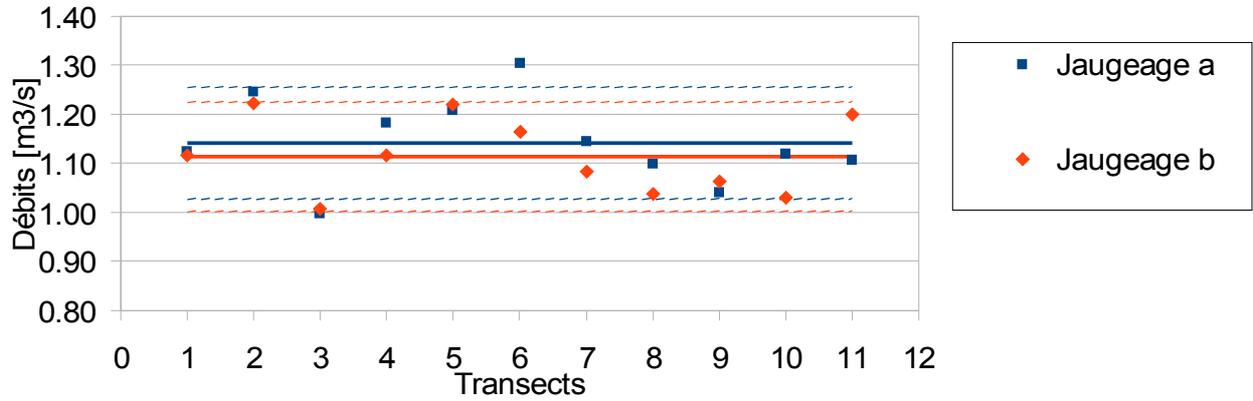
Jaugeages par transect et moyenne sur l'Ouvèze
Dépouillement trapèzes avec m=2



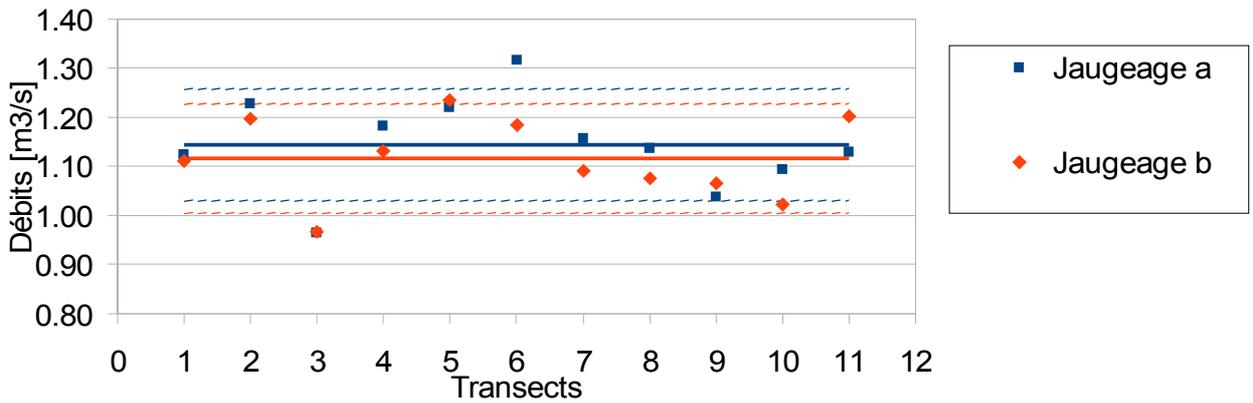
Jaugeages par transect et moyenne sur l'Ouvèze
Dépouillement trapèzes avec m=6



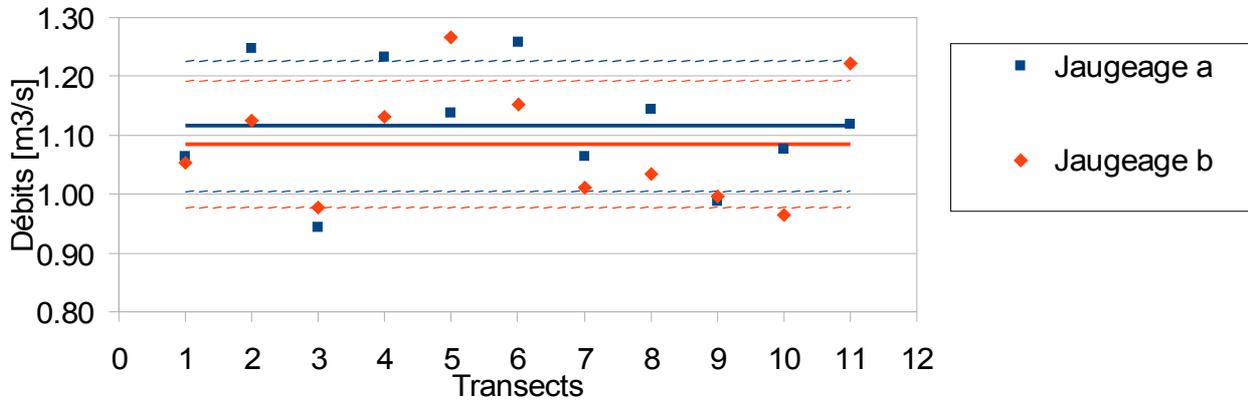
Jaugeages par transect et moyenne sur l'Ouvèze
 Dépouillement méthode 1 v/2



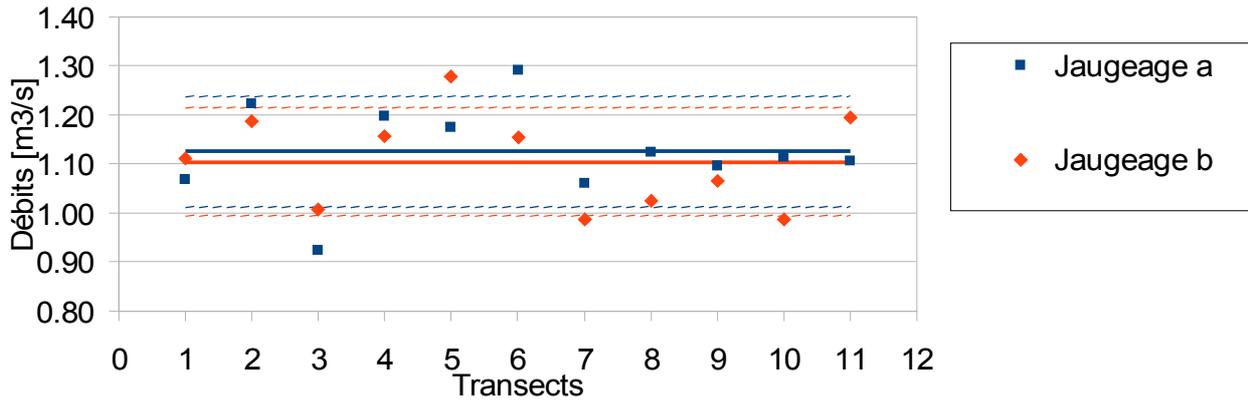
Jaugeages par transect et moyenne sur l'Ouvèze
 Dépouillement méthode Japonaise 1 v/2



Jaugeages par transect et moyenne sur l'Ouvèze
 Dépouillement méthode 1 v/3



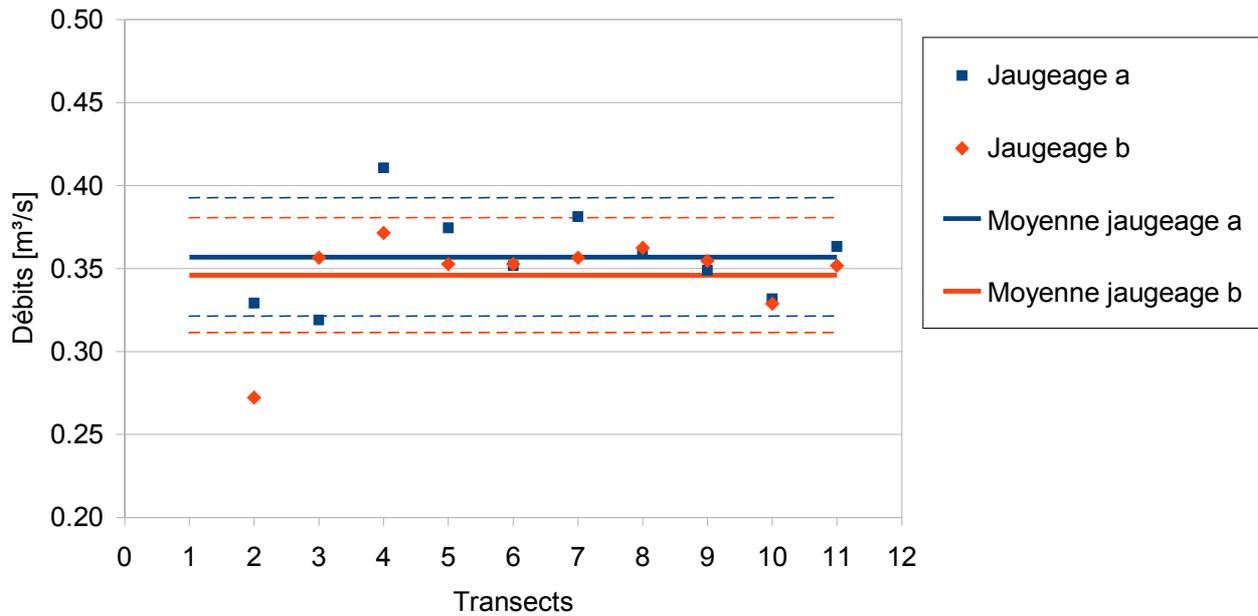
Jaugeages par transect et moyenne sur l'Ouvèze
 Dépouillement méthode japonaise 1 v/3



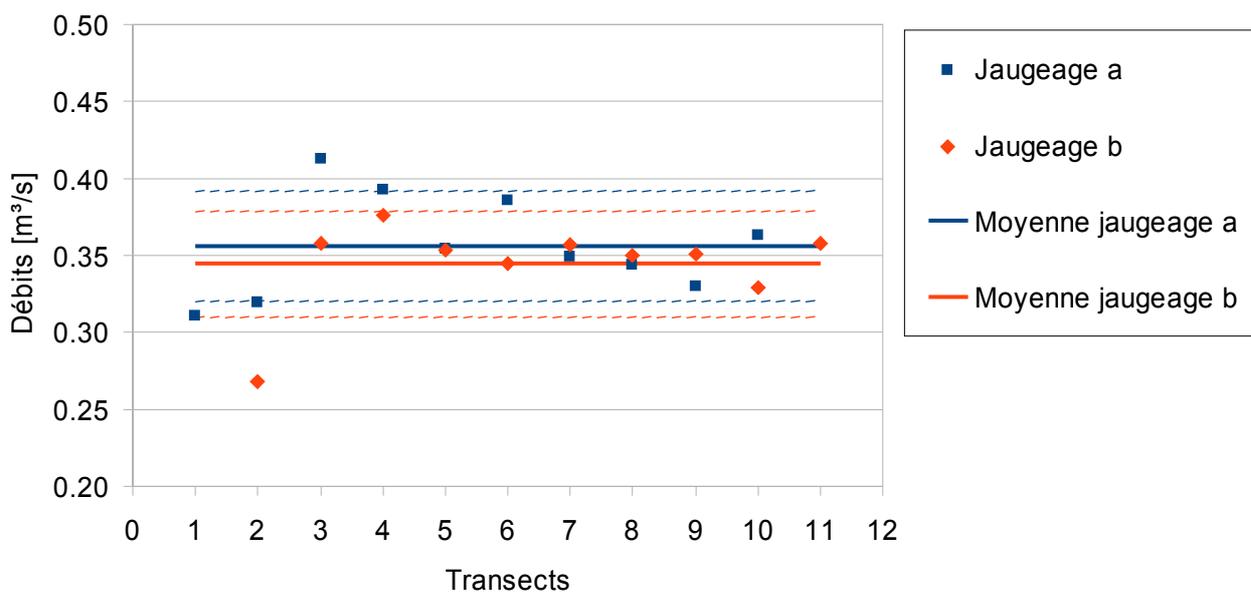
ANNEXE 2

Jaugeages sur le Toulourenc suivant les différents dépouillements

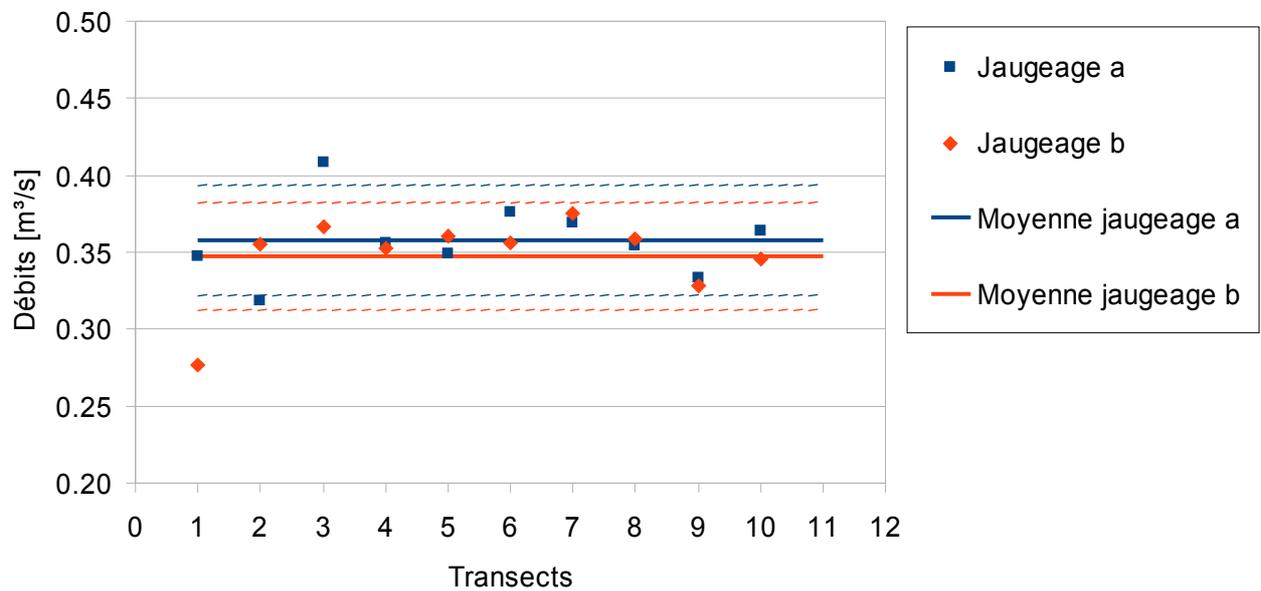
Jaugeages par transect et moyenne sur le Toulourenc
Dépouillement 3 points ISO 748



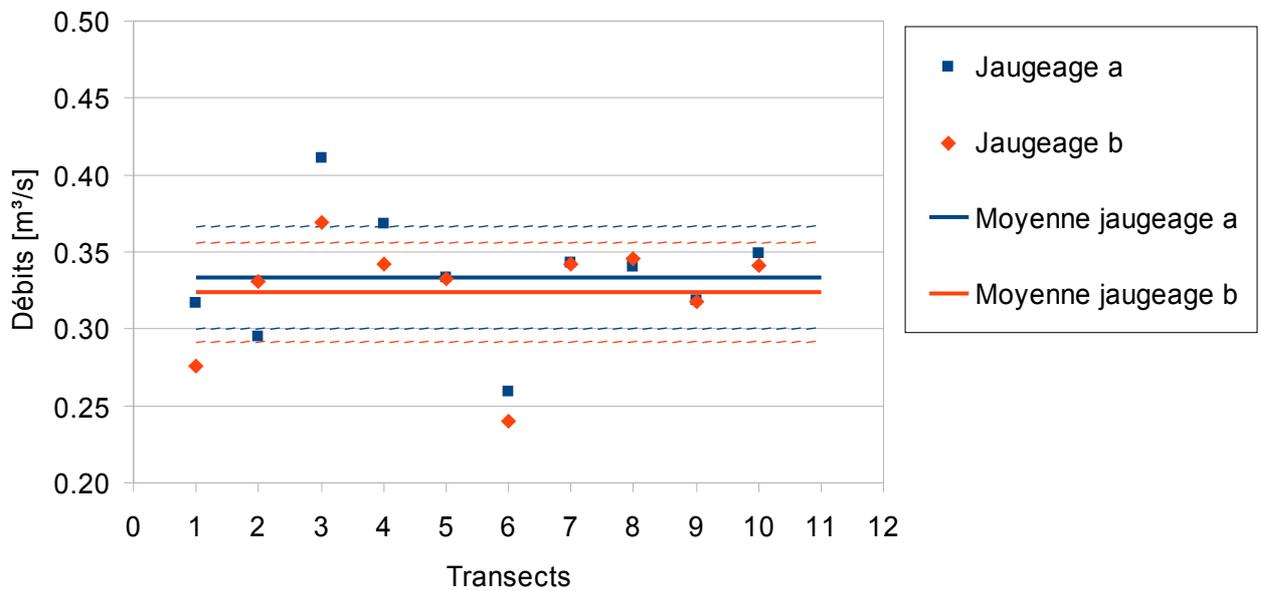
Jaugeages par transect et moyenne sur le Toulourenc
Dépouillement 2 points ISO 748



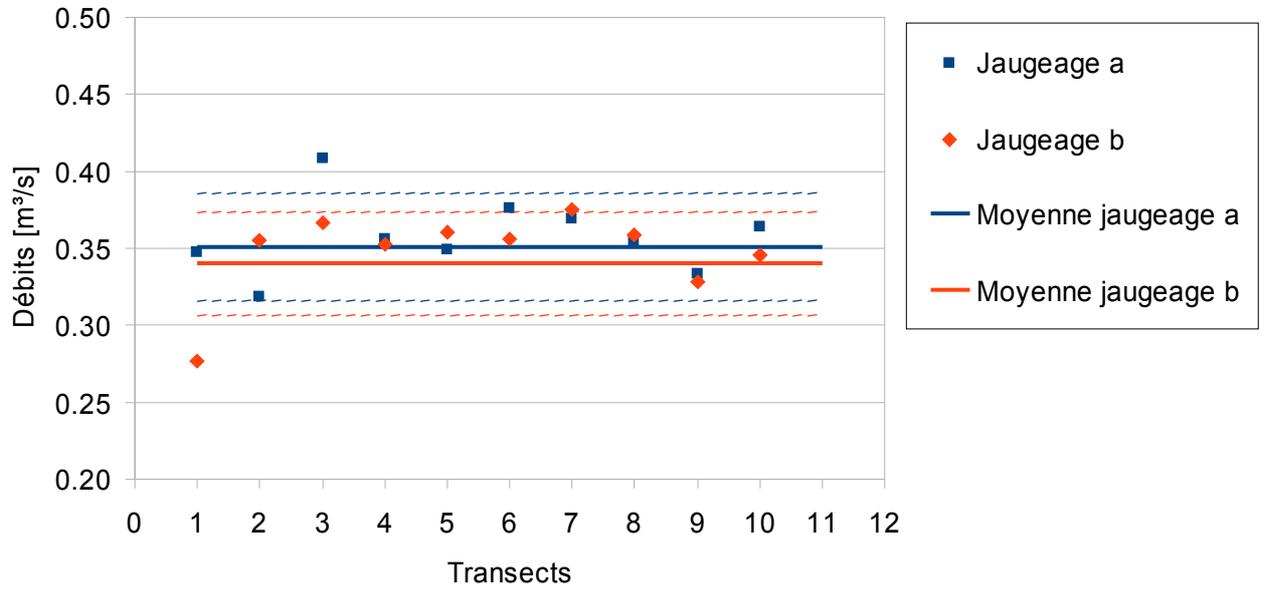
Jaugeages par transect et moyenne sur le Toulourenc
 Dépouillement 1 points ISO 748



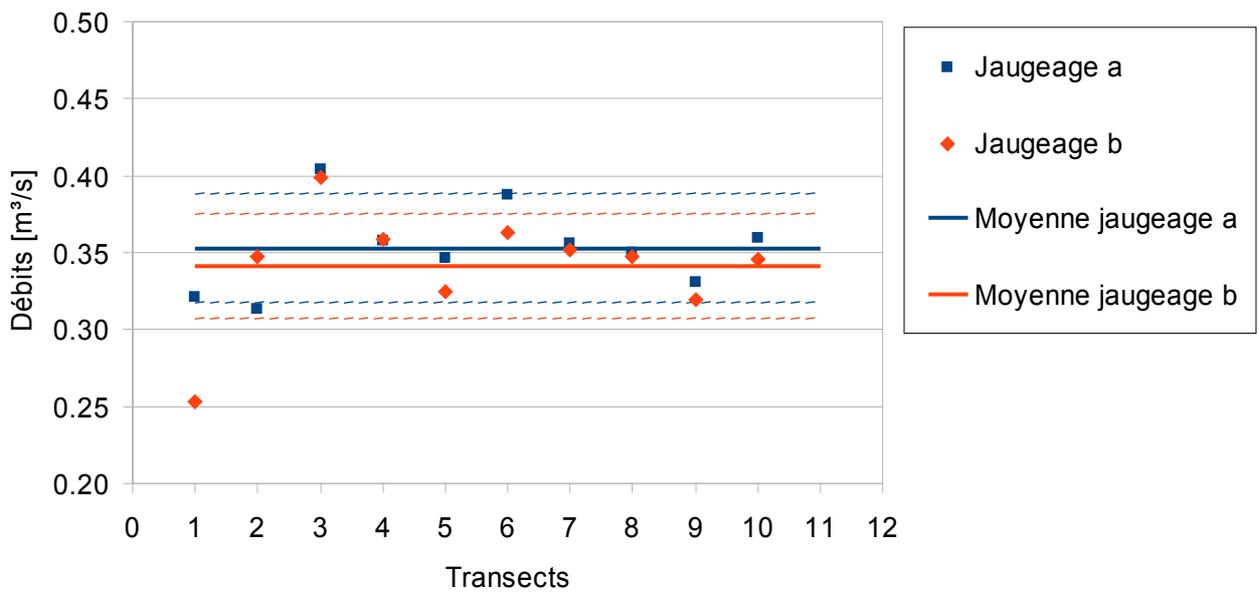
Jaugeages par transect et moyenne sur le Toulourenc
 Dépouillement Trapèzes avec m=2



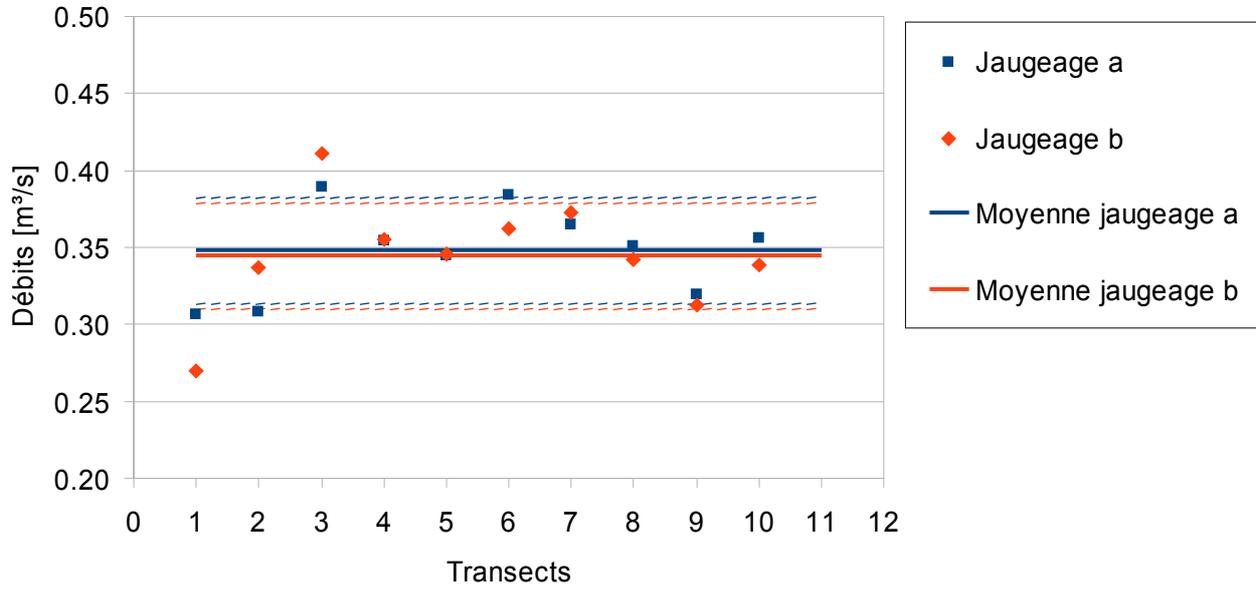
Jaugeages par transect et moyenne sur le Toulourenc
 Dépouillement Trapèzes avec $m=6$



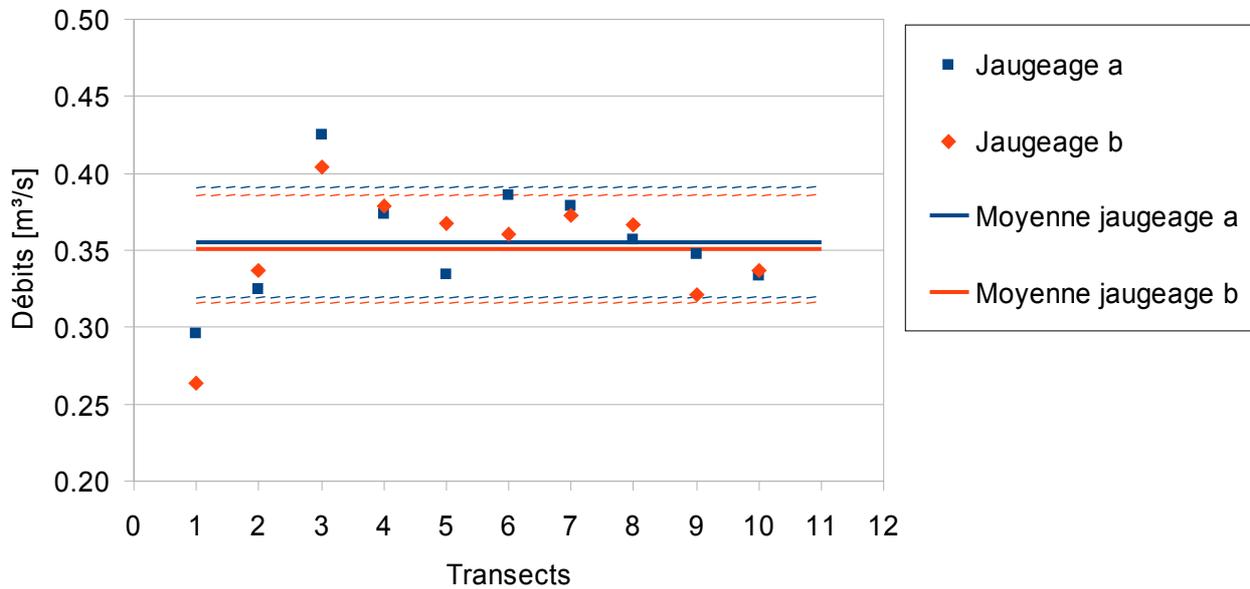
Jaugeages par transect et moyenne sur le Toulourenc
 Dépouillement méthode 1V/2



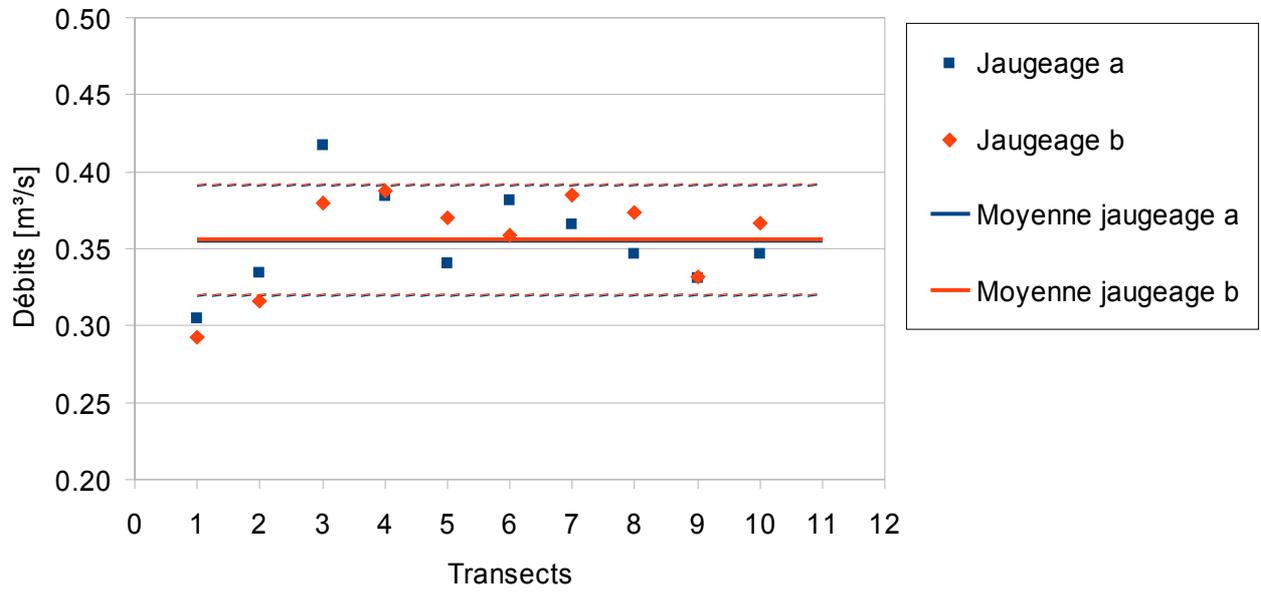
Jaugeages par transect et moyenne sur le Toulourenc
 Dépouillement méthode Japonaise 1V/2



Jaugeages par transect et moyenne sur le Toulourenc
 Dépouillement méthode Japonaise 1V/3



Jaugeages par transect et moyenne sur le Toulourenc
Dépouillement méthode 1V/3



ANNEXE 3

Projet de protocole qualité de contrôle des courantomètres de la DREAL PACA. Il est associé à une feuille de calcul type tableur. Pour plus de renseignements :

HYDRO.uema.sbep.dreal-paca@developpement-durable.gouv.fr

CONTROLE DES PERCHES

1. Objectif

Mettre en évidence des valeurs douteuses et écarter un matériel du stock fonctionnel.

Le protocole est effectué tous les mois.

2. Le matériel

Voici les 5 perches à contrôler :

N° PERCHE	PERCHE
1	C2 87484 H1-23370
2	C2 170931 H1-169246
3	C31 46585 H1-17812
4	NAUTILUS 224010
5	FLOMATE 2006461

3. Le site

Le canal de la SCP près de Meyreuil à priori.

4. La préparation

Chaque matériel est préparé au préalable :

Courantomètres : Nettoyage de la tête de sonde avec du « spirits ».

Moulinets : remplacement de l'huile et nettoyage de l'axe.

5. Le protocole

Un seul point de la section choisi du canal est mesuré : Vers le centre de la section, là où l'écoulement est le plus homogène et rectiligne possible. C'est important car chaque perche a une zone de sensibilité différente.

Dix mesures successives sont effectuées en ce point avec la même perche.

L'ordre d'apparition des perches sont : P1, P2, P3, P4, P5, P1.

Le contrôle commence et se termine avec la même perche, afin de vérifier la régularité de l'écoulement au cours du temps.

Le temps de comptage est le même pour toutes perches : 30 secondes.

6. Feuille de terrain

Un feuille de terrain est prévue pour ce protocole.

7. Dépouillement

La saisie des données est faite dans un classeur excel.

Ce classeur permet de suivre l'évolution des deux variables suivantes graphiquement (donc deux graphes) :

* **ECART TYPE DES DIX MESURES DE CHAQUE PERCHE** : Vérification de la répétabilité de chaque perche au cours du temps.

* **ECART ENTRE LES MOYENNES MESUREES PAR CHAQUE PERCHE A LA MOYENNE GENERALE** (en % car la valeur n'est pas fixe au cours du temps) : Vérification de la justesse au cours du temps de chaque perche.

A noter que la justesse des appareils ne peut pas être réellement quantifiée avec ce protocole.

Cette intercomparaison n'a pas de poids statistique avec 5 perches (Un échantillon est représentatif à partir de 30 en statistique).

8. Définition des valeurs seuils

Il reste à définir :

* La valeur de validation du protocole : L'écart maximal toléré entre la moyenne des mesures de la perche 1 au début et la moyenne de cette même perche en fin de protocole (en %).

* **La valeur limite de répétabilité** : l'écart type maximal de chaque perche.

* **La valeur limite de justesse** : L'écart à la moyenne maximal toléré.

9. Vérification des zones de sensibilité

Lors du premier essai il faut que nous vérifions :

La qualité de l'écoulement du canal ;

La justesse de la mesure de chaque appareil en fonction de leurs zones de sensibilité.

10. Projet d'une perche étalon

Ce protocole n'est pas satisfaisant en terme statistique (intercomparaison non significative) mais permet d'éliminer des valeurs aberrantes.

Une solution serait de se munir d'une perche étalon, étalonnée par un organisme indépendant accrédité et relié au système métrologique international (au hasard la Suisse ?). Par défaut, si on ne vise pas l'accréditation COFRAC, on peut utiliser ce même moulinet avec l'étalonnage du constructeur.

Pour exemple, un moulinet sans coffret avec outillage avec une hélice de pas de 0.05 vaut chez OTT 2366 euros HT sans étalonnage OTT, et 2707 euros HT avec étalonnage OTT.

Cette perche étalon serait dédiée uniquement à un nouveau protocole de vérification de la vitesse mesurée, et envoyée régulièrement à étalonnage mais à des fréquences plus longues (5 ans par exemple).

Voici quelques avantages :

- * Meilleure connaissance de la valeur cible de vitesse voulue (moyenne plus solide).
- * L'envoi de nos appareils pour étalonnage ne serait plus systématique tous les 2 ans, mais en fonction des valeurs trouvées lors de ce nouveau contrôle (pertinence).

Compte tenu des délais et du coût des étalonnages, le retour sur investissement d'un tel achat semble bon, si le protocole est validé.