



HAL
open science

Incertitude des mesures de débit des cours d'eau au courantomètre. Amélioration des méthodes analytiques et apports des essais interlaboratoires

Aurélien Despax

► **To cite this version:**

Aurélien Despax. Incertitude des mesures de débit des cours d'eau au courantomètre. Amélioration des méthodes analytiques et apports des essais interlaboratoires. Ingénierie de l'environnement. Université Grenoble Alpes, 2016. Français. NNT : 2016GREAU009 . tel-01496704

HAL Id: tel-01496704

<https://theses.hal.science/tel-01496704>

Submitted on 27 Mar 2017

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.

THÈSE

Pour obtenir le grade de

DOCTEUR DE L'UNIVERSITÉ DE GRENOBLE

Spécialité : **Terre, Univers et Environnement**

Arrêté ministériel : 7 août 2006

Présentée par

Aurélien DESPAX

Thèse dirigée par **Anne-Catherine FAVRE**

préparée au sein du **Laboratoire d'étude des Transferts en Hydrologie et Environnement (LTHE)** en collaboration avec **EDF-DTG** et de l'**Ecole Doctorale Terre, Univers, Environnement (TUE)**

Incertitude des mesures de débit des cours d'eau au courantomètre. Amélioration des méthodes analytiques et apports des essais interlaboratoires.

Thèse soutenue publiquement le **27 septembre 2016**, devant le jury composé de :

Michel ESTEVES

DR, IRD, LTHE, Grenoble, Président

Jean-Luc BERTRAND KRAJEWSKI

Prof., laboratoire DEEP, INSA, Lyon, Rapporteur

Jan SEIBERT

Prof., département de Géographie, Université de Zurich, Suisse, Rapporteur

Dominique BEROD

Chef de la division des systèmes de base en hydrologie, OMM, Genève, Suisse, Examineur

Michel LANG

Ingénieur en hydrologie, Irstea, Lyon, Examineur

Anne-Catherine FAVRE

Prof., laboratoire LTHE, GINP/ENSE3, Grenoble, Directrice de thèse

Arnaud BELLEVILLE

Ingénieur spécialiste, EDF-DTG, Grenoble, Co-Encadrant de thèse

Rachel PUECHBERTY

Chef du pôle acquisition de données et hydrométrie, SCHAPI, Toulouse, Invitée

Jérôme LE COZ

Chercheur en hydraulique des rivières, Irstea, Lyon, Invité



"Sans l'incertitude l'aventure n'existerait pas"

ALAIN SÉJOURNÉ

*"La connaissance progresse en intégrant en elle l'incertitude,
non en l'exorcisant"*

EDGAR MORIN

A ma famille et mes parents pour ce que je suis.

A Fleur pour tout.

Remerciements

Tout d'abord, je remercie les membres du jury pour l'intérêt qu'ils ont porté à mes travaux de thèse, leurs remarques et commentaires. Je remercie en particulier Jérôme d'avoir eu la gentillesse de collaborer au cours de ces trois années. Tu es resté impliqué, disponible et constructif pendant ces trois années. Tes apports à ce travail sont nombreux. Je me réjouis de poursuivre avec toi et je remercie Rachel Puechberty pour le soutien qu'elle apporte à ces travaux.

Au commencement, il y a Christian, mon mentor dans le domaine de l'hydrométrie, initiateur de ces travaux de thèse. Que soient ici chaleureusement remerciés tes apports et tes contributions majeurs à cette thèse. Nos échanges m'ont enrichis et construits, tant d'un point de vue professionnel que personnel. Dans les moments de doute, ton positivisme a vaincu mon pessimisme.

Je remercie ensuite Anne-Catherine, ma directrice de thèse pour sa sympathie, sa bonne humeur et surtout son optimisme, ingrédient indispensable pour terminer une thèse. Tu as subi mon empressement pour les relectures mais tu as su être présente dans les moments importants.

Ensuite, je remercie Arnaud de m'avoir accompagné tout au long de cette thèse. Ta disponibilité, ta fiabilité, ton calme et ta rigueur m'ont été très utiles et je t'en suis reconnaissant. Je suis également reconnaissant pour les efforts administratifs que tu as menés pour le lancement de la thèse puis du postdoc, dans ce contexte particulier. Tu as été bien plus qu'un encadrant et voisin de bureau, j'ai passé de bons moments à tes côtés, sur le terrain (malgré le nombre de verticales et le portable perdu) et dans les moments plus festifs (et quelques gouttes de la célèbre liqueur verte) révélant ta sympathie et ta générosité. Un grand merci à toi.

Je remercie ensuite Alex que je considère comme un encadrant de thèse à part entière. Je souligne ici ta disponibilité, tes idées, ta rigueur et ta passion pour le métier faisant de toi un véritable professionnel. J'ai énormément appris à tes côtés. Ta franchise a toujours été constructive dans ma jeune carrière de scientifique ainsi que pour mon développement personnel. Tu as été un compagnon de route tout simplement génial. Je n'aurais ici pas la place de citer tous les moments agréables passés avec toi. De la simple discussion au coin café (voyages, livres de Sylvain Tesson par exemple) à notre voyage aux Etats-Unis, tous ces moments vont me manquer mais ta voix chantant Ramon Pérez résonnera toujours dans ma tête. Je t'en suis infiniment reconnaissant.

Je remercie également tous mes collègues à DTG pour votre accueil. J'ai pris plaisir à tra-

vailler à vos côtés dans une ambiance de travail conviviale. Je remercie l'ensemble des CH et de DMM, qui, de près ou de loin et de différentes façons, avez apporté quelque chose à cette thèse.

Je remercie en particulier l'équipe matériel : Cécile (co-bureau et cascadeuse), Lucas, Paul, Guillaume, Véro, Yannick, Paul, Sylvie et les retraités (Jean-Pierre, Jean-Jacques et Phiphi). J'ai passé des moments très agréables avec vous. La séance photo à Voiron puis le pot de départ de Jean-Jacques sont mémorables.

Merci à Toto, d'abord encadrant de stage puis collègue de thèse et colocataire, la vie fut animée aux côtés de petit bonhomme.

Merci à Damien pour toutes tes remarques et tes apports toujours pertinents. J'ai vraiment pris plaisir à travailler à tes côtés, merci aussi pour ce beau vol en parapente.

Un grand merci à Rémy, Joël, Manu, Thibault, Fred, David et Fédérico pour vos conseils, votre sympathie et vos apports scientifiques. J'ai apprécié d'être entouré par tant de compétences, dénominateur commun des personnels de DMM.

Viennent ensuite tous les hydromètres des CH (Amaury, Julien, Baptiste, Guillaume, Pierre...) ainsi que l'équipe prévi (Mathieu, Fabien, Christi...), j'ai apprécié vos qualités professionnelles et aussi extra-professionnelles.

Je remercie l'ensemble des personnels que j'ai côtoyé lors de mon séjour à DTG (Agnès, Benoit, le drone-bar, le pôle ouvrage, le pôle méthodes et ENV), les stagiaires (Pierre, Emy, Carine, Jessica, Alois, Soufiane...) et alternants.

Merci enfin à Hervé Tissot de m'avoir permis de séjourner dans son service et à Caroline pour son coaching.

De manière plus générale, je remercie tous les hydromètres de France et d'ailleurs que j'ai côtoyé au cours de cette thèse via notamment le Groupe Doppler Hydrométrie. J'ai apprécié l'esprit de collaboration et la passion du métier qui anime la plupart d'entre vous. Je souligne aussi les moments conviviaux partagés avec eux.

Je souhaite notamment remercier l'équipe hydraulique d'Irstea Lyon (Guillaume Dramais et Jérôme Le Coz en particulier) pour l'organisation des essais inter-laboratoires et leurs échanges tout au long des 3 années.

Je souligne aussi l'implication externe via l'USGS rencontré à plusieurs reprises et qui ont eu la gentillesse de nous inviter aux Etats-Unis (Julie Kiang, Robert Mason, Jon & Jason).

Merci également à Marian Muste pour son accueil à IIHR et aux membres du workshop hydrométrie de l'EGU pour leurs discussions. Toutes ces rencontres furent très enrichissantes et je me réjouis de poursuivre des collaborations avec eux.

Bien qu'un peu isolé dans ma thématique de recherche, j'ai été adopté par un laboratoire ou plutôt une famille, le LTHE. Un grand merci à tous (personnels administratifs –Odette, Carméline, Claire-, techniques –Wajdi- et scientifiques) pour votre sympathie et votre accueil. Le dynamisme du labo tient en grande partie à ses nombreux doctorants et non-permanents, merci à eux. Mes –très- nombreux séjours à EDF ne témoignent pas du plaisir que j'ai eu à vos côtés. Je vous remercie tous sincèrement pour les moments passés avec vous, au coin café, à la cantine et en dehors du labo.

Mention spéciale à Damien et Saif, mes frères inséparables de thèse. Merci Damien pour tous les moments que nous avons partagés, cinés, sorties ski, Valmorel (merci au passage à David et Maelle, notre idée de voyage trotte encore dans nos têtes), le kayak, les soirées belotte, les randos, les bistrots, nos pauses café, tes histoires (la fameuse cuvette) et tant d'autres.

Merci à mes co-bureaux successifs : Mélo (et Nico), Steph (avec qui j'ai passé presque 3 années, merci!), Olivier, Jérémy, Baptiste.

Merci aux autres copains et collègues du labo : Anna, Guillaume, Audrey, les stagiaires, le

Cermo (so far), Joseph, François, Camille, Aude et les anciens doctorants (Mathias, Julien).
Merci à Sam pour ses clémentines et son accueil aux US. J'ai passé un formidable séjour à Iowa City!

Merci à Guillaume Nord, Julien Némery, Jean-Dominique, Philippe Belleudy et Michel Esteves pour leurs discussions constructives.

Je remercie les membres administratifs de l'INPG SA qui ont géré mon dossier de manière efficace pendant ces trois années. Merci également à Christine de l'ED TUE.

Enfin il y a la vie non professionnelle, bien que les collègues de travail témoignent que la frontière est souvent perméable.

Merci à mes colocos. Victor, sans ta bonne humeur et ton brin de folie, je n'aurai peut-être pas réussi à tenir la distance. J'ai appris à te connaître et j'ai passé 3 années parfaites à tes côtés, merci du fond du cœur. Merci aussi à Toto. J'aurai aimé que tu consacres plus de temps aux tâches ménagères mais j'ai passé de chouettes moments avec toi. Merci également à Ilann, Robbie, Édouard (notre menuisier), Alice (coloc non officielle), Félix et Jacques, les voisins.

Ensuite il y a tous les copains de Pessac, les copains de Polytech (Cyril, Armel, Fabien, Damien, Ronald, Amandine, Hélo, Marion, Nico, Kévin, Prisc, Marie, Clem, Morgane...), les copains de Chalon (glaiseux plein aux as) et ceux de la piscine. Pendant ces trois ans, il m'a été difficile de passer du temps avec tous, de m'engager pleinement dans des activités, je le regrette et vous m'en excuserez.

J'ai passé avec vous tous des moments inoubliables et votre compagnie professionnelle et/ou personnelle sera difficile à remplacer. A votre manière, vous avez participé à ma construction et à l'affirmation de mes valeurs. La thèse, c'est un sujet de travail très prenant, repoussant la frontière entre vie professionnelle et personnelle. Ce sont aussi des moments exigeants et difficiles mais ce sont ces instants qui construisent une vie, repoussent nos limites et font naître des projets.

Et puis une thèse, c'est un cadre. Grenoble en offre un beau. Les montagnes vont me manquer ainsi que l'ambiance particulière et les rencontres que la ville permet.

Je remercie enfin mes parents et ma famille toute entière, pour ce qu'ils sont et pour ce que je suis. Vous êtes mon socle, mes racines et ma fierté. Vous m'avez donné les moyens d'arriver là.

Enfin, je remercie Fleur. Vous savez tous à quel point elle compte pour moi. Les collègues, les amis et la colocation ont permis au temps de passer plus vite mais rien ne te remplace. Sans cesse, j'ai remis en cause ma vie loin de toi (distance raccourcie grâce au covoiturage et à Patrice). Tu n'as jamais douté de moi, tu as toujours été présente et aimante. Merci pour ces instants, pour ton soutien, pour tout. Notre amour était solide, il l'est encore plus et le sera toujours. Je t'aime.

Je remercie ma future belle-famille et notamment les parents de Fleur pour leur générosité et leur aide pour le pot de thèse, cela me touche sincèrement.

L'écriture de ces quelques mots, un brin mélancolique, remue en moi de belles émotions, signes de moments inoubliables passés à vos côtés. **Merci encore à tous** et bonne lecture!

Aurélien.

Table des matières

Glossaire	1
Introduction générale	3
I Contexte de l'étude	5
1 Notions fondamentales	7
1.1 Notations et unités	7
1.2 Éléments d'hydraulique à surface libre	8
1.2.1 Caractéristiques des canaux à surface libre	8
1.2.2 Caractéristiques et régimes de l'écoulement	10
1.2.3 Formules empiriques de l'hydraulique fluviale	12
1.2.4 Distribution des vitesses dans la section	13
1.2.5 Autres définitions	15
1.3 De la complexité des cours d'eau	16
1.3.1 Sur les sections en travers	16
1.3.2 Sur les profils de vitesses	16
2 Besoins et enjeux des mesures de débit	19
2.1 La connaissance du débit, outil clé de gestion de la ressource en eau	19
2.2 La gestion des ressources en eau à l'échelle française	20
2.2.1 Cadre général	20
2.2.2 Les réseaux d'hydrométrie en France	22
2.2.3 Nécessité d'une normalisation	23
2.2.4 Le réseau hydrométrique EDF-DTG	24
3 L'hydrométrie opérationnelle	27
3.1 Les techniques de jaugeage	27
3.1.1 Les jaugeages capacitifs	27
3.1.2 Les jaugeages par dilution	28
3.1.3 Les jaugeages par exploration du champ des vitesses	29
3.1.4 Répartition des moyens de mesure à EDF-DTG	33
3.1.5 Caractéristiques des jaugeages au courantomètre	34
3.2 Les stations hydrométriques	35
3.2.1 Stations à relation hauteur-débit pour le suivi en continu du débit	35

3.2.2	Stations à double échelle	36
3.2.3	Stations à vitesse témoin	36
4	Les incertitudes en hydrométrie	39
4.1	Incertitudes : généralités	39
4.1.1	Hiérarchie des erreurs et contribution à l'incertitude de mesure	40
4.1.2	Classification des sources d'incertitude	41
4.2	Méthodes d'estimation des incertitudes dans le domaine de l'hydrométrie	41
4.2.1	Méthode de propagation analytique des incertitudes (méthode ascendante)	41
4.2.2	Méthode par propagation des distributions	42
4.2.3	Méthode par essais interlaboratoires (méthode descendante)	43
4.2.4	Autres méthodes	45
4.2.5	Synthèse	45
4.3	Sources d'incertitude des estimations du débit	46
4.3.1	L'incertitude sur l'estimation ponctuelle du débit	46
4.3.2	L'incertitude des relations hauteur-débit	47
4.3.3	Incertitude de la mesure des évènements rares	47
4.4	Impact des incertitudes sur les décisions relatives à la gestion de l'eau	48
	Conclusion de la première partie	51
II	Méthodes analytiques d'estimation d'incertitude appliquées aux jaugeages par exploration du champ des vitesses	53
5	Jaugeages au courantomètre : protocole de mesure et sources d'incertitude	55
5.1	Processus de mesure	55
5.1.1	Choix de la section de mesure	56
5.1.2	Mesure ponctuelle des vitesses	57
5.1.3	Intégration verticale des vitesses	58
5.1.4	Intégration latérale des débits	60
5.1.5	Cas particulier des verticales de type lame d'eau	61
5.2	Préconisations générales	62
5.3	Inventaire des sources d'erreurs	63
5.3.1	Erreurs sur les mesures de largeur $u(B_i)$	64
5.3.2	Erreurs sur l'estimation des vitesses moyennes $u(V_i)$	64
5.3.3	Erreurs sur les mesures de profondeur $u(D_i)$	66
5.3.4	Erreurs sur l'estimation du débit $u(Q_t)$	66
5.4	Problématiques	66
6	État de l'art	69
6.1	Application du GUM	69
6.2	Norme ISO 748	70
6.2.1	Calcul	70
6.2.2	Application à la base de données EDF-DTG	71
6.2.3	Limitations	72
6.3	Méthode Q_+	73
6.3.1	Calcul	73
6.3.2	Sensibilité à l'angle α	75
6.3.3	Application à la base de données EDF-DTG	76
6.4	Méthode <i>IVE</i> – Interpolation Variance Estimator	78

6.4.1	Application à la base de données EDF-DTG	78
Vers une nouvelle approche		81
III Méthode FLAURE - Objectivation des termes d'incertitudes		83
7	Description générale	85
7.1	Estimation du terme d'incertitude u'_m - Principes de l'approche	85
7.2	Ensemble de jaugeages de référence	87
7.2.1	Jaugeages de référence au courantomètre	87
7.2.2	Jaugeages équivalent moulinet obtenus à l'aide de l'ADCP	87
7.2.3	Jaugeages de référence issus d'un modèle hydraulique	90
8	Méthode de sous-échantillonnage	93
8.1	Travaux antérieurs	93
8.2	Méthodologie de sous-échantillonnage	94
8.2.1	Sous-échantillonnage par tirage pseudo-aléatoire	95
8.2.2	Calcul des probabilités de tirage	95
8.2.3	Exemple de tirage étape par étape	97
9	Estimation du terme u'_m - Analyse statistique	103
9.1	Analyse en fonction du nombre de verticales	103
9.1.1	Comportement non gaussien	104
9.1.2	Courbes d'incertitude $u'_{m,empirique} = f(m)$	106
9.2	Une nouvelle variable explicative : l'indice de qualité d'échantillonnage (<i>SQI</i>)	107
9.2.1	Incertaince résiduelle des jaugeages de référence	110
9.2.2	Courbes d'incertitude $u'_m = f(SQI)$	112
9.3	Biais	113
10	Modèles d'incertitude pour le calcul de u'_m	115
10.1	Modèle par typologie de jaugeage	115
10.1.1	Choix du critère d'analogie	117
10.1.2	Calibration du nombre d'analogues	120
10.1.3	Correction du biais	121
10.2	Modèle moyen d'incertitude	122
10.3	Décomposition des sources d'incertitude	125
11	Autres termes investigués	129
11.1	Erreur sur les mesures de largeur	129
11.2	Erreur sur la vitesse moyenne	129
11.2.1	Incertaince due à l'utilisation des formules algébriques	129
11.2.2	Étalonnage du courantomètre	132
11.2.3	Résolution du courantomètre	135
11.2.4	Intégration temporelle des vitesses	136
11.2.5	Incertaince des verticales de type lame d'eau	138
11.3	Incertaince sur l'estimation du débit	139
11.3.1	Choix de la section de mesure	140
11.3.2	Variabilité du débit	140
11.3.3	Corrélation des sources d'incertitude	141

12 Application de la méthode FLAURE et influence des différents termes d'incertitude	143
12.1 Calcul du terme u'_m	143
12.1.1 Par typologie	143
12.1.2 Modèle moyen	147
12.1.3 Modèle moyen par décomposition des sources d'incertitude	148
12.1.4 Confrontation des modèles - Synthèse	148
12.2 Incertitude élargie selon la méthode FLAURE	149
12.2.1 Effet de l'objectivation des différents termes d'incertitude	150
12.2.2 Effet de l'ajout de verticales de type lame d'eau	152
12.3 Comparaison des incertitudes élargies selon les quatre méthodes analytiques	152
12.3.1 Quelques exemples	157
12.3.2 Effet du protocole de mesure	159
Conclusion de la partie III	163
IV Essais interlaboratoires	165
13 Essais interlaboratoires appliqués aux jaugeages au courantomètre	167
13.1 Description générale des essais	167
13.2 Résultats des mesures	169
13.2.1 Mesures complémentaires	170
13.3 Résultats d'incertitude	170
14 Confrontation des essais aux méthodes analytiques	173
14.1 Confrontations des estimations d'incertitude des deux approches	173
14.1.1 Paramètres de calculs	173
14.2 Comparaison des résultats	175
14.2.1 Sur-estimation de l'incertitude par l'approche interlaboratoires	175
14.2.2 Sous-estimation des méthodes analytiques	179
14.2.3 Impact de l'objectivation des termes d'incertitude sur les méthodes analytiques	180
14.3 Synthèse et préconisations	181
14.3.1 Estimation de l'incertitude liée à la section de mesure	182
Conclusion de la partie IV	185
Conclusions générales et perspectives	187
Bibliographie	192
A Éléments de métrologie	203
A.1 Définitions	203
A.1.1 Définitions complémentaires	205
A.2 Lois de distribution des erreurs utilisées dans la thèse	205
A.2.1 Distribution selon une loi normale	205
A.2.2 Distribution selon une loi uniforme	205
B Jaugeages de référence	207

C	Confrontation des différentes méthodes de dégradation	217
C.1	Présentation des différentes méthodes de dégradation	217
C.1.1	Tirage aléatoire	217
C.1.2	Équi-répartition des verticales sur la largeur de la section	217
C.1.3	Selon les variations de la bathymétrie	218
C.1.4	Selon la distance et la bathymétrie	218
C.1.5	Selon le gradient des vitesses	219
C.1.6	Débits partiels homogènes	219
C.1.7	Aires des sous-sections homogènes	219
C.2	Confrontation des méthodes de sous-échantillonnage	219
D	Articles publiés	223
E	Valorisation des données de jaugeage	245
E.1	Analyse de risque en rivière	245
E.2	Autres utilisations	245
F	Jaugeages des essais interlaboratoires	249
G	Comparaison protocole anglo-saxon - protocole français	271
	Résumé - Abstract	281

Glossaire

Notation [unité]	Description
α [°]	Angle traduisant l'irrégularité bathymétrique d'une section de jaugeage.
A [m ²]	Aire de la section mouillée.
ADCP	<i>Acoustic Doppler Current Profiler</i> : appareil acoustique de jaugeage basé sur l'effet Doppler
ADV ou ADC	<i>Acoustic Doppler Velocimeter</i> ou <i>Acoustic Doppler Currentmeter</i> : appareil acoustique de mesure de vitesse ponctuelle de fluide basé sur l'effet Doppler
B ou L [m]	Largeur au miroir de la section
BIPM	Bureau International des Poids et Mesures
C [m ³ /m ³]	Concentration
D et h [m]	Profondeur d'eau et hauteur
EDF-DTG	Division Technique Générale d'Électricité De France, unité d'expertise en charge de la surveillance et de l'optimisation des parcs de production d'électricité
g [m/s ²]	Accélération de la pesanteur
GUM	<i>Guide to the expression of Uncertainty Measurement</i> : guide de référence pour l'expression de l'incertitude de mesure
HUG	<i>Hydrometric Uncertainty Guidance</i> : GUM appliqué à l'hydrométrie, transposant les lignes directrices du GUM au domaine de l'hydrométrie
Irstea	Institut national de Recherche en Sciences et Technologies pour l'Environnement et l'Agriculture
K_s [m ^{1/3} /s]	Coefficient de Strickler
LSPIV	<i>Large-Scale Particle Image Velocimetry</i> : méthode d'analyse d'image permettant d'estimer les vitesses de surface d'un cours d'eau et d'en déduire le débit
LTHE	Laboratoire des Transferts en Hydrologie et Environnement, laboratoire d'accueil de cette thèse
n [s/m ^{1/3}]	Coefficient Manning, inverse du coefficient de Strickler
P_m [m]	Périmètre mouillé
PU ou q [m ² /s]	Profil ou débit unitaire
Q [m ³ /s]	Débit liquide
R_h [m]	Rayon hydraulique = A/P_m
SCHAPI	Service Central d'Hydrométéorologie et d'Appui à la Prévision des Inondations, organisme gouvernemental français
SQI [/]	<i>Sampling Quality Index</i> : Indice adimensionnel de qualité d'échantillonnage
SVR	<i>Surface Velocity Radar</i> : appareil de mesure permettant la réalisation de jaugeage par radar mobile

U [m/s]	Vitesse débitante = Q/A
USGS	<i>United States Geological Survey</i> , organisme gouvernemental américain se consacrant aux sciences de la Terre et en particulier à l'hydrologie
v [m/s]	Vitesse locale
V [m/s]	Vitesse moyenne ou linéaire [m^2s^{-1}/m]
WMO ou OMM	Organisation Mondiale de la Météorologie, institution des Nations Unies spécialisée dans la météorologie et l'hydrologie opérationnelle. Elle a notamment pour rôle de participer à l'élaboration des normes relatives aux mesures météorologiques
x	Axe latéral de la section (voir figure 1.1)
y	Axe vertical de la section (voir figure 1.1)
z	Axe longitudinal, dans la direction de l'écoulement (voir figure 1.1)

Introduction générale

Les activités humaines, que ce soient l’approvisionnement en eau potable, l’agriculture, la production d’énergie ou l’industrie, dépendent de la ressource en eau et entrent en concurrence avec les besoins de l’écosystème aquatique. Les besoins en eau ne cessent d’augmenter sous les effets conjugués de l’augmentation démographique, de l’amélioration du niveau de vie et du développement de l’irrigation. La multiplicité des problématiques liées à la gestion de l’eau mobilise un grand nombre d’acteurs, à des échelles différentes et entraîne la confrontation de différentes logiques ou parties prenantes. Cela nécessite une gestion collective, et à une échelle cohérente, de la ressource en eau en s’appuyant sur la science du cycle de l’eau, l’hydrologie. Cette dernière, par exemple pour l’alerte et la prévision des crues, nécessite des données sur l’eau et en particulier des données de débits. Ces données sont fournies par les hydromètres.

Lors des crises (sécheresses ou crues) les données hydrométriques participent directement aux processus de décision pour la gestion en temps réel mais également à l’analyse *a posteriori* pour le règlement des litiges. Pour pouvoir prendre des décisions, il est essentiel de connaître l’incertitude associée aux données de débit. Si les techniques hydrométriques se sont nettement améliorées au cours des dernières décennies, l’estimation des incertitudes reste un défi pour la communauté de l’hydrométrie dont les enjeux se situent à l’interface entre scientifiques et décisionnaires. La maîtrise (quantification et réduction) et la communication des incertitudes sur les données produites doit permettre de limiter le risque de prise de décision erronée et, ainsi, éviter des dépenses inutiles, des poursuites judiciaires injustifiées ou des conséquences néfastes pour la société ou pour les activités humaines.

Alors que la majorité des études portant sur les incertitudes de débit sont plutôt anciennes, comme en témoignent les études bibliographiques de Pelletier (1988) et McMillan *et al.* (2012), les évolutions réglementaires, comme le respect du débit réservé à l’aval des ouvrages hydrauliques, la détermination des volumes prélevables ou encore la détermination des flux de matière dans les rivières se traduisent par de nouveaux besoins en matière de réseaux d’observation des débits. Les attentes, telles que la prédétermination des extrêmes, la gestion et le partage des ressources en eau, le suivi de la qualité environnementale et l’évaluation des changements globaux nécessitent des données fiables et précises. C’est pourquoi, depuis quelques années, la discipline de l’hydrométrie s’organise autour de la quantification des incertitudes des données de débit. Cette étude, portant sur la quantification des incertitudes des jaugeages au courantomètre, s’inscrit dans une suite de travaux récents dont la perspective vise la mise à jour potentielle de la norme ISO 748 (ISO, 2009).

Ce travail vise donc à quantifier les incertitudes des jaugeages au courantomètre, mesures ponctuelles du débit. Ces dernières répondent à des enjeux ponctuels, tels que le contrôle d'un débit réservé, ou de manière pérenne pour la construction et le suivi des courbes de tarage permettant l'obtention de chroniques temporelles de débit.

L'objectif de cette thèse consiste à proposer un calcul d'incertitude des jaugeages au courantomètre applicable à tout jaugeage.

Ce manuscrit se décompose en quatre parties. La première partie (partie I) présente des éléments d'hydraulique et d'hydromorphologie fluviale puis dresse le contexte de l'étude. Les activités humaines fortement dépendantes de l'eau nécessitent une gestion de la ressource qui ne peut avoir lieu que si l'on dispose de données de débit fiables. Les outils mis à disposition des hydrologues pour produire de telles données seront abordés et les sources d'incertitudes associées aux mesures de débit seront mises en évidence.

La seconde partie (partie II) porte sur la définition des jaugeages au courantomètre et dresse l'état de l'art des méthodes analytiques du calcul des incertitudes associées. L'application de ces méthodes à un ensemble de jaugeages soulignera les limites de chacune d'entre elles, justifiant les recherches menées au cours de cette thèse.

Face aux limites des méthodes exposées dans la partie II, la partie III expose une nouvelle méthode permettant d'objectiver les différentes sources d'incertitude pour l'expression analytique de l'incertitude des jaugeages au courantomètre. Une nouvelle estimation du terme d'incertitude prépondérant u'_m , portant sur l'erreur due à l'intégration latérale des profils des profondeurs et des vitesses moyennes, est proposée dans cette thèse afin de palier les limites des méthodes analytiques existantes. Une méthode d'estimation du terme d'incertitude u'_m , basée sur la définition d'un indice d'échantillonnage et sur l'étude de jaugeages à forte densité d'échantillonnage, est proposée. En complément, d'autres termes d'incertitude seront objectivés. L'estimation de l'incertitude selon cette nouvelle méthode, nommée FLAURE (pour *FLow Analog UnceRtainty Estimation*) sera appliquée à un ensemble de 3930 jaugeages de routine et illustrée par quelques exemples.

En l'absence d'étalon de référence en termes de débit d'un cours d'eau à surface libre, deux campagnes d'essais interlaboratoires ont été menées sur quatre petits cours d'eau en France. Cette approche, permettant d'obtenir une estimation de l'incertitude dans des conditions d'essais données, sera confrontée, dans la partie IV, aux méthodes analytiques pour évaluer la pertinence de celles-ci. Les résultats obtenus sur les deux campagnes d'essais mettront en évidence les limites des deux approches et des préconisations pour des futurs essais seront enfin discutées.

PREMIÈRE PARTIE

Contexte de l'étude



Station hydrométrique avec seuil dans le parc du château de Vizille (Isère, France). Source : A. Despax.

Notions fondamentales

Le terme "*hydrométrie*" provient des racines grecques "*hydro*" signifiant eau et "*métrie*", mesure. L'Académie Française définit ainsi ce terme, en se basant sur son étymologie, comme la « *Science qui a pour objet la mesure des propriétés physiques des liquides, et particulièrement de l'eau* » (Académie française 1986). Cette définition fixe néanmoins un périmètre trop large et on retiendra la définition suivante, tirée du Larousse : « *Science qui a pour objet de mesurer les propriétés physiques de l'eau et spécialement le débit des eaux superficielles et souterraines* ». De manière plus restrictive, on définit l'hydrométrie comme « *La discipline qui s'attache à mesurer la hauteur, les vitesses et le débit des écoulements des cours d'eaux naturels et artificiels* » (Perret *et al.*, 2017, ¹). Cette science est donc à l'interface entre deux disciplines : l'hydraulique fluviale et la métrologie. Le scientifique s'intéressant au domaine de l'hydrométrie, effectuant et participant à des mesures hydrométriques, sera désigné par la suite sous le terme d'« *hydromètre* » (Perret *et al.*, 2017). D'autres organismes suggèrent l'appellation « jaugeur » ou « hydrologue de terrain » pour désigner le technicien qui effectue les mesures. Cette dernière dénomination élégante souligne le fait que l'hydrométrie est indissociable de l'hydrologie : sans hydromètre pas d'hydrologie ; sans hydrologue pas d'hydrométrie.

Ce chapitre propose tout d'abord un inventaire des symboles et notations utilisés dans cette étude. Des éléments d'hydraulique à surface libre, utiles au domaine de l'hydrométrie sont ensuite exposés brièvement en section 1.2 ainsi que des notions d'hydromorphologie fluviale, en section 1.3, afin de comprendre la complexité des cours d'eau. Les définitions relatives au domaine de la métrologie sont exposée à l'annexe A.

1.1 Notations et unités

Le tableau 1.1 expose la définition des symboles utilisés dans cette étude et leurs unités associées. Dans la suite de ce document, la notation "[/]" désigne une unité sans dimension.

Les incertitudes sont généralement notées en utilisant la lettre u . Soit x une grandeur mesurée, comme estimation du mesurande X (valeur vraie, voir la définition en section A.1), on note $u(x)$, l'incertitude type absolue, exprimée dans l'unité de la grandeur mesurée et généralement au niveau de confiance de 68% (facteur d'élargissement $k = 1$). La notation $U(x)$ désigne une incertitude composée ou combinée portant sur la grandeur x . Celle-ci est généralement exprimée selon un niveau de confiance de 95% ($k = 1,96 \simeq 2$, ou niveau de risque de 5%) ou 99% ($k = 2,58$). Les valeurs du facteur d'élargissement k supposent une distribution de l'incertitude

1. Nouvelle charte qualité de l'hydrométrie, en cours de rédaction.

TABLE 1.1 – Symboles et notations utilisés dans le manuscrit.

Indice	Unité	Description
A	$[\text{m}^2]$	Aire de la section mouillée.
C	$[\text{m}^3/\text{m}^3]$	Concentration
D et h	$[\text{m}]$	Profondeur d'eau et hauteur
g	$[\text{m}/\text{s}^2]$	Accélération de la pesanteur
K_s	$[\text{m}^{1/3}/\text{s}]$	Coefficient de Strickler
$BouL$	$[\text{m}]$	Largeur au miroir de la section
n	$[\text{s}/\text{m}^{1/3}]$	Coefficient Manning, inverse du coefficient de Strickler
P_m	$[\text{m}]$	Périmètre mouillé
PU ou q	$[\text{m}^2/\text{s}]$	Profil ou débit unitaire
Q	$[\text{m}^3/\text{s}]$	Débit liquide
R_h	$[\text{m}]$	Rayon hydraulique = A/P_m
U	$[\text{m}/\text{s}]$	Vitesse débitante = Q/A
v	$[\text{m}/\text{s}]$	Vitesse locale
V	$[\text{m}/\text{s}]$	Vitesse moyenne ou linéaire $[\text{m}^2\text{s}^{-1}/\text{m}]$
x		Axe latéral de la section (voir figure 1.1)
y		Axe vertical de la section (voir figure 1.1)
z		Axe longitudinal, dans la direction de l'écoulement (voir figure 1.1)

suivant une loi normale. Les notations $u'(x)$ et $U'(x)$ désignent respectivement les incertitudes relatives, exprimées en [%], type et combinée.

Outil utilisé

L'ensemble des développements et des calculs de cette thèse ont été réalisés sous "R" (R Core Team, 2013), progiciel libre. Certaines fonctions utilisées sont inscrites en italique dans le texte.

1.2 Éléments d'hydraulique à surface libre

L'hydraulique à surface libre ou hydraulique fluviale traite essentiellement des écoulements à surface libre dans les cours d'eau naturels ou artificiels. Il s'agit d'une des plus anciennes sciences explorées par l'homme puisqu'elle commande l'élément indispensable à la vie. L'objet de cette section n'est pas de reprendre de manière exhaustive tout l'état de l'art depuis l'origine de cette discipline mais d'aborder quelques éléments utiles à cette étude.

Un écoulement à surface libre se caractérise par une pression à la surface de l'eau équivalent à la pression atmosphérique. L'écoulement est dû à la différence de charge hydraulique entre deux sections.

1.2.1 Caractéristiques des canaux à surface libre

En hydraulique à surface libre, on désigne un bief comme un tronçon homogène de cours d'eau délimité par deux sections transversales (amont et aval), une section transversale étant une section plane normale à la direction de l'écoulement, comme illustré à la figure 1.1.

Un bief se caractérise par sa pente de fond, sa pente d'énergie J et la pente i de la ligne



FIGURE 1.1 – Section transversale d’une rivière et définition des axes x , y et z . Schéma adapté de Hauet (2006).

d’eau (selon le repère (y, z)) ainsi que par les caractéristiques géométriques des sections en travers. On appelle canal prismatique un canal dont la section ne varie pas et dont la pente longitudinale et la rugosité restent constantes (la hauteur d’eau peut cependant varier).

Les caractéristiques géométriques usuelles d’une section transversale (aire de la section mouillée A , profondeur D , largeur au miroir L et périmètre mouillé P_m) sont illustrées à la figure 1.2. On distingue deux types de canaux à surface libre : les cours d’eau naturels, dont la morphologie est irrégulière (voir figure 1.2b) et les canaux construits par l’homme (canaux d’irrigation, d’assainissement ou de navigation par exemple) et dont les caractéristiques géométriques sont plus régulières, comme illustré à la figure 1.2a. L’application de la théorie hydraulique sur des canaux artificiels donne souvent des résultats plus réalistes que sur des rivières naturelles.

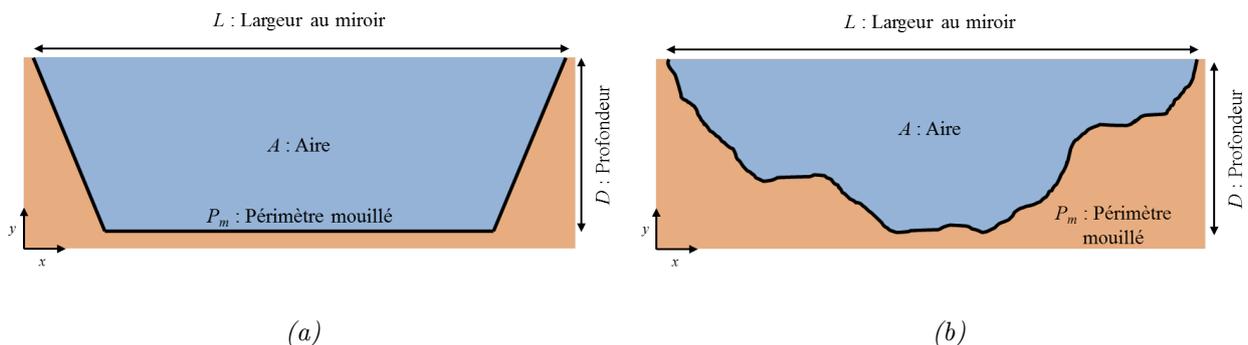


FIGURE 1.2 – Caractéristiques géométriques d’une section en travers d’un canal artificiel (a) et d’un cours d’eau naturel (b).

On constate, en comparant les figures 1.2a et 1.2b, que le périmètre mouillé, représentant la longueur du fond en contact avec le liquide, est plus simple à estimer pour un canal trapézoïdal que pour une section naturelle de rivière.

D’autres caractéristiques telles que le rayon hydraulique $R_h = A/P_m$ et la profondeur hydraulique $h_H = A/L$ sont couramment utilisées. La section optimale, c’est-à-dire permettant de

faire passer un débit liquide maximal, possède la forme d'une demi-conduite circulaire (Roos *et al.*, 1999), soit une forme concave.

Pour une section d'écoulement donnée, le débit liquide, noté Q , se définit comme le volume de liquide V_L écoulé à travers la surface A de la section par unité de temps T , comme exprimé à l'équation 1.1.

$$Q = \frac{V_L}{T} \text{ [m}^3\text{/s]} \quad (1.1)$$

Le rapport entre le débit Q et l'aire de la section A , noté U et exprimé en [m/s], est appelé vitesse débitante.

1.2.2 Caractéristiques et régimes de l'écoulement

Turbulence

Le calcul du nombre adimensionnel de Reynolds, exprimé par l'équation 1.2 (CETMEF, 2001), permet de distinguer le caractère laminaire ($Re < 2040$) ou turbulent ($Re > 2040$) de l'écoulement (Avila *et al.*, 2011).

$$Re = \frac{4\mu UR_h}{\rho} \text{ [/]} \quad (1.2)$$

où U et R_h désignent la vitesse débitante de la section $U = Q/A$ et le rayon hydraulique $R_h = A/P_m$; μ et ρ sont respectivement la viscosité dynamique, exprimée en [kg/(ms)], et la masse volumique du fluide en [kg/m³].

Sans le démontrer, on admet que le régime d'un écoulement à surface libre est toujours turbulent.

Un écoulement est laminaire lorsque les "filets" liquides (ou lignes tracées par les particules de fluide le long du cours d'eau) qui le composent sont parallèles et juxtaposés. Les molécules de fluide ont alors chacune une vitesse dont le vecteur est tangent à l'axe d'écoulement. A l'inverse, un écoulement est dit turbulent lorsque ses molécules de fluide ont une direction principale dans le sens de l'axe principal d'écoulement, à laquelle s'ajoute une composante transversale provoquée par exemple par des obstacles, des changements locaux des caractéristiques géométriques de la section ou la rugosité des parois. Les filets liquides s'entrechoquent et produisent des tourbillons. Sous l'effet de cette agitation, les vitesses de chaque molécule de fluide varient de manière aléatoire et leurs paramètres ainsi que leurs directions ne peuvent pas être déterminés à un instant donné. Il est néanmoins possible d'accéder aux valeurs moyennes de ceux-ci par intégration temporelle du signal.

Écoulement permanent ou transitoire

On parle d'un écoulement permanent si la profondeur hydraulique et les vitesses moyennes et ponctuelles de l'écoulement du canal ne varient pas dans le temps. En écoulement permanent, le débit se propage en restant constant. Dans le cas contraire, l'écoulement est qualifié de non-permanent ou transitoire. En milieu naturel, l'écoulement est rarement permanent, mais les variations sont parfois suffisamment lentes pour justifier l'utilisation de cette hypothèse sur un laps de temps considéré. Le régime est alors qualifié de stationnaire. Il se traduit mathématiquement par la nullité de toutes les dérivées partielles des grandeurs par rapport au temps et permet de simplifier les équations de l'hydraulique.

Régime fluvial, critique ou torrentiel

Le nombre de Froude, noté Fr , désigne un paramètre hydraulique adimensionnel qui permet de caractériser le régime de l'écoulement (Chow, 1959). Il se calcule par l'équation 1.3 :

$$Fr = \sqrt{\frac{Q^2 B}{g A^3}} = \frac{U}{\sqrt{g D}} \quad [1] \quad (1.3)$$

où g est l'accélération gravitationnelle ($g \simeq 9,81$ [m/s²]). Q , B , A , U et D désignent respectivement le débit, la largeur au miroir, l'aire de la section, la vitesse débitante et la profondeur de l'écoulement.

Ce nombre quantifie le rapport de la vitesse du courant sur la célérité des ondes de gravité. En d'autres termes, il exprime le rapport entre l'énergie cinétique et l'énergie potentielle de l'écoulement. S'il est supérieur à 1 cela signifie que la vitesse du courant est supérieure à la célérité des ondes de gravité. Les ondes ne peuvent alors pas remonter le courant et l'écoulement est torrentiel ou super-critique. S'il est inférieur à 1, alors la célérité des ondes est supérieure à la vitesse du courant, les ondes peuvent remonter vers l'amont (l'écoulement est influencé par l'amont et par l'aval) et l'écoulement est qualifié de fluvial ou sub-critique. La transition a lieu pour un nombre de Froude égal à 1, en un point où la célérité des ondes est égale à la vitesse de l'écoulement. On dit que l'écoulement est critique lorsque le nombre de Froude est égal à 1.

Les différents régimes que l'on peut rencontrer sont illustrés à la figure 1.3.

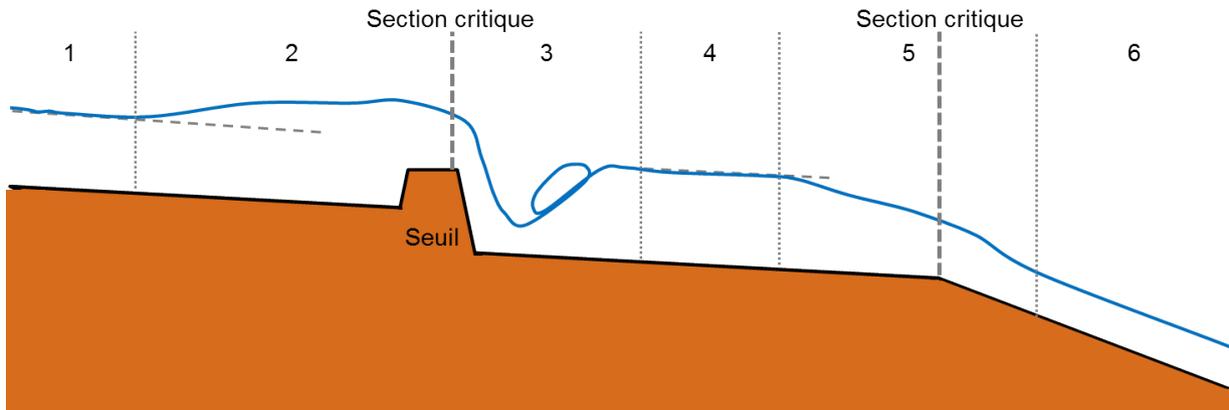


FIGURE 1.3 – Régimes d'écoulement d'après Degoutte (2006). Les chiffres renvoient aux régimes d'écoulement suivants :

- 1 : Régime uniforme fluvial.
- 2 : Régime graduellement varié. L'écoulement est qualifié de décéléré en raison de vitesses ralenties à l'approche du seuil.
- 3 : Régime rapidement varié accéléré. Les vitesses augmentent après le passage du seuil.
- 4 : Régime uniforme fluvial.
- 5 : Régime rapidement varié accéléré. Les vitesses augmentent du fait d'une pente plus élevée.
- 6 : Régime torrentiel.

Régime uniforme ou non-uniforme

L'écoulement d'un canal est dit uniforme si la hauteur hydraulique et la vitesse restent invariables dans les diverses sections du canal. Au contraire, l'écoulement d'un canal est non-uniforme si la profondeur hydraulique et la vitesse changent d'une section à l'autre du canal.

On dit aussi que le régime est varié. On distingue le régime graduellement varié, pour lequel les caractéristiques de l'écoulement varient lentement dans l'espace, du régime rapidement varié, pour lequel elles varient rapidement. Dans les cours d'eau naturels, le régime est généralement graduellement varié sauf à proximité d'irrégularités (rétrécissement, seuil, rupture de pente) où celui-ci devient rapidement varié (voir la figure 1.3).

1.2.3 Formules empiriques de l'hydraulique fluviale

Cas des écoulements permanents et uniformes

L'hypothèse d'uniformité de l'écoulement est classique en hydraulique à surface libre et permet de simplifier les équations de l'hydraulique fluviale. Cette hypothèse est valable suffisamment loin à l'amont ou à l'aval d'une singularité, on dit alors que l'écoulement est uniforme. L'application du théorème de Bernoulli permet par exemple de démontrer que lorsque l'écoulement est uniforme, la perte de charge linéaire est égale à la pente du cours d'eau (Degoutte, 2006). En écoulement permanent uniforme, le débit dépend ainsi de la géométrie de la section, de la pente de la ligne de fond et de la rugosité du canal puisque les parois du canal induisent des frottements avec le liquide. Entre deux sections transversales et sous l'hypothèse d'un écoulement permanent uniforme, la formule de Chézy donne la relation suivante :

$$U = C_z \sqrt{R_h i} \quad (1.4)$$

où le coefficient de Chézy C_z désigne un paramètre de frottement qui est fonction de la nature des parois et du rayon hydraulique.

Pour estimer le coefficient de Chézy, la formule empirique de Strickler de la forme $C_z = K_s R_h^{1/6}$, où K_s désigne le coefficient de Strickler exprimé en $[m^{1/3}/s]$, est souvent utilisée. En utilisant la formule de Strickler, l'équation 1.4 permet d'exprimer Q comme :

$$Q = K_s A R_h^{2/3} i^{1/2} \quad (1.5)$$

où l'on rappelle que A désigne l'aire de la section en travers, et que la pente de la ligne d'eau i est équivalente à la pente longitudinale du fond.

Dans cette formulation, l'aire de la section A et le rayon hydraulique R_h dépendent de la profondeur d'eau dans la section. Ainsi, si au cours du temps les caractéristiques d'une section restent constantes, il est en pratique possible de déduire directement le débit Q traversant la section de la hauteur d'eau h mesurée par exemple par une échelle limnimétrique.

Cas des écoulements permanents rapidement variés

Lorsque l'écoulement rencontre une singularité naturelle ou artificielle (par exemple une rupture brutale de la pente de la ligne de fond, des enrochements formant un obstacle, un resserrement naturel ou encore un ouvrage d'art), l'écoulement à proximité n'est plus uniforme. Dans ce cas, la singularité provoque le passage de l'écoulement par la hauteur critique ($Fr = 1$). Cela correspond à la figure 1.3 aux transitions entre les régimes 2-3 et 5-6. On parle alors de section de contrôle. Ainsi, une perturbation ou une variation du niveau en aval de la section de contrôle n'influence pas le niveau en amont. Après la section critique, le fluide tombe en chute libre. La vitesse de chute du fluide U est exprimée par la loi de Torricelli telle que :

$$U = \sqrt{2g(h - h_0)} \quad (1.6)$$

où h et h_0 désignent respectivement la hauteur en $[m]$ mesurée à la section et la hauteur correspondant au débit nul.

En appliquant une loi de seuil du type $Q = mSU$, où m et S désignent respectivement un coefficient de frottement et la surface caractéristique de la section, l'équation 1.6 permet d'exprimer Q comme :

$$Q = mS\sqrt{2g(h - h_0)} \quad (1.7)$$

Généralisation

Les formules hydrauliques usuelles de Chézy et Manning-Strickler pour les écoulements uniformes (équations 1.4 et 1.5) et l'équation 1.7 pour les écoulements graduellement variés (en amont d'une singularité et par application d'une loi de seuil), peuvent être approchées par une loi puissance exprimant la relation entre le débit Q et la hauteur h d'eau au niveau d'une section telle que :

$$Q = a(h - h_0)^b \quad (1.8)$$

où h et h_0 désignent la hauteur en [m] mesurée à la section et la hauteur correspondant au débit nul. a et b sont des paramètres qui dépendent du type de contrôle hydraulique et des conditions d'écoulement.

1.2.4 Distribution des vitesses dans la section

La notion de vitesse débitante, définie précédemment comme le rapport du débit par la section mouillée, ainsi que l'hypothèse de permanence du débit cachent mal l'hétérogénéité de la distribution des vitesses dans la section et au cours du temps. D'après Graf et Altinakar (1993), les vitesses $v(x,y,z)$ se répartissent dans la section selon un paraboloïde, comme illustré à la figure 1.4.

Lorsque la section est suffisamment large ($B > 5D$), sauf à proximité des berges, on peut faire l'hypothèse que l'écoulement est bidimensionnel. En faisant l'hypothèse d'une section infiniment large, l'écoulement devient 1D et les vitesses ne varient que selon l'axe vertical y .

En se plaçant dans un cas unidimensionnel ou bidimensionnel, en dehors de l'influence des berges (voir la figure 1.4), pour un écoulement uniforme rugueux parfaitement développé, la distribution des vitesses peut être approchée par un profil logarithmique (Chow, 1959; Graf *et al.*, 1998; Ferro, 1999). D'après Graf et Altinakar (1993), celle-ci s'exprime comme :

$$\frac{v(y)}{u^*} = \frac{1}{\kappa} \ln \left(\frac{y}{k_s} \right) + B_r \quad (1.9)$$

où $v(y)$ désigne la vitesse à l'altitude y ; κ est la constante universelle de von Karman ($\kappa = 0,41$); k_s dénote la hauteur de rugosité et B_r est une constante numérique valant 8,5 selon Graf *et al.* (1998). u^* désigne la vitesse de frottement au fond, exprimée comme :

$$u^* = \sqrt{gJD} \quad (1.10)$$

où g , J et D désignent respectivement l'accélération moyenne de la gravité, la pente du fond de la rivière et le tirant d'eau.

Pour simplifier l'équation 1.9, il est classique en hydrométrie d'utiliser une loi puissance (ISO, 2009). Cette approximation donne des résultats cohérents avec un profil logarithmique modélisé par l'équation 1.9 (Le Coz, 2011). La loi puissance d'exposant $1/m$ fixé *a priori* donne la vitesse ponctuelle à la cote y au-dessus du fond sous la forme :

$$v(y) = \alpha y^{1/m} \quad (1.11)$$

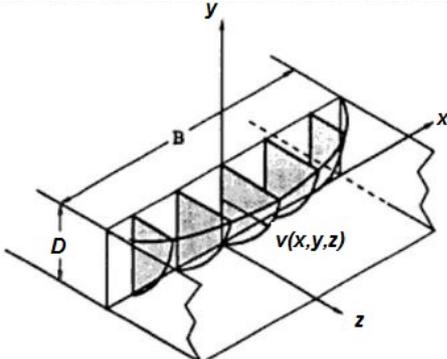
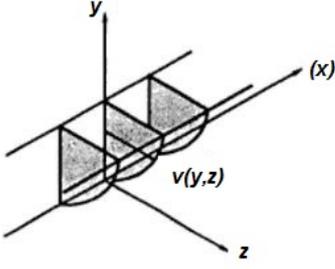
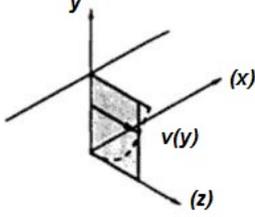
	<p>Ecoulement 3D si $B \leq 3 D$</p>
	<p>Ecoulement 2D si $B > 5 D$</p>
	<p>Ecoulement 1D $v = \frac{1}{D} \int_0^D u \, dy$</p>

FIGURE 1.4 – Répartition des vitesses selon la dimension considérée de l'écoulement. Schéma tiré de Graf et Altinakar (1993).

où α désigne un coefficient à caler. Celui-ci peut-être estimé sur la vitesse mesurée la plus basse, v_a à la cote a au-dessus du fond tel que :

$$v(y) = \left(\frac{y}{a}\right)^{1/m} v_a \quad (1.12)$$

En général, le coefficient m de rugosité varie entre 5 et 7. Celui-ci peut varier sur une plage plus étendue selon la résistance hydraulique. Pour des parois très rugueuses, une valeur de $m = 4$ peut s'appliquer. Une valeur de $m = 10$ caractérise au contraire des parois plus lisses. La figure 1.5 montre l'ajustement d'une loi puissance sur la vitesse moyenne, avec $m = 6$ et en supposant que celle-ci a lieu à 60% de la profondeur sous la surface de l'eau (Barrows et Horton, 1907).

Au fond, ou au contact de l'interface eau-lit, il y a adhérence (ou non glissement) entre le filet liquide et le matériau constitutif du lit. L'écoulement est turbulent rugueux, c'est-à-dire qu'il est fortement perturbé par la proximité d'anfractuosités et dissipe localement de l'énergie, occasionnant la majeure partie de la perte de charge linéaire. Dans la zone de fond, on observe ensuite un gradient élevé de vitesse. La vitesse moyenne est généralement atteinte dans la zone intermédiaire où le profil des vitesses est peu influencé par le fond et la surface libre. La vitesse maximale de l'écoulement est enfin observée dans la zone proche de la surface de l'eau. Dans un cas 1D la turbulence et la rugosité du lit sont les paramètres majeurs qui pilotent la distribution verticale des vitesses.

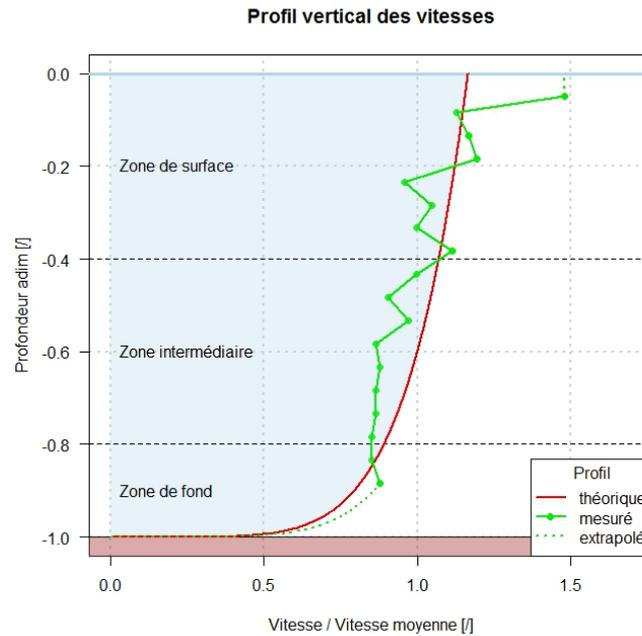


FIGURE 1.5 – Intégration des vitesses sur une verticale : comparaison entre un profil théorique en loi puissance et un profil mesuré (la profondeur est adimensionnelle, les vitesses sont normalisées par la vitesse moyenne).

A proximité des parois, la distribution latérale des vitesses peut également être modélisée par un profil logarithmique ou en loi puissance.

1.2.5 Autres définitions

Batillage : vagues produites par les oscillations du débit qui déferlent contre les berges ou les éléments d'hydrométrie comme les échelles limnimétriques.

Hystéresis : (dans le cas de l'hydrométrie) caractère du phénomène physique responsable de l'apparition de non-linéarités dans la relation hauteur-débit (*e.g.* Petersen-Øverleir, 2006; Dottori *et al.*, 2009; Le Coz *et al.*, 2012b), illustré à la figure 1.6.

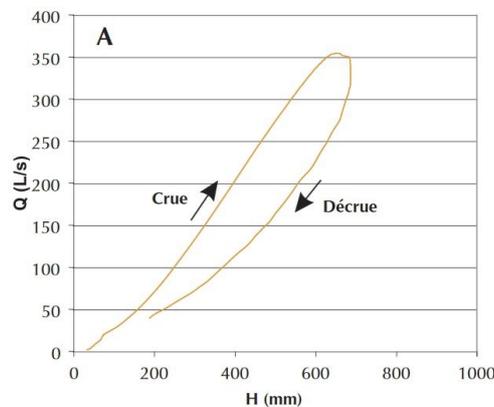


FIGURE 1.6 – Exemple de courbe de tarage en forme de "raquette". La non stationnarité engendrée par le phénomène d'hystéresis induit qu'une même hauteur peut correspondre à plusieurs débits. Figure tirée de Benoist et Birgand (2002).

1.3 De la complexité des cours d'eau

La discipline qui traite des processus qui régissent le fonctionnement des cours d'eau (la dynamique fluviale) ainsi que des formes qui en résultent (la morphologie fluviale) se nomme l'hydromorphologie fluviale. Des éléments de cette discipline sont exposés ci-dessous, ils s'appuient sur l'ouvrage de Malavoi et Bravard (2010). Ces éléments permettent de mettre en évidence les phénomènes à l'origine des morphologies variées des cours d'eau (la variabilité des caractéristiques géométriques des sections en travers, décrite à la section 1.3.1) et les conséquences sur la distribution des vitesses dans une section en travers (voir la section 1.3.2).

Le fonctionnement hydromorphologique d'un cours d'eau est complexe puisqu'il est soumis à des variables de deux types (Schumm, 1977) :

- Les variables de "contrôle" que sont le débit liquide et le débit solide. Le débit liquide dépend principalement des conditions météorologiques et des caractéristiques physiques du bassin versant (dénivellation et nature du sol par exemple). Ce débit liquide possède une influence sur le débit solide puisqu'il donne la puissance nécessaire aux phénomènes d'érosion et de transport solide. Le débit solide dépend également de la pédologie, de la couverture végétale des sols (qui freine l'érosion) et de la géologie des surfaces drainées par les écoulements.
- Des variables de "réponse" comme la largeur, la sinuosité et la pente locale du tronçon de rivière qui traduisent les ajustements de la rivière face aux changements des variables de contrôle. Ces changements peuvent être d'origine naturelle ou d'origine anthropique.

Dans des conditions naturelles stables (en termes notamment de climatologie et de couverture de sol), le système tend vers un équilibre stable. La dynamique fluviale peut alors se résumer comme « *un ajustement permanent de la morphologie du cours d'eau, autour de conditions moyennes, par le biais des processus d'érosion-dépôt* » (Malavoi et Bravard, 2010).

1.3.1 Sur les sections en travers

Les fluctuations des variables de contrôle engendrent des ajustement des variables de réponse comme le profil en long du cours d'eau. En complément de cet ajustement, le cours d'eau possède une certaine "mobilité" lui permettant d'ajuster plus ou moins rapidement sa géométrie en travers aux fluctuations des variables de contrôle. Les cours d'eau sont ainsi capables de développer une géométrie en travers adaptée aux conditions locales d'apport en débits liquide et solide. La géométrie en travers est donc très variable sur le linéaire d'un cours d'eau. La figure 1.7 montre la variabilité des sections en travers selon leur position sur le cours d'eau.

La nature de la charge grossière transportée (les particules de taille généralement supérieure à celle du sable) conditionne, en grande partie, la nature du profil bathymétrique en une section donnée. Lorsque les particules sont fines (du sable par exemple), le profil bathymétrique sera plutôt lisse. A l'inverse, des éléments transportés plus gros (rochers par exemple) participeront à la nature irrégulière de la section en travers.

On observe que les sections fluviales sont très aplaties avec des rapports d'aspect B/D très grands.

1.3.2 Sur les profils de vitesses

Les équations présentées précédemment (équations 1.9 et 1.11) traduisent des profils théoriques verticaux de vitesse sur un bief rectiligne. Cette hypothèse de bief rectiligne n'est cepen-

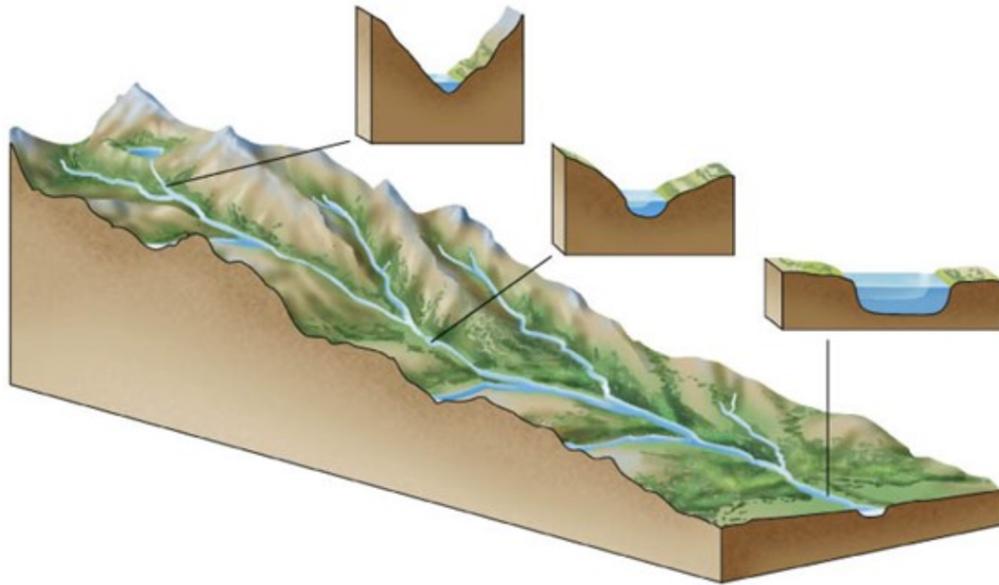


FIGURE 1.7 – Exemple de sections en travers sur un bassin versant. Source : *The British Geographer*.

dant pas justifiée en milieu naturel. La présence de méandres, de confluent ou d'obstacles tels que des gros rochers ou des ouvrages artificiels perturbent en effet la distribution théorique des vitesses dans la section en travers. La rugosité et les irrégularités du fond, dues aux phénomènes de transport solide, affectent également les profils verticaux de vitesse. En plus de modifier la composante principale de la vitesse (selon l'axe z), les irrégularités du profil bathymétrique d'un tronçon de rivière ou la présence de singularités provoquent l'apparition de courants secondaires (dont la composante de vitesse apparaît selon les axes x et y), participant aux phénomènes de turbulence. On note toutefois que, dans une section en travers d'un cours d'eau, la distribution latérale des vitesses (composante principale selon l'axe z) est généralement plus lissée que le profil bathymétrique.

Besoins et enjeux des mesures de débit

2.1 La connaissance du débit, outil clé de gestion de la ressource en eau

L'eau est à l'origine de la vie sur la Terre et donc de la naissance de l'homme. La maîtrise de l'eau par l'homme a permis la naissance et le développement des premières grandes civilisations grâce à l'agriculture. L'ingéniosité de l'homme s'illustre par les systèmes d'irrigation qu'il a développés. On peut citer, par exemple, la construction de réseaux souterrains de galeries (appelées ganats) en Mésopotamie vers la fin du premier millénaire avant J.-C. pour acheminer l'eau sur le plateau iranien.

L'eau, par ses propriétés, est nécessaire à la majeure partie des activités humaines. Cantonnée aux usages agricoles et artisanaux jusqu'au début du XVIII^e siècle, les volumes d'eau prélevés et consommés¹ par l'homme ont considérablement augmenté depuis le début du XIX^e siècle avec le développement de l'industrie. L'eau est ainsi devenue un élément-clé du développement des transports fluviaux, de la production d'énergie (en tant que source d'énergie pour l'hydroélectricité et source de refroidissement des centrales thermiques ou nucléaires), de tout type d'industries et aussi du tourisme.

On comprend alors aisément pourquoi l'homme s'est installé près des cours d'eau augmentant de ce fait sa dépendance et sa vulnérabilité face à la variabilité temporelle de cette ressource comme les risques de crue.

Face à l'accroissement de la population, l'augmentation des besoins alimentaires et les effets probables du réchauffement climatique, la pression sur la ressource hydrique s'accroît dangereusement (Vörösmarty *et al.*, 2000). Le Programme des Nations Unies pour le Développement estime ainsi que 3 milliards d'individus vivront dans des pays sous "stress hydrique", c'est-à-dire avec moins de 1700 [m³] d'eau par an et par habitant (Falkenmark et Widstrand, 1992), à l'horizon 2050 (United Nations Development Programme, 2006).

Outre les séquelles environnementales d'une utilisation excessive de l'eau, les conséquences sociales (à l'image du fleuve Colorado dont seulement 9% de l'eau atteint l'embouchure suite à la signature d'un traité entre le Mexique et les États-Unis (Vogel et Ketcham, 2015)), alimentaires, sanitaires et économiques tendent à augmenter les conflits autour de l'"or bleu". Les tensions géopolitiques autour des fleuves transfrontaliers en témoignent (citons par exemple les

1. On distingue bien prélèvement et consommation d'eau. Le prélèvement désigne la quantité d'eau prélevée dans le milieu tandis que la consommation correspond à l'eau réellement utilisée (éventuellement évaporée) et dégradée durant l'usage et qui ne retourne pas dans le milieu naturel.

cas du Nil Bleu, de la vallée du Jourdain ou encore du Tigre et de l'Euphrate). Soulignons ici que ces tensions se transposent et s'observent à toutes les échelles spatiales (partant des conflits entre agriculteurs à des conflits internationaux).

Dans ce contexte, le management durable des ressources en eau devient un défi de plus en plus complexe. Pour répondre à ces enjeux, les données hydrologiques constituent le premier outil pour aider à définir des stratégies de gestion et de management des ressources en eau. En particulier les données de débit des eaux de surface (données hydrométriques), permettent de fournir une information sur la disponibilité de la ressource en eau ainsi que sur sa variabilité dans le temps et l'espace. Le débit est la grandeur intégratrice des variables météorologiques et des constantes physiques d'un bassin versant. La réponse hydrologique d'un bassin versant possède notamment l'avantage d'être mesurable en un point précis, contrairement à la variable pluie dont la mesure n'est souvent effectuée que par échantillonnage spatial, même si aujourd'hui les radars pallient en grande partie cet inconvénient. Les données de débit répondent à la fois à des besoins en temps réel comme la prévision des crues et à des enjeux à plus long terme tels que le prédimensionnement d'ouvrages face aux crues ou pour les besoins de l'irrigation, ou encore la détection de changement de régime hydrologique dans un contexte de changement climatique.

Compte-tenu de la multiplicité des usages et usagers de l'eau, la connaissance du débit des rivières et de ces variations permet de répondre à différents objectifs, plus ou moins interdépendants. Le tableau 2.1 recense la diversité des activités nécessitant des données hydrométriques. On souligne que la modélisation hydrologique tend à être un outil incontournable dans la gestion des ressources en eau dans tous les domaines économiques liés à l'eau. Ces modèles nécessitent une calibration par l'utilisation de données hydrométriques de qualité. Pour répondre à l'ensemble de ces enjeux, le système de mesure des débits se doit d'être fiable et permettre un accès aux données en temps réel (Stroffek, 2010). Au delà de l'aspect temps réel, de nombreuses études ont besoin de séries chronologiques de débit, d'où la nécessité de constituer des séries chronologiques à valeur patrimoniale (Chery et Filali, 2004).

2.2 La gestion des ressources en eau à l'échelle française

2.2.1 Cadre général

En France, la gestion des ressources en eau se décline à des échelles différentes. D'un point de vue législatif, elle est basée sur des directives européennes (comme la Directive Cadre sur l'Eau de 2000² ou *Water Framework Directive*) transposées en droit français via la Loi sur l'Eau et les Milieux Aquatiques (LEMA) du 30 décembre 2006³.

La gestion de l'eau est décentralisée tout en étant coordonnée au niveau national voire international dans le cas des bassins versants transfrontaliers (le Rhin par exemple). Six agences de l'eau, dont le découpage assure une cohérence hydrologique, ont été créées. Elles ont pour missions de contribuer à réduire les pollutions, à protéger les ressources en eau et les milieux aquatiques grâce à des instruments économiques d'incitation (principes pollueur-payeur et utilisateur-payeur). Elles perçoivent ainsi des redevances qui sont ensuite redistribuées sous forme d'aides finançant des projets ayant un impact positif sur la ressource. Un comité de bassin (parfois dénommé "parlement local de l'eau") regroupant des représentants de l'État, des collectivités locales et des usagers définit les grands axes de la politique de l'eau sur le périmètre de l'agence. Il permet d'élaborer le Schéma Directeur d'Aménagement et de Gestion des Eaux

2. Directive 2000/60/CE adoptée le 23 octobre 2000

3. Loi 2006-1772 du 30 décembre 2006 intégrée au code de l'environnement

TABLE 2.1 – Principaux domaines nécessitant des données hydrométriques.

Domaine	Objectifs
<i>Gestion des ressources en eau</i>	
Planification et gestion des ressources	Quantification des ressources en eau de surface Suivi et gestion des prélèvements en eau Planification et dimensionnement de projets de captages durables Évaluation et estimation des risques de pénuries en eau Études d'impacts des prélèvements Évaluation de l'impact potentiel du changement climatique
Qualité de l'eau	Quantification des rejets dans les eaux de surface (polluants, nutriments et de transport solide) Études sur la capacité d'assimilation des rejets d'un bassin versant Études hydro-écologiques (évaluation et préservation de la biodiversité et des habitats aquatiques)
Recherche et éducation	Compréhension des phénomènes hydrologiques Amélioration des normes et de la législation relative à l'eau Impact du changement climatique (Giuntoli <i>et al.</i> , 2013)
<i>Sécurité</i>	
Crues et inondations	Estimation et gestion des risques crues Système de prévision (modèle) et d'alerte des crues Mesures de prévention et de réduction des risques Protection des zones habitées
Dimensionnement des ouvrages	Digues, barrages
<i>Développement économique</i>	
Dimensionnement d'infrastructures	Routes, ponts, digues, retenues (irrigation), captage des eaux de surface et réseaux d'assainissement
Planification et développement	Définition des zones inondables
Hydro-électricité	Planification et dimensionnement des installations d'hydro-électricité Management, exploitation et optimisation des ouvrages Gestion du transport sédimentaire
Prélèvements d'eau	Irrigation Industries (dont centrales thermiques et nucléaires)
Pêche	Gestion de la ressource
Navigation et tourisme	Dimensionnement, gestion et exploitation des ouvrages de navigation fluviale Activités sportives en eau douce

(SDAGE), qui fixe les objectifs et les priorités d'actions sur une période de six années. Le SDAGE fixe par exemple le Débit Objectif d'Étiage (DOE) en différents points clé du bassin hydrographique afin de garantir le bon fonctionnement du milieu aquatique. Le DOE correspond à une valeur de débit moyen mensuel (sauf pour la Garonne à Lamagistère où il s'agit

d'un VCN₁₀⁴) défini par l'article L.211-1 du code de l'environnement, comme "le débit de référence permettant l'atteinte du bon état des eaux et au-dessus duquel est satisfait l'ensemble des usages en moyenne 8 années sur 10".

Les Schémas d'Aménagement et de Gestion des Eaux (SAGE) et les contrats de rivières sont la déclinaison des SDAGE au niveau local. Les Établissements Publics Territoriaux de Bassins en assurent généralement la mise en œuvre en collaboration avec les différents acteurs. C'est le cas de l'Établissement Public Loire pour lequel il existe un modèle opérationnel d'aide à la prise de décision pour le soutien d'étiage (Mathevet *et al.*, 2010).

Enfin, la loi de modernisation publique territoriale et d'affirmation des métropoles (MAP-TAM) du 27 janvier 2014 attribue à l'échelon communal une compétence exclusive et obligatoire relative à la GEstion des Milieux Aquatiques et la Prévention des Inondations (GEMAPI). La compétence et la responsabilité sont donc transférées et concentrées au "bloc communal", c'est à dire une commune isolée ou un groupement de communes (Établissement Public de Coopération Intercommunale à Fiscalité Propre). Le bloc communal assure par exemple la prévention des inondations par la gestion des ouvrages de protection comme les digues. L'État assure toutefois l'élaboration des cartes de zones inondables et des plans de prévention des risques, la prévision et l'alerte des crues sur un périmètre donné via les Services de Prévisions des Crues (SPC) et soutient les communes dont les moyens sont insuffisants. Les municipalités garantissent également les services d'eau potable et d'assainissement.

Au niveau local, la réglementation est aussi assurée par des arrêtés préfectoraux et des arrêtés municipaux tels que les arrêtés de limitation des usages de l'eau. Pour la gestion des crises (sécheresse ou inondations) sur des cours d'eau importants, un préfet de région ou préfet coordinateur de bassin dispose de pouvoirs pour coordonner les décisions. Afin de garantir le respect de la législation, la "police de l'eau" réglemente les installations, ouvrages, travaux ou activités qui peuvent exercer des pressions sur les milieux aquatiques. En France, celle-ci est assurée par trois polices spécialisées : la police de l'eau et des milieux aquatiques, la police de la pêche, la police des installations classées. Elles sont coordonnées par les Missions InterServices de l'Eau et de la Nature (MISEN).

La police de l'eau est assurée par les Missions InterServices de l'Eau (MISE), l'Office National de l'Eau et des Milieux Aquatiques (ONEMA), les Directions Régionales de l'Environnement, de l'Aménagement et du Logement (DREAL), la gendarmerie et les maires.

L'expertise scientifique et technique est portée par l'ONEMA (intégré à la future Agence Française pour la Biodiversité) ou le Service Central d'Hydrométéorologie et d'Appui à la Prévision des Inondations (SCHAPI) sur le périmètre de l'hydrométrie et de la prévision des crues.

2.2.2 Les réseaux d'hydrométrie en France

Pour permettre une étude et une gestion quantitative des ressources superficielles en eau, il est nécessaire de disposer de réseaux performants de mesure de débit. En France, différents acteurs contribuent au suivi des ressources en eau et opèrent des réseaux d'hydrométrie. Il s'agit tout d'abord des services de l'État au travers des DREAL qui gèrent généralement les Services de Prévision des Crues (SPC) et les Unités d'Hydrométrie. On note que la réforme de l'hydrométrie de 2006⁵ pose les jalons d'une hydrométrie « unifiée » et modernisée au sein des services de l'État avec une réorganisation et une harmonisation des différents réseaux (hydrométrie gé-

4. Débit minimal sur 10 jours consécutifs

5. Circulaire du 13 avril 2006 relative à l'organisation de l'hydrométrie dans les DIREN et les SPC

nérale et annonce des crues). Les unités d'hydrométrie des DREAL constituent maintenant le seul service de l'État produisant toutes les données hydrométriques sur un territoire donné. Ce réseau hydrométrique comporte près de 3000 stations. D'autres organismes institutionnels tels que des Établissements Publics Territoriaux de Bassin (EPTB), des Conseils Départementaux, certains parcs naturels ou encore des syndicats de rivière exploitent des stations d'hydrométrie. La multiplicité de ces acteurs institutionnels, disposant pour certains de moyens limités (humains et financiers), peut poser des questions quant à la cohérence et la fiabilité des stations exploitées. Des organismes de recherche (Irstea, IRD, universités. . .) ainsi que des producteurs d'électricité et des compagnies d'aménagement tels que Électricité De France (EDF), la Compagnie d'Aménagement des Coteaux de Gascogne (CACG), la Compagnie Nationale du Rhône (CNR), la Société du Canal de Provence (SCP), les Voies Navigables de France (VNF), la compagnie d'aménagement du Bas-Rhône-Languedoc (BRL. . .) gèrent également des réseaux d'hydrométrie.

Ces producteurs de données disposent d'équipes permettant la maintenance des stations de mesure en rivière, le recueil des données, la réalisation de jaugeages et l'établissement des courbes de tarage. Les données sont ensuite validées, éventuellement corrigées et stockées dans des bases de données. Tous ces acteurs possèdent des objectifs divers (focalisés par exemple sur le suivi des étiages ou bien de crue), parfois concurrents, et la qualité des résultats produits peut en dépend. Ainsi, une station dont les objectifs sont le suivi des crues peut produire des valeurs de débit de mauvaise qualité en basse-eaux.

Une grande partie des données hydrométriques est collectée dans une banque de données nationale (la banque HYDRO⁶) et mise à disposition gratuitement sur internet. Le SCHAPI assure l'administration et les développements liés à ce service. La banque HYDRO collecte ainsi les hauteurs d'eau en provenance de plus de 3200 stations sur le sol français (Leleu *et al.*, 2014). Dans un contexte économique peu favorable (restrictions financières), certains services tentent de rationaliser la gestion de leur réseau hydrométrique. L'un des moyens mis en œuvre consiste à développer des partenariats entre organismes, y compris avec et entre les organismes privés.

2.2.3 Nécessité d'une normalisation

La multiplicité des acteurs et leurs interactions mettent en évidence la nécessité d'harmoniser les modes opératoires et si possible de les normaliser. L'estimation du débit sert à prendre des décisions, d'où la nécessité d'avoir la connaissance de l'incertitude associée afin que les décisions prises soient adaptées. La normalisation des modes opératoires et du calcul de l'incertitude doit être consensuelle (acceptée par tous les acteurs) et réaliste avec les contraintes opérationnelles du métier (en termes de coût et de mise en œuvre notamment) pour en assurer son applicabilité et sa diffusion la plus large.

Ces normes doivent permettre d'homogénéiser les pratiques de manière cohérente avec l'état de l'art et de définir un cadre. Avec l'appui d'un tel cadre, l'État peut alors bâtir une réglementation cohérente. On note toutefois que seul 1% des normes sont d'application obligatoire. Dans le domaine de l'hydrométrie, aucune norme n'a de caractère obligatoire. Les normes constituent avant tout un langage commun entre acteurs d'un même champ d'activité. Le respect d'une norme est généralement volontaire (non obligatoire) et traduit un engagement à satisfaire un niveau de qualité et de sécurité reconnu et approuvé. Un tel référentiel commun permet aussi d'accréditer, de qualifier des prestataires ou encore de minimiser les conflits juridiques entre

6. www.hydro.eaufrance.fr, consulté en juin 2016.

deux organismes.

Les normes définissent ainsi un cadre qui peut être ensuite décliné au travers de bonnes pratiques du métier, il s'agit notamment, en France, de la charte qualité de l'hydrométrie (Forray *et al.*, 1998) ou du guide des mesures hydrologiques (Le Coz *et al.*, 2008) du *Groupe Doppler Hydrométrie* (Le Coz *et al.*, 2007) qui traduisent une culture commune dans la communauté de l'hydrométrie. Chaque acteur dispose ensuite de son propre référentiel interne, souvent sous la forme de modes opératoires. Les normes en hydrométrie ne couvrent que certains aspects de la charte qualité puisqu'elles sont le fruit d'un processus d'accord consensuel entre les différentes parties prenantes, au niveau national ou international.

On note qu'une nouvelle version de la charte qualité de l'hydrométrie, à ce jour en cours de rédaction (Perret *et al.*, 2017), a été commanditée par le CONseil D'Orientation et d'appui Scientifique et Technique (CODOST) du SCHAPI. La mise à jour des différentes normes relatives à l'hydrométrie est quant à elle assurée par le comité technique international "ISO/TC 113 Hydrometry". En France, les travaux de ce comité sont suivis au sein de l'Association Française de NORmalisation (AFNOR⁷) par la commission "X10C Hydrométrie" réunissant des experts français du domaine.

2.2.4 Le réseau hydrométrique EDF-DTG

L'eau est une ressource naturelle à forts enjeux pour EDF. Elle constitue la source d'énergie primaire pour la production hydroélectrique et la source de refroidissement des centrales nucléaires et thermiques à flamme. En tant que concessionnaire ou propriétaire d'ouvrages de production d'électricité, EDF est responsable du fonctionnement en état sûr des installations ainsi que du respect des limites imposées par les textes réglementaires. Dans ce but, la Division Technique Générale d'EDF (EDF-DTG) réalise la surveillance et la prévision des variables hydrométéorologiques. Ces prévisions et cette surveillance répondent à quatre enjeux majeurs :

- Assurer l'exploitation des ouvrages de production en toute sûreté, notamment en conditions hydrologiques extrêmes (crues, étiages),
- Anticiper les phénomènes météorologiques extrêmes pouvant affecter les réseaux et les parcs éoliens (vents violents, givre, neige collante, foudre, températures de l'air extrêmes...),
- Respecter la réglementation concernant notamment l'impact des rejets et la température de l'eau à l'aval des centrales thermiques (nucléaire et à flamme),
- Optimiser l'utilisation des différents moyens de production, conformément aux cahiers des charges des aménagements et aux usages reconnus sur le bassin versant (eau potable, agriculture, tourisme...).

Pour répondre à ces besoins, EDF-DTG a développé depuis les années 1950 et dans la continuité du Service des Grandes Forces Hydrauliques, un réseau d'observation des variables climatiques telles que la température de l'air et de l'eau, les précipitations (pluie et neige), le débit des rivières, mais aussi des paramètres physico-chimiques de l'eau et des flux de matières en suspension. Les données collectées par des systèmes télé-transmis (Perret *et al.*, 2012) permettent la surveillance en quasi temps réel des cours d'eau et alimentent des modèles de prévision (débit et température) pour les exploitants d'ouvrages. Le stockage de séries patrimoniales permet également la réalisation d'études hydrologiques quantitatives et le dimensionnement d'ouvrages. Depuis quelques années, les données de débit permettent de réaliser des études sur

7. L'AFNOR est le représentant français de la normalisation au niveau du Comité Européen de Normalisation (CEN) et de l'ISO (organisation internationale de normalisation) auprès desquels elle défend les intérêts français.

des thématiques liées au transport solide ou à l'état qualitatif des eaux. De cette façon, EDF-DTG maîtrise tous les niveaux de l'hydrologie, de la production de la donnée à la prévision météorologique en passant par des études environnementales et le développement de modèles hydrologiques. Ainsi, EDF-DTG exploite un réseau de 280 stations d'hydrométrie réparties sur les bassins versants des installations (figure 2.1) auxquelles s'ajoutent 70 "stations usines". Ces dernières profitent de la présence d'ouvrages hydrauliques tels que les usines hydroélectriques ou les organes de décharge pour estimer le débit. Pour un barrage, le débit entrant peut ainsi être calculé en faisant le bilan hydrologique de l'aménagement via le débit turbiné, le débit déversé, le débit réservé, le débit dérivé et la variation de réserve.

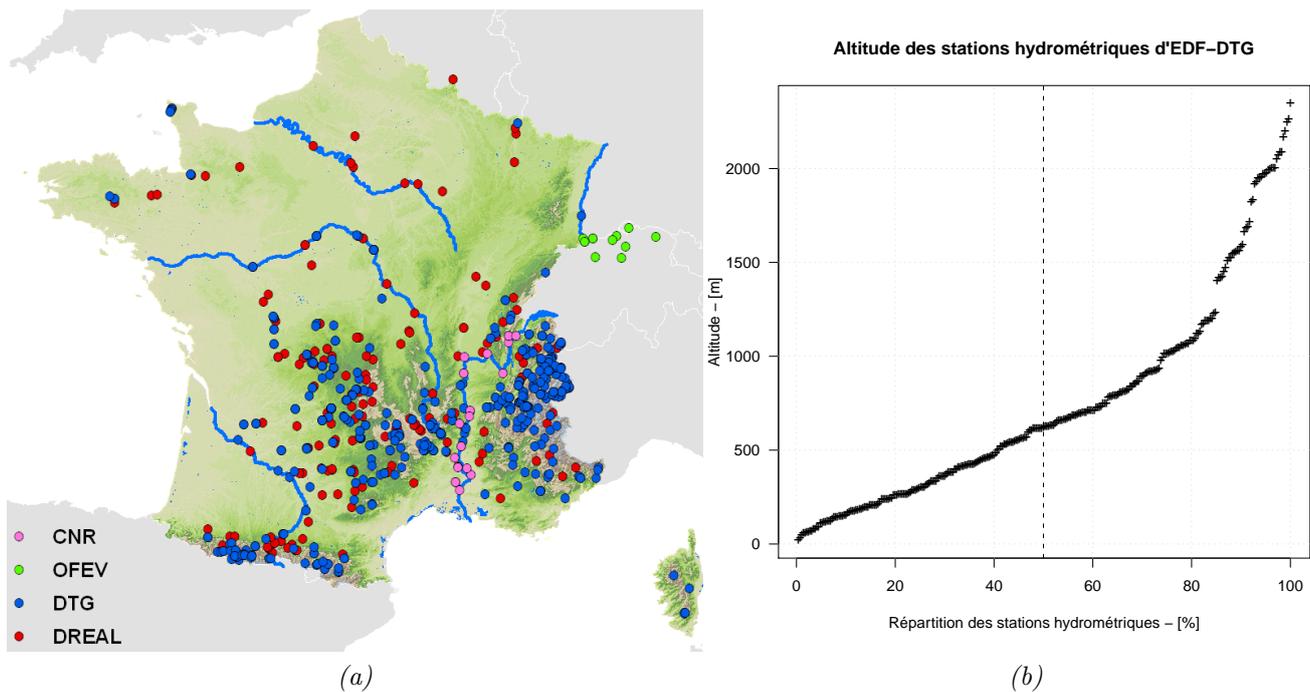


FIGURE 2.1 – (a) Le réseau hydrométrique EDF-DTG (stations EDF-DTG et partenaires) et (b) sa distribution altimétrique (Morlot, 2014).

Ce réseau couvre principalement les massifs montagneux des Alpes, des Pyrénées et du Massif-Central, comme le montre la répartition des stations sur le territoire français à la figure 2.1a. Ainsi, 50% des stations hydrométriques qui le composent sont localisées à plus de 600 [m] d'altitude (Perret *et al.*, 2012). La figure 2.1b. présente la répartition des stations hydrométriques en fonction de l'altitude. Cette singularité du milieu montagnard confère aux variables hydroclimatiques observées un comportement particulier. Par exemple le régime des cours d'eau est très turbulent et les stations hydrométriques à contrôle hydraulique aval sont très instables (Perret *et al.*, 2012) en raison d'un charriage de matériaux important.

En complément à ce réseau dense en région montagneuse, EDF-DTG a établi des conventions avec des organismes externes (CNR, Office fédéral de l'environnement suisse ou DREAL par exemple) pour compléter son réseau d'observation (figure 2.1a) dans le cadre des réseaux d'intérêt commun (RIC) ou via des conventions particulières. 105 stations d'hydrométrie complètent ainsi le réseau d'EDF-DTG (Perret, 2014).

Pour EDF, la connaissance et la maîtrise quantitative des débits répondent en même temps à des enjeux de sûreté des ouvrages, garantissent le respect de la réglementation et permettent l'optimisation de la ressource en eau.

Du point de vue de la sûreté des installations de production, les mesures de débit en rivière alimentent des modèles de prévisions qui aident les exploitants à gérer leurs installations notamment lors des épisodes de crue.

Les données patrimoniales permettent, quant à elles, de réaliser des études de pré-dimensionnement (évacuateurs de crues, sécurisation des centrales nucléaires vis à vis des hautes eaux ou des plus basses eaux).

Le suivi des débits transitant au niveau des installations de production permet de garantir le respect des arrêtés de prise et rejet (en lien également avec la température de l'eau) pour les installations nucléaires et thermiques et le respect du débit réservé à l'aval des ouvrages hydrauliques. Le bilan des volumes prélevés est réalisé pour le calcul des redevances aux Agences de l'eau.

Enfin, les prévisions de débit permettent l'optimisation des moyens de production pour garantir la gestion de l'équilibre offre-demande au périmètre d'EDF.

Face à ces enjeux, le calcul des incertitudes associées aux données de débit permet de quantifier la confiance que l'on peut y accorder.

L'hydrométrie opérationnelle

L'hydrométrie opérationnelle a pour but de produire des séries de débit en des points d'intérêt du bassin versant. La difficulté majeure de cette discipline réside dans l'impossibilité de mesurer directement et en continu la valeur d'intérêt qu'est le débit. Les données de débit sont généralement issues de la conversion d'une grandeur intermédiaire comme la hauteur d'eau ou la vitesse de l'écoulement. C'est pourquoi, on parle d'estimation du débit. On emploiera par la suite le terme de "mesure" de débit comme synonyme d'estimation du débit.

La méthode la plus utilisée repose sur l'utilisation d'une courbe de tarage (Hersch, 1993a, 2009; WMO, 2010) établissant une relation entre la hauteur d'eau mesurée à la station hydrométrique et le débit. Cette courbe est construite à l'aide de mesures ponctuelles du couple hauteur-débit, appelées jaugeages, réalisées à différentes dates t . La mesure en continu de la hauteur d'eau peut ainsi être convertie en débit afin de produire un hydrogramme permettant de suivre l'évolution du débit en fonction du temps. Cet exemple de processus d'élaboration de séries chronologiques de débit est illustré à la figure 3.1.

Il convient ainsi de distinguer deux types d'estimation du débit :

- L'estimation ponctuelle du débit mesuré à un instant t (appelée ensuite **jaugeage**),
- La valeur de débit estimée par (ou déduite d') une grandeur intermédiaire (généralement une hauteur d'eau dans le cas d'une courbe de tarage).

3.1 Les techniques de jaugeage

Les techniques les plus couramment utilisées dans les services d'hydrométrie sont exposées brièvement ci-dessous. Elles constituent ce que l'on peut appeler "la boîte à outils" de l'hydromètre. Les ouvrages de Rantz *et al.* (1982), Audinet (1995), WMO (2010), Le Coz *et al.* (2011) et Perret *et al.* (2017) peuvent être consultés pour compléter la lecture. Le choix d'une méthode est conditionné par les conditions d'écoulement, la configuration du site (accès), l'exactitude que l'on souhaite obtenir, le matériel et le temps disponibles. Par exemple, en cas de crue, l'utilisation de techniques intrusives doit être envisagée uniquement si les conditions de sécurité sont réunies pour garantir le bon déroulement de la mesure. En outre la durée de la mesure doit être adaptée pour que la variation de débit n'affecte pas la mesure.

3.1.1 Les jaugeages capacitifs

L'application d'une méthode capacitive, ou volumétrique est certainement la plus simple pour mesurer le débit. Elle permet de déduire le débit selon l'équation 1.1 grâce à la mesure

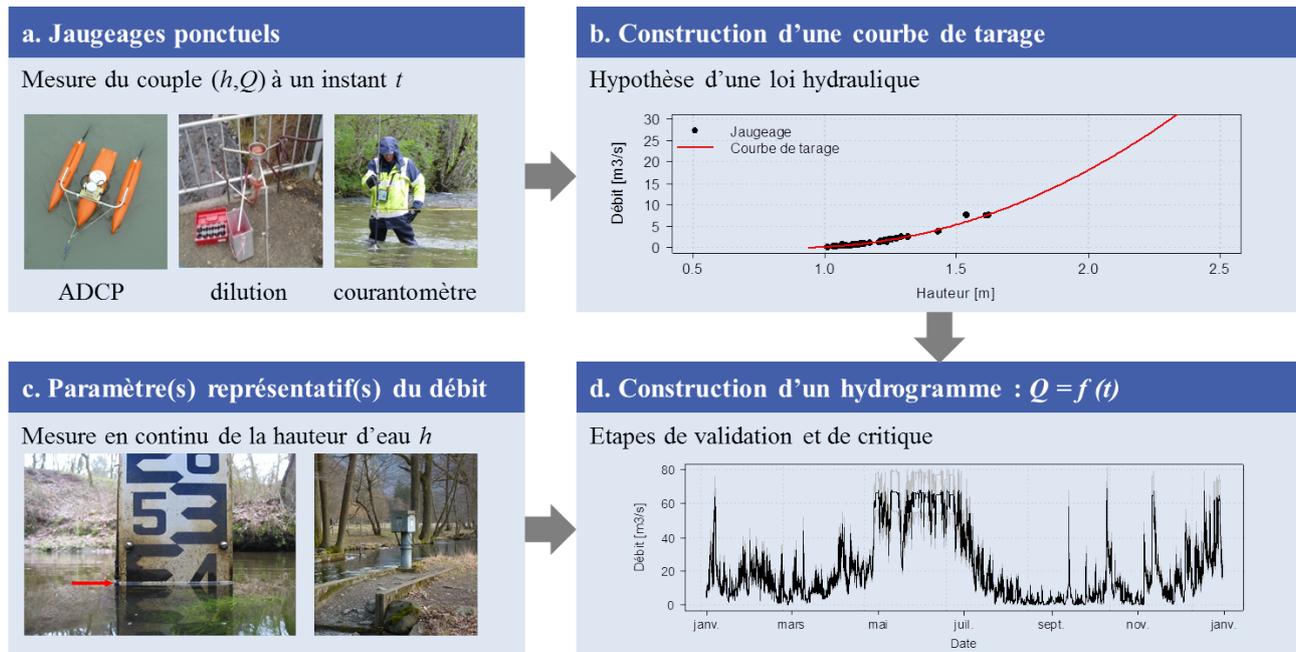


FIGURE 3.1 – Principe du processus d'élaboration d'une chronique de débit, à partir d'une station hydrométrique à relation hauteur-débit. Les étapes a. et b. constituent le travail préliminaire à la production en continu des chroniques de débit. Sources des images A. Despax et EDF-DTG.

du temps de remplissage d'un récipient calibré au moyen d'un chronomètre. Bien que simple, rapide et peu coûteuse, cette méthode n'est que rarement applicable pour la mesure du débit des cours d'eau étant donné les volumes importants qu'il faudrait mesurer.

3.1.2 Les jaugeages par dilution

Les méthodes de jaugeage par dilution sont des méthodes volumétriques qui se fondent sur le principe de la conservation de la masse. Ces techniques reposent sur la comparaison de la concentration connue du traceur injecté en un point (sel, fluorescéine, bichromate de sodium, rhodamine WT) avec la concentration observée dans la rivière en aval en prélevant éventuellement des échantillons d'eau. Pour garantir l'applicabilité de ces méthodes, l'intégralité du traceur choisi doit passer dans la section de mesure, la condition de bon mélange doit être respectée et le débit de la rivière doit être constant pendant la mesure. Ces méthodes sont particulièrement bien adaptées pour mesurer des débits de torrents de montagne pour lesquels le brassage est important et assure un bon mélange du traceur. La précision de ce type de mesure dépend du soin apporté à la manipulation du traceur et au choix de la distance de bon mélange. Dans le cas des traceurs fluorescents, l'adsorption du produit peut conduire à une surestimation du débit. Les principales recommandations portant sur les méthodes de jaugeage par dilution sont présentées dans la norme ISO 9555-1 (ISO, 1994c).

On distingue deux types d'injection à savoir l'injection instantanée ou à débit constant ; les figures 3.2a et 3.2b illustrent le déploiement respectif associé à ces deux modes d'injection. La méthode de dilution à injection instantanée ou "globale" consiste à injecter en une seule fois un volume V [L^3] d'une solution de traceur de concentration connue C_1 [M/L^3] dans la rivière à l'instant $t = 0$ [T]. Le débit est alors estimé selon l'équation suivante :

$$Q = \frac{VC_1}{\int_0^t C_2 dt} [\text{m}^3/\text{s}] \quad (3.1)$$

La mesure de la concentration C_2 de traceur en aval (à une distance garantissant le bon mélange) est réalisée de manière discrète ou continue pour approcher l'intégrale.

La méthode à débit constant repose sur l'injection à débit constant q [m^3/s] d'un traceur (à l'aide par exemple d'un vase de Mariotte) dont le ratio entre la concentration initiale C_1 et la concentration C_2 des prélèvements en aval peut être mesuré. Le débit est dans ce cas calculé comme suit :

$$Q = q \frac{C_1}{C_2} [\text{m}^3/\text{s}] \quad (3.2)$$



FIGURE 3.2 – Injection (a) instantanée et (b) à débit constant (Rhodamine WT). Source EDF-DTG.

3.1.3 Les jaugeages par exploration du champ des vitesses

Ces méthodes de mesure de débit en rivière sont les plus répandues. Elles reposent sur le fait que la vitesse de l'écoulement et le fond de la rivière ne sont pas uniformes dans la section transversale. Il faut alors explorer le champ de vitesses $v(x,y)$ en réalisant des mesures de vitesse sur un semis de points distribués horizontalement et verticalement à travers la section en travers (d'aire mouillée A) d'un cours d'eau et en mesurant le fond de la section afin de déduire le débit selon l'équation suivante (Rantz *et al.*, 1982; Herschy, 1993b) :

$$Q = \int_x \int_y v(x,y) dx dy [\text{m}^3/\text{s}] \quad (3.3)$$

On précise que $v(x,y)$ désigne la vitesse normale à l'élément de section $dx dy$. Les vitesses v sont localisées en abscisse (x) selon la position par rapport à la rive et en ordonnée en fonction de la profondeur par rapport à la surface libre (y).

La qualité de la mesure dépend alors directement de la densité de l'échantillonnage des vitesses et des profondeurs d'eau sur la section.

Courantomètre ou vélocimètre

Les premiers appareils utilisés pour mesurer les vitesses de l'écoulement sont des moulinets mécaniques à hélice dont la vitesse de rotation est proportionnelle à la vitesse de l'écoulement. Ce type d'appareil fut inventé par Woltman en 1786 (Frazier, 1974). Utilisée depuis le *XIX^e* siècle, cette technique reste l'une des méthodes de mesure du débit des cours d'eau les plus répandues et les plus robustes. De ce fait, elle est généralement prise comme méthode de comparaison quand il s'agit de qualifier d'autres méthodes de jaugeage (Olivier *et al.*, 2009).

Si le *design* de cet appareil (voir figure 3.3) a évolué vers des appareils plus petits (voir figure 3.4a), son concept n'a guère évolué, ni sa robustesse.



FIGURE 3.3 – Moulinet de Woltman dans sa caisse de transport. Photo A. Despax.

L'utilisation d'un contact électromagnétique (dans les années 70) est néanmoins une évolution majeure car il a quasiment supprimé les frottements. La rotation de l'hélice produit des impulsions électriques détectées et comptabilisées par un compteur connecté au corps du moulinet. Plus récemment, des courantomètres électro-magnétiques et des courantomètres acoustiques à effet Doppler ont été développés (illustrés respectivement par les figures 3.4b et 3.4c). Les premiers reposent sur l'application de la loi de Faraday. Le capteur crée un champ magnétique entre deux électrodes situées à l'extrémité de la sonde. La vitesse de l'écoulement est alors déduite de la mesure de la force électro-motrice générée par le passage de l'eau à travers le champ magnétique.

Les courantomètres acoustiques émettent des signaux ultrasonores via des transducteurs placés dans la sonde. Ces impulsions sont rétro-diffusées par les particules en suspension dans l'eau qui sont supposées se déplacer à la même vitesse que l'eau. La vitesse d'écoulement est alors calculée en mesurant le décalage de fréquence des impulsions émises et reçues par les transducteurs (effet Doppler). Certains courantomètres permettent d'obtenir les différentes composantes du vecteur vitesse.

Selon la nature du cours d'eau, ces dispositifs sont fixés à différents supports. Il peut s'agir d'une perche graduée manipulée par l'opérateur directement dans l'eau pour des cours d'eau de faible profondeur comme illustré à la figure 3.5a. Des perches profilées de plus grande taille sont utilisées via des passerelles pour des rivières de plus grande profondeur ou pour lesquelles les vitesses d'écoulement sont élevées. Enfin, pour des écoulements plus rapides et des rivières larges, les courantomètres sont fixés à des saumons (poids lestés et profilés) suspendus à une traille à demeure (figure 3.5c, dispositif permettant le déplacement d'un chariot sur un câble tendu entre les deux berges), une cyclo-potence ou un camion jaugeur (figure 3.5b). Il est alors important de bien estimer la position des points de mesure en fonction de l'angle du câble par

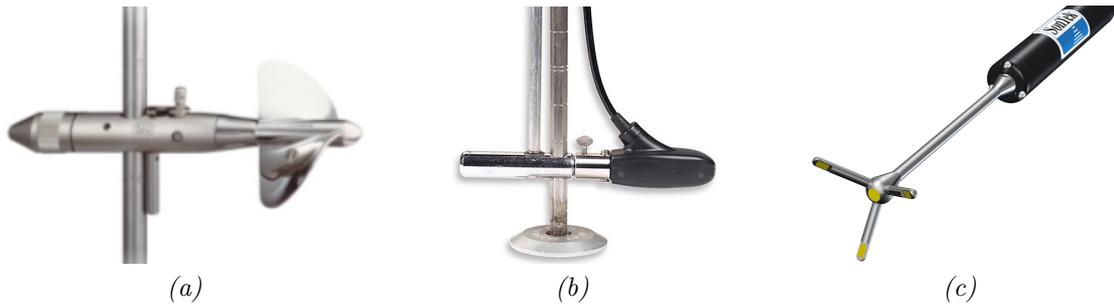


FIGURE 3.4 – Courantomètres (a) mécanique, (b) électro-magnétique et (c) acoustique. Sources OTT et Sontek.

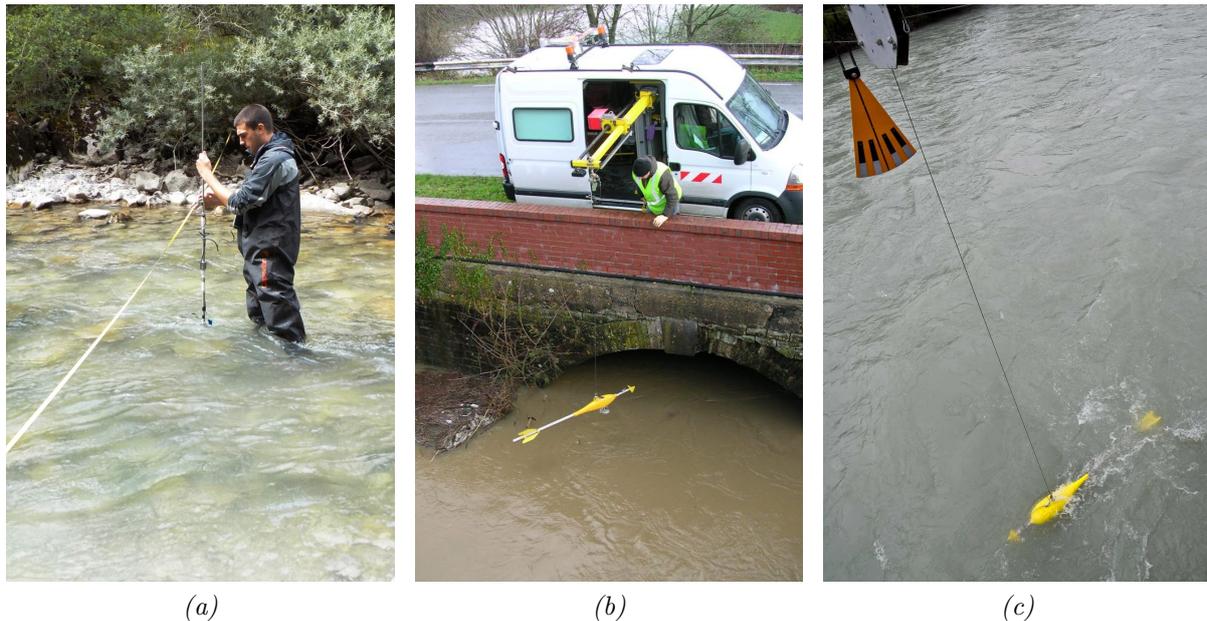


FIGURE 3.5 – Différents moyens de déploiement des courantomètres (a) perche, (b) camion jaugeur et (c) traîle. Sources : A. Despax, DREAL Nord Pas de Calais et EDF-DTG.

rapport à la normale et éventuellement en fonction de la flèche du câble porteur (ISO, 2009).

Profileurs acoustiques à effet Doppler (ADCP)

Reposant sur le principe de l'effet Doppler, les profileurs acoustiques à effet Doppler ou *Acoustic Doppler Current Profiler* (ADCP) sont apparus dans les années 1990 dans le domaine de l'hydrométrie. La mise en œuvre de cette technique est plus rapide que l'utilisation de courantomètres classiques et permet une exploration plus dense du champ des vitesses (Le Coz *et al.*, 2008). Ce type d'appareil est fixé sur un flotteur (figure 3.6a) et dispose de plusieurs cellules en céramique (au minimum 3, la figure 3.6b montre un ADCP à 9 céramiques). Ces cellules émettent des trains d'ondes acoustiques dans l'eau et reçoivent le signal rétro-diffusé par les matières en suspension se déplaçant avec l'eau. Le décalage de fréquence entre les deux signaux permet d'estimer la vitesse de l'écoulement (par effet Doppler ou par décalage de phase) tandis que le temps de retour de ces ultrasons permet de mesurer la profondeur des cellules de mesure des vitesses. Lorsque le signal rencontre le fond du lit, le signal rétro-diffusé est plus important, ce qui permet de localiser le fond. L'appareil mesure donc simultanément sur une verticale la profondeur et les vitesses de l'écoulement à plusieurs profondeurs. La fréquence des ultrasons émis varie selon les modèles (généralement entre 300 et 3000 kHz). Plus la fréquence

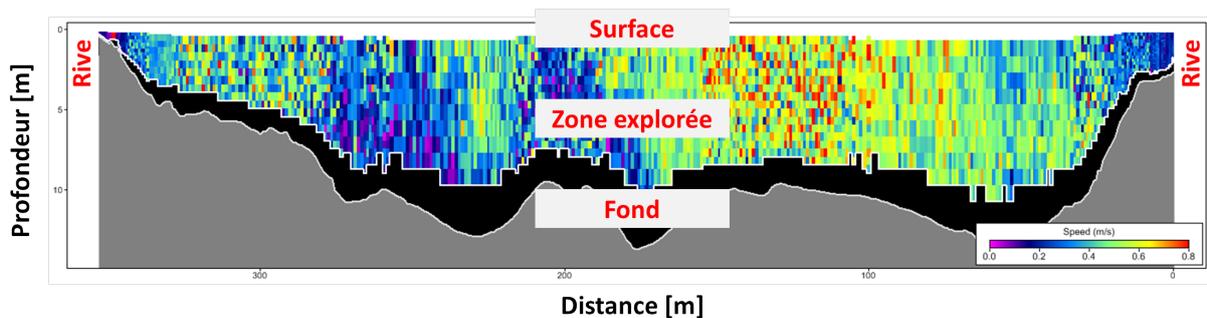
des ondes est faible et plus l'appareil sera capable de mesurer des vitesses profondément. À l'inverse, lorsque la fréquence est élevée, l'appareil ne peut mesurer que sur une faible profondeur, mais il est alors possible de mesurer des vitesses sur des cellules de plus petite taille. Une partie non négligeable de l'écoulement n'est pas mesurée en surface, au niveau des berges et au fond impliquant des extrapolations dans ces zones (figure 3.6c).



(a)



(b)



(c)

FIGURE 3.6 – Un ADCP de type M9 (b) sur flotteur au cours d'une mesure sur la Roya (a). (c) Exemple de profil latéral obtenu avec un ADCP sur le Rhône à Chavanay, le 06/08/2014 (extrait du logiciel River Surveyor). Les zones blanches en surface, au fond et au niveau des berges correspondent à des zones non mesurées. Les carrés colorés correspondent aux cellules de mesure de vitesse. Sources : A. Despax et Sontek.

L'appareil est capable de mesurer son déplacement par rapport au fond (*bottom tracking*). Il est également possible de coupler l'appareil à un système de positionnement externe (GPS) pour mesurer le déplacement lorsque le fond de la rivière est mobile ou à un sondeur acoustique pour localiser avec précision le fond.

Le mode de déploiement peut être mobile ou stationnaire (verticale par verticale). L'ouvrage de Le Coz *et al.* (2008) fournit un approfondissement complet, en français, sur les mesures par profileur Doppler.

Exploration du champ des vitesses de surface

Des méthodes non intrusives, reposant sur le principe de l'exploration partielle du champ des vitesses, ont été développées afin de diminuer l'exposition aux risques pour les opérateurs et le matériel en cas de crue. Bien que reposant sur des innovations technologiques récentes, le principe de ces techniques remonte à l'une des premières techniques de jaugeage au flotteur

développée par Léonard De Vinci dans le *Codice Atlantico* (De Vinci, 1904) à la fin du XV^e siècle. Il est en effet possible d'utiliser des flotteurs afin d'estimer les vitesses de surface de l'écoulement. Dans ce cas, un coefficient permettant de relier la vitesse de surface à la vitesse moyenne doit être estimé et la bathymétrie mesurée.

La méthode par radar de surface (*Surface Velocity Radar* (SVR), figure 3.7a.) permet également de mesurer les vitesses de surface de l'écoulement (Dramais *et al.*, 2013b; Welber *et al.*, 2016). Comme pour les mesures avec flotteur, le calcul du débit nécessite la connaissance de la bathymétrie et du coefficient permettant de déduire la vitesse moyenne.

Les développements dans le domaine de l'analyse d'image ont permis, à partir de film vidéo (figure 3.7b.), d'estimer les vitesses de surface d'un écoulement (Hauet *et al.*, 2008b) pour en déduire le débit. Des vidéos amateurs (Le Boursicaud *et al.*, 2014) ou des caméras installées à demeure près d'une station hydrométrique permettent ainsi de répondre à la difficulté des hydromètres de se rendre immédiatement sur site pour réaliser un jaugeage. L'installation de caméras ouvre la voie à l'acquisition de mesures de débit à plus haute fréquence (Hauet *et al.*, 2009). Cette technique est néanmoins assez incertaine pour la mesure de débits usuels et son intérêt réside plutôt dans l'estimation des hauts débits (Hauet *et al.*, 2008a).

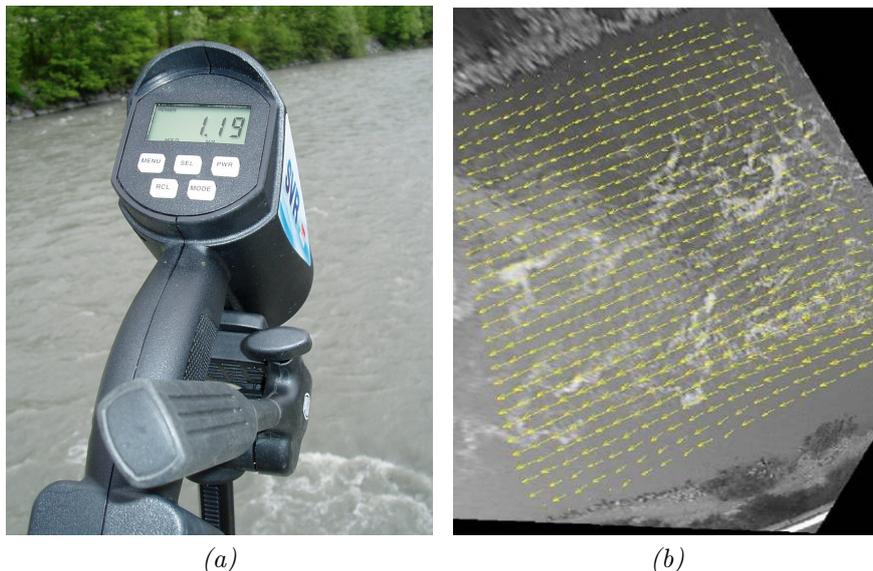


FIGURE 3.7 – Un SVR (a) au cours d'une mesure sur l'Arc et (b) exemple de traitement d'image réalisé par le logiciel FUDAA-LSPIV. Sources : A. Despax et Hauet (2006).

3.1.4 Répartition des moyens de mesure à EDF-DTG

En 2015, 835 jaugeages ont été réalisés par EDF-DTG par le service de production de données (service qui exploite les stations d'hydrométrie). A ceux-là s'ajoutent les jaugeages réalisés pour études ponctuelles (par exemple pour le calage de station H-ADCP ou pour le contrôle de débit réservé). A titre de comparaison, 65766 jaugeages ont été réalisés en un an (entre 2005 et 2006) par l'USGS (pour environ 8000 stations hydrométriques), aux Etats-Unis (Oberg et Mueller, 2007) et la proportion des jaugeages réalisés à l'ADCP est passée de 1% en 1995 à 67% en 2009 (WMO, 2010).

Malgré la diversification récente des moyens de mesure, les jaugeages par exploration du champ des vitesses au courantmètre occupent toujours une place importante parmi les jaugeages

réalisés. La figure 3.8 montre ainsi la comparaison entre la part des trois principales techniques de mesure (ADCP, courantomètre et dilution) pour deux périodes (début des années 1990 et ces deux dernières années). On observe une part croissante de jaugeages réalisés à l'ADCP depuis son introduction dans les années 1990.

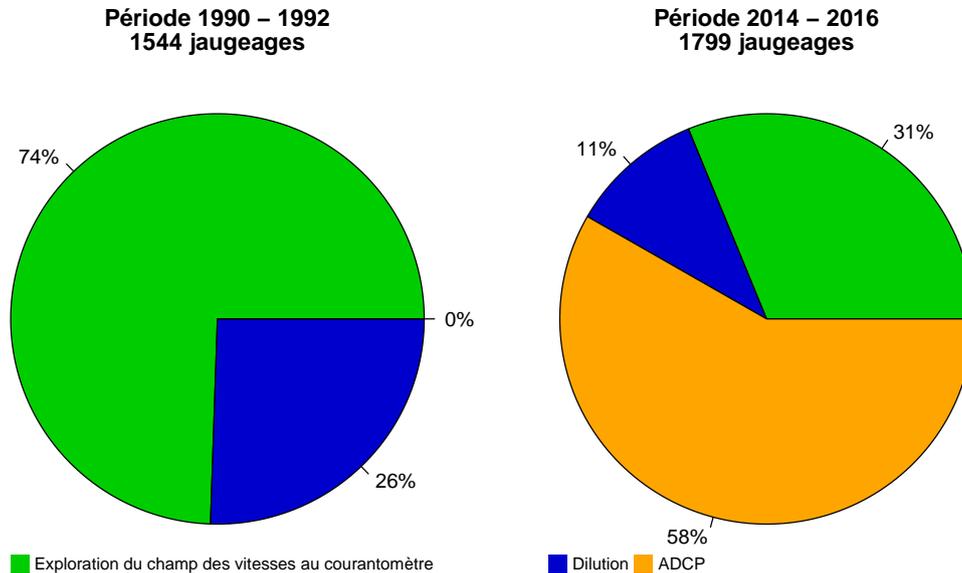


FIGURE 3.8 – Répartition des moyens de mesure utilisés à EDF-DTG sur deux périodes (1990 à 1992 à gauche, et 2014 à début 2016 à droite)

3.1.5 Caractéristiques des jaugeages au courantomètre

La base de données de jaugeages utilisée dans cette étude provient d'une extraction de 3930 jaugeages récents pour lesquels l'ensemble des données brutes est disponible (ensemble des vitesses ponctuelles) et a été dépouillé avec le logiciel JASMINE¹. Les caractéristiques en termes de débit, aire de la section mouillée, largeur au miroir, profondeur maximale et vitesse débitante sont présentées sous forme de boîtes à moustaches à la figure 3.9.

Cela donne un aperçu des caractéristiques globales des rivières jaugeées par les équipes EDF-DTG. Les débits mesurés sont pour 90% d'entre eux inférieurs à 10 [m³/s]. Le minimum est de quelques litres par seconde et le maximum de plus de 800 [m³/s]. La médiane des largeurs des sections jaugeées est de l'ordre de 10 [m]. La profondeur maximale de la section est généralement inférieure à 1 [m] (quantile 95%) puisque l'essentiel des mesures sont réalisés avec une micro-perche comme support. Les jaugeages présentant des profondeurs plus élevées sont réalisés avec des courantomètres déployés sur perche profilée ou depuis un camion jaugeur ou une traîlle (figures 3.5b et c). 95% des vitesses débitantes sont inférieures à 1 [m/s].

Le jaugeage "type", selon le protocole EDF-DTG, (Vignon, 2001) est un jaugeage avec 11 verticales (nombre médian de verticales) comportant généralement entre 4 à 6 points de mesure de vitesses. La rivière type jaugeée fait 10 [m] de large pour un débit de 2 [m³/s].

1. Logiciel de dépouillement de jaugeage au courantomètre utilisé à EDF-DTG.

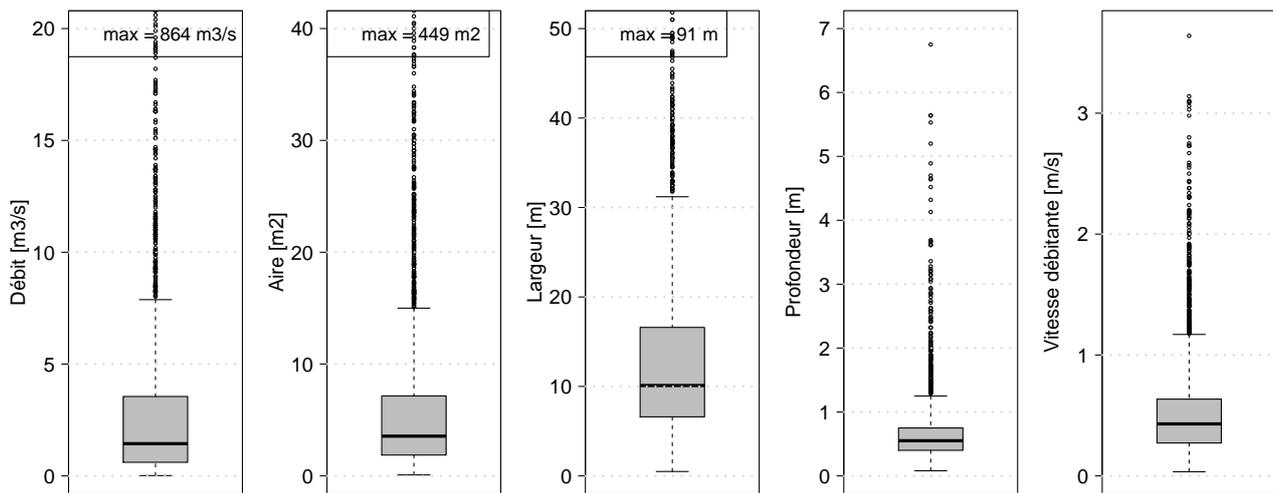


FIGURE 3.9 – Boîtes à moustaches des débits, aires de la section mouillée, largeurs au miroir, profondeurs maximales et vitesses débitantes des 3930 jaugeages utilisés dans l'étude. Les boîtes s'étendent du quartile 25% au quartile 75% et les moustaches s'étendent jusqu'à la valeur distante de 1,5 fois la distance interquartile.

3.2 Les stations hydrométriques

Afin de fournir en continu des estimations de débit, il est nécessaire d'installer une station hydrométrique. Ce type d'installation est constitué d'appareillages permettant la mesure et la transmission d'un paramètre représentatif du débit. Il s'agit généralement de la hauteur d'eau (voir la section 1.2.3 pour la justification théorique) à laquelle s'ajoute parfois la mesure d'une vitesse d'écoulement.

3.2.1 Stations à relation hauteur–débit pour le suivi en continu du débit

Les stations hydrométriques les plus répandues sont des stations à relation hauteur–débit. Elles reposent sur l'hypothèse d'une relation univoque entre la hauteur d'eau et le débit d'une rivière, en une section donnée, de la forme $Q = f(h)$ traduisant le fonctionnement hydraulique de la rivière.

L'univocité de la relation est assurée par la présence d'un contrôle hydraulique. Celui-ci peut être constitué par une section que ce soit un seuil naturel ou artificiel, un rétrécissement marqué, une rupture brutale de la pente de la ligne de fond, des enrochements formant un obstacle, un resserrement naturel ou encore un ouvrage d'art, on parle alors de section de contrôle. La présence d'une section de contrôle induit le passage de l'écoulement en régime critique. Le contrôle suit une loi de seuil ou loi de Torricelli (voir section 1.2.3). On souligne que l'installation d'ouvrages d'art (seuil bétonné) en milieu naturel est rare en raison des problématiques de continuité piscicole et de transport sédimentaire. La tendance actuelle est à l'effacement des seuils pour restaurer l'hydromorphologie des rivières.

Dans le cas des tronçons de contrôle, l'écoulement est régulé par la géométrie, la pente de la ligne de fond et la rugosité du chenal. L'écoulement n'est plus influencé par de quelconques singularités mais les conditions limites aval peuvent influencer la relation hauteur-débit (effets de remous). On considère que l'écoulement obéit à la relation de Manning-Strickler (voir la section 1.2.3), bien que les conditions de permanence du débit et d'uniformité de l'écoulement

soient rarement respectées en milieu naturel.

En fonction du niveau d'eau les contrôles hydrauliques peuvent changer. La figure 3.10 montre une succession de contrôles hydrauliques. Pour de faibles débits, l'obstacle le plus à l'amont constitue une section de contrôle. Lorsque le débit augmente, celui-ci est substitué au profit d'un autre obstacle à l'aval (seconde section de contrôle). Enfin, cette section de contrôle s'efface et est noyée lorsque le débit augmente. Le contrôle devient alors un tronçon.

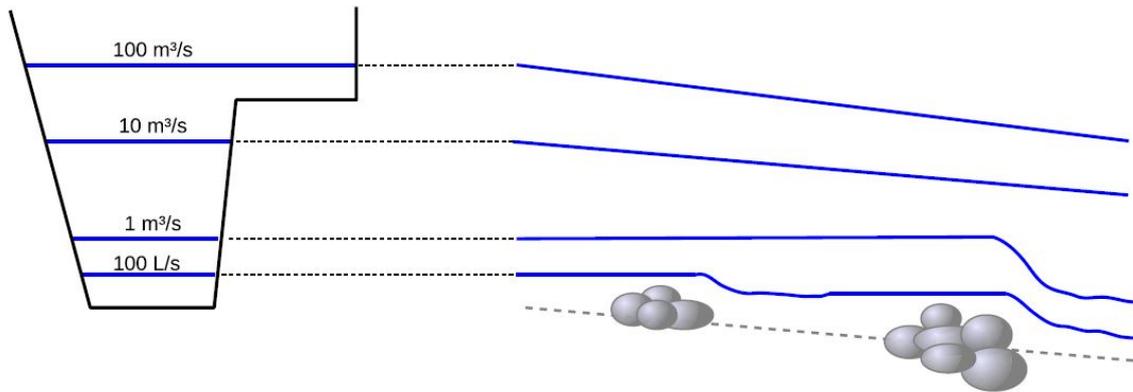


FIGURE 3.10 – Illustration de la succession des contrôles hydrauliques pour une station hydrométrique. Le profil topographique de la section en travers est illustré à gauche de la figure. Les lignes de fond et d'eau pour différentes gammes de débit sont tracées à droite de la figure. Source : Le Coz et al. (2014b).

Dans les deux situations, la relation $Q = f(h)$ (voir la section 1.2.3), nommée courbe de tarage, est calée à partir d'un nombre suffisant de jaugeages réalisés selon une ou plusieurs techniques présentées en section 3.1 et sur la plus grande gamme de débits possible. Il est alors aisé de déduire le débit grâce à la mesure de la hauteur d'eau à partir d'un capteur limnimétrique. Ce type de station est également appelé station à une échelle en opposition aux stations à double échelle (paragraphe 3.2.2).

3.2.2 Stations à double échelle

Dans le cas des stations à double échelle, le débit est fonction de la profondeur d'eau dans le bief et de la pente de la ligne d'eau. La relation hauteur-débit n'est plus univoque en raison d'une influence aval. Le contrôle impose donc l'utilisation de deux échelles placées dans des sections assez éloignées pour que la dénivellation soit mesurable sur l'ensemble de la gamme de débit (Forray *et al.*, 1998). La relation hauteur-débit est alors fonction d'une hauteur d'eau et de la pente de la ligne d'eau.

Une courbe double est constituée de plusieurs courbes simples paramétrées en fonction de la cote aval. La principale difficulté est de jauger toutes les configurations possibles pour construire la courbe double. Le suivi des courbes dans le temps est alors délicat. A l'étiage, s'ajoute la difficulté de mesurer de très faibles pentes de la ligne d'eau.

3.2.3 Stations à vitesse témoin

Lorsqu'il n'existe pas de relation univoque entre la hauteur et le débit (notamment dans les chenaux régulés par des ouvrages de navigation ou les cours d'eau sujets aux marées), il

est nécessaire de recourir à la mesure d'une grandeur supplémentaire comme une vitesse dite témoin (Levesque et Oberg, 2012).

Il s'agit généralement de stations à ultra-sons à temps de transit ou de stations à effet Doppler. Ces stations nécessitent également la réalisation de jaugeages pour caler les paramètres des lois de transformation de la vitesse mesurée en vitesse débitante.

Stations ultrason à temps de transit

Cette technique s'appuie sur la mesure de la durée du trajet (ou temps de transit) d'impulsions ultrasonores traversant la rivière entre deux sondes et selon un angle par rapport au courant. La vitesse de l'eau est déduite du temps de transit de l'onde. Un ou plusieurs coefficient(s) de correction permet(tent) de relier la vitesse mesurée à la vitesse débitante. Un profil bathymétrique de la section de rivière est nécessaire afin d'estimer la surface de la section débitante au moyen de la mesure de la hauteur d'eau (Audinet, 1995; Forray *et al.*, 1998; ISO, 2005c). Sa géométrie doit donc être stable dans le temps. Le débit est alors obtenu comme le produit de la vitesse débitante par la surface mouillée.

Afin que la vitesse mesurée soit bien représentative de la vitesse débitante de l'écoulement, le bief doit être le plus rectiligne possible.

Stations à effet Doppler (H-ADCP et radar de surface)

Les stations à effet Doppler sont issues de l'adaptation des ADCP au contrôle de débit (Le Coz *et al.*, 2008). En général, le capteur est disposé de manière à envoyer les ondes acoustiques horizontalement en direction de la berge, comme illustré par la figure 3.11a. Les capteurs utilisés sont des profileurs acoustiques Doppler horizontaux ou *Horizontal Acoustic Doppler Current Profiler* (H-ADCP) (*e.g.* Nihei et Kimizu, 2008; Hoitink *et al.*, 2009; Hidayat *et al.*, 2011). Compte tenu de l'angle d'ouverture du faisceau d'onde, la mesure des vitesses est partielle et il est nécessaire de recourir à des extrapolations des vitesses sur la zone non explorée (Hauet, 2006). De ce fait, ce système n'est pas adapté pour les mesures de débit dans les rivières larges et peu profondes en raison d'un risque de réflexion de l'onde sur la surface ou sur le fond. Le lien entre vitesses mesurées et la vitesse débitante nécessite le calage de paramètres via des jaugeages et la surface mouillée doit être estimée (Garcia-Aznar, 2014) comme pour les stations à ultrason.

Un autre type de station se base sur la mesure de la vitesse par un capteur de type radar fonctionnant selon le principe de l'effet Doppler (Costa *et al.*, 2006). Le capteur peut être fixé sur un pont comme illustré à la figure 3.11b. Selon la distance par rapport à la surface de l'eau et l'angle d'inclinaison de l'appareil, celui-ci estime la vitesse sur une zone plus ou moins grande. Comme pour les autres méthodes à vitesse témoin, la vitesse débitante est estimée à partir de la vitesse mesurée grâce à des paramètres calés via des jaugeages.



FIGURE 3.11 – (a) Un H-ADCP hors de l'eau fixé sur un rail. (b) Un radar déployé depuis une passerelle. Sources : Hydro International et Flow-Tronic S.A.

Les incertitudes en hydrométrie

L'hydrométrie opérationnelle permet de générer ponctuellement ou au cours du temps des estimations de débit. Elle nécessite la mesure de plusieurs variables. Comme toute mesure, l'estimation du débit est entachée d'erreurs, qui, malgré les évolutions récentes de la discipline, sont inévitables.

Les enjeux des disciplines nécessitant des données hydrométriques évoluent constamment et il apparaît primordial de connaître la qualité de l'estimation du débit. L'analyse d'incertitude est la seule méthode objective permettant de quantifier cette qualité.

Les travaux portant sur l'estimation des incertitudes de mesure sont relativement récents. D'une part, l'intérêt des incertitudes n'est apparu qu'au milieu du *XX*^{ème} siècle et d'autre part, il aura fallu attendre le milieu des années 1990 pour voir apparaître un premier cadre normatif faisant consensus.

Ce chapitre présente d'abord les principes généraux de l'analyse d'incertitude (section 4.1), les méthodes courantes d'estimation d'incertitude (section 4.2) puis les sources d'incertitude des estimations de débit (section 4.3). Enfin l'impact des incertitudes de débit sur les problématiques de gestion des ressources en eau (section 4.4) soulignera l'importance du travail d'analyse d'incertitude.

4.1 Incertitudes : généralités

En métrologie, l'analyse de l'incertitude est une technique qui permet selon le Vocabulaire International de Métrologie (JCGM, 2008c) de caractériser « *la dispersion des valeurs attribuées à un mesurande, à partir des informations utilisées* ». En l'absence de biais (erreur systématique), elle définit un intervalle autour de la valeur mesurée qui inclut la valeur vraie avec une probabilité plus ou moins grande. Ainsi, lorsque l'on rend compte du résultat d'un mesurage, l'incertitude associée doit pouvoir donner une information quantitative sur la qualité du résultat de manière à ce que l'utilisateur de la donnée puisse estimer sa fiabilité. L'incertitude d'une mesure permet ainsi de quantifier la justesse et la fidélité d'une mesure (se référer à l'annexe A pour la définition de ces termes). L'affectation d'une incertitude aux résultats de mesure permet de les comparer soit entre eux, soit par rapport à des valeurs de référence (étalon, limite ou consigne).

En complément, le lecteur est invité à consulter l'annexe A pour trouver des définitions complémentaires portant sur la métrologie.

La publication en 1995 du Guide pour l'expression de l'incertitude de mesure (ou GUM)

a permis de poser les premiers principes de l'évaluation des incertitudes (sous sa version révisée : JCGM, 2008a). Ce guide, commandité par le Comité International des Poids et Mesures (CIPM), la plus haute autorité mondiale en métrologie, a permis de définir un cadre faisant consensus au niveau international. Il décrit la méthode de référence de propagation analytique des incertitudes (section 4.2.1). L'approche numérique des simulations de Monte-Carlo, décrite dans la section 4.2.2, pour la propagation des incertitudes a ensuite fait l'objet d'un supplément au GUM (JCGM, 2008b). On retrouve ces méthodes dans les recommandations du *Hydrometric Uncertainty Guidance* (HUG - ou GUM appliqué à l'hydrométrie) (ISO, 2007c) qui transpose les lignes directrices du GUM au domaine de l'hydrométrie.

Enfin, des travaux complémentaires ont été menés pour développer des méthodes alternatives lorsque la modélisation du processus de mesure est impossible. C'est le cas de la méthode d'estimation de la justesse et de la fidélité des méthodes de mesure, formalisée dans le cadre des comparaisons dites interlaboratoires (ISO, 1994a) et présentée dans la partie 4.2.3.

4.1.1 Hiérarchie des erreurs et contribution à l'incertitude de mesure

Quel que soit le soin apporté à la réalisation d'une mesure, chacune des mesures des grandeurs élémentaires est entachée d'erreurs, même après l'application de corrections et un étalonnage correct des instruments de mesure. On peut décomposer les sources d'erreurs en différentes familles (voir figure 4.1). On note que les erreurs systématiques connues doivent conduire à la correction de la grandeur mesurée et ne doivent ainsi pas contribuer à l'incertitude de mesure. Les erreurs de mesures aléatoires, les erreurs systématiques inconnues et l'erreur résiduelle suite à la correction des erreurs systématiques contribuent à l'incertitude de mesure. Les erreurs systématiques inconnues (par exemple une erreur de lecture ou une erreur de saisie par l'opérateur) sont, par définition, les plus difficiles à estimer. Les erreurs de mesure aléatoires peuvent généralement être réduites par répétition de la mesure.

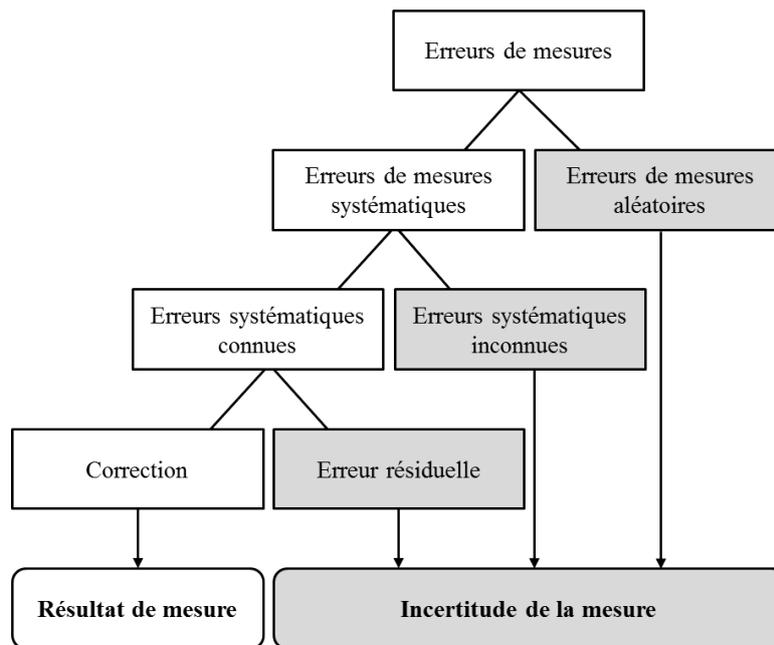


FIGURE 4.1 – Décomposition des différents types d'erreur et leur influence sur le résultat de la mesure et l'incertitude associée, schéma adapté de Hernla (1996).

4.1.2 Classification des sources d'incertitude

On peut classer les sources d'incertitude affectant une mesure en différentes catégories selon la méthode des "5M" (Ishikawa, 1982).

- *Moyen* : On retrouve en premier lieu l'incertitude due aux **instruments de mesure** utilisés. Il s'agit d'erreurs provenant de la qualité métrologique de l'instrument de mesure (étendue de mesure, résolution, sensibilité et exactitude de mesure en termes de justesse et de fidélité) et de l'étalonnage de l'instrument. Une dérive de l'instrument de mesure peut apparaître notamment en cas d'usure. On note que l'utilisation d'un même instrument de mesure peut engendrer des corrélations entre ces erreurs (section 4.2.1).
- *Méthode* : L'incertitude de la méthode provient du **modèle** retenu pour approcher le mesurande. Il s'agit par exemple d'une discrétisation finie des vitesses sur la section en travers (voir la section 5.1) pour les jaugeages au courantomètre ou encore de l'utilisation d'une courbe de tarage pour l'estimation du débit. Les erreurs sont également issues des choix d'interpolation et d'extrapolation du modèle. Un mode opératoire adapté permet de réduire cette source d'incertitude.
- *Matière* : Les incertitudes induites par la **nature du mesurande** sont difficiles à évaluer. Elles proviennent notamment des problèmes de stabilité du débit au cours de la mesure et de la variabilité des vitesses au cours du temps.
- *Milieu* : Les erreurs dues aux **conditions opérationnelles ou environnementales**. Elles sont fonction des particularités du site de mesurage et sont généralement réduites en suivant les principales recommandations métier quant au choix de la section de mesure ou de l'implantation de la station hydrométrique. Ce sont des erreurs qui diffèrent des conditions idéales dans lesquelles les instruments ont été étalonnés et les incertitudes quantifiées. Les conditions météorologiques (température, vent) peuvent aussi contribuer à cette source d'incertitude.
- *Main d'œuvre* : L'**effet opérateur** est difficile à quantifier. L'incertitude est fonction de l'habileté, l'acuité visuelle, le stress et l'expérience de l'opérateur. Les erreurs sont réduites par le respect et le choix d'un protocole adapté aux conditions de la mesure (choix opportun du capteur, choix de la section), avec l'expérience (connaissance de la section de jaugeage), le niveau de formation et le soin apporté par l'opérateur.

4.2 Méthodes d'estimation des incertitudes dans le domaine de l'hydrométrie

4.2.1 Méthode de propagation analytique des incertitudes (méthode ascendante)

L'estimation de l'incertitude de mesure telle que proposée par le GUM (JCGM, 2008a) est la méthode de référence et se développe en quatre phases :

1. *Analyse du processus de mesure*. La première étape consiste à définir le mesurande, noté Y . Puis les différentes grandeurs d'influence, appelées « grandeurs d'entrée » et notées X_i (avec $i = 1, \dots, N$), sont listées. On note ensuite f le modèle mathématique qui relie le mesurande aux grandeurs d'influence selon l'équation 4.1.

$$Y = f(X_1, X_2, \dots, X_N) \quad (4.1)$$

2. *Calcul des incertitudes-types*. L'incertitude-type $u(x_i)$ de chaque grandeur d'influence est estimée par des méthodes d'évaluation de type A et/ou de type B, exposées à l'annexe A.

Les éventuelles covariances entre grandeurs d'influence, notées $u(x_i, x_j)$ sont également estimées.

3. *Détermination de l'incertitude composée.* On applique une loi de propagation des incertitudes. Une manière simple, utilisée dans le GUM, consiste à utiliser un développement limité du premier ordre (développement de Taylor), c'est-à-dire à remplacer la loi f par sa tangente locale pour estimer la propagation de l'incertitude selon l'équation 4.2.

$$u_c^2(y) = \sum_{i=1}^N \left(\frac{\partial f}{\partial x_i} \right)^2 u^2(x_i) + 2 \sum_{i=1}^{N-1} \sum_{j=i+1}^N \frac{\partial f}{\partial x_i} \frac{\partial f}{\partial x_j} u(x_i, x_j) \quad (4.2)$$

où $u(x_i, x_j)$ désigne la covariance entre les variables x_i et x_j , y l'estimation de la grandeur Y .

Dans les cas impliquant une non-linéarité importante dans le modèle de mesure, l'équation 4.2 est élargie pour inclure des termes d'ordre plus élevé.

4. *Détermination de l'incertitude élargie.* Le résultat de mesure est exprimé avec son incertitude élargie à partir d'un facteur d'élargissement. Il est habituel de représenter l'incertitude de mesure par un intervalle de confiance à 95%. C'est ce que préconise d'ailleurs le *Hydrometric Uncertainty Guidance* (ISO, 2007c). Il est généralement admis que la loi de distribution de la variable de sortie est *a priori* une gaussienne en application du théorème Central Limite. L'incertitude élargie est alors obtenue en multipliant l'incertitude-type par un coefficient d'élargissement k égal à 1,96 (en pratique, k est arrondi à 2) représentant deux écarts-types autour de la moyenne, dans le cas d'une loi normale.

Ce processus se base donc sur deux hypothèses fondamentales. La première hypothèse porte sur la validité de la loi de propagation de l'incertitude. On suppose en effet que le modèle mathématique du processus de mesure est bien approché par un développement en série de Taylor à l'ordre 1, c'est-à-dire que les hypothèses de linéarité et de dérivabilité du modèle sont acceptables et que les incertitudes-types $u(x_i)$ sont petites comparativement aux valeurs des variables x_i . Bien qu'il soit possible d'utiliser un développement de Taylor au-delà de l'ordre 1, l'application de la formule de propagation peut devenir compliquée avec le calcul de toutes les dérivées partielles du modèle.

Ensuite, l'utilisation d'un facteur d'élargissement $k = 1,96$ est basée sur l'hypothèse que la distribution de la variable de sortie est gaussienne. Le calcul de l'incertitude élargie devient bien plus complexe si cette hypothèse n'est pas valable. Il est également généralement admis que les erreurs de mesure suivent une distribution gaussienne (ou au moins unimodale).

L'avantage de ce type de méthode est qu'il est alors possible de décomposer les sources d'incertitude mettant en évidence celles qui contribuent le plus à l'incertitude finale de la mesure. Ainsi, il est possible de modifier par exemple sa stratégie d'échantillonnage afin de réduire l'incertitude.

4.2.2 Méthode par propagation des distributions

Dans certains cas, les hypothèses d'application du GUM ne sont pas satisfaites (linéarisation du modèle inadéquate ou densité de probabilité pour la grandeur de sortie non gaussienne). En complément du GUM, le supplément 1 (JCGM, 2008b) a été édité afin de proposer une nouvelle approche pour l'estimation des incertitudes de mesure. Il propose la propagation des distributions des variables d'entrée à travers un modèle mathématique du processus de mesure par une approche numérique (Monte-Carlo) comme suit :

1. *Analyse du processus de mesure.* La première étape est commune à la méthode analytique des incertitudes (voir équation 4.1).

2. *Choix des distributions pour chaque variable d'entrée.* Cette étape consiste à associer à chaque grandeur d'entrée une distribution simple (normale, rectangulaire, triangulaire. . .).
3. *Génération de M réalisations de chaque grandeur par tirage dans leur densité de probabilité.* Il est préconisé de réaliser 10^6 tirages grâce à un générateur de nombres pseudo-aléatoires.
4. *Construction de la distribution empirique du mesurande.* Le calcul des M valeurs de la grandeur de sortie par l'application du modèle mathématique (équation 4.1) permet de construire la densité de probabilité du mesurande. L'incertitude est alors obtenue en utilisant l'espérance mathématique et l'écart-type des simulations de Monte-Carlo.

Cette méthode suppose la connaissance de la forme de la distribution de chacune des grandeurs d'intérêt.

4.2.3 Méthode par essais interlaboratoires (méthode descendante)

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

- La norme ISO 5725–2 (ISO, 1994b) permettant de quantifier les performances de la méthode, en termes de répétabilité et de reproductibilité,
- la norme ISO 21748 (ISO, 2005a) établissant un lien entre les résultats précédents et l'incertitude de mesure telle que définie dans le GUM,
- la norme ISO 13528 (ISO, 2010) détaillant les différentes procédures statistiques à appliquer et permettant de déterminer l'incertitude associée à la valeur de référence calculée sur l'ensemble des laboratoires.
- la norme ISO 5725–1 (ISO, 1994a) afin de déterminer les incertitudes associées aux estimations de répétabilité et de reproductibilité.

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

$$Y = \mu + \delta + B + \epsilon + \sum c_i x_i \quad (4.3)$$

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

En se basant sur l'utilisation d'une seule méthode de mesure et en établissant un protocole commun (c'est-à-dire que certaines sources d'erreur ne s'expriment pas), on peut simplifier l'équation 4.3 en :

$$Y = m + B + \epsilon \quad (4.4)$$

où l'on considère que m est la moyenne de l'ensemble des résultats de l'essai, soit une approximation de la valeur vraie du mesurande μ dans l'équation 4.3 et B le biais de la méthode de mesure.

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

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

$$s_R^2 = s_r^2 + s_L^2 \quad (4.5)$$

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

$$s_r^2 = \frac{\sum_{i=1}^p (n_i - 1) s_i^2}{\sum_{i=1}^p (n_i - 1)} \quad \text{avec} \quad s_i^2 = \frac{1}{n_i - 1} \sum_{k=1}^{n_i} (Y_{i,k} - \bar{Y}_i)^2 \quad (4.6)$$

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

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

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

$$s_L^2 = \frac{s_d^2 - s_r^2}{\bar{n}} \quad \text{avec} \quad s_d^2 = \frac{1}{p-1} \sum_{i=1}^p n_i (\bar{Y}_i - Y_{\text{moy}})^2 \quad \text{et} \quad \bar{n} = \frac{1}{p-1} \left[\sum_{i=1}^p n_i - \frac{\sum_{i=1}^p n_i^2}{\sum_{i=1}^p n_i} \right] \quad (4.7)$$

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

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

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

$$U(Q) = k \sqrt{s_R^2 + u^2(\hat{\delta})} = k \sqrt{s_r^2 + s_L^2 + u^2(\hat{\delta})} \quad (4.8)$$

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

Le biais de la méthode de mesure δ peut être estimé par comparaison avec une mesure de référence dont l'incertitude doit être au moins 3 à 10 fois plus petite que la technique de mesure étudiée (ISO, 2010).

4.2.4 Autres méthodes

D'autres techniques d'estimation d'incertitude sont utilisées en hydrologie mais ne sont pas évoquées dans ces travaux. Il s'agit par exemple de la méthode *Generalized Likelihood Uncertainty Estimation* (GLUE) introduite par Beven et Binley (1992). Cette méthode est particulièrement adaptée pour évaluer l'incertitude des modèles hydrologiques dont la difficulté majeure est de reproduire des processus naturels.

On peut également évoquer l'utilisation des ensembles flous pour modéliser l'incertitude (Shrestha et Simonovic, 2010).

Dans le domaine de l'hydrométrie, des approches basées sur le théorème de Bayes sont utilisées notamment pour le tracé des courbes de tarage (par exemple : Moyeed et Clarke, 2005; Le Coz *et al.*, 2014b). Le théorème de Bayes est utilisé pour mettre à jour ou actualiser les estimations d'une probabilité ou d'un paramètre quelconque, à partir des observations et des lois de probabilité de ces observations. Cette approche permet ainsi de faire évoluer l'estimation de l'incertitude dès qu'une nouvelle information est disponible. Le résultat de l'analyse bayésienne fournit à la fois une valeur estimée des paramètres de la courbe de tarage et une distribution (a posteriori) des paramètres. Cette distribution représente directement l'incertitude d'estimation des paramètres de la courbe de tarage

4.2.5 Synthèse

Les approches classiques d'estimation d'incertitude dans le domaine de l'hydrométrie peuvent être résumées dans le schéma présenté à la figure 4.2.

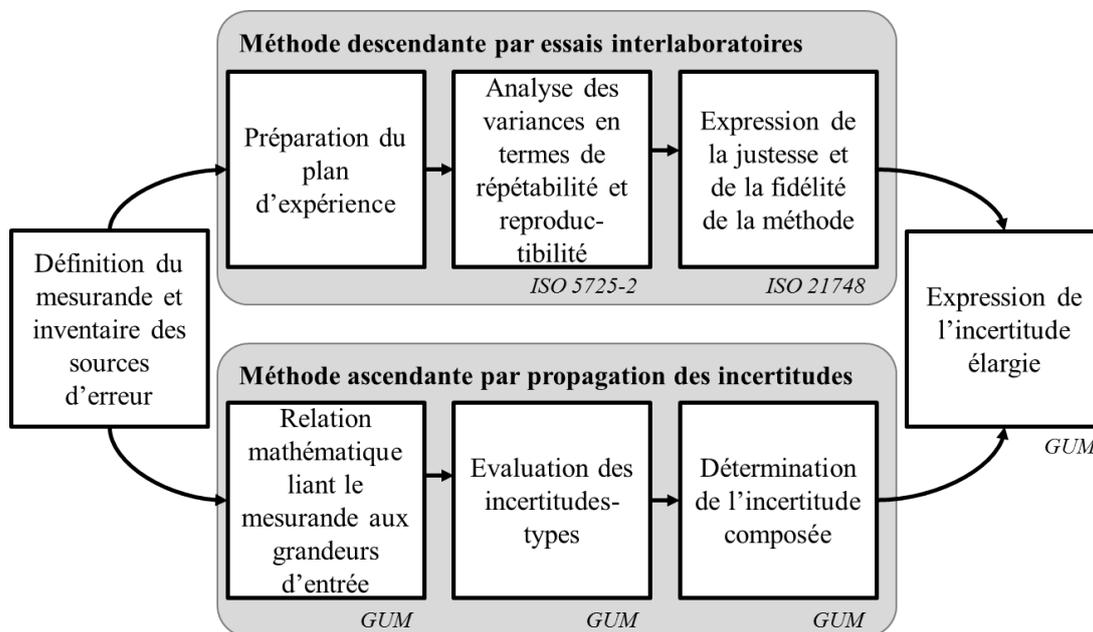


FIGURE 4.2 – Synthèse des différentes approches d'estimation des incertitudes et guides associés, adaptée de Blanquart (2013).

On distingue deux approches à savoir l'approche ascendante basée sur la propagation (analytique ou numérique) des sources d'incertitude affectant le mesurande et l'approche descendante qui se base sur les estimations de répétabilité et de reproductibilité lors d'essais interlaboratoires.

Le choix entre ces méthodes s'effectue selon que le processus de mesure est modélisable ou non

et en fonction des moyens pouvant être mis en œuvre. On qualifie généralement les méthodes de propagation des incertitudes (analytique ou numérique) de méthodes de référence car elles permettent de déterminer l'incertitude d'une seule mesure. La technique des essais interlaboratoires permet, quant à elle, de quantifier la justesse et la reproductibilité de la méthode de mesure, dans les conditions des essais.

Chacune de ces méthodes présente des limites et il est intéressant de les confronter en vue d'obtenir l'estimation de l'incertitude la plus pertinente possible. Les essais interlaboratoires peuvent ainsi mettre en évidence des sources d'incertitude omises dans l'application de la méthode par propagation analytique.

4.3 Sources d'incertitude des estimations du débit

L'estimation du débit, qu'elle soit ponctuelle (jaugeage) ou continue (déduite par exemple d'une courbe de tarage), nécessite la mesure de plusieurs grandeurs, sources d'erreurs. La variabilité temporelle des écoulements pose de plus des problèmes de stationnarité ou d'échantillonnage. L'estimation du débit, comme toute grandeur physique, est donc entachée d'erreurs qu'il faut quantifier par une analyse d'incertitude. Il faut également garder à l'esprit que l'absence d'étalon pour la valeur de débit complique cette tâche.

Des études ont montré que les incertitudes associées aux chroniques de débit sont souvent importantes (Di Baldassarre et Montanari, 2009; Westerberg et McMillan, 2014) mais leur quantification reste problématique, ce qui rend généralement leur diffusion et prise en compte difficiles. Ainsi, de nombreux chercheurs se sont attelés à répertorier et quantifier les incertitudes affectant les données de débit. Les paragraphes suivants ont pour objectif de recenser les principaux travaux.

En complément, le lecteur est invité à consulter la revue bibliographique (Le Coz, 2012) portée par l'Organisation Météorologique Mondiale (OMM, *World Meteorological Organization*) ainsi que les travaux de McMillan *et al.* (2012) sur les différentes sources d'incertitude des paramètres hydrologiques (précipitations, débit, qualité de l'eau).

4.3.1 L'incertitude sur l'estimation ponctuelle du débit

Bien que la plupart des études hydrologiques soient basées sur l'utilisation de jaugeages, rares sont les études consacrées à la quantification de l'incertitude de ces derniers. De plus, les seules études qui traitent des incertitudes des jaugeages sont consacrées en grande partie aux jaugeages par exploration du champ des vitesses (au courantmètre ou au moyen de flotteurs) alors que la boîte à outils de l'hydromètre est de plus en plus fournie (voir section 3.1). Parmi ces études, la revue bibliographique détaillée que dresse Pelletier (1988) n'a guère évolué au cours de ces trente dernières années, comme le montrent McMillan *et al.* (2012). On retiendra de cette étude une liste assez exhaustive des différentes sources d'incertitude. Seules les études de Carter et Anderson (1963) et Herschy (1975) proposent la combinaison des différentes sources d'incertitude par un véritable calcul d'incertitude. Ce sont les travaux de Herschy (1975) qui sont à l'origine de la norme ISO 748 (ISO, 2009, sous sa dernière version) dont les propositions d'amélioration sont assez récentes (Kiang *et al.*, 2009; Le Coz *et al.*, 2012a; Cohn *et al.*, 2013; Le Coz *et al.*, 2014a). Ces calculs peuvent être appliqués aisément aux jaugeages SVR (section 3.1.3) alors que des études plus complexes sont nécessaires pour estimer l'incertitude des jaugeages par imagerie *Large Scale Particule Image Velocimetry* (LSPIV) (Hauet *et al.*, 2008a; Le Coz *et al.*, 2010).

Dans bien des cas, lorsque l'incertitude des jaugeages est prise en compte, celle-ci est simplement forfaitaire en fonction de la méthode de jaugeage adoptée. Par exemple, des valeurs "à dire d'expert" d'incertitude de 5% à 10% (au niveau de confiance à 95%) pour des jaugeages au courantomètre (Forray *et al.*, 1998) sont utilisées dans les travaux de Morlot *et al.* (2014) portant sur le tracé dynamique des courbes de tarage et le calcul des incertitudes associées.

En ce qui concerne les jaugeages par dilution à injection à débit constant, un calcul d'incertitude est présenté dans la norme ISO 9555-1 (ISO, 1994c). L'incertitude pour ce type de mesure est de l'ordre de 4 à 10%, au niveau de confiance de 95% (Morlot, 2014).

On note que les calculs proposés pour les jaugeages à l'ADCP sont généralement une adaptation de la norme ISO 748 (González-Castro et Muste, 2007; Lee *et al.*, 2014). D'autres études portent sur la comparaison entre différentes techniques de jaugeages (*e.g.* Olivier *et al.*, 2009). En parallèle, de nombreuses comparaisons interlaboratoires ont été réalisées récemment dans le but de quantifier l'incertitude des jaugeages à l'ADCP (Everard, 2007; Terek et Nimac, 2008; Everard, 2009; Le Coz *et al.*, 2009; Pobanz *et al.*, 2011; Hauet *et al.*, 2012). Ces dernières semblent donner un ordre de grandeur d'incertitude cohérent. Pour des "bonnes" sections de jaugeage (écoulement stable, loin de singularités), l'incertitude est de l'ordre de 5% pour un ADCP réalisant 6 traversées. En revanche, l'incertitude pour des sections moins propices est plutôt de l'ordre de 15%. Cependant, aucune norme à ce jour ne définit un calcul faisant consensus et des travaux complémentaires devront être menés pour les jaugeages à l'ADCP.

4.3.2 L'incertitude des relations hauteur-débit

Dans le cas des stations limnimétriques à relation hauteur-débit, les sources d'erreur proviennent de l'estimation de la hauteur d'eau (type et précision du capteur), de la sensibilité de la station, du tracé de la courbe de tarage et de la stabilité de la relation hauteur-débit (Schmidt, 2002; Herschy, 2009; Le Coz *et al.*, 2016; Morlot, 2014).

La sensibilité d'une section de mesure désigne sa capacité à détecter une faible variation de débit. Celle-ci sera donc meilleure lorsque qu'une forte variation en hauteur (ΔH) représente une faible augmentation du débit (ΔQ) traversant la section mesure au droit de l'échelle.

Par ailleurs, les erreurs sont minimisées lorsque la station d'hydrométrie bénéficie d'un bon suivi permettant de vérifier à la fois le calage des capteurs à l'échelle hydrométrique de référence et la validité de la relation hauteur-débit par des jaugeages suffisamment nombreux, bien répartis sur la gamme de débit et fréquents afin de vérifier la stabilité de la station.

La stabilité de la relation hauteur-débit dépend des caractéristiques géomorphologiques de la section. Le creusement, l'engravement de seuil ou bien le développement d'herbiers peuvent en effet modifier les propriétés hydrauliques de la section de contrôle. Les restaurations hydromorphologiques engagées sur certaines rivières ont de même un impact sur la relation hauteur-débit.

4.3.3 Incertitude de la mesure des évènements rares

Les évènements rares, qu'il s'agisse des crues ou des étiages, sont par nature difficiles à mesurer car très peu fréquents.

Les bas-débits sont plus faciles à anticiper et donc plus aisément mesurables. L'incertitude provient majoritairement de la remise en cause de la stabilité de la relation hauteur-débit. Pour les basses eaux, les modifications locales des contrôles hydrauliques sont plus visibles à l'étiage car la section mouillée est moins sensible. L'extrapolation des courbes de tarage à bas débit est alors délicate.

Concernant le jaugeage des bas débits, il faut d'abord s'assurer que l'intégralité de l'écoule-

ment peut être mesurable en surface (cas des écoulements de nappe notamment). A défaut, il faudrait prendre en compte et quantifier les écoulements souterrains. Le champ des vitesses étant peu homogène, le matériel utilisé pour la mesure de débit doit être adapté. L'usage d'un ADCP pour des tirants d'eau très faibles est par exemple à proscrire. Quant aux jaugeages au courantomètre, il faudra un temps d'exposition suffisamment élevé pour estimer correctement les faibles vitesses d'écoulement (résolution de l'appareil et pulsations lentes de l'écoulement).

Les courbes de tarage sont mal définies à haut débit puisqu'il est rare et difficile (techniquement et en toute sécurité) de mesurer les crues (Lang *et al.*, 2006). En effet, les méthodes intrusives classiques de jaugeage sont à éviter pour des raisons de sécurité (des opérateurs et du matériel). Quant aux jaugeages par dilution, les quantités de traceur à injecter sont parfois déraisonnables pour le sel et il faut s'assurer que les Matières En Suspension (MES) n'adsorbent pas le traceur. Pour ces raisons, les techniques de jaugeages de type SVR ou LSPIV sont à privilégier bien que moins précises. A cela s'ajoutent les problèmes liés au régime non permanent des écoulements en crue et dans certains cas aux phénomènes d'hystérésis (voir section 1.2.5). Il est alors nécessaire de recourir à des extrapolations sur les parties extrêmes de la courbe de tarage grâce, par exemple, à la modélisation hydraulique. On note que les phénomènes de transport solide sont décuplés en période de hautes eaux, ce qui peut engendrer une modification significative du contrôle hydraulique et donc de l'ensemble de la courbe de tarage.

4.4 Impact des incertitudes sur les décisions relatives à la gestion de l'eau

Les activités liées à la ressource en eau sont nombreuses et leur gestion dépend de la disponibilité de données de débit (patrimoniales ou temps réel) comme montré précédemment (voir tableau 2.1). Malgré l'application de méthodes d'estimation des incertitudes dans le domaine de l'hydrométrie, il est encore rare de disposer en opérationnel d'un intervalle de confiance associé à la donnée. L'utilisateur de la donnée, parfois éloigné du travail de l'hydromètre, n'a donc pas d'information quant à la qualité de la donnée qu'il utilise. Ce dernier peut donc difficilement prendre une décision adaptée à la fiabilité de la donnée.

Certaines décisions se fondent sur l'utilisation de modèles hydrologiques calés sur des chroniques de débit. Dans ces cas, les incertitudes des données de débit paraissent faibles comparativement aux imprécisions des modèles hydrologiques mais elles méritent d'être prises en compte pour le calage des modèles (Zin, 2002). Dans des cas de planification en lien avec des activités humaines, les incertitudes sur le développement de la population ou sur l'évolution future de la demande en eau sont par exemple d'une magnitude bien plus forte que les incertitudes des données de débit.

S'agissant d'incertitudes portant sur un événement redouté (en l'occurrence, une crue), les concepteurs accordent généralement une marge de sécurité par rapport à un événement de référence (crue centennale, millénale ou décennale) dans le dimensionnement d'un ouvrage hydraulique, en raison de séries patrimoniales trop courtes et de risques de sous-estimation des quantiles de crues (Lang *et al.*, 2010). L'Autorité de Sécurité Nucléaire (ASN, 1984) définit une "cote majorée de sécurité" pour les sites fluviaux comme le maximum entre « *le niveau atteint par un débit de crue millénale (crue dont la probabilité annuelle de dépassement est de 10^{-3}) majoré de 15% et le niveau atteint par la conjonction de la plus forte crue connue, ou de la crue centennale, si-celle-ci est plus importante, et de l'effacement de l'ouvrage de retenue le plus contraignant.* » Concernant le dimensionnement des barrages, il n'existe pas de réglementation, le dimensionnement se base généralement sur une crue de débit millénal assortie d'un

coefficient de sécurité. L'incertitude des chroniques de débit utilisées (prenant en compte les incertitudes des données et du modèle hydraulique liant les hauteurs au débit) dans de tels dimensionnements est alors "noyée" (au sens figuré) parmi les autres sources d'erreur potentielles telles que les incertitudes liées au choix du modèle statistique, à l'extrapolation du modèle théorique aux valeurs extrêmes ainsi qu'à la taille et à la représentativité de l'échantillon disponible.

L'impact des incertitudes est certainement plus fort en situation de crise (étiage ou crue) ou bien dans le cas d'utilisation de données en temps réel. Comme nous l'avons montré, la mesure du débit est particulièrement sensible en basses eaux alors que les besoins en eau constituent des enjeux patrimoniaux et économiques forts (Lacaze *et al.*, 2010). Dans de telles situations, les préfetures de département ou de région peuvent être amenées à restreindre les prélèvements pour assurer l'approvisionnement en eau potable. Il s'agit notamment de limiter les usages agricoles et industriels non stratégiques. Dans les situations d'étiage les plus marquées, les prélèvements industriels permettant le refroidissement des centrales thermiques peuvent être limités. Pour tous ces usages, ces restrictions ont bien évidemment un impact économique très fort et sont conditionnées au franchissement de seuils de débit au niveau des stations de suivi d'étiage. Ces seuils correspondent à quatre niveaux de criticité définis par le SDAGE : vigilance, alerte (associé au débit d'étiage seuil d'alerte ou DSA), crise (associé au débit de crise ou DCR) et crise renforcée. Le franchissement d'un seuil entraîne le déclenchement de séries d'actions afin de ne pas atteindre le niveau de criticité suivant.

La variable de suivi de l'étiage est le $VCN_{3_{15j}}$, c'est à dire le plus petit débit moyen sur 3 jours, calculé sur la quinzaine passée (Lacaze *et al.*, 2010). Ceci implique de la part des services d'hydrométrie l'assurance de la disponibilité en continu des données. Or, sans un certain recul temporel, il est parfois difficile de corriger et de garantir la qualité de la donnée en temps réel. Certaines études démontrent en effet que l'apport de jaugeages ultérieurs peut engendrer une modification sur les chroniques de débit (Lacaze *et al.*, 2010; Morlot, 2014). L'incertitude sera donc plus grande pour les données en temps réel que pour les données validées. Ces incertitudes non négligeables peuvent remettre en cause le franchissement d'un seuil et donc les décisions qui en découlent.

La question des incertitudes se pose également concernant les débits réservés (c'est à dire l'obligation de maintenir un débit minimal à l'aval d'un aménagement). Selon l'article L214-18 du Code de l'Environnement, le débit réservé ne doit pas être inférieur à 1/10ème du module (ou à 1/20ème du module dans certains cas), c'est-à-dire le débit moyen pluriannuel du cours d'eau. Dans ce but, la Police de l'eau peut être amenée à réaliser des contrôles de terrain inopinés par des jaugeages. Elle peut alors verbaliser les infractions constatées puisque le non respect du débit réservé est un délit prévu et réprimé par l'article L216-7 du Code de l'Environnement (75 000 euros d'amende). Face à l'incertitude propre de la mesure de débit, à quel moment une sanction pénale est-elle envisageable ?

En résumé, l'absence de prise en compte de l'incertitude possède un coût (humain, socio-économique ou environnemental) puisqu'elle est susceptible d'entraîner des prises de décision non adaptées, soit trop prudentes ou soit trop risquées. La prise en compte de l'incertitude doit permettre d'adapter la décision en fonction de la gravité du risque que l'on cherche à garantir. Par exemple, lorsque la décision porte sur un risque de crue mettant en danger la population, l'ordre d'évacuation sera conditionné au le dépassement d'une valeur cible par la borne supérieure d'incertitude (au seuil de confiance de 95% ou plus, selon le niveau de prudence) de l'hydrogramme. Si les conséquences sont modérées, la valeur centrale (moins pessimiste) sera retenue. En outre, la connaissance des incertitudes permet, grâce à une analyse coût-avantage, d'adapter les investissements et d'estimer les risques associés.

Conclusion de la première partie

La croissance et la diversification des besoins en eau engendrent des problèmes de partage de cette ressource entre des acteurs aux objectifs variés. Pour répondre à ces enjeux, la définition de politiques équitables de partage de l'eau nécessite un bilan quantitatif précis des volumes d'eau. De nombreux organismes institutionnels ou privés disposent de réseaux d'hydrométrie pour établir un suivi de la quantité d'eau disponible à l'échelle du bassin versant. Ces réseaux de mesure collectent, valident et construisent des séries chronologiques de débit qui sont à la base du travail des hydrologues. Ainsi, ces données contribuent à répondre à des enjeux environnementaux, économiques et sociétaux dans le monde. Dans ce contexte, l'instauration d'un dialogue constructif entre toutes les parties prenantes passe par la mise en place d'un référentiel commun en matière d'hydrométrie. La normalisation constitue un bon outil pour atteindre cet objectif.

La boîte à outils à disposition de l'hydromètre n'a eu de cesse d'évoluer et de s'étoffer au cours des dernières années. Bien que les processus d'acquisition et le matériel soient devenus de plus en plus fiables au cours du temps, l'hydrométrie opérationnelle reste assez artisanale et par nature imprécise. Les sources d'erreur associées à la mesure du débit sont nombreuses. Elle doivent être identifiées, quantifiées et propagées, via une analyse d'incertitude, afin que les décisions soient prises en fonction de la fiabilité de la donnée. Le respect du processus de mesure et des règles de l'art sont les conditions qui autorisent la conduite d'un calcul d'incertitude. En aucun cas l'incertitude ne peut se soustraire à un respect rigoureux des bonnes pratiques et à une analyse critique de la donnée. L'estimation de l'incertitude ne permettra jamais de détecter des erreurs ou des dérives aux codes de bonne pratique. La maîtrise du matériel, le maintien de la compétence et le suivi de formations doivent en outre permettre de conserver un haut niveau de qualification des personnels.

Les jaugeages étant le premier maillon de l'hydrométrie opérationnelle, ces travaux visent à quantifier leur incertitude et en particulier celle des jaugeages par exploration du champ des vitesses qui constituent une grande proportion des jaugeages. Dans la seconde partie de cette étude (partie II) seront présentées l'application de la méthode analytique de propagation d'incertitude aux jaugeages par exploration du champ des vitesses et les méthodes existantes qui en découlent. Les limites de ces dernières seront abordées et justifient l'objectivation des différents composants d'incertitude par une approche nommée FLAURE (pour *FLow Analog UnceRtainty Estimation*) développée en partie III. Les résultats d'incertitude obtenus selon cette méthode seront enfin confrontés à des essais interlaboratoires (partie IV).

DEUXIÈME PARTIE

Méthodes analytiques d'estimation d'incertitude appliquées aux jaugeages par exploration du champ des vitesses



Un jaugeage au moulinet sur le Glandon à St Etienne-de-Cuines (Savoie, France). Photo : A. Hauet.

Jaugeages au courantomètre : protocole de mesure et sources d'incertitude

Les jaugeages par exploration du champ des vitesses consistent à intégrer spatialement les vitesses et la bathymétrie sur une section en travers d'une rivière (voir section 3.1.3). En plus des erreurs inhérentes à la mesure des profondeurs et des vitesses, la précision de ce type de mesure dépend, en grande partie, du soin apporté à l'échantillonnage et de la variabilité des grandeurs mesurées au cours du temps.

Ce chapitre présente la définition exacte du processus de mesure (section 5.1), ce qui constitue la première étape du travail d'analyse de l'incertitude, quelques préconisations générales quant aux stratégies d'échantillonnage déployées au cours du mesurage (section 5.2), un inventaire des sources d'erreurs (section 5.3) et quelques problématiques portant sur leurs quantifications (section 5.4).

5.1 Processus de mesure

La première étape de toute analyse d'incertitude est la définition du processus de mesure. La méthode de jaugeage par exploration du champ des vitesses consiste à échantillonner la géométrie du cours d'eau (la bathymétrie) et les vitesses sur un semis de points distribués horizontalement et verticalement à travers une section en travers (Rantz *et al.*, 1982; Herschy, 1993b). En pratique, les points de mesures (en termes de vitesse et de profondeur) sont répartis sur des verticales, d'indice i et le débit est calculé comme la somme des débits partiels associés à chacune des verticales et des débits des sous-sections de rive, comme exprimé à l'équation 5.1 qui correspond à la discrétisation de l'équation 3.3.

$$Q = \sum_{i=0}^{m+1} Q_i = Q_0 + Q_{m+1} + \sum_{i=1}^m B_i D_i V_i \text{ [m}^3/\text{s]} \quad (5.1)$$

où Q_i , B_i et D_i correspondent respectivement au débit, à la largeur et à la profondeur de chacune des sous-sections i . V_i est la vitesse moyenne normale à la sous-section i (ou débit surfacique) estimée par intégration verticale du profil des vitesses. Q_0 et Q_{m+1} désignent les débits partiels des sous-sections de rive.

La vitesse moyenne des sous-sections est calculée par intégration des n_i mesures ponctuelles de vitesse de la verticale i .

Les verticales sont repérées en abscisse (x_i) généralement au moyen d'un décamètre rigide tendu entre deux berges pour un jaugeage à la microperche ou posé sur un pont pour un cou-

rantomètre déployé avec une cyclo-potence ou un camion jaugeur. Les trilles sont équipées d'un dispositif permettant de mesurer la distance et la profondeur des points de mesure en fonction de l'enroulement du câble. La graduation des perches permet de repérer verticalement la position des points de mesure. La profondeur de chaque point de mesure est notée $h_{i,j}$, où j (de 1 à n_i) représente l'indice du point de mesure sur la verticale i .

La figure 5.1a montre un exemple de profil bathymétrique du jaugeage de la Bourne à la station hydrométrique Les Jarrands, avec la répartition des points de mesure de vitesses sur 11 verticales. Le profil latéral des vitesses moyennes (V_i) associé à ce jaugeage est représenté à la figure 5.1b.

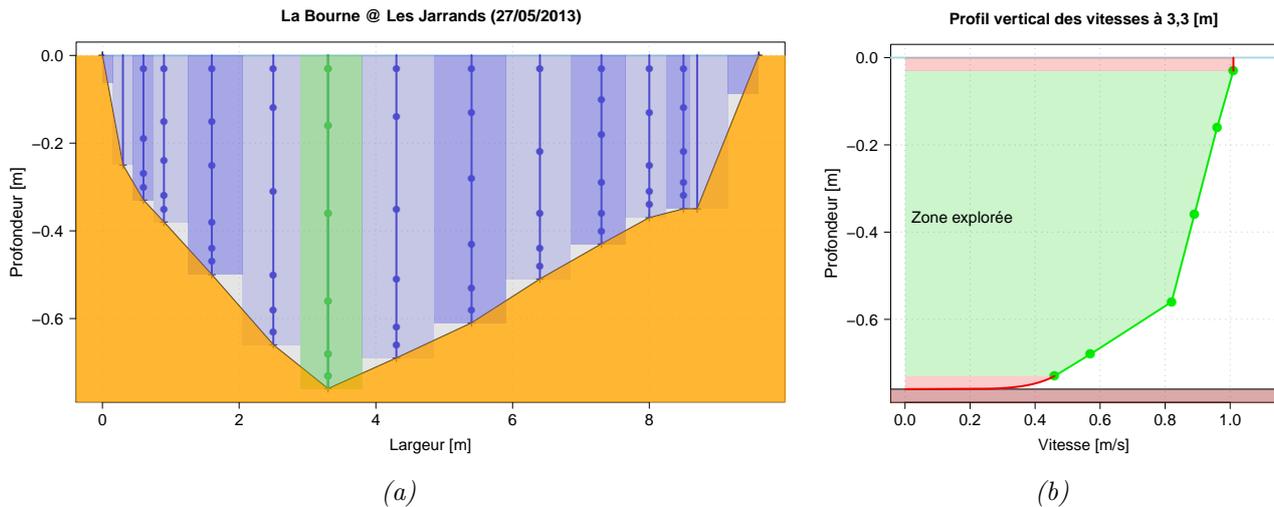


FIGURE 5.1 – Jaugeage de la Bourne à la station Les Jarrands, du 27/05/2013 (débit de $3,1 \text{ [m}^3/\text{s}]$). (a) Profil bathymétrique de la section de mesure avec localisation des points de mesure et délimitation des sous-sections selon la méthode de la section médiane. On note que le repère des axes n'est pas orthonormé (effet de distorsion des axes). Les verticales les plus au bord correspondent à des verticales à vitesse nulle délimitant la section active de l'écoulement. (b) Profil vertical des vitesses associé à l'abscisse $3,3 \text{ [m]}$. La zone en vert correspond à l'intégration par la méthode des trapèze des vitesses, les zones en rouge correspondent aux extrapolations en surface (profil constant) et au fond (en loi puissance).

5.1.1 Choix de la section de mesure

Le choix d'une section de jaugeage contribue grandement à la précision de l'estimation du débit (Le Coz *et al.*, 2011). Le temps passé au choix d'une section de jaugeage n'est jamais vain. Il est important de souligner que la section de mesure ne doit pas nécessairement être la même au cours de la vie d'une station hydrométrique, celle-ci doit être adaptée aux conditions de l'écoulement.

En premier lieu, les conditions d'écoulement doivent être les plus stables possibles au cours de la mesure (régime hydraulique permanent). Pour s'en assurer, il faut vérifier que le niveau d'eau est constant tout au long de la mesure.

Les filets liquides doivent être parallèles entre eux et à angle droit par rapport à la section de mesure afin de réduire l'effet des courants secondaires.

Les caractéristiques géométriques de la section doivent être nettement définies afin de faciliter

la mesure. Les profils verticaux et latéraux de vitesse doivent être réguliers.

Ces conditions idéales n'existent pas en pratique, mais pour s'en approcher, le choix de la section doit répondre, autant que possible, aux préconisations exposées ci-après. Les ouvrages de Herschy (1993b), Forray *et al.* (1998, et sa mise à jour Perret *et al.* (2017)), WMO (2010) et Le Coz *et al.* (2011) permettent de compléter ces préconisations.

La section de mesure doit être située sur un bief rectiligne dont la pente est uniforme. En pratique, le bief doit être rectiligne sur une distance d'au moins deux fois la largeur de la section de mesure à l'amont et d'une fois sa largeur à l'aval, tel qu'illustré à la figure 5.2. Elle doit être éloignée de tout coude, rétrécissement, élargissement ou de tout obstacle (y compris la végétation aquatique) susceptible d'engendrer une perturbation de l'écoulement. Il est préférable de se placer en amont d'un obstacle (un pont par exemple) pour s'affranchir de la perturbation de l'écoulement engendrée. Les zones où ont tendance à se produire des tourbillons, des courants secondaires ou des zones d'eaux mortes, doivent être évitées. Ces considérations doivent garantir que les filets liquides soient parallèles. Dans une certaine mesure, un choix non judicieux de section de jaugeage peut être compensé, en partie, par l'autocomposance¹ de certaines hélices ou par la mesure des vitesses dans le plan de la section de jaugeage par certains courantomètres. Il est préférable de choisir une section relativement lisse (faible rugosité, absence de gros blocs) et pour laquelle le ratio *Largeur/Profondeur* est supérieur à 5 afin que les conditions de faible turbulence garantissent que les profils verticaux des vitesses soient bien établis (Nezu *et al.*, 1985; Bonakdari *et al.*, 2008), tel qu'illustré par la figure 1.5.

Le lit de la section de mesure doit être le plus régulier possible afin de faciliter la mesure de ses caractéristiques géométriques (fond stable, absence d'obstacle et de trou). Il faut veiller à adapter le support et le matériel utilisé aux conditions rencontrées en terme de vitesse d'écoulement et de profondeur afin notamment d'assurer l'immersion de l'appareil de mesure utilisé, sans risque de frottements sur le fond.

5.1.2 Mesure ponctuelle des vitesses

Les vitesses ponctuelles, dont la position verticale est notée, sont mesurées à l'aide d'un courantomètre (moulinet mécanique à hélice, acoustique ou électromagnétique ; illustrés respectivement par les figures 3.4a, 3.4c et 3.4b) déployé sur un support. Le déploiement doit permettre de mesurer les vitesses de l'écoulement perpendiculaires à la section de jaugeage. Les hélices possèdent toutes un effet autocomposant permettant d'obtenir une bonne approximation de la vitesse pour des angles d'incidence des filets liquides pouvant atteindre 30 à 45 degrés suivant les modèles. De même, les courantomètres électromagnétiques et acoustiques sont capables de mesurer les courants obliques et inversés (pour des courants inversés, l'effet de sillage affecte la mesure). Il est néanmoins préférable de choisir une section de mesure adéquate afin d'éviter ce type de situation.

Le courantomètre doit être exposé pendant une durée minimale, en fonction du type de capteur et de la gamme de vitesse mesurée (généralement au moins 30 secondes et au moins 100 impulsions pour un moulinet mécanique), afin d'obtenir une intégration des oscillations des vitesses. Pour les moulinets à hélice, les compteurs électroniques permettent de présélectionner le temps d'exposition ou le nombre d'impulsions. Il est primordial d'utiliser une hélice dans la

1. L'autocomposance d'une hélice désigne la propriété qui permet d'obtenir la composante de la vitesse suivant l'axe de l'hélice lorsque les filets d'eau forment un angle β avec celui-ci (Perret, 1992).

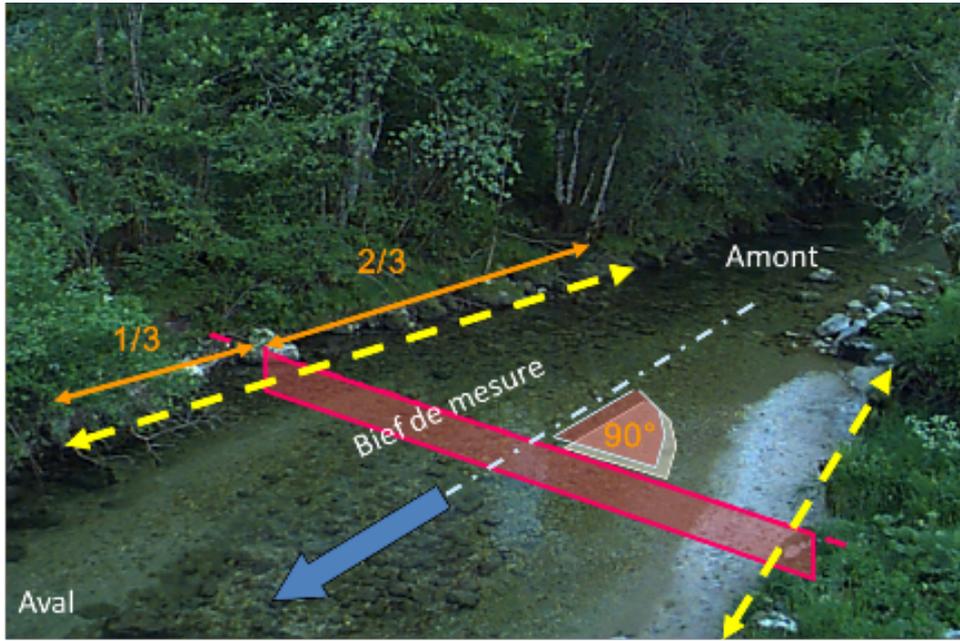


FIGURE 5.2 – Exemple d’une bonne section de jaugeage. La section de mesure se trouve sur un tronçon de rivière rectiligne et suffisamment éloigné de singularités à l’amont et à l’aval. L’écoulement est orthogonal à la section de mesure. Source J. Ribot-Bruno (Irstea).

gamme de vitesse pour laquelle elle est prévue (fonction du pas de l’hélice²). Il faut donc s’assurer que la vitesse de l’écoulement est comprise dans les limites indiquées par le constructeur. Le courantomètre doit être adapté à la gamme de vitesse mesurée, être orienté correctement et conserver une position stable au cours de la mesure.

On trouvera, par exemple, dans le guide de l’ONEMA (Le Coz *et al.*, 2011), des préconisations quant à l’entretien des courantomètres.

5.1.3 Intégration verticale des vitesses

On appelle débit spécifique, ou débit unitaire (noté q_i , et exprimé en $[m^2/s]$), ou encore profil unitaire (noté q_i), l’intégration verticale du profil des vitesses d’une verticale i (figure 5.1b). Le rapport entre le débit spécifique et la hauteur d’eau est appelé par la suite vitesse moyenne V_i . La vitesse moyenne peut être estimée par intégration des points de mesures distribués verticalement (méthode par distribution des points) ou par l’application de méthodes algébriques.

Distribution des points

L’intégration du profil des vitesses peut être réalisée selon la méthode des trapèzes, avec une extrapolation du profil vertical des vitesses en loi puissance au fond et un profil constant en surface (ISO, 2009), comme illustré à la figure 5.1a. q_i s’exprime alors comme :

$$\begin{aligned}
 q_i &= q_{i,surface} + q_{i,explor} + q_{i,fond} \\
 &= (D_i - h_{i,1})v_{i,1} + \sum_{j=1}^{n_i-1} (h_{i,j} - h_{i,j+1}) \left(\frac{v_{i,j} + v_{i,j+1}}{2} \right) + h_{i,n_i} v_{i,n_i} \frac{m_{fond}}{m_{fond} + 1} \\
 &= DiVi
 \end{aligned} \tag{5.2}$$

2. Le pas géométrique d’une hélice est la distance de deux points consécutifs situés sur une même génératrice.

où $h_{i,j}$ et $v_{i,j}$ sont respectivement la hauteur (mesurée par rapport au fond) et la vitesse du point de mesure j ($j = 1, \dots, n_i$) de la verticale i . m_{fond} désigne le coefficient de rugosité du fond. Ce coefficient est généralement compris entre 5 et 7 ; les extrêmes étant 4 pour une paroi rugueuse et 10 pour une paroi très lisse (ISO, 2009).

D'autres scénarios d'extrapolation sont possibles à savoir au fond selon un profil de vitesse linéaire à zéro au niveau du lit ou un profil de vitesse constante et en surface par prolongation linéaire du profil des deux points les plus hauts ou par l'application d'une loi puissance. Le protocole d'EDF-DTG propose l'application d'une loi puissance au fond et un profil linéaire pour l'extrapolation des vitesses en surface.

Méthodes algébriques

Dans le cas des méthodes normalisées (méthodes à un ou trois points par exemple), les vitesses moyennes V_i sont déduites de formules algébriques (ISO, 2009). Les équations suivantes (équations 5.3, 5.4 et 5.5) permettent d'estimer respectivement la vitesse moyenne à partir de un, deux ou trois points de mesure de vitesse :

$$V_i = v_{0,6}, \quad (5.3)$$

$$V_i = 0,5(v_{0,2} + v_{0,8}), \quad (5.4)$$

$$V_i = 0,25(v_{0,2} + 2v_{0,6} + v_{0,8}), \quad (5.5)$$

où $v_{0,2}$, $v_{0,6}$ et $v_{0,8}$ désignent les vitesses mesurées respectivement à 20%, 60% et 80% de la profondeur sous la surface de l'eau. La figure 5.3 montre le placement du courantomètre associé à l'utilisation des formules normalisées à 1 et 3 points.

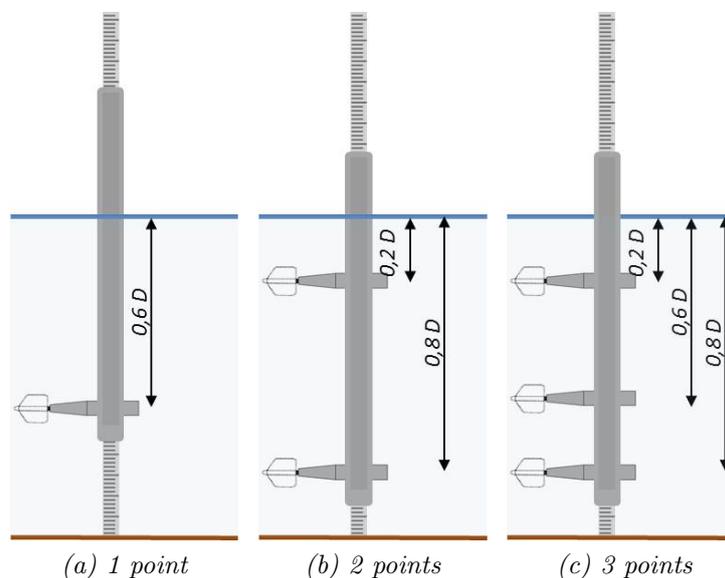


FIGURE 5.3 – Position du courantomètre selon la méthode normalisée choisie (1, 2 ou 3 points).

Les équations 5.3, 5.4 et 5.5 sont basées sur l'hypothèse d'un profil parabolique et d'un écoulement uniforme. Bien que cette hypothèse ne soit pas souvent vérifiée, elles sont appliquées par un grand nombre de services d'hydrométrie. C'est le cas pour la plupart des pays anglo-saxons comme l'USGS et les services d'hydrométrie de Nouvelle-Zélande ou du Canada. Il conviendrait néanmoins de réaliser pour chaque site de jaugeage au moins une mesure complète du profil des vitesses et le cas échéant d'appliquer un coefficient correcteur (Barrows et Horton,

1907). On note que d'autres méthodes algébriques existent telles que la méthode du point unique en surface et la méthode des cinq points (basée sur la vitesse de surface, la vitesse du fond et les vitesses mesurées à 20%, 60% et 80% de la profondeur sous la surface de l'eau).

5.1.4 Intégration latérale des débits

Le débit total est calculé comme la somme de débits partiels affectés à chacune des verticales et aux sous-sections de rive. La vitesse moyenne associée à une sous-section de rive est généralement estimée par extrapolation en loi puissance de la vitesse moyenne de la verticale adjacente à la berge. L'équation 5.6 exprime la relation entre la vitesse au niveau de la berge (indice $i = 0$ ou $i = m + 1$) et la vitesse moyenne de la verticale de mesure adjacente (indice $i = 1$ ou $i = m$) en fonction de la distance à la berge et du paramètre de rugosité m_{rive} . Celle-ci est analogue à l'équation 1.12 exposée à la section 1.2.4.

$$V_0 = |x_0 - x_1| \frac{m_{rive}}{m_{rive} + 1} \quad (5.6)$$

L'intégration latérale (horizontale) des débits partiels Q_i peut se faire par la méthode de la section moyenne (*mean-section method*) ou par la méthode de la section médiane (*mid-section method*), ou encore par un polynôme (protocole EDF-DTG).

La méthode de la section médiane, illustrée à la figure 5.1a, consiste à diviser la section en sous-sections délimitées par la demi-distance séparant les verticales de mesure.

La méthode de la section moyenne suppose une variation latérale linéaire de la profondeur et de la vitesse entre deux verticales de mesure, tandis que la méthode de la section médiane suppose l'uniformité de la vitesse et de la profondeur à proximité des verticales de mesure. On rappelle que la largeur de la sous-section est notée B_i .

La suite des travaux porte sur la méthode de la section médiane, méthode la plus couramment utilisée.

La méthode alternative de la section moyenne conduit à des différences faibles, de l'ordre de 1%, dans le calcul du débit (Young, 1950; Le Coz *et al.*, 2012a). La figure 5.4 montre la distribution des écarts relatifs, calculés selon l'équation 5.7, entre les méthodes de la section médiane et de la section moyenne sur un jeu de 3930 jaugeages EDF-DTG.

$$E(Q_{\text{moy.}}, Q_{\text{med.}}) = 100 \left(\frac{Q_{\text{moy.}} - Q_{\text{med.}}}{Q_{\text{med.}}} \right) \quad (5.7)$$

où $Q_{\text{moy.}}$ et $Q_{\text{med.}}$ désignent respectivement la valeur de débit selon un dépouillement en section moyenne et en section médiane.

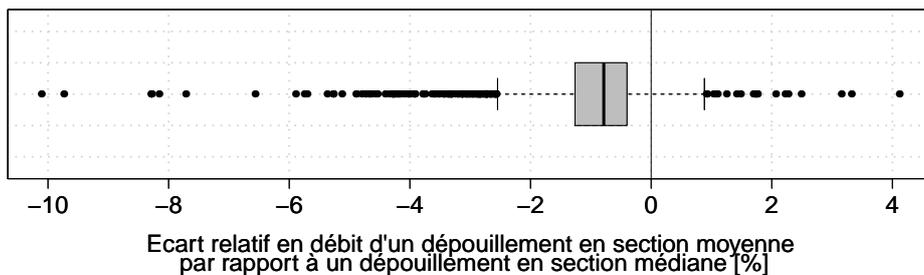


FIGURE 5.4 – Boîte à moustaches des écarts relatifs en débit entre un dépouillement en section moyenne et en section médiane. Des écarts négatifs indiquent une estimation de débit supérieure pour un dépouillement en section médiane.

Globalement, on note que la section moyenne donne des résultats de débit plus faibles que la section médiane. L'ordre de grandeur des écarts relatifs de 1% est cohérent avec les valeurs renseignées dans la littérature.

5.1.5 Cas particulier des verticales de type lame d'eau

Pour augmenter l'échantillonnage latéral des mesures de bathymétrie, certains auteurs proposent l'ajout de verticales intermédiaires de mesure (Fulford et Sauer, 1986; ISO, 1990; Boiten, 2000; Le Coz *et al.*, 2012a). Sur celles-ci, seule la profondeur D_i est estimée. Le protocole consiste à effectuer une mesure classique (l'hydromètre se déplace de la rive de départ jusqu'à la rive opposée) puis à intercaler des verticales de type lame d'eau lorsque l'hydromètre revient à la rive de départ. La vitesse moyenne, V_i , est alors estimée par approximation linéaire du nombre de Froude, dont la définition est rappelée en section 1.2, selon l'équation 5.8. Cette méthode repose sur l'hypothèse d'une variation linéaire de nombre de Froude sur la section en travers d'une rivière. Des essais montrent qu'une information moins fine sur la distribution latérale des vitesses est suffisante pour obtenir un résultat cohérent de débit (Dramais *et al.*, 2011). Lors d'évènements de crues ou sur les cours d'eau dont le débit varie rapidement, il peut donc être utile d'avoir recours à ce protocole.

$$V_i = Fr_i \sqrt{gD_i} \quad \text{avec :} \quad Fr_i = \frac{Fr_{i+1} + Fr_{i-1}}{x_{i+1} + x_{i-1}}(x_{i+1} - x_i) + Fr_{i-1} \quad (5.8)$$

où Fr_i désigne le nombre de Froude interpolé sur la verticale i , à l'abscisse x_i , à partir des nombres de Froude calculés sur les verticales adjacentes Fr_{i+1} et Fr_{i-1} , d'abscisses x_{i-1} et x_{i+1} .

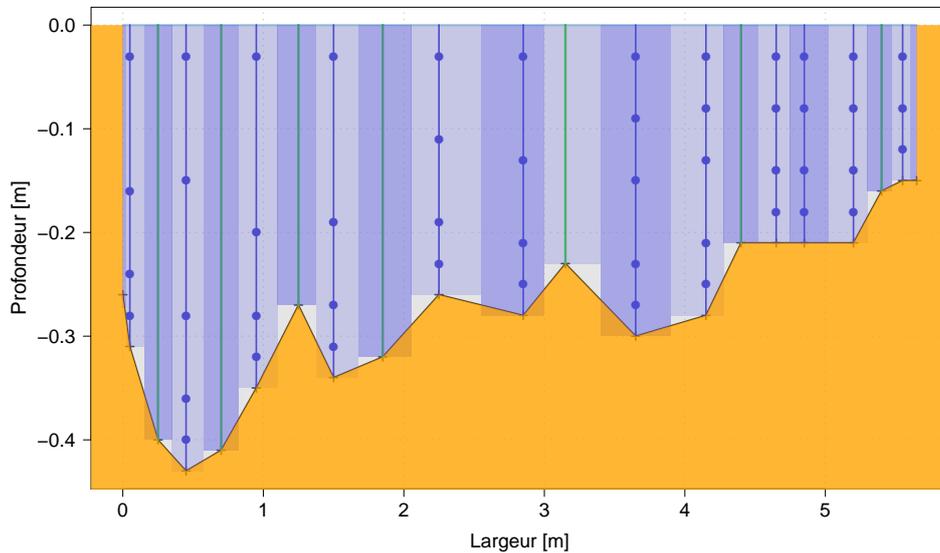


FIGURE 5.5 – Exemple de profil bathymétrique d'un jaugeage avec ajout de verticales de type lame d'eau (jaugeage de la Veyradere à la station hydrométrique de Chamberombaud, le 05/06/2013). Les lignes verticales vertes matérialisent les verticales de type lame d'eau.

Ce protocole de mesure est testé depuis 2013 par les équipes d'hydromètres d'EDF-DTG. 192 jaugeages avec ajout de verticales de type lame d'eau ont été réalisés depuis cette date. La figure 5.5 illustre un jaugeage de la Veyradere à la station hydrométrique de Chamberombaud comportant 12 verticales classiques de mesure et 7 verticales de type lame d'eau. Le débit

mesuré sans lame d'eau est de 1,02 [m³/s] contre 0,98 [m³/s] avec prise en compte des verticales de type lame d'eau.

5.2 Préconisations générales

Les différentes préconisations que l'on retrouve ci-dessous et dans la littérature visent à réduire le biais de mesure et à limiter l'importance des erreurs dues à l'échantillonnage limité des vitesses et des profondeurs.

La précision des jaugeages au courantomètre repose avant tout sur un échantillonnage correct des mesures de vitesses et de profondeurs en raison de la complexité morphologique et de la distribution des vitesses des sections de jaugeage rencontrées (voir la section 1.3). L'échantillonnage des points de mesure doit être suffisamment dense et judicieusement réparti dans la section pour que le calcul du débit total (selon l'équation 5.1) donne une estimation précise du débit réel représenté par l'équation 3.3. En revanche, un échantillonnage inutilement dense, ou mal distribué dans la section, entraînera une perte de temps, un risque accru de variation du régime hydraulique durant la mesure, sans réel gain sur la qualité de la mesure.

On retrouve dans la littérature ou dans les modes opératoires des préconisations différentes quant aux choix des verticales de mesure et des points de mesure de vitesse en termes de répartition spatiale et de nombre. Quelques préconisations sont présentées dans le tableau 5.1 et à la figure 5.6. Il n'existe pas de recommandations universelles étant donné la diversité des sections de jaugeage rencontrées. On peut cependant observer que le protocole EDF-DTG (Vignon, 2001) est adapté aux caractéristiques des sections de jaugeages rencontrées sur le réseau hydrométrique plutôt montagneux d'EDF (voir paragraphe 3.1.4).

Les recommandations normatives (ISO, 2009) préconisent l'utilisation d'une vingtaine de verticales quelle que soit la section de jaugeage. Ainsi le débit partiel de chaque sous-section doit correspondre à 5% du débit total et ne doit en aucun cas être supérieur à 10%. Il est difficile en pratique de respecter cette préconisation en raison de la durée de la mesure (Aldegheri, 1979). Forray *et al.* (1998) stipulent que ce choix revient à l'opérateur en fonction de son expertise et sa connaissance du site ainsi qu'en fonction de la géométrie du lit et de la distribution de l'écoulement dans la section de jaugeage. Il convient cependant de toujours chercher à décrire au mieux les portions de la section où les variations de profondeur et/ou de vitesse sont rapides ou irrégulières, surtout si ces portions de section contribuent significativement au débit total. Le choix du nombre de points est dicté par des contraintes pratiques (profondeur, durée de mesure) et par le type d'écoulement à décrire (profils de vitesse irréguliers, section étroite). Le nombre de verticales devra être suffisant pour décrire correctement la complexité de la section de mesure.

Dans la mesure du possible, il convient de rapprocher les points de mesure à proximité des berges, de la surface et du fond de manière à réduire le poids des extrapolations. Il est évident qu'en situation de crue, il est recommandé d'utiliser un nombre moindre de verticales de mesure pour des raisons de sécurité et afin de réduire les risques de variation du débit au cours de la mesure (pour compléter le volet sur la sécurité, le lecteur se référera à l'annexe E).

La figure 5.6, représentant le nombre de verticales en fonction de la largeur de la section pour 3930 jaugeages EDF-DTG, montre que les jaugeages EDF-DTG respectent les préconisations de Forray *et al.* (1998). Les préconisations de la norme ISO 748 nécessitent en effet beaucoup plus de verticales.

TABLE 5.1 – Exemples de préconisations selon différents organismes.

Intitulé ou organisme	Pays concerné(s)	Nombre de verticales	Nombre de points par verticale	Temps d'exposition
Norme ISO 748 (ISO, 2009)	Monde entier	figure 5.6	Néant	au moins 30 [s]
Guide WMO (WMO, 2010)	Monde entier	25 à 30 (si $B > 10$ [m])	Néant	au moins 30 [s]
Charte qualité de l'hydrométrie (Forray <i>et al.</i> , 1998)	France	figure 5.6	Néant	au moins 30 [s]
Protocole interne EDF-DTG (Vignon, 2001)	France	au moins 6 (selon la section)	au moins 3 (à adapter selon le profil)	30 [s] ou 100 impulsions
USGS (Rantz <i>et al.</i> , 1982; Turnipseed et Sauer, 2010)	Etats-Unis	25 à 30	1 ou 2	40 [s]
Canada (Pelletier, 1988)	Canada	20 (minimum)	1 ou 2	40 [s]
Guide Onema (Le Coz <i>et al.</i> , 2011)	France	si $B/H > 5 \geq 11$, ≥ 6 sinon	Néant	au moins 30 [s]

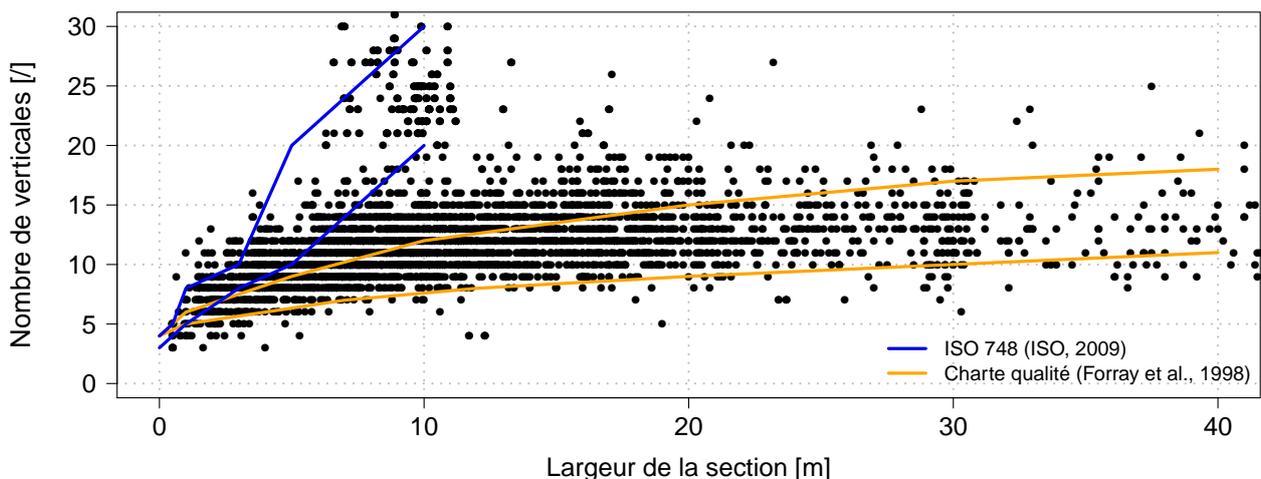


FIGURE 5.6 – Répartition des 3930 jaugeages extraits de la base de données EDF-DTG et préconisations en termes de nombre de verticales comme fonction de la largeur de la section selon Forray *et al.* (1998) et ISO (2009). Les courbes colorées représentent l'intervalle dans lequel les jaugeages devraient se situer.

5.3 Inventaire des sources d'erreurs

Différentes études (Dickinson, 1967; Fulford et Sauer, 1986; Pelletier, 1988; Sauer et Meyer, 1992; McMillan *et al.*, 2012) se sont attelées à lister et à quantifier les différentes sources d'incertitude affectant les données hydrométriques et en particulier les jaugeages par exploration du champ des vitesses au courantomètre. Concernant ces derniers, on retiendra que les études de Dickinson (1967) et Pelletier (1988) sont les plus exhaustives bien que relativement anciennes.

La revue bibliographique de Pelletier (1988) dresse un inventaire complet des études réalisées jusqu'en 1988 sur les différentes sources d'erreur des jaugeages au courantomètre. On présente ci-dessous les sources d'erreur les plus significatives affectées à chaque étape du processus conduisant à l'estimation du débit ainsi que quelques ordres de grandeurs usuels. On note que la méthode des "5M" (section 4.1.2) peut être appliquée sur chaque grandeur intermédiaire estimée, c'est-à-dire B_i , V_i , $h_{i,j}$, $v_{i,j}$ et D_i .

5.3.1 Erreurs sur les mesures de largeur $u(B_i)$

Les erreurs portant sur les mesures de largeur sont certainement les plus simples à quantifier. Elles diffèrent selon le type de dispositif de mesure mis en œuvre et du soin apporté par l'opérateur. Par exemple, pour les rivières étroites, une tension insuffisante du décamètre tendu entre les deux berges peut augmenter la flèche de courbure et ainsi augmenter les erreurs sur la mesure de largeur provoquant une surestimation systématique de cette dernière. On peut considérer que les erreurs de lecture sont nettement supérieures aux erreurs métrologiques de l'appareil. Dans de bonnes conditions de déploiement, Herschy (2002) et ISO (2009) proposent une estimation de 0,5% pour l'incertitude relative sur la largeur de la section ($u'(B_i)$). Des écarts bien plus importants, de l'ordre de 5%, ont néanmoins déjà été observés sur des cours d'eau de petite taille (Dramais *et al.*, 2011).

5.3.2 Erreurs sur l'estimation des vitesses moyennes $u(V_i)$

L'estimation de la vitesse moyenne dépend à la fois de la qualité de l'échantillonnage vertical des vitesses sur la colonne d'eau ainsi que des mesures ponctuelles de vitesse.

Erreurs sur l'intégration verticale des vitesses

On note le terme d'incertitude relatif à l'intégration verticale du profil vertical des vitesses $u_p(V_i)$. L'incertitude due aux extrapolations au fond et en surface est supposée prise en compte dans ce terme. On distingue deux protocoles différents pour l'estimation de la vitesse moyenne sur une verticale (voir section 5.1) : application d'une formule algébrique normalisée ou par distribution des points.

Une majorité d'organismes d'hydrométrie appliquent des formules algébriques pour relier les vitesses ponctuelles à la vitesse moyenne (voir section 5.1). Lorsque le profil des vitesses suit un profil logarithmique théorique (section 1.2.4), les formules algébriques basées sur un nombre limité de points par verticale permettent une bonne approximation de la vitesse moyenne. Il est conseillé de vérifier la validité de ces formules d'un site à un autre à partir d'études préliminaires (ISO, 2009) et il est alors éventuellement possible d'appliquer un facteur correctif. De plus, l'utilisation de ces formules suppose un placement correct des points de mesures selon le protocole imposé. Dans ces conditions, on peut considérer que les valeurs de l'annexe E de la norme *ISO 748* (ISO, 2009) (tableau 5.2) donnent une bonne estimation de l'incertitude puisqu'elles sont basées sur des rivières (Pelletier, 1988) plutôt larges où l'hypothèse d'un profil théorique des vitesses est valable. Bien que basé sur un nombre élevé de profils de vitesse, Pelletier (1988) relève que la quantification du terme $u'_p(V_i)$ par Herschy (1975) porte uniquement sur deux rivières (565 profils sur la Tamise et 115 sur la rivière Derwent en Angleterre) où l'hypothèse d'un profil logarithmique est valable (voir section 1.2.4).

On peut regretter l'usage systématique de ces formules sans prise en compte des conditions particulières de la section de mesure. Dans les torrents de montagne, la présence de blocs et la proximité des parois perturbent les filets liquides. Dans ce cas, il est préférable d'utiliser un nombre suffisant de points par verticale pour approcher au mieux la vitesse moyenne ou

TABLE 5.2 – Incertitude sur l'intégration verticale des vitesses. Tiré de ISO (2009)

Méthode	Distribution des vitesses	5 points	2 points (0,2 et 0,8D)	1 point (0,6D)	Surface
Incertitude $u'_p(V_i)$ (à 68%) [%]	0,5	2,5	3,5	7,5	15

bien d'attribuer une incertitude bien plus forte que les valeurs recommandées par la norme *ISO 748*. On note que la valeur de 0,5% proposée pour un profil multipoints (ISO, 2009) semble relativement faible et qu'elle ne prend pas en compte la répartition des points de mesure sur la verticale ni la complexité du profil (il est néanmoins préconisé que l'écart entre deux vitesses successives soit inférieur à 20%).

Erreurs sur la mesure ponctuelle des vitesses

Les erreurs portant sur la mesure ponctuelle de la vitesse (notées $u(v_{i,j})$) proviennent à la fois de la qualité métrologique de l'appareil ainsi que des conditions opérationnelles. En ce qui concerne les qualités métrologiques de l'appareil, on distingue :

- Les erreurs provenant de l'étalonnage du courantomètre en canal (ISO, 2007b). Les valeurs indicatives de la norme ISO 748 montrent que l'incertitude relative est plus forte pour des faibles vitesses. Les erreurs sont généralement plus faibles lorsque le courantomètre est étalonné individuellement et sur son support. Des ondes engendrées par le déplacement des courantomètres dans le canal peuvent également affecter la qualité de l'étalonnage (De Huu et Wüthrich, 2012) si celui-ci n'est pas tranquilisé. En fonction de l'état d'usage, on note qu'un courantomètre mécanique peut sous-estimer la vitesse.
- Les erreurs sur la mesure du temps (négligeables compte-tenu des progrès réalisés en ce sens) et le comptage des impulsions. Le nombre de tours mesuré par un moulinet est tronqué (résolution de l'appareil), ce qui engendre une sous-estimation de la vitesse. Ce terme est généralement omis bien que sa magnitude soit d'autant plus forte que le nombre de tours mesuré est faible.
- Les erreurs engendrées par l'inertie du moulinet. Elles dépendent de la qualité du palier hydraulique³ du moulinet. Un bon entretien et le changement fréquent de l'huile réduisent ces effets (Perret, 1992).

Les conditions rencontrées en canal couvert pour l'étalonnage des courantomètres sont différentes des conditions rencontrées en rivière, ainsi, des sources d'incertitude supplémentaires émergent :

- Les courants secondaires (c'est-à-dire non perpendiculaires à la section de jaugeage) peuvent perturber la mesure, en particulier à proximité des parois et pour les rivières étroites et peu profondes. L'autocomposance des hélices permet de résoudre en partie ce problème. Certains courantomètres électromagnétiques et acoustiques sont également capables de mesurer les trois composantes de vitesse. Concernant les mesures réalisées sur un support lesté (type saumon), la dérive du dispositif oriente le courantomètre dans la direction du courant auquel cas un facteur correctif doit être appliqué.
- Généralement, la vitesse mesurée en un point de la section varie dans le temps à cause de phénomènes physiques de turbulence et de pulsation de l'écoulement. Ces phénomènes varient en fonction du cours d'eau et de la position par rapport aux parois (et donc en

3. Un palier hydraulique permet de réduire les frottements entre deux surfaces grâce à un film d'huile intercalé entre l'arbre et le corps du moulinet.

fonction de la vitesse). L'erreur sera évidemment réduite avec un temps d'exposition plus long et l'incertitude associée à l'intégration de la vitesse ponctuelle est notée $u_{exp}(v_{i,j})$.

5.3.3 Erreurs sur les mesures de profondeur $u(D_i)$

Les erreurs affectant les mesures de profondeur dépendent essentiellement du type de déploiement. La nature du fond (irrégularités, dureté) engendre des erreurs sur l'estimation de la profondeur d'autant plus grandes que le support du courantomètre est imposant. Pour les dispositifs suspendus par un câble, les effets de flèche horizontaux et verticaux sont d'autant plus importants que la vitesse de l'écoulement est forte, que la largeur est grande et que la profondeur est importante. Des facteurs correctifs dus à la traînée du câble et du tirant d'air doivent être appliqués (ISO, 1989). Pour les courantomètres sur perche, le talon de la perche et la distance entre l'axe du courantomètre et le fond doivent être pris en compte. Sauer et Meyer (1992) proposent des incertitudes-type en fonction de la profondeur mesurée, du type de déploiement (sur perche ou par câble) et de la nature du fond. Herschy (2002) et ISO (2009) proposent une valeur de 0,5%.

5.3.4 Erreurs sur l'estimation du débit $u(Q_t)$

Ce sont des erreurs en lien direct avec l'estimation du débit total Q_t . Elles s'expliquent par l'écart entre le mesurande (équation 3.3) et l'estimation du débit par l'équation 5.1. Cet écart est inévitable pour des raisons pratiques : discrétisation finie du champ des vitesses, conditions hydrologiques et durée de la mesure par exemple.

Elles dépendent principalement de l'échantillonnage latéral de la bathymétrie et des vitesses ainsi que de la méthode d'intégration adoptée (méthode de la section médiane ou moyenne par exemple) ainsi que du choix des coefficients d'extrapolation des vitesses moyennes au niveau des bords. L'expérience de l'opérateur permet généralement de réduire ces erreurs via un choix judicieux de la section et des verticales de mesure. Un nombre insuffisant de verticales entrainera le plus souvent une sous-estimation systématique du débit (biais) compte-tenu de la concavité des profils latéraux de profondeur et de vitesse (voir section 1.2.1).

Enfin, la variation du débit et les effets d'hystérésis peuvent augmenter l'incertitude globale. Il est à noter que ces effets sont certainement importants bien qu'ils n'aient fait l'objet que de très peu d'études (Le Coz *et al.*, 2012a).

La figure 5.7 résume les différentes sources d'incertitude selon les grandeurs estimées (B_i , V_i , $v_{i,j}$, $h_{i,j}$, D_i et Q_t) et la nature des erreurs (section 4.1.2). Pour chacune des grandeurs, les sources d'erreur sont dues à des problèmes d'échantillonnage (intégration de la grandeur et extrapolations éventuelles), aux qualités métrologiques et à l'étalonnage de l'instrument de mesure, aux conditions opérationnelles de déploiement (conditions environnementales notamment) et aux erreurs humaines telles que des erreurs de lecture. Cette figure constitue le fil rouge de l'étude.

5.4 Problématiques

La revue bibliographique de Pelletier (1988) montre une grande variété de travaux pour quantifier les différentes sources d'incertitude. On note que ces études sont plutôt anciennes (donc difficilement accessibles) et que depuis les années 1990 peu d'études ont été menées sur cette thématique. Ceci peut s'expliquer par l'arrivée des profileurs Doppler (ADCP). Globalement, on note que les études donnent des résultats assez différents d'un auteur à l'autre en raison d'un nombre différent et de la variabilité des sites étudiés.

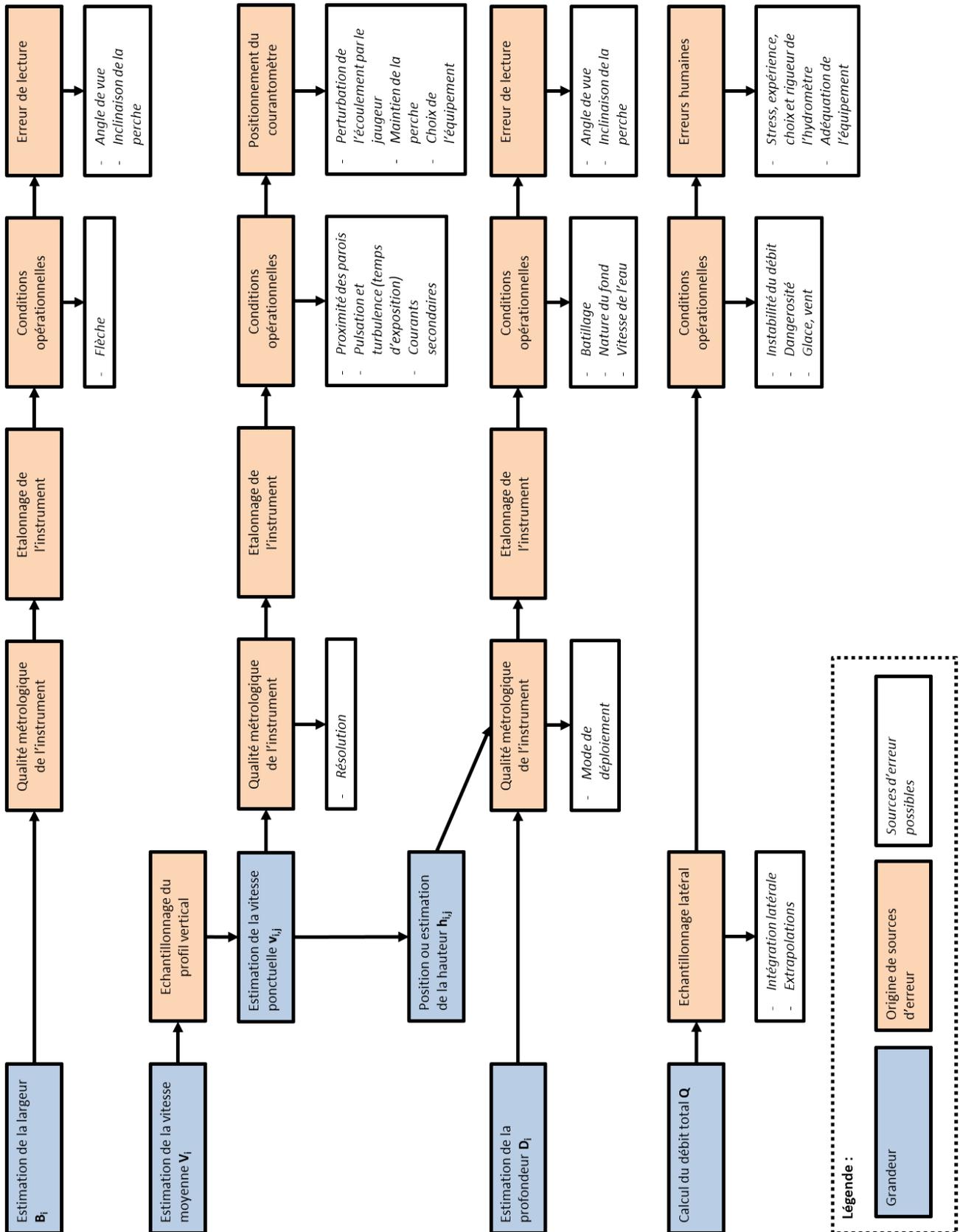


FIGURE 5.7 – Classification des différentes sources d'incertitude selon la nature des erreurs et la grandeur estimée.

On retiendra des travaux de Pelletier (1988) que :

- Les études les plus exhaustives (en termes de sources d'erreur investiguées) ont été développées par Herschy (Herschy, 1975, 2002) et ont inspiré les ordres de grandeur que l'on retrouve dans la norme *ISO 748*.
- Les études de Carter et Anderson (1963) sont basés sur un plus grand nombre de cours d'eau. Néanmoins, seules les valeurs moyennes sont présentées.
- Toutes les études ont des protocoles différents. Ce qui fait sans doute que l'exhaustivité des études d'Herschy a conduit à l'adoption de ces résultats dans la norme *ISO 748*.
- Les études portent généralement sur des cours d'eau moyens ou larges et reflètent souvent des conditions d'essais idéales. A ce titre, leur transposition à des jaugeages classiques est hasardeuse.
- Enfin, les études sont anciennes et donc peu transposables aux dernières technologies (courantomètres acoustiques et électromagnétiques). Les résultats obtenus sur des courantomètres au moulinet ne sont pas transposables aux courantomètres acoustiques et électromagnétiques plus récemment développés.

Les valeurs de la norme *ISO 748* peuvent bien évidemment être appliquées à condition de vérifier l'adéquation entre les conditions du site de mesure et les conditions des essais. Dans le cas contraire, il faudrait conduire une étude préliminaire sur chaque site afin de quantifier les différents composants d'incertitude (ISO, 2007a). Pour des raisons pratiques, ce type d'étude est fastidieux et coûteux d'autant que la variabilité spatiale et temporelle du lit des rivières et de l'écoulement rendrait ce travail rapidement obsolète. La suite de cet exposé proposera une méthodologie permettant de préciser ou d'objectiver les valeurs admises dans la norme *ISO 748*.

Les premiers travaux portant sur l'expression de l'incertitude des jaugeages par exploration du champ des vitesses ont été portés par Carter et Anderson (1963) et Herschy (1975). Leurs conclusions sont à l'origine du calcul que l'on retrouve dans la norme ISO 748 (ISO, 2009) qui n'a guère évolué depuis les années 1980. Il faut attendre les années 2000 pour revoir surgir le problème de ce calcul d'incertitude et des propositions d'améliorations de ladite norme.

Les méthodes qui sont présentées ci-après suivent les principales recommandations du *Hydrometric Uncertainty Guidance* (HUG - ou GUM appliqué à l'hydrométrie) (ISO, 2007c) à savoir que l'incertitude finale est exprimée en % du résultat de débit $Q \pm U(Q)$ au niveau de confiance de 95% (soit un facteur d'élargissement d'environ $k = 2$, traduisant une probabilité d'être à plus ou moins deux écarts-types, sous l'hypothèse d'une distribution de l'incertitude gaussienne). On rappelle que les incertitudes-types, notées $u(x_i)$, sont exprimées au niveau de confiance à 68%.

6.1 Application du GUM

L'application littérale du GUM (voir section 4.2.1) à la méthode de jaugeage par exploration du champ des vitesses a été proposée par différents auteurs notamment sous l'impulsion de l'Organisation Mondiale de la Météorologie (Muste, 2009; Fulford, 2009; Muste *et al.*, 2012).

En se basant sur l'équation 5.1 et la liste des différentes sources d'incertitudes (section 4.1.2), l'incertitude-type composée s'exprime selon le GUM comme :

$$u(Q)^2 = \sum_{i=0}^{m+1} \left(\frac{\partial Q}{\partial B_i} \right)^2 u^2(B_i) + \sum_{i=0}^{m+1} \left(\frac{\partial Q}{\partial V_i} \right)^2 u^2(V_i) + \sum_{i=0}^{m+1} \left(\frac{\partial Q}{\partial D_i} \right)^2 u^2(D_i) + 2 \sum_{i=0}^m \sum_{j=i+1}^{m-1} \frac{\partial Q}{\partial x_i} \frac{\partial Q}{\partial x_j} u(x_i, x_j) + u^2(Q_t) \quad (6.1)$$

Q est défini par l'équation 5.1 reliant le débit aux grandeurs mesurées. $u(B_i)$, $u(V_i)$ et $u(D_i)$ sont respectivement les incertitudes-types reliées aux estimations de largeur, vitesse moyenne et profondeur de chaque sous-section i . $u(Q_t)$ est l'incertitude-type portant sur l'estimation du débit (voir section 5.3).

Les dérivées partielles sont les coefficients de sensibilité définis dans le GUM (équation 4.2). Le quatrième terme de l'équation représente les corrélations possibles entre les erreurs de mesures.

Le terme $u(x_i, x_j)$ désigne la covariance entre les grandeurs x_i et x_j . On peut considérer que seule l'utilisation d'un même instrument de mesure induit des corrélations (mesures de largeur, profondeur et vitesse). Par souci de simplification et en raison de la difficulté de quantifier la covariance entre les grandeurs d'entrée, ce terme est généralement omis (Muste, 2009; Fulford, 2009; Muste *et al.*, 2012).

6.2 Norme ISO 748

6.2.1 Calcul

Les travaux d'Herschky (Herschky, 1975, 2002) et du comité de normalisation sont antérieurs à la publication du GUM en 1995. Néanmoins, à quelques notations et simplifications près, la méthode proposée dans la norme ISO 748 (ISO, 2009) est similaire à une application littérale du GUM. Elle propose de travailler avec des incertitudes relatives afin de simplifier les notations. A ce jour, cette norme constitue le seul cadre normatif pour l'estimation de l'incertitude des jaugeages par exploration du champ des vitesses.

L'incertitude-type combinée (relative et au niveau de confiance de 68%) du débit s'écrit :

$$u'^2(Q) = u_s'^2 + u_m'^2 + \frac{\sum_{i=1}^m Q_i^2 \left[u'^2(B_i) + u'^2(D_i) + u_p'^2(V_i) + \frac{1}{n_i} \{u_c'^2(v_{i,j}) + u_{exp}'^2(v_{i,j})\} \right]}{\left(\sum_{i=1}^m Q_i \right)^2} \quad (6.2)$$

L'incertitude combinée élargie $U'(Q)$ est ensuite calculée comme le produit de l'incertitude type combinée par un facteur d'élargissement $k = 2$.

Les incertitudes-types relatives $u'(x)$ sont :

- u_s' : la composante d'incertitude provenant des erreurs systématiques résiduelles après le meilleur étalonnage des instruments de mesure des vitesses, des largeurs et des profondeurs.
- u_m' : le terme d'erreur dû à l'intégration transversale du profil des vitesses et du profil bathymétrique.
- $u'(B_i)$ et $u'(D_i)$: les termes d'erreur sur les mesures respectives de largeur et de profondeur.
- $u_p'(V_i)$: le terme d'erreur dû au nombre limité n_i de points de mesures ponctuelles pour l'estimation de la vitesse moyenne V_i de la verticale i .
- $u_c'(v_{i,j})$: le terme d'erreur sur la mesure de vitesses ponctuelles à cause des limites du courantomètre.
- $u_{exp}'(v_{i,j})$: le terme d'erreur sur l'estimation de la vitesse ponctuelle sur un pas de temps limité (temps d'exposition).

En comparaison de l'application littérale du GUM, on note que :

- Les éventuelles covariances entre les sources d'incertitude sont omises.
- L'expression de l'incertitude-type sous sa forme relative donne une expression simplifiée des coefficients de sensibilité. Mathématiquement, les deux formulations sont homogènes sauf pour les sous-sections des verticales situées au niveau du bord (non prise en compte des extrapolations du profil latéral des vitesses moyennes).

- Les termes u'_s et u'_m peuvent être reliés aux erreurs provenant de l'estimation du débit $u'(Q_t)$.
- Certaines sources d'incertitude ne sont pas prises en compte par rapport à l'inventaire présenté en section 5.3 comme les erreurs dues à la résolution du courantomètre.

En faisant l'hypothèse d'une calibration correcte des instruments de mesure, Herschy (2002) et ISO (2009) proposent les valeurs suivantes :

- $u'_s = 1\%$
- $u'(B_i) = u'(D_i) = 0,5\%$

Les termes u'_m , $u'_p(V_i)$, $u'_c(v_{i,j})$, $u'_{exp}(v_{i,j})$ peuvent être calculés à partir de valeurs informatives tabulées dans l'annexe E de la norme ISO 748 (ISO, 2009). Les tableaux 6.1 et 6.2 montrent, à titre d'exemples, les valeurs d'incertitudes des termes u'_m et $u'_{exp}(v_{i,j})$ proposées dans la norme ISO 748 (ISO, 2009).

TABLE 6.1 – Incertitude (au niveau de confiance de 68%) sur l'intégration latérale du débit u'_m , en fonction du nombre de verticales. Extrait de ISO (2009)

Nombre de verticales	5	10	15	20	25	30	35 et plus
Incertitude u'_m [%]	7,5	4,5	3,0	2,5	2,0	1,5	1,0

TABLE 6.2 – Incertitude (au niveau de confiance de 68%) sur la vitesse ponctuelle due à l'intégration temporelle limitée des oscillations de la vitesse, $u'_{exp}(v_{i,j})$. D_i désigne la profondeur mesurée à la verticale i . Tableau tiré de ISO (2009)

Vitesse [m/s]	Position du point sur la verticale par rapport à la surface. 0,2D _i , 0,4D _i et 0,6D _i 0,8D _i et 0,9D _i							
	Temps d'exposition [min]							
	0,5	1	2	3	0,5	1	2	3
0,05	25	20	15	10	40	30	25	20
0,1	14	11	8	7	17	14	10	8
0,2	8	6	5	4	9	7	5	4
0,3	5	4	3	3	5	4	3	3
0,4	4	3	3	3	4	3	3	3
0,5	4	3	3	2	4	3	3	2
1	4	3	3	2	4	3	3	2
> 1	4	3	3	2	4	3	3	2

Par souci de simplicité, Le Coz *et al.* (2012a) proposent d'estimer ces termes à partir d'interpolation linéaire ou en loi puissance. Pour exemple, l'équation 6.3 permet de calculer le terme u'_m .

$$u'_m = 32 \times m^{-0,88} \tag{6.3}$$

6.2.2 Application à la base de données EDF-DTG

En se basant sur les valeurs informatives de la norme, l'incertitude finale $U'(Q)$ a été calculée sur un jeu de 3930 jaugeages issus de la base de données EDF-DTG (voir section 3.1.5). La figure 6.1a, représentant l'incertitude $U'(Q)$ selon la norme ISO 748 en fonction du nombre de verticales, montre une dépendance très forte de l'incertitude finale au nombre de verticales

du jaugeage. Pour un même nombre de verticales, la variabilité que l'on observe est due aux composantes d'incertitude relatives aux vitesses. En effet, les incertitudes portant sur les vitesses ponctuelles augmentent très fortement quand la vitesse est faible. La figure 6.1b montre la contribution médiane des différents composants d'incertitude. Pour un composant d'incertitude quelconque, $u'(x)$, la contribution relative est calculée comme le ratio entre $u^{2'}(x)$ et l'incertitude combinée $u^{2'}(Q)$ (au niveau de confiance de 68%). La contribution médiane du composant d'incertitude u'_m est de près de 85% (figure 6.1b).

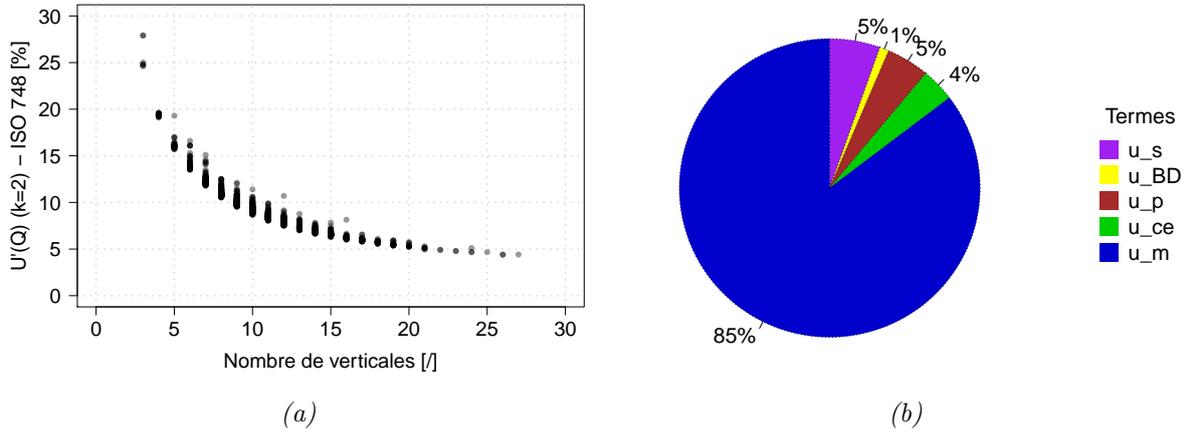


FIGURE 6.1 – (a) Incertitude $U'(Q)$ (à $k = 2$) en fonction du nombre de verticales et (b) part médiane des contributions de chacune des sources d'incertitude selon la méthode ISO 748 pour 3930 jaugeages au courantomètre. Les termes d'incertitude correspondent respectivement aux termes u'_s , $\sqrt{u'^2(B_i) + u'^2(D_i)}$, $u'_p(V_i)$, $\sqrt{u'^2_c(v_{i,j}) + u'^2_{exp}(v_{i,j})}$ et u'_m .

6.2.3 Limitations

La méthode de calcul d'incertitude proposée dans la norme ISO 748 présente un certain nombre de limites. Le problème principal ne vient pas de la formulation mathématique de l'incertitude, bien que certains termes soient omis, mais plutôt du calcul des termes u_m , $u_p(V_i)$, $u_c(v_{i,j})$, $u_{exp}(v_{i,j})$ via l'utilisation des valeurs informatives de l'annexe E. Ces valeurs sont issues d'études empiriques non documentées, certainement spécifiques au type d'instrument utilisé et aux conditions de mesure des essais (morphologie de la section de mesure, stabilité du débit au cours des essais, régularité des écoulements, etc.). Elles proviennent essentiellement des travaux de Herschy (1975).

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

Les extrapolations des vitesses en surface et au fond ne sont pas prises en compte explicitement dans l'analyse de l'incertitude.

Le terme d'incertitude $u_p(V_i)$ dépend uniquement du nombre de points par verticale, et, dans le cas des formules algébriques de la norme ISO 748, il est supposé que les profils des vitesses sont classiques. Dans le cas de la méthode point par point des vitesses (protocole utilisé par EDF-DTG), une valeur par défaut négligeable de 0,5% est appliquée sans prendre en compte la répartition verticale des points de mesure.

De même, les extrapolations du profil latéral des vitesses moyennes au niveau des rives ne sont

pas prises en compte explicitement et sont négligées même dans les cas où leur contribution au débit total n'est pas négligeable.

Enfin, le principal inconvénient de la norme ISO 748 provient de la prédominance du terme d'incertitude due au nombre de verticales u_m sur le résultat de l'incertitude combinée (cf. supra). Ce terme ne prend en compte ni la répartition spatiale des verticales de mesure, ni la complexité de la distribution des écoulements. Ce terme ne permet pas d'indiquer si la complexité morphologique de la section de mesure et la complexité du profil des écoulements ont été correctement décrites par l'échantillonnage des verticales. Considérant cette limite, la charte qualité de l'hydrométrie (Forray *et al.*, 1998) déconseille l'utilisation des valeurs tabulées dans la norme.

6.3 Méthode $Q+$

6.3.1 Calcul

La méthode $Q+$ (Le Coz *et al.*, 2012a, 2014a) est une approche généralisée du calcul d'incertitude des jaugeages par exploration du champ des vitesses au courantomètre. C'est une alternative au calcul proposé 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 palier certains problèmes de la norme ISO 748. L'incertitude combinée issue de la méthode $Q+$ est exprimée comme :

$$u'^2(Q) = u'_s{}^2 + \frac{\sum_{i=1}^m Q_i^2 \left\{ u'^2(B_i) + u'^2(D_i) + u'_p{}^2(V_i) + u'_m{}^2(D_i) + u'_m{}^2(V_i) + \frac{u'^2_{c,e}(v_{i,j})}{n_i} \right\}}{\left(\sum_{i=1}^m Q_i \right)^2} \quad (6.4)$$

avec $u'^2_{c,e}(v_{i,j}) = u'^2_c(v_{i,j}) + u'^2_{exp}(v_{i,j})$.

Le calcul du terme $u'_p{}^2(V_i)$ proposé dans cette méthode prend en compte explicitement l'espacement entre les points de mesure sur une verticale ainsi que les extrapolations au niveau de la surface et du fond. Pour les jaugeages réalisés par la méthode de distribution des points (équation 5.2), le terme $u'^2_p(v_i)$ est calculé comme suit :

$$u'^2_p(V_i) = \frac{1}{12q_i^2} \left\{ \sum_{k=1}^{n_i-1} [(v_{i,k} - v_{i,k+1})(d_{i,k} - d_{i,k+1})]^2 + E^2(q_{i,bas}) + E^2(q_{i,haut}) \right\} \quad (6.5)$$

Les erreurs dues aux extrapolations sont estimées à partir des options extrêmes d'extrapolation du profil de vitesse au fond et en surface. En supposant que les cas les plus défavorables sont supposés être un profil de vitesse linéaire à zéro au niveau de lit, et un profil de vitesse constante en surface, l'erreur maximale de débit de fond est calculée comme :

$$E(q_{i,bas}) = \frac{0,5v_{i,bas}h_{i,bas}}{2\sqrt{3}q_i} \quad (6.6)$$

De même le terme $E(q_{i,haut})$ est calculé en supposant que la vitesse peut varier linéairement de plus ou moins 20% entre le point de mesure le plus haut et la surface. En faisant l'hypothèse

d'une loi de distribution rectangulaire de l'erreur, cela donne :

$$E(q_{i,\text{haut}}) = \frac{0,2v_{i,\text{haut}}(D_i - h_{i,\text{haut}})}{2\sqrt{3}q_i} \quad (6.7)$$

Le Coz *et al.* (2012a, 2014a) proposent également de séparer le terme d'incertitude dû au nombre limité de verticales en deux termes liés à l'échantillonnage latéral de la bathymétrie $u'_m(D_i)$ et l'échantillonnage de la vitesse $u'_m(V_i)$ tout en prenant en compte l'extrapolation des vitesses près des berges. Cette séparation a l'avantage de permettre d'estimer la contribution des différentes sources d'incertitude et d'adapter ainsi la stratégie d'échantillonnage. Cette séparation est recommandée par Muste *et al.* (2012). On note que la covariance possible entre ces deux termes devraient être prise en compte. Le terme $u'_m(D_i)$ traduit alors l'erreur d'intégration transversale sur la profondeur. Il 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 et définie par l'utilisateur au travers d'un angle α exprimé en degré. Cet angle est illustré par la figure 6.2 sur laquelle les aires probables, minimale et maximale, de la sous section sont représentées pour deux configurations différentes.

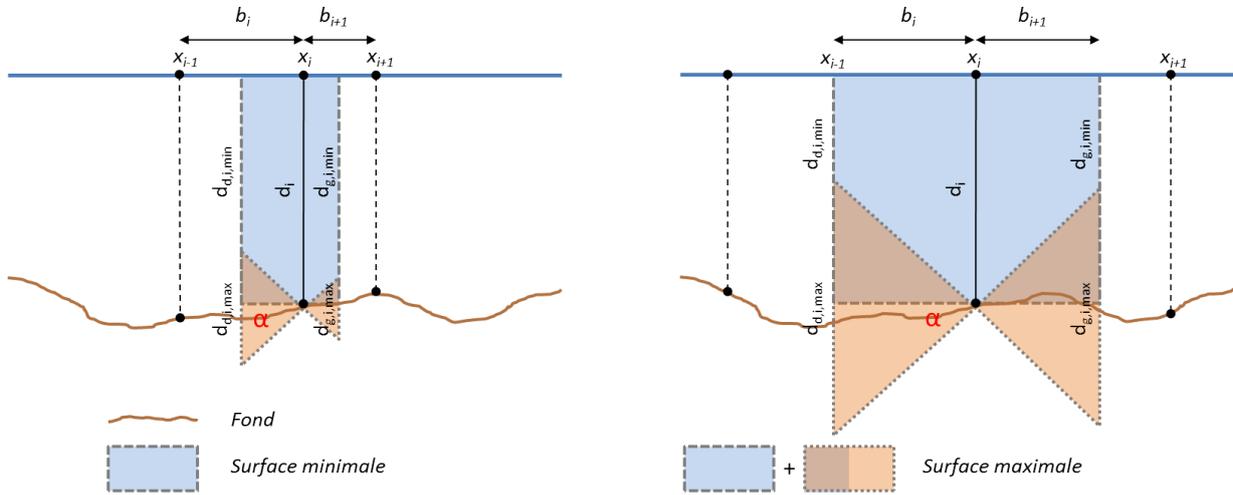


FIGURE 6.2 – Illustration de l'angle α pour le calcul de $u_m(D_i)$ pour deux configurations différentes. La figure de gauche montre des verticales resserrées tandis que les verticales sont plus espacées sur la figure de droite. Dans les deux cas, la surface colorée en bleu (respectivement en orange) représente l'aire minimum (respectivement maximum) probable de la sous-section. Adapté de Le Coz et al. (2012a).

Le terme $u'_m(D_i)$ se calcule, pour la méthode de la section médiane, comme suit :

$$u'_m(D_i) = \frac{b_{i+1}^2 + b_i^2}{2\sqrt{3}(b_{i+1} + b_i)D_i} \tan \alpha \quad (6.8)$$

avec $b_i = x_i - x_{i-1}$ et $b_{i+1} = x_{i+1} - x_i$. Pour les verticales de bord, $b_0 = x_1 - x_0$ et $b_{m+1} = x_{m+1} - x_m$.

De même, le terme $u'_m(V_i)$ est estimé à partir des vitesses moyennes probables au niveau des limites de sous-section. Pour cela, on utilise les profondeurs extrêmes estimées précédemment et les vitesses moyennes sont estimées en faisant l'hypothèse d'une variation linéaire du nombre de Froude (section 1.2). Les vitesses extrêmes $V_{i,\text{min.}}$ et $V_{i,\text{max.}}$ sont donc utilisées dans l'équation 6.9.

$$u'_m(V_i) = \frac{V_{i,\text{max.}} - V_{i,\text{min.}}}{2\sqrt{3}V_i} \quad (6.9)$$

Pour les verticales de bord, $u'_m(V_0) = \frac{0,24}{2\sqrt{3}m_{\text{rive}}}$ et $u'_m(V_{m+1}) = \frac{0,24}{2\sqrt{3}m_{\text{rive}}}$.

6.3.2 Sensibilité à l'angle α

L'angle α repose sur l'effet des irrégularités du fond (mouilles ou blocs) et son estimation est subjective car fixée par l'utilisateur. La définition de cet angle est le principal inconvénient de la méthode Q_+ . Il est conceptuellement difficile de savoir à quel paramètre physique cet angle est lié : rugosité du substrat, macro-rugosité (rochers, blocs) ou pente moyenne du profil bathymétrique? On note que le calcul d'incertitude est d'autant plus sensible que le ratio *Largeur/Profondeur/Nombre de verticales* est élevé. En effet, plus les verticales sont espacées et plus les aires minimales et maximales probables (figure 6.2) seront importantes.

La figure 6.3 montre un exemple de jaugeage et la sensibilité du calcul d'incertitude en fonction de l'angle α . Ce cas montre une très forte sensibilité à l'angle α .

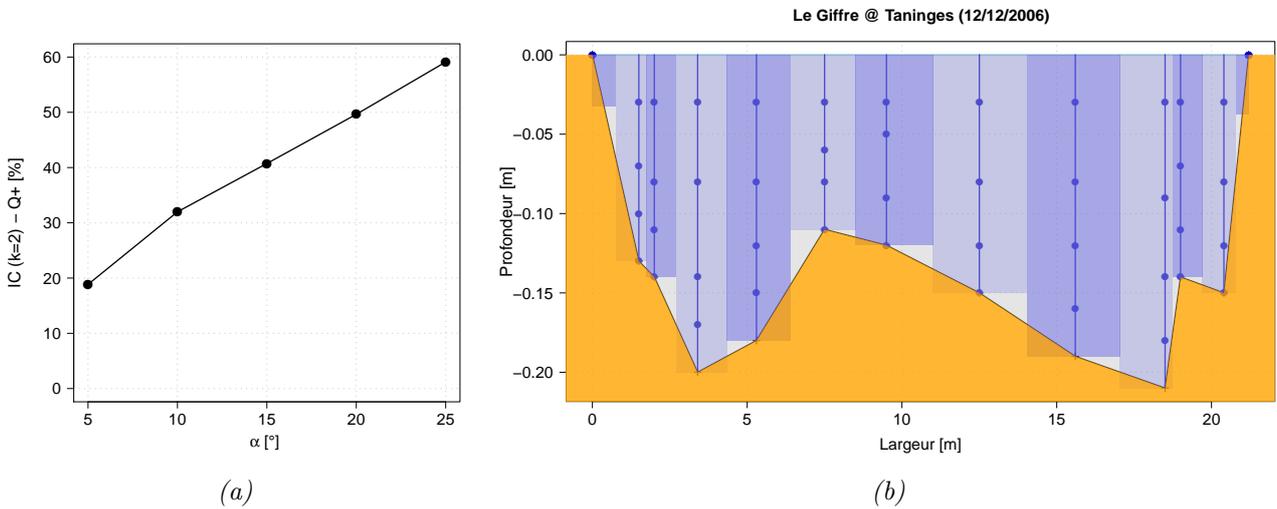


FIGURE 6.3 – (a) Évolution de l'incertitude Q_+ au niveau de confiance de 95% pour différentes valeurs de l'angle α pour un jaugeage du Giffre à Taninges dont le profil bathymétrique est illustré à la figure (b).

Une valeur doit ainsi être affectée à chaque jaugeage puisque la section de jaugeage d'une station hydrométrique peut varier en fonction des conditions d'écoulement. Une autre limite provient du fait que l'angle peut varier sur une même section de mesure en fonction de la nature du fond.

Par la suite, afin de s'affranchir de la subjectivité du choix de cette grandeur, on propose de calculer l'angle α comme suit (Despax *et al.*, 2016b) :

$$\alpha = \frac{\sum_{i=1}^m Q_i |\alpha_i|}{Q} \quad (6.10)$$

où α_i est la pente moyenne (en degrés) de la sous-section i :

$$\alpha_i = \frac{180}{2\pi} \left\{ \arctan \left| \frac{D_i - D_{i-1}}{x_i - x_{i-1}} \right| + \arctan \left| \frac{D_i - D_{i+1}}{x_i - x_{i+1}} \right| \right\} \quad (6.11)$$

avec D_i et x_i respectivement la profondeur et l'abscisse de la verticale i .

Il est important de souligner que cette estimation de l'angle α suppose un échantillonnage suffisant et correct. En particulier, la bathymétrie doit être correctement mesurée pour que l'angle α traduise bien la complexité de la section de jaugeage.

6.3.3 Application à la base de données EDF-DTG

La méthode $Q+$ a été appliquée à la base de 3930 jaugeages. Les résultats d'incertitude sont tracés en fonction du nombre de verticales à la figure 6.4a. On observe des valeurs d'incertitudes plus nuancées que celles issues de la norme ISO 748 (figure 6.1a).

La figure 6.4b montre la contribution médiane des différentes sources d'incertitude. La somme des contributions des incertitudes dues à l'intégration latérale du profil des vitesses (13%) et du profil bathymétrique (51%) est réduite par rapport à l'incertitude médiane u_m de la norme ISO 748 (soit 85%, figure 6.1b). Il est logique d'observer une contribution à l'incertitude plus forte pour l'intégration latérale des profils bathymétrique, terme $u'_m(D_i)$, puisque ceux-ci sont généralement beaucoup moins lissés que les profils latéraux des vitesses.

Les résultats d'incertitude pour un angle arbitrairement fixé à 10° (figure 6.4a) sont comparés avec les résultats d'incertitude pour un angle calé selon l'équation 6.10 (figure 6.4c). On observe ici un lien plus prononcé avec le nombre de verticales (l'incertitude est d'autant plus faible que le nombre de verticales est élevé).

La figure 6.4d montre la distribution des incertitudes selon l'utilisation d'un angle arbitraire fixé à 10° et le calage automatique de l'angle α . On observe que le calage individuel de l'angle α donne des incertitudes plus faibles que pour un angle α arbitrairement fixé à 10° .

Ceci s'explique par les valeurs plus faibles (majoritairement inférieures à 10°) de l'angle α estimé selon l'équation 6.10, comme illustré à la figure 6.4e.

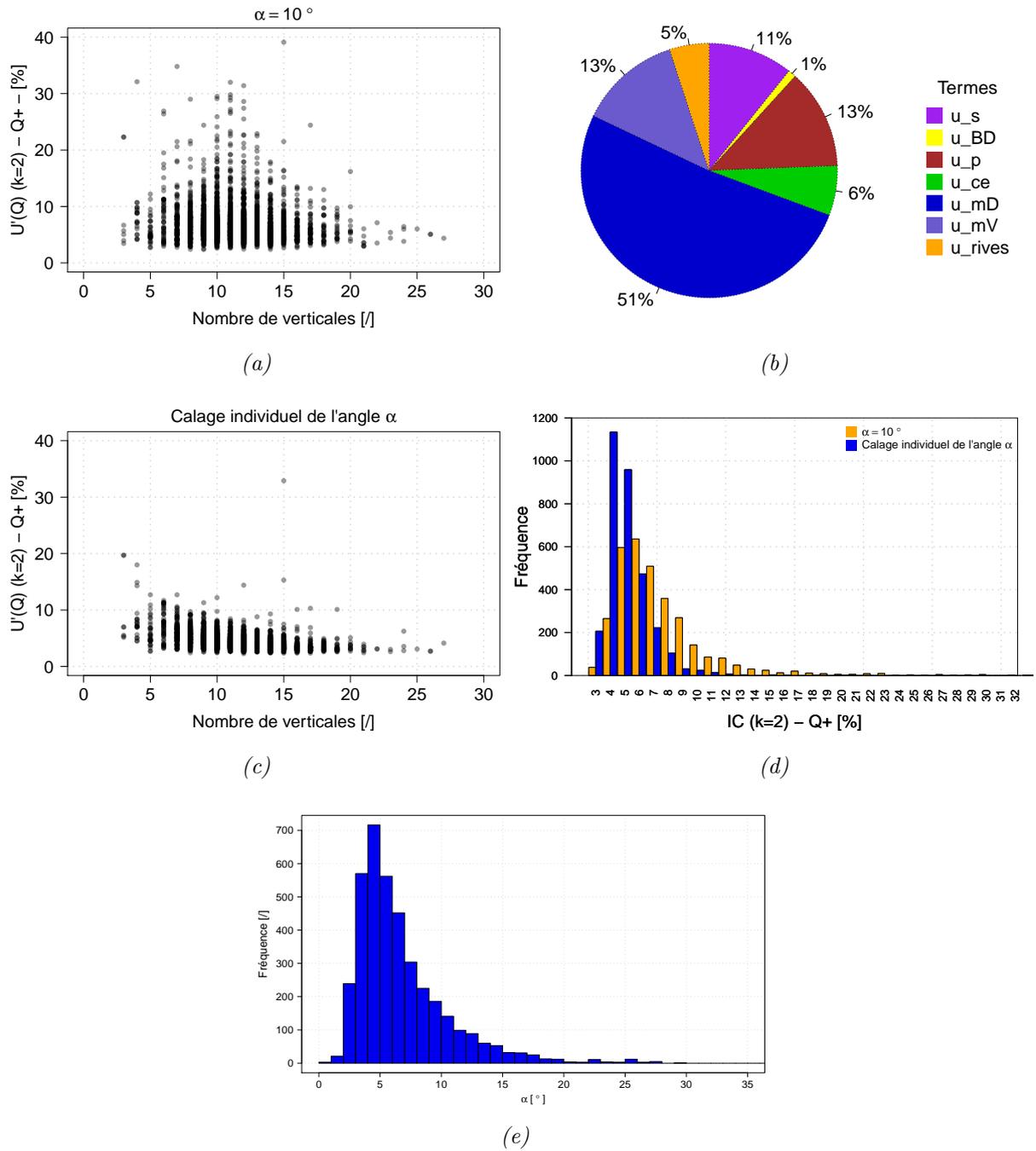


FIGURE 6.4 – Incertitude $U'(Q)$ selon la méthode Q_+ (à $k = 2$) en fonction du nombre de verticales avec (a) un angle α fixe à 10° et (c) avec un calage individuel de l'angle α selon l'équation 6.10 pour 3930 jaugeages au courantomètre. Les niveaux de gris mettent en évidence la densité de points. (b) Contribution médiane des différentes sources d'incertitude (avec un angle α fixe à 10°). Les termes d'incertitude correspondent respectivement aux termes u'_s , $\sqrt{u'^2(B_i) + u'^2(D_i)}$, $u'_p(V_i)$, $\sqrt{u'^2(v_{i,j}) + u'^2_{exp}(v_{i,j})}$ et u'_m décomposé en $u'_m(D_i)$ et $u'_m(V_i)$. u'_{rives} désigne la contribution des sous-sections de rive. (d) Histogramme des incertitudes selon la méthode Q_+ (à $k = 2$) avec un angle α fixe et le calage individuel de l'angle α selon l'équation 6.10 et (e) histogramme des valeurs de l'angle α associé.

6.4 Méthode *IVE* – Interpolation Variance Estimator

Une approche alternative nommée *IVE* (pour Interpolated Variance Estimator) a été développée et étudiée par Kiang *et al.* (2009) et Cohn *et al.* (2013). Elle part de l'hypothèse que les verticales doivent être choisies de manière à décrire les principales caractéristiques de la bathymétrie et du profil des vitesses. Ainsi, si le nombre et la position des verticales sont adéquats, les profondeurs et les vitesses doivent varier doucement sur la largeur du chenal et les verticales adjacentes doivent montrer une variation quasi linéaire des vitesses et de la profondeur. A l'inverse, si les profils des vitesses et de bathymétrie s'écartent trop d'une droite, il est considéré que le nombre de verticales est insuffisant.

L'incertitude-type combinée est calculée comme :

$$u'^2(Q) = u'_s{}^2 + \frac{\sum_{i=1}^m Q_i^2 \{u'^2(B_i) + u'_{IVE}{}^2(D_i) + u'_{IVE}{}^2(V_i)\}}{\left(\sum_{i=1}^m Q_i\right)^2} \quad (6.12)$$

avec :

$$u'_{IVE}(D_i) = \frac{\sqrt{\frac{1}{m-5} \sum_{i=3}^{m-2} \frac{\Delta_{i,D}^2}{2(1-\omega_i + \omega_i^2)}}}{\frac{\sum_{i=3}^{m-2} D_i}{\sum_{i=3}^{m-2} i}} \quad (6.13)$$

où $\Delta_{i,D}$ est l'écart entre la profondeur mesurée sur la verticale i et l'interpolation linéaire des profondeurs D_{i-1} et D_{i+1} (équations 6.15 et 6.16) calculé comme suit :

$$\Delta_{i,D} = D_i - D_{i,est} \quad (6.14)$$

$$D_{i,est} = \omega_i D_{i-1} + (1 - \omega_i) D_{i+1} \quad (6.15)$$

$$\omega_i = \frac{x_{i+1} - x_i}{x_{i+1} - x_{i-1}} \quad (6.16)$$

Le terme $u'_{IVE}(V_i)$ se calcule de la même manière en remplaçant D_i par V_i dans les équations 6.13, 6.14 et 6.15.

Cette méthode estime séparément les erreurs portant sur les mesures de profondeur et de vitesse en se basant sur l'écart entre la grandeur mesurée (vitesse ou profondeur) d'une sous-section et l'interpolation linéaire des mesures adjacentes (équations 6.14 et 6.15).

Selon cette méthode, les termes d'incertitude $u'_p(V_i), u'_c(v_{i,j}), u'_e(v_{i,j})$ et $u'(D_i)$ sont pris en compte dans les termes $u'_{IVE}(V_i)$ et $u'_{IVE}(D_i)$. Par conséquent, la méthode *IVE* ne permet pas la budgétisation précise des différentes sources d'incertitude. Par ailleurs, l'indice i variant entre $i = 3$ et $i = m - 2$ montre que les extrapolations aux rives ne sont pas prises en compte.

6.4.1 Application à la base de données EDF-DTG

Les incertitudes des 3930 jaugeages de la base EDF-DTG sont tracées en fonction du nombre de verticales à la figure 6.5a. Les valeurs oscillent entre 3 et 75%, ce qui semble donner des incertitudes bien trop élevées. La méthode ne semble pas applicable aux jaugeages issus des

sections de jaugeages d'EDF-DTG. En effet, la forte irrégularité des profils latéraux (de vitesse et de profondeur) induit des écarts ($\Delta_{i,D}$ et $\Delta_{i,V}$) très importants. Pour obtenir une incertitude faible, il faudrait sur-échantillonner la section de mesure de manière à ce que chaque verticale de mesure donne une profondeur (respectivement une vitesse) proche d'une interpolation linéaire des verticales adjacentes. On peut penser que cette méthode donne des résultats plus cohérents sur des cours d'eau plus larges et pour lesquels un nombre élevé de verticales est réalisé (voir par exemple le protocole de l'USGS en section 5.2).

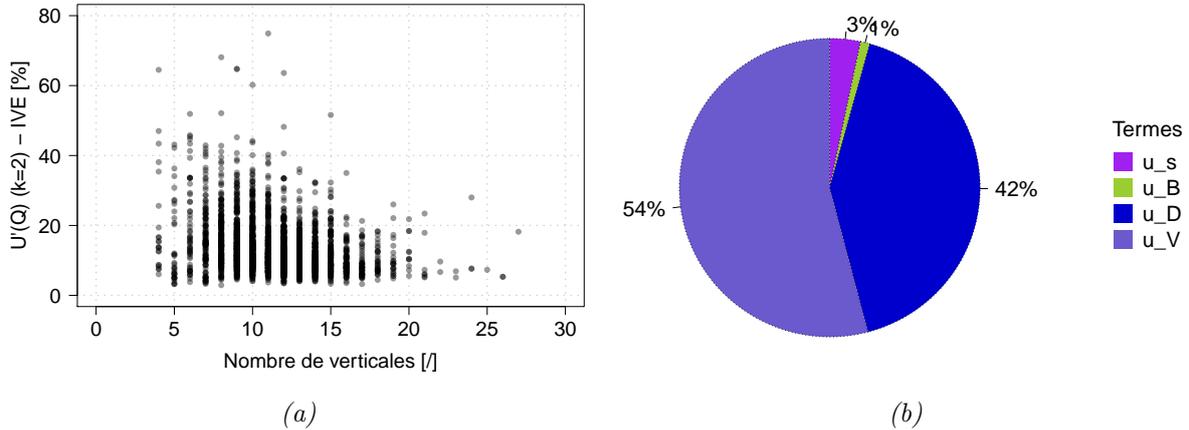


FIGURE 6.5 – (a) Incertitude $U'(Q)$ selon la méthode IVE (à $k = 2$) en fonction du nombre de verticales pour 3930 jaugeages au courantomètre. Les niveaux de gris mettent en évidence la densité de points. (b) Contribution médiane des différentes sources d'incertitude. Les termes d'incertitude correspondent respectivement aux termes u'_s , $u'(B_i)$, $u'_{IVE}(V_i)$ et $u'_{IVE}(D_i)$.

Vers une nouvelle approche

En l'état, les différentes méthodes présentées ci-dessus sont applicables mais leurs limites respectives posent des questions quant aux valeurs d'incertitude produites, rendant difficile leur applicabilité et leur diffusion. En l'absence de valeurs de débit de référence en milieu naturel, il est difficile de caler les modèles d'incertitude. Il est donc nécessaire de construire une méthode plus satisfaisante et adaptée à la diversité des jaugeages rencontrés. Bien évidemment, cette méthode devra être testée, confrontée aux observations (notamment dans le cadre d'essais interlaboratoires) puis discutée en vue d'un consensus le plus large possible.

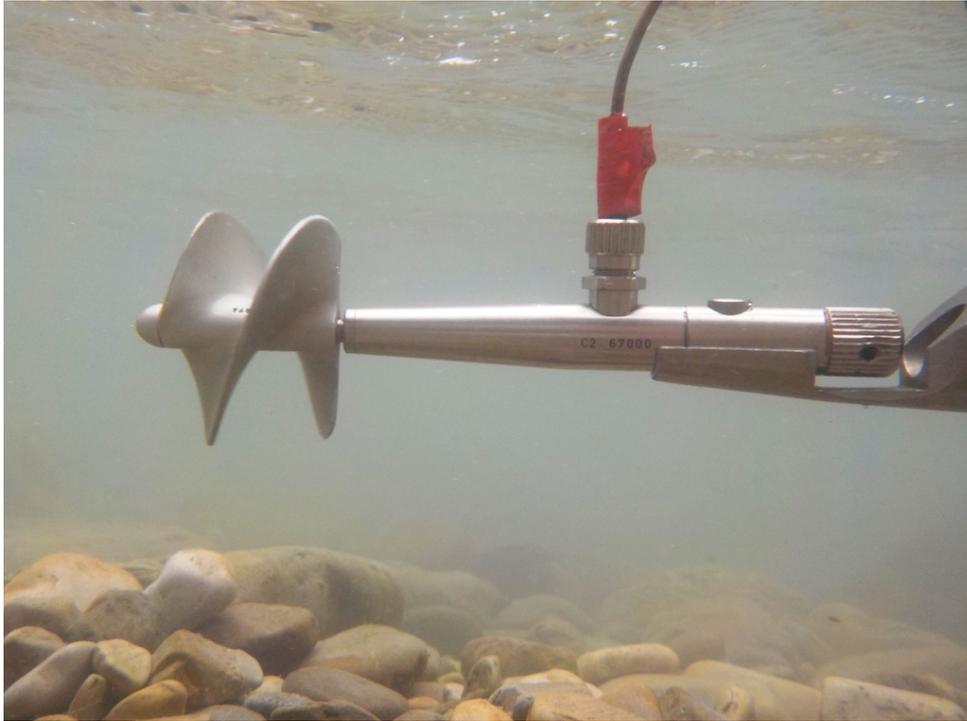
Le terme d'incertitude dû à l'échantillonnage latéral des profils latéraux de vitesses moyennes et de profondeur (u_m) est généralement le terme prépondérant dans le calcul d'incertitude. Que ce soit via la norme ISO 748, la méthode $Q+$ ou la méthode *IVE*, son estimation n'est pas satisfaisante car ni la qualité de l'échantillonnage ni la complexité de la section de jaugeage ne sont prises en compte simultanément. On se propose donc d'objectiver l'estimation de ce terme en conduisant des études statistiques sur l'influence du nombre de verticales sur le résultat du jaugeage. Chaque jaugeage étant particulier de par ses caractéristiques hydrauliques (périmètre mouillé, distribution des vitesses . . .), on cherche à établir un lien entre ce que l'on peut appeler la qualité de l'échantillonnage et son incertitude.

Dans la suite des travaux de la méthode $Q+$ qui propose une nouvelle estimation de l'incertitude $u'_p(V_i)$ ainsi que la prise en compte de l'incertitude des débits des sous-sections de berges, on cherchera à s'affranchir de la valeur de l'angle α et à s'affranchir au maximum des valeurs proposées par la norme ISO 748 pour l'estimation des autres sources d'incertitude.

Enfin, la confrontation des résultats d'incertitude selon l'approche GUM et l'approche interlaboratoire pourra mettre en évidence certaines sources d'incertitude omises.

TROISIÈME PARTIE

Méthode FLAURE - Objectivation des termes d'incertitudes



Un moulinet en action dans la Souloise, à proximité de la station hydrométrique de l'Infernet (Isère, France). Photo : A. Despax

Description générale

Tout en conservant les avancées proposées par la méthode $Q+$, les chapitres suivants visent à objectiver les différentes composantes d'incertitude (voir section 5.3) afin que leurs estimations soient adaptées aux conditions particulières du jaugeage (complexité de la section de mesure, conditions de déploiement, matériel utilisé ...).

Une attention particulière sera portée à la quantification du terme u'_m induit par les erreurs d'intégration des profils latéraux de vitesse et de profondeur. Ce terme contribue en effet à une part élevée de l'incertitude finale alors que son estimation par les méthodes présentées précédemment semble inadaptée (voir chapitre 6). La méthodologie suivie ainsi que les mesures spécifiques réalisées pour l'estimation du terme u'_m sont présentées ci-dessous (respectivement dans les sections 7.1 et 7.2).

Cette méthode a fait l'objet d'une publication (Despax et al., 2016b) dans Journal of Hydrology dont une copie se trouve à l'annexe D.

Les autres termes d'incertitude investigués seront détaillés en fin de partie, dans le chapitre 11. On note que ces derniers ont bénéficié de la confrontation des résultats des comparaisons interlaboratoires (présentés dans la partie IV) avec les méthodes par propagation analytique décrites dans le chapitre 6.

7.1 Estimation du terme d'incertitude u'_m - Principes de l'approche

L'estimation du terme d'incertitude u'_m , dû au nombre limité de verticales utilisées lors d'un jaugeage, ne peut se faire qu'à partir de jaugeages réalisés à partir d'un grand nombre de verticales. La norme ISO 1088 (ISO, 2007a) préconise d'ailleurs de réaliser ce type d'étude :

« To determine the influence of the distribution of horizontal velocity and depth between the verticals on the total uncertainty in discharge, it is necessary to make a detailed measurement of the cross-section and to locate the verticals for the velocity measurement at intervals of no more than 0,25 [m] or 1/50 of the total width, whichever is greater. »

Ainsi, il conviendrait d'avoir pour chaque site de jaugeage un profil en travers finement détaillé. Or les sections de jaugeage ne sont pas identiques d'une mesure à l'autre en fonction des gammes de débit jaugées. De plus, une même section de jaugeage peut varier dans le temps à cause de phénomènes de transport sédimentaire ce qui impliquerait alors de renouveler ce type d'étude.

Ces mesures à forte résolution sont laborieuses, coûteuses et peuvent se heurter à des risques de variation de débit au cours de la mesure d'où l'impossibilité d'obtenir ce type de données en opérationnel.

L'étude qui suit vise l'estimation de l'incertitude u'_m sur la base d'un jeu de 53 jaugeages de référence réalisés avec une forte densité spatiale de verticales sur plusieurs sites (section 7.2). Ces jaugeages sont dans un premier temps sous-échantillonnés par une méthode de sous-échantillonnage, exposée au chapitre 8, pour produire des jaugeages probables (c'est-à-dire similaires à des jaugeages réalisés par un hydromètre). Le débit des jaugeages sous-échantillonnés est ensuite comparé à celui des jaugeages de référence complets et une analyse statistique, présentée au chapitre 9, est conduite afin d'estimer le terme u'_m en fonction d'un indice de qualité d'échantillonnage. Cet indice est introduit à la section 9.2. Son calcul permet d'estimer l'incertitude u'_m grâce à une approche par typologie de jaugeage (section 10) pour tout jaugeage quelconque. L'incertitude estimée pour chaque jaugeage de référence est alors utilisée en fonction du degré d'analogie de ce dernier avec le jaugeage quelconque. Un modèle moyen d'incertitude conceptuellement plus simple et aisément diffusable sera finalement exposé et retenu en opérationnel.

Le jaugeage de référence du Buech à la station hydrométrique de Serres est utilisé ici comme fil rouge dans la présentation de la méthode (jaugeage numéro 13, voir l'aperçu des profils latéraux de bathymétrie et de vitesse à l'annexe B).

La figure 7.1 résume, sous forme de logigramme, les grandes étapes de cette approche. La première partie de la démarche porte sur la quantification du terme u'_m sur un jeu de jaugeages de référence. La deuxième étape vise l'estimation de ce terme pour un jaugeage quelconque réalisé selon le protocole de mesure habituel. La quantification du terme u'_m est effectuée selon un modèle moyen d'incertitude ou éventuellement avec la sélection de jaugeages analogues dans la base de référence.

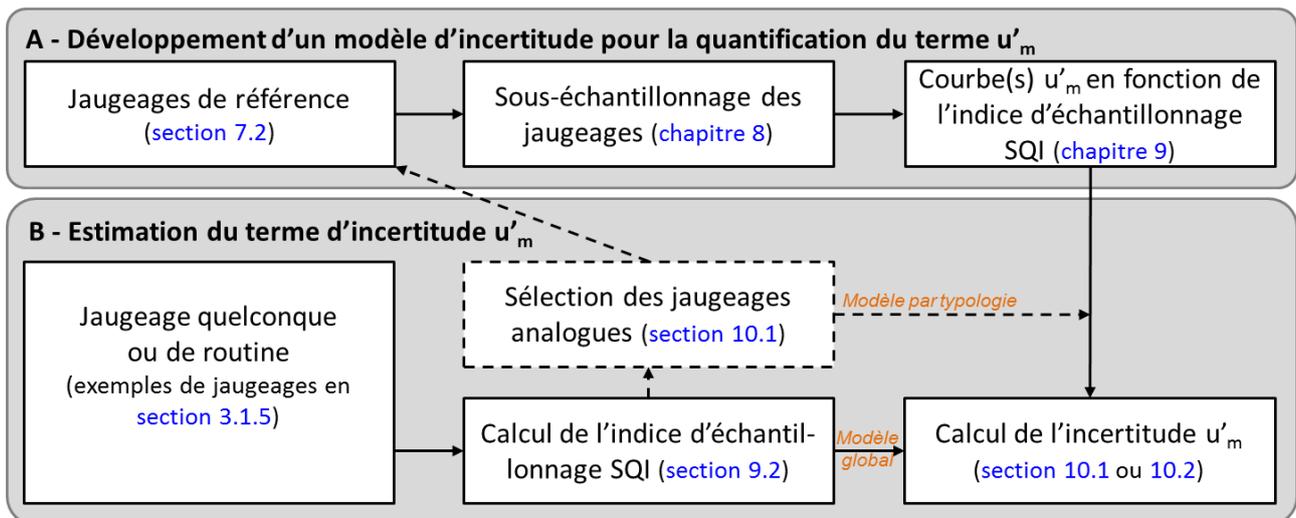


FIGURE 7.1 – Principales étapes de la méthode de calcul du terme u'_m . L'étape A porte sur les jaugeages de référence. L'étape B vise à estimer l'incertitude u'_m pour un jaugeage quelconque à partir des résultats de l'étape A.

7.2 Ensemble de jaugeages de référence

Dans le cadre de cette étude, un ensemble de 53 jaugeages à grand nombre de verticales (ou jaugeages de référence) a été constitué. 36 jaugeages au courantomètre ont été réalisés sur des cours d'eau français et néo-zélandais de faible largeur (de 3 à 35 [m]) et sont présentés au paragraphe 7.2.1. Des jaugeages réalisés à l'ADCP ont été utilisés et transformés en jaugeages équivalents au courantomètre (paragraphe 7.2.2) afin de disposer de sections de jaugeage plus profondes (jusqu'à 15 [m]) et plus larges (plus de 300 [m]). On note que la stabilité du débit a été vérifiée lors de la réalisation de ces jaugeages. Afin de compléter le jeu de jaugeages de référence par des sections de rivière de forme géométrique maîtrisée (rectangulaire, trapézoïdale), 10 jaugeages ont été modélisés grâce à l'utilisation d'un modèle hydraulique 2D (Telemac 2D) et sont présentés au paragraphe 7.2.3.

Les caractéristiques de l'ensemble des jaugeages en termes de largeur, de profondeur, de débit et de nombre de verticales sont détaillées dans le tableau 7.1.

L'objectif de cette base de données est de constituer un jeu de jaugeages de référence dont les caractéristiques et la variabilité des sections sont représentatives des jaugeages habituellement réalisés. Les profils latéraux (bathymétrie et vitesse moyenne) des jaugeages de référence sont présentés dans l'annexe B.

7.2.1 Jaugeages de référence au courantomètre

36 jaugeages au courantomètre à la micropêche ont été réalisés sur des cours d'eau en France (jaugeages d'indices 8 à 20 dans le tableau 7.1) et en Nouvelle-Zélande (indices 21 à 43). La différence entre les deux ensembles de jaugeages réside dans le protocole d'échantillonnage vertical des vitesses et le temps d'exposition. 5 mesures ponctuelles de vitesse par verticale sont généralement réalisées pour les jaugeages des cours d'eau français selon le protocole interne EDF-DTG, avec un temps d'exposition de 30 secondes. Les jaugeages néo-zélandais sont issus des méthodes normalisées, avec un à trois points par verticale (ISO, 2009) pour un temps d'exposition de 40 secondes. On précise que ces derniers n'ont pas été réalisés spécifiquement pour la quantification du terme u'_m , néanmoins le nombre important de verticales justifie leur utilisation dans cette étude. Les jaugeages du Durzon et du Cernon (d'indices respectifs 9, 10 et 16) possèdent la particularité d'être le résultat de la concaténation de deux jaugeages consécutifs réalisés sur une même section de jaugeage, avec le même matériel, 3 points par verticale et un temps d'exposition de 30 secondes. Ils sont issus des essais interlaboratoires de 2013, exposés dans le chapitre 13, au cours desquels la stabilité du débit a été contrôlée. La différence entre les protocoles n'est dans notre cas pas fondamentale puisque l'intérêt réside dans l'étude du sous-échantillonnage latéral des profils.

7.2.2 Jaugeages équivalent moulinet obtenus à l'aide de l'ADCP

La réalisation de jaugeages à haute résolution latérale au courantomètre a l'inconvénient d'être "chronophage" ce qui augmente, de ce fait, le risque d'instabilité du débit au cours de la mesure. Dans un souci de gain de temps, des jaugeages par ADCP ont également été utilisés. Ces derniers possèdent comme avantage d'explorer des rivières plus larges et profondes ayant ainsi une rugosité relative plus faible (ratio entre taille de la "macro" rugosité et la hauteur d'eau). Des jaugeages par ADCP ont également été introduits dans l'étude de Cohn *et al.* (2013) pour étudier l'incertitude des jaugeages au courantomètre.

TABLE 7.1 – Nomenclature et caractéristiques des 53 jaugeages de référence (indice, nom de la station, rivière, moyen de mesure, date, largeur, profondeur, débit et nombre de verticales). **m* est le nombre de verticales; *MCM désigne les jaugeages réalisés au courantomètre et *TELE les jaugeages issus de modélisation hydraulique 2D avec le logiciel TELEMAC.

Indice	Station	Rivière	Type	Date	Largeur [m]	Profondeur [m]	Débit [m ³ /s]	<i>m</i> *
				AAAA/MM/JJ				
1	Allasac	Vézère	ADCP	2009/02/05	36,7	2,90	29,9	54
2	Chavanay	Rhône	ADCP	2008/12/18	342	15,4	1010	83
3	Chavanay	Rhône	ADCP	2014/08/06	343	14,1	1332	79
4	Miramont Comminges	Gentille	ADCP	2011/09/13	17,2	3,43	15,8	56
5	Rocherousse	Durance	ADCP	2013/10/09	23,8	0,91	11,6	46
6	Tricastin	Rhône	ADCP	2013/09/18	152	14,1	1009	80
7	Tricastin	Rhône	ADCP	2014/03/04	146	13,3	1664	61
8	Les Chambons	Buech	MCM*	2014/07/22	18,1	0,85	2,98	47
9	Nant 1	Durzon	MCM*	2013/10/16	5,70	0,41	1,05	35
10	Nant 2	Durzon	MCM*	2013/10/17	5,90	0,52	0,93	31
11	Pont-En-Royans	Vernaison	MCM*	2001/01/27	10,4	0,26	0,81	34
12	Sassenage	Furon	MCM*	2013/07/10	6,80	0,67	0,18	35
13	Serres	Buech	MCM*	2014/07/22	16,2	0,79	2,81	53
14	Seuil de Premont	Arc	MCM*	2014/07/23	3,50	0,81	1,80	46
15	Seuil de Premont Canal	Arc	MCM*	2014/07/23	9,00	0,86	1,75	47
16	St Georges de Luzencon	Cernon	MCM*	2013/10/16	13,8	0,63	0,79	40
17	Villar Loubière	Séveraisse	MCM*	2010/01/28	10,5	0,33	1,34	50
18	Voiron	Morge	MCM*	2013/07/10	7,00	0,45	0,66	45
19	Pont de la Baume	Souloise	MCM*	2015/06/05	4,10	0,55	0,25	39
20	Infernet	Souloise	MCM*	2015/07/30	10,2	0,60	1,30	95
21	Cemetery	Akatarawa	MCM*	2002/09/10	18,1	0,92	4,96	33
22	Water treatment plant	Waikanae	MCM*	2008/02/28	10,9	0,51	0,91	31
23	Water supply intake	Waitohu	MCM*	2003/03/13	6,20	0,32	0,09	33
24	Hautotara	Huangaaru	MCM*	2003/09/01	16,0	0,75	0,94	34
25	Hautotara	Huangaaru	MCM*	2005/04/19	14,9	0,80	1,59	33
26	Pine Avenue	Hutt River	MCM*	2005/09/12	27,8	0,54	2,72	32
27	Te Marua	Hutt River	MCM*	2002/09/10	22,1	0,93	7,16	32
28	Te Marua	Hutt River	MCM*	2003/08/04	24,3	0,87	6,11	32
29	McLennans	Mangatarere	MCM*	2004/11/09	18,1	0,58	1,41	37
30	Gorge	Mangatarere	MCM*	2004/01/12	9,90	0,44	0,38	32
31	Wouters Culvert	Taratahi	MCM*	1999/12/10	3,40	0,57	0,51	31
32	Harwoods	Takaka	MCM*	2014/02/13	20,3	0,88	3,47	30
33	Harwoods	Takaka	MCM*	2014/12/09	17,3	0,81	3,10	32
34	Harwoods	Takaka	MCM*	2014/04/14	14,9	1,09	10,8	29
35	Harwoods	Takaka	MCM*	2014/05/08	14,7	0,86	4,89	34
36	Harwoods	Takaka	MCM*	2014/09/10	14,2	0,61	1,69	31
37	Harwoods	Takaka	MCM*	2013/06/13	9,90	0,69	4,17	28
38	Harwoods	Takaka	MCM*	2013/10/24	8,00	0,62	1,92	28
39	Harwoods	Takaka	MCM*	2014/01/13	7,70	0,55	1,15	29
40	Harwoods	Takaka	MCM*	2014/01/15	32,1	1,20	8,42	29
41	Harwoods	Takaka	MCM*	2013/03/17	33,7	1,04	13,3	26
42	Harwoods	Takaka	MCM*	2003/03/05	18,1	1,38	1,99	28
43	Harwoods	Takaka	MCM*	2015/12/11	13,2	0,76	1,36	29
Indice	Forme	Nature du fond	Type	Date	Largeur	Profondeur	Débit	<i>m</i> *
44	Rectangle	Lisse	TELE*		10,0	1,95	32,0	50
45	Rectangle	Lisse	TELE*		30,0	2,14	110	50
46	Rectangle	Rugueux	TELE*		20,0	2,04	76,4	50
47	Rectangle	Rugueux	TELE*		20,0	2,08	72,5	50
48	Trapèze	Lisse	TELE*		20,0	1,95	64,0	50
49	Asymétrique	Lisse	TELE*		18,0	3,97	70,0	50
50	Asymétrique	Rugueux	TELE*		18,0	3,83	53,7	50
51	Idem jaugeage 4	-	TELE*		17,2	3,43	108	50
52	Idem jaugeage 17	-	TELE*		10,5	0,33	1,34	50
53	Idem jaugeage 17	-	TELE*		10,5	1,28	16,4	50
				Minimum	3,40	0,26	0,09	28
				Maximum	343	15,4	1664	95

Le principe d'exploration du champ des vitesses reste le même que celui décrit au paragraphe 3.1.3, mais la technique utilisée permet un échantillonnage plus dense des vitesses, bien qu'il soit difficile de mesurer les vitesses près des parois et en surface (zones non mesurées, voir la figure 3.6c). La mesure des vitesses par les ondes acoustiques est plus rapide, de l'ordre de la seconde pour obtenir un profil vertical complet des vitesses (Lee *et al.*, 2014). En revanche, les fluctuations ponctuelles des vitesses au cours du temps ne sont pas intégrées.

A titre d'illustration, la figure 7.2 montre la comparaison des profils verticaux de vitesses mesurés successivement par un ADCP stationnaire (répétition de mesures ou tirs) avec le profil mesuré avec un courantomètre fixé sur un saumon et pour un temps d'exposition de 30 secondes. L'ADCP est, dans cette configuration, fixé sur le câble porteur du saumon. On observe que la vitesse moyenne obtenue à l'ADCP est comparable à celle obtenue au courantomètre (voir aussi : Oberg et Mueller, 2007).

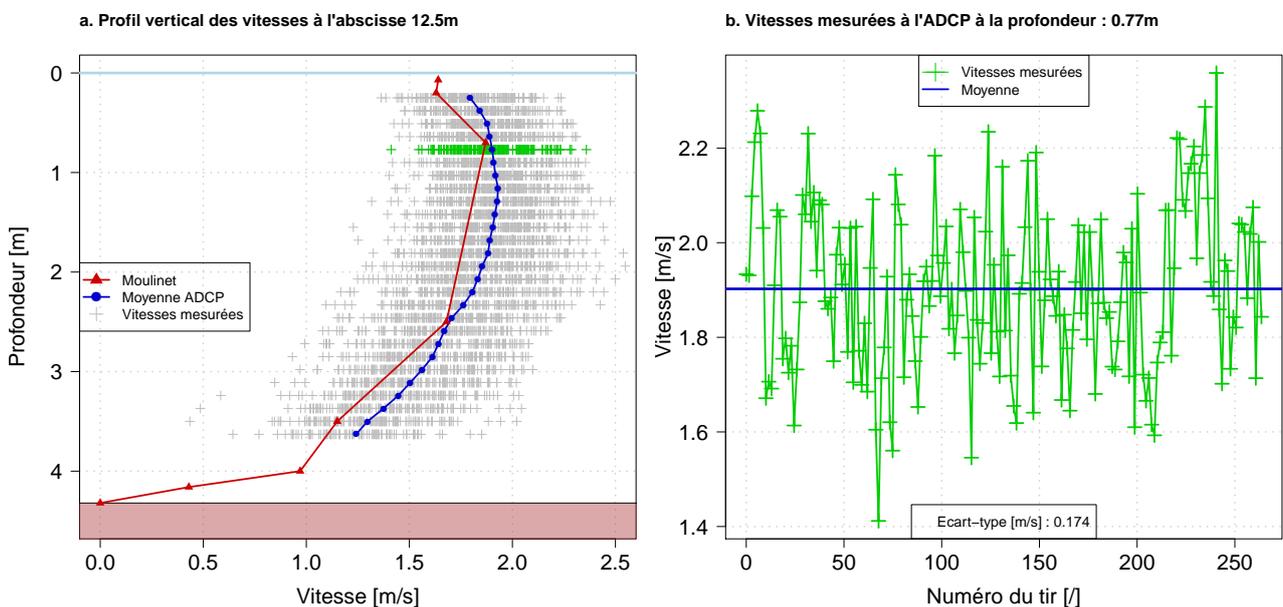


FIGURE 7.2 – (a) Comparaison des profils verticaux des vitesses mesurés à l'ADCP (par tir et moyen) et au courantomètre, à 12,5 [m] du bord, sur la traîle du Cheylas, Isère. (b) Variabilité des mesures de vitesse pour 258 tirs à la profondeur 0,77 [m].

Pour obtenir des vitesses consistantes avec celles d'un jaugeage au courantomètre, une succession de plusieurs transects sera utilisée, de manière à moyenner les vitesses ponctuelles au cours du temps. Cela permet d'obtenir un échantillonnage temporel des vitesses ponctuelles similaire à un jaugeage classique au courantomètre, de l'ordre de 30 [s].

Processus de conversion de transects ADCP

Le processus de conversion de transects ADCP en jaugeage équivalent moulinet est illustré sur la figure 7.3. Gunawan *et al.* (2010) proposent une méthodologie et des critères de sélection de transects similaires à ce processus pour générer un champ des vitesses moyen. Il se décompose en cinq étapes :

1. *Sélection et critique des transects.* Les transects sont critiqués à l'aide du logiciel de dépouillement dédié à l'appareil de mesure. Il s'agit par exemple du logiciel WinRiver pour les appareils de la marque *Teledyne RD Instruments* ou de RiverSurveyor Live pour

des appareils de la marque *Sontek*. Les transects ADCP choisis doivent respecter les critères suivants :

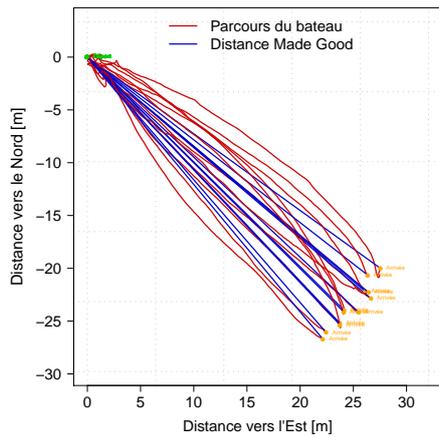
- Nombre d'ensembles suffisant (traversée de la section suffisamment lente),
- Peu d'ensembles vides (afin de limiter les extrapolations),
- Transects réalisés sur la même section.

Les transects présentant d'autres incohérences (gradient bathymétrique local trop élevé par exemple) sont également exclus.

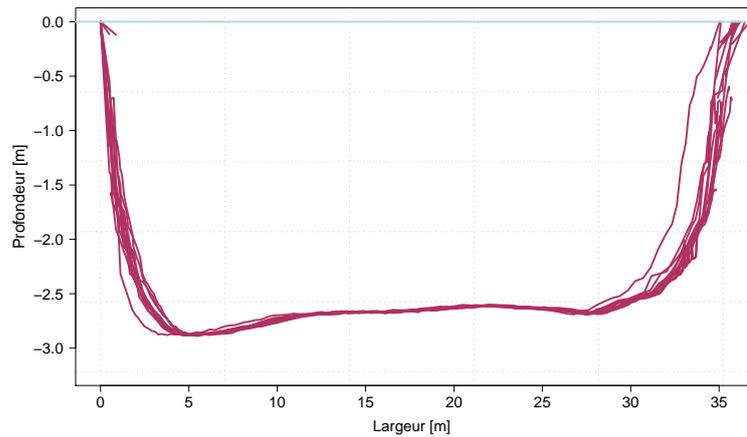
2. *Superposition des transects*. Les trajets (dans un repère Nord-Est) des ADCP sont superposés afin de s'assurer que la section de mesure est la même, comme illustré par la figure 7.3a pour le jaugeage de la Vézère à Allasac (05/02/2009). Les profils bathymétriques sont ensuite superposés. La position des premières et dernières mesures de chacun des transects pouvant être différente, on applique aux profils bathymétriques un décalage en abscisse de manière à maximiser la corrélation (à l'aide de la fonction *ccf* sous *R*) et assurer la superposition des profils. Un exemple de superposition est montré sur la figure 7.3b. A cette étape, certains transects peuvent être exclus si le trajet ou le profil bathymétrique est très éloigné des autres transects. Le profil bathymétrique moyen est retenu.
3. *Projection des mesures sur un maillage*. Les mesures de vitesses de chaque transect sont projetées sur la grille. Cette grille est définie de manière à imposer un temps d'exposition moyen de 30 [s]. Pour cela, on adapte le nombre de verticales en fonction du nombre de tirs que l'on peut superposer à une même abscisse. Le pas vertical de la grille est fonction du nombre de mesures de vitesses réalisées à chaque tir ou de la taille des cellules de mesure de l'ADCP. La figure 7.3c montre le maillage du jaugeage de la Vézère.
4. *Champ moyen et extrapolations verticales par verticale*. Pour chaque verticale (du maillage), les vitesses sont moyennées et on réalise une extrapolation au fond (en loi puissance) et en surface (profil constant) de manière à compléter le profil des vitesses avec des points proche de la surface et du fond, comme pour un jaugeage au courantomètre. La figure 7.3d illustre l'obtention d'un profil vertical moyen de vitesse à partir de 12 transects.

7.2.3 Jaugeages de référence issus d'un modèle hydraulique

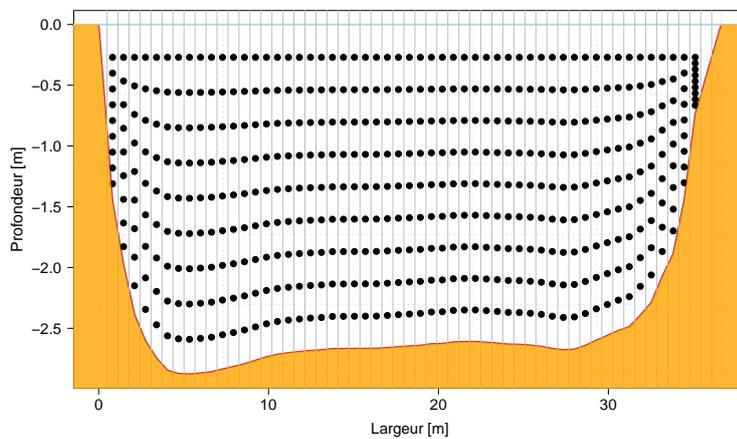
Pour compléter le jeu de jaugeages de référence avec des sections de géométrie maîtrisée, 10 jaugeages supplémentaires ont été modélisés en s'aidant du logiciel de modélisation hydraulique Telemac 2D basé sur la résolution des équations de Saint-Venant. Ce modèle permet de produire un profil latéral de vitesse sur une section d'un canal. La composante verticale des vitesses ne nous intéresse pas dans cette étude, d'où l'utilisation d'un modèle 2D plus simple qu'un modèle 3D. On contrôle le débit ainsi que la bathymétrie dans le canal. Pour chaque situation, un canal rectiligne prismatique est modélisé (même bathymétrie d'amont à l'aval). Sur chaque section de mesure, les sections modélisées reviennent à un cas idéal pour lequel on a une absence d'obstacle en amont de la section, ce qui est impossible dans un cas naturel (présence de blocs en amont, méandres, etc). La stabilité du débit est également garantie. Les bathymétries des jaugeages 51, 52 et 53 sont issues des jaugeages de La Gentille (jaugeage 4) et de Villar Loubière (jaugeage 17). Le débit imposé au jaugeage 53 est supérieur au jaugeage 52.



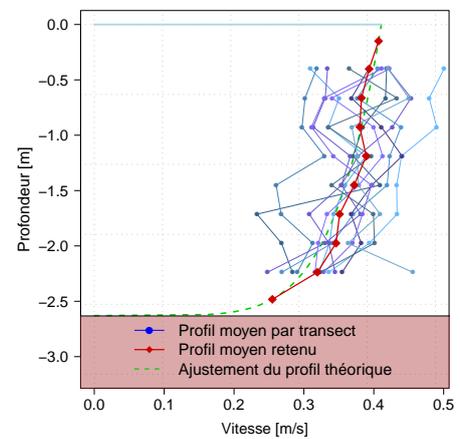
(a) Etape 2 : Superposition des trajets. La distance Made Good désigne l'axe sur lequel sont projetées les vitesses.



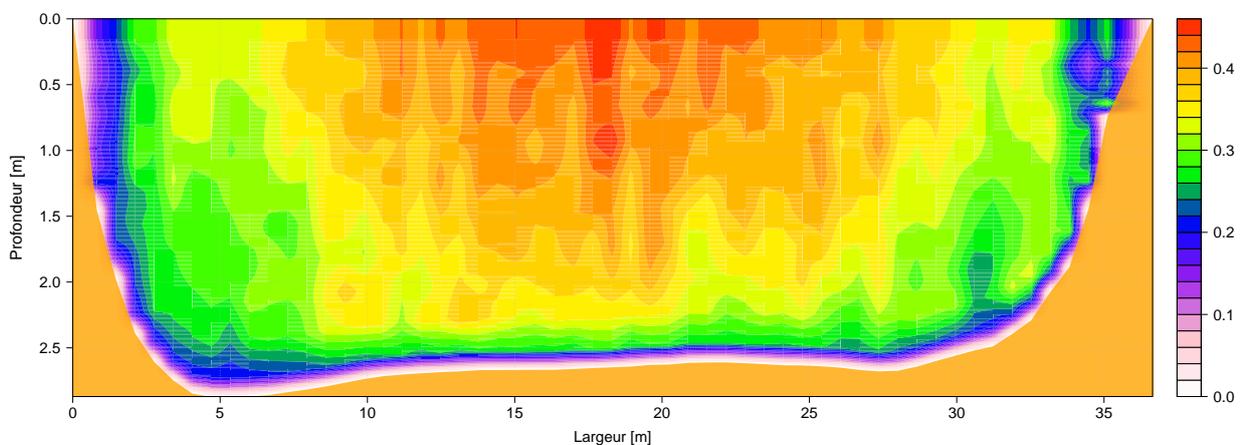
(b) Etape 2 : Superposition des profils bathymétriques.



(c) Etape 3 : Maillage pour la projection des vitesses. Les lignes verticales délimitent la largeur des cellules; les points, le centre des cellules.



(d) Etape 4 : Profil moyen sur une verticale. Pour chaque point de mesure, 44 cellules de vitesse, issues de 12 transects, sont moyennées. Le profil moyen est extrapolé au fond et en surface.



(e) Etape 4 : Champ des vitesses final. L'échelle à droite donne la magnitude des vitesses exprimées en [m/s].

FIGURE 7.3 – Illustration du processus de conversion de transects ADCP appliqué au jaugeage de la Vézère à Allasac (05/02/2009), jaugeage d'indice 1 dans le tableau 7.1.

Méthode de sous-échantillonnage

L'objectif de la méthode de sous-échantillonnage décrite dans ce chapitre consiste à générer des jaugeages cohérents, c'est-à-dire similaires à des jaugeages qui auraient pu être réalisés sur le terrain, par un hydromètre, en termes de nombre et de répartition latérale des verticales, afin d'étudier le terme d'incertitude u'_m .

8.1 Travaux antérieurs

L'estimation du terme u'_m implique l'analyse de jaugeages réalisés selon un échantillonnage fin, comme recommandé dans la norme ISO 1088 (ISO, 2007a). Ce type d'étude a déjà été mené il y a plusieurs décennies. Par exemple, Carter et Anderson (1963) et Herschy (1975) ont conduit ce type d'approche en réduisant le nombre de verticales de jaugeages à fort échantillonnage. La méthode de dégradation adoptée consistait alors, simplement, à choisir une verticale sur deux, une sur quatre ou une sur cinq sans toutefois prendre en compte le comportement de l'hydromètre ni la complexité de la section de jaugeage. Les résultats de ces études sont à l'origine des valeurs moyennes que l'on retrouve dans l'annexe E de la norme ISO 748 (ISO, 2009).

Un point de vue différent adopté dans d'autres études consiste à balayer toutes les combinaisons possibles de jaugeages lorsque l'on supprime k verticales (Masson *et al.*, 1987). Cette méthode se heurte à deux inconvénients. Tout d'abord les calculs sont très vite limités par la capacité de calcul du logiciel utilisé (il y aurait par exemple $\binom{26}{50} = 121\,548\,660\,036\,300$ combinaisons possibles de jaugeages à 26 verticales parmi 50). Ensuite, des jaugeages incohérents sont générés en raison de l'exhaustivité de la méthode. A titre d'exemple, un jaugeage aberrant avec cinq verticales choisies toutes proches d'une berge pourrait être produit.

Il faut se référer à la norme ISO 1088 (ISO, 2007a) ou aux travaux de Whalley *et al.* (2001) pour trouver des pistes plus récentes quant à la méthode à mettre en œuvre pour dégrader (ou sous-échantillonner) des jaugeages. Ainsi la norme ISO 1088 propose quatre méthodes :

1. Equi-répartition des verticales sur la largeur,
2. Aires des sous-sections équivalentes,
3. Débits des sous-sections équivalents,
4. Réduction des verticales dont la vitesse et la profondeur sont proches de l'interpolation linéaire des verticales adjacentes.

Whalley *et al.* (2001) proposent, quant à eux, trois approches :

1. Une dégradation uniforme des verticales (*idem* que le point (1) ci-dessus),
2. Une réduction plus importante du nombre de verticales au milieu de la section,
3. Une dégradation accentuée à proximité des berges.

Des résultats sommaires sont présentés dans cette dernière étude sans que le(s) jaugeage(s) utilisé(s) ne soi(en)t présenté(s). Les résultats obtenus sont spécifiques aux conditions des rivières étudiées. Le nombre de jaugeages sous-échantillonnés n'est pas évoqué. Cette étude semble observer des différences significatives avec les valeurs issues de la norme ISO 748. On note également que le nombre d'itérations, c'est-à-dire le nombre de jaugeages sous-échantillonnés pour un nombre donné de verticales, est généralement limité, ce qui réduit la robustesse de l'analyse statistique.

Dans ces conditions, il paraît difficile de transposer les résultats de ces études. On se propose donc de conduire une étude à partir d'une méthode de sous-échantillonnage qui reproduise le comportement de l'hydromètre tout en générant un nombre de jaugeages suffisamment élevé pour conduire une analyse statistique robuste.

8.2 Méthodologie de sous-échantillonnage

Le comportement de l'hydromètre est rarement pris en compte dans les méthodes de sous-échantillonnage alors que ce dernier dispose d'une expertise lui permettant d'adapter la stratégie d'échantillonnage en fonction de la section de jaugeage.

En lien avec les différentes préconisations relatives au choix des verticales, exposées dans la section 5.2, différentes approches de sous-échantillonnage ont été implémentées et testées (un aperçu des résultats pour les autres méthodes est présenté à l'annexe C) :

- Selon la distance (équi-répartition des verticales sur la largeur de la section),
- Selon les variations de la bathymétrie (sélection préférentielle des verticales dans les zones de fort gradient),
- Selon la distance et la bathymétrie (combinaison des deux approches précédentes),
- Selon le gradient des vitesses,
- Selon le gradient du nombre de Froude,
- De manière à obtenir des débits partiels homogènes,
- De manière à obtenir des aires de sous-sections homogènes,
- Selon les profils unitaires (méthode retenue et étudiée par la suite).

La méthode de dégradation la plus adaptée est celle qui permet de reproduire au mieux le comportement de l'hydromètre face à une rivière (tout en gardant une certaine variabilité) et de traduire les principales préconisations « métier ». On retient également la méthode qui génère des jaugeages peu biaisés. On constate généralement qu'un hydromètre a tendance à placer les verticales de manière à ce qu'elles soient plutôt bien réparties sur la largeur du cours d'eau, de manière à cerner les principales zones qui contribuent à l'écoulement ainsi qu'à décrire correctement les variations du profil des vitesses et la bathymétrie de la section de jaugeage. Parmi les grandeurs disponibles, le profil unitaire (noté PU ou q et défini par l'équation 5.2) semble pertinent pour combiner à la fois l'information issue de la bathymétrie et des variations latérales des vitesses.

8.2.1 Sous-échantillonnage par tirage pseudo-aléatoire

En pratique, les méthodes de dégradation reviennent à choisir de manière pseudo-aléatoire des verticales au sein de la population des m verticales du jaugeage de référence. Les verticales disponibles au tirage (sans remise) sont affectées d'une probabilité de tirage qui sera d'autant plus grande que son attractivité est grande, c'est-à-dire que l'intérêt de sélectionner cette verticale est grand.

Les principales étapes de la génération de jaugeages sous-échantillonnés sont illustrées par le biais d'un logigramme présenté sur la figure 8.1. A partir d'un jaugeage de référence (comportant m verticales), les verticales sont tirées une à une de manière à produire des jaugeages comportant de $j = 3$ à $j = m$ verticales. A chaque itération k , le débit du jaugeage sous-échantillonné noté $Q_{j,k}$ est calculé. Tant que le nombre de verticales disponibles $m - j$ n'est pas nul, les probabilités de tirage sont calculées à nouveau en fonction des verticales déjà sélectionnées. Lorsque le nombre de verticales maximal est atteint (c'est-à-dire que $j = m$), le processus est réitéré. On répète le processus 1000 fois, de manière à obtenir $k = 1000$ jaugeages différents à j verticales.

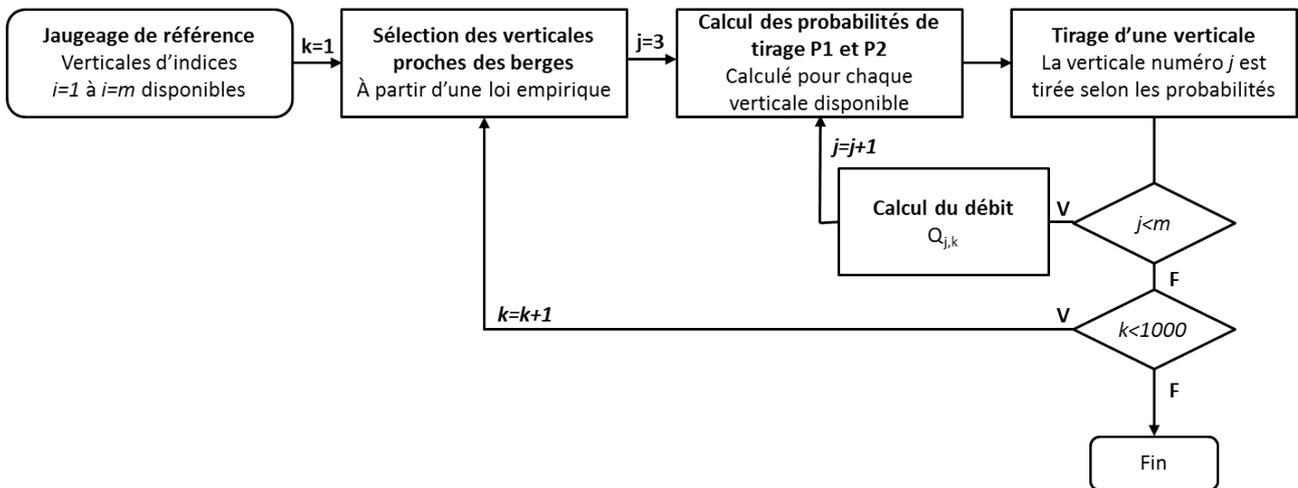


FIGURE 8.1 – Logigramme du processus de sous-échantillonnage. V et F désignent respectivement l'expression logique "vrai" et "faux". La loi empirique pour le tirage des verticales proches des berges est illustrée ci-après par la figure 8.2. P_1 et P_2 désignent des probabilités de tirage dont le calcul est présenté dans la sous-section 8.2.2.

Remarque : à l'issue de la génération de jaugeages sous-échantillonnés, seuls les jaugeages comportant au moins 5 verticales seront retenus dans la suite de l'étude.

8.2.2 Calcul des probabilités de tirage

Sélection des verticales de bord

En accord avec le protocole interne d'EDF-DTG, on cherche à sélectionner les verticales situées près des berges (indices proches de $i = 1$ et $i = m$) afin de réduire le poids des extrapolations des profils au niveau des berges. On souligne ici que l'on ne cherche pas à quantifier l'incertitude dues aux extrapolations de bord puisqu'elle est explicitement prise en compte dans les travaux de Le Coz *et al.* (2012a, 2014a).

Le tirage des verticales les plus proches du bord s'effectue dans une loi de probabilité empirique. Cette probabilité empirique est calée sur le placement des premières verticales par rapport à la berge observé sur l'ensemble des jaugeages de la base de données EDF-DTG et illustré par la figure 8.2. La densité de probabilité est calée par la méthode non paramétrique de Parzen-Rosenblatt (Parzen, 1962) connue aussi sous le nom d'estimation par noyau (fonction *density* sous *R*).

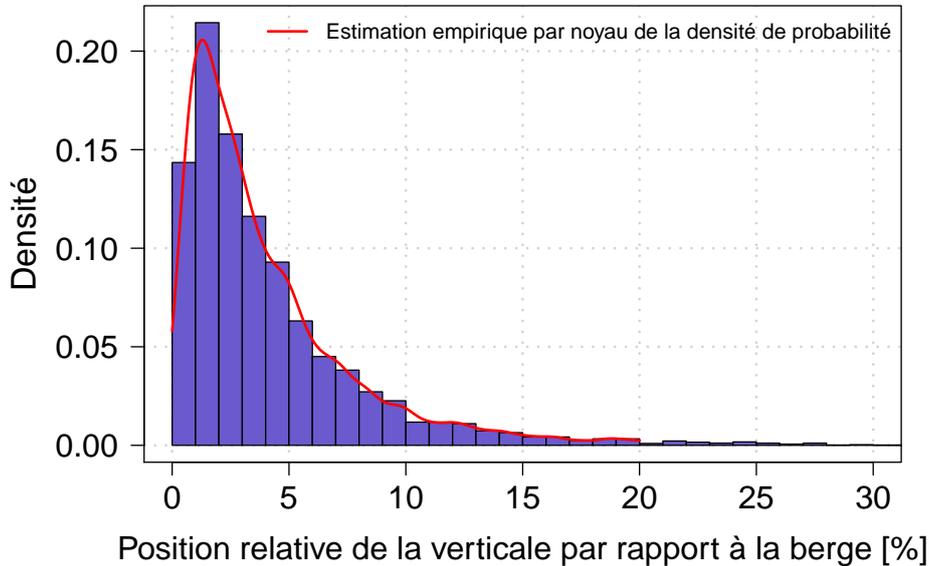


FIGURE 8.2 – Position relative (en pourcentage) des premières verticales par rapport aux berges (3930 jaugeages soient 7860 verticales traitées) et fonction de densité empirique en rouge (l'aire sous la courbe est égale à 1).

Cette figure montre la densité du placement des premières verticales relativement à leur position par rapport à la berge. La berge est située à une position relative de 0% alors que le milieu de la section correspond à 50%. Cette figure montre que les premières verticales sont généralement sélectionnées à 2% de la largeur de la section.

Probabilité de sélection des verticales

Une fois que les deux premières verticales sont sélectionnées, la probabilité de tirage d'une verticale est fonction :

1. De sa proximité avec une verticale déjà sélectionnée,
2. De sa proximité avec les berges,
3. Du gain d'information apporté par la verticale.

La probabilité de tirage d'une verticale qui se situe à proximité d'une verticale (1) déjà sélectionnée ou d'une berge (2) sera beaucoup plus faible que celle d'une verticale plus éloignée. Le point (3) peut se traduire par une importance préférentielle donnée à une verticale qui permet une description plus fine de la section de mesure. Par exemple, si le *PU* mesuré sur une verticale est très différent du *PU* interpolé à partir des verticales adjacentes déjà sélectionnées, sa probabilité de tirage sera augmentée. Cette considération permet ainsi d'échantillonner les principaux points de rupture du profil latéral des *q*.

Pour rappel, le *PU* ou *q* est calculé comme suit :

$$q_i = D_i V_i \quad (8.1)$$

où i varie entre 1 et m . D_i et V_i sont respectivement la profondeur et la vitesse moyenne à la verticale i .

Condition d'espacement des verticales

Lorsqu'un hydromètre doit réaliser un jaugeage avec peu de verticales, celui-ci aura tendance à sélectionner une verticale au cœur de l'écoulement et suffisamment éloignée des verticales déjà sélectionnées (en particulier les berges). Le milieu, ou encore le "centre de gravité", de l'écoulement peut être défini comme la zone pour laquelle les débits qui coulent de part et d'autre de la verticale sont similaires. La probabilité de tirage d'une verticale sera donc maximisée lorsque les débits partiels ($Q_{j,k,i,\text{gauche}}$ et $Q_{j,k,i,\text{droite}}$) entre la verticale i et les verticales déjà sélectionnées les plus proches sont du même ordre. Une probabilité de tirage $P_{1,j,k,i}$ peut alors être affectée en fonction des débits partiels à gauche ($Q_{j,k,i,\text{gauche}}$) et à droite ($Q_{j,k,i,\text{droite}}$) comme suit :

$$P_{1,j,k,i} = \frac{\min(Q_{j,k,i,\text{gauche}}, Q_{j,k,i,\text{droite}})}{m-j} \sum_{i=1} \min(Q_{j,k,i,\text{gauche}}, Q_{j,k,i,\text{droite}}) \quad (8.2)$$

$Q_{j,k,i,\text{gauche}}$ ($Q_{j,k,i,\text{droite}}$ respectivement) désigne l'intégration latérale des q entre la verticale i et la verticale la plus proche sur sa gauche (sur sa droite respectivement) comme illustré sur les figures 8.5a et 8.5c). L'indice j est le nombre de verticales déjà sélectionnées.

La somme des probabilités ainsi définies est égale à 1.

Échantillonnage des irrégularités

Lors du calcul du débit par les méthodes de la section moyenne ou de la section médiane, le profil latéral des vitesses ainsi que le profil latéral des profondeurs sont supposés varier de manière linéaire entre deux verticales. De ce fait, l'hydromètre aura tendance à ajouter une verticale de mesure lorsque l'une de ces grandeurs a tendance à s'écarter d'une droite, de manière à capturer les changements brusques de ces profils. Pour traduire ce comportement, une seconde probabilité $P_{2,j,k,i}$ est calculée telle que :

$$P_{2,j,k,i} = \frac{\Delta q_i L_{i,\text{sep}}}{m-j} \sum_{i=1} (\Delta q_i L_{i,\text{sep}}) \quad (8.3)$$

Un poids plus fort sera attribué à une verticale pour laquelle le PU s'éloigne de l'interpolation linéaire des PU des verticales adjacentes déjà sélectionnées séparées par une distance notée $L_{i,\text{sep}}$. L'écart entre le PU mesuré et le PU interpolé est noté Δq_i . L'aire colorée en bleu sur les figures 8.5b et 8.5d) est proportionnelle à la probabilité $P_{2,i}$.

La somme des probabilités ainsi définies est également égale à 1.

Afin de donner le même poids à ces deux probabilités, la probabilité finale pour le tirage de la verticale i , notée P_i , est la moyenne des deux probabilités :

$$P_{j,k,i} = \frac{P_{1,j,k,i} + P_{2,j,k,i}}{2} \quad (8.4)$$

8.2.3 Exemple de tirage étape par étape

Le jaugeage du Buech à Serres (jaugeage numéro 13 dans la base des jaugeages de référence) est utilisé ici comme fil rouge pour illustrer pas-à-pas la méthode de sous-échantillonnage. Les

figures 8.3a et 8.3b montrent respectivement le profil bathymétrique et le profil latéral des PU du jaugeage de référence initial.

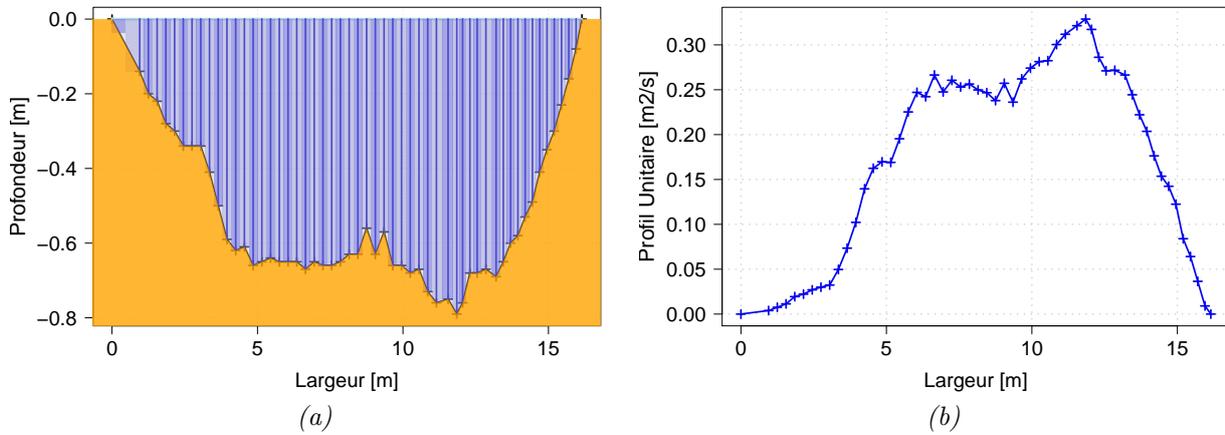


FIGURE 8.3 – (a) Profil bathymétrique et (b) profil latéral des PU du jaugeage du Buech à Serres (22/07/2014).

Sélection des verticales proches des berges :

La première étape consiste à sélectionner les verticales proches des berges, en rive droite et en rive gauche, selon la distribution de probabilité empirique illustré par la figure 8.2. La figure 8.4a montre la probabilité de tirage des verticales en fonction de la largeur pour le jaugeage de Serres. Les lignes oranges correspondent aux deux verticales sélectionnées (en rive droite et en rive gauche).

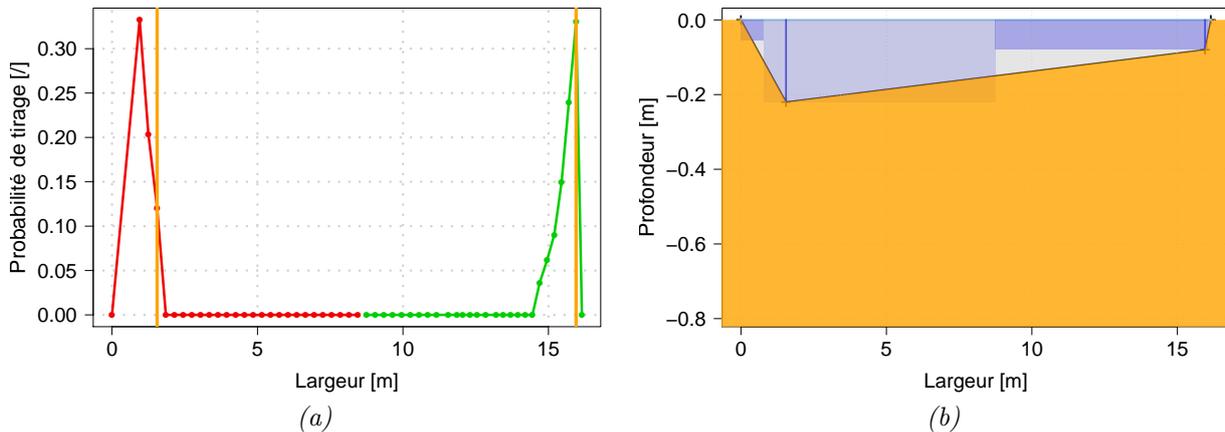


FIGURE 8.4 – (a) Probabilité de tirage des verticales en fonction de la position (rive gauche en rouge et rive droite en vert) et (b) profil bathymétrique du jaugeage sous-échantillonné.

Le profil bathymétrique du jaugeage sous-échantillonné résultant du tirage des 2 verticales de bord est représenté par la figure 8.4b. La valeur de débit de ce jaugeage sous-échantillonné ne sera pas retenue par la suite, puisque le nombre de verticales est trop faible.

Sélection d'une troisième verticale :

Pour la sélection d'une verticale supplémentaire (d'indice $j = 3$), les probabilités de tirages $P_{1,j=3,k,i}$ et $P_{2,j=3,k,i}$ sont illustrées par les figures 8.5e et 8.5f. Les figures 8.5a et 8.5b (8.5c et

8.5d) illustrent le calcul de ces deux probabilités pour l'indice $i = 14$ (respectivement $i = 36$).

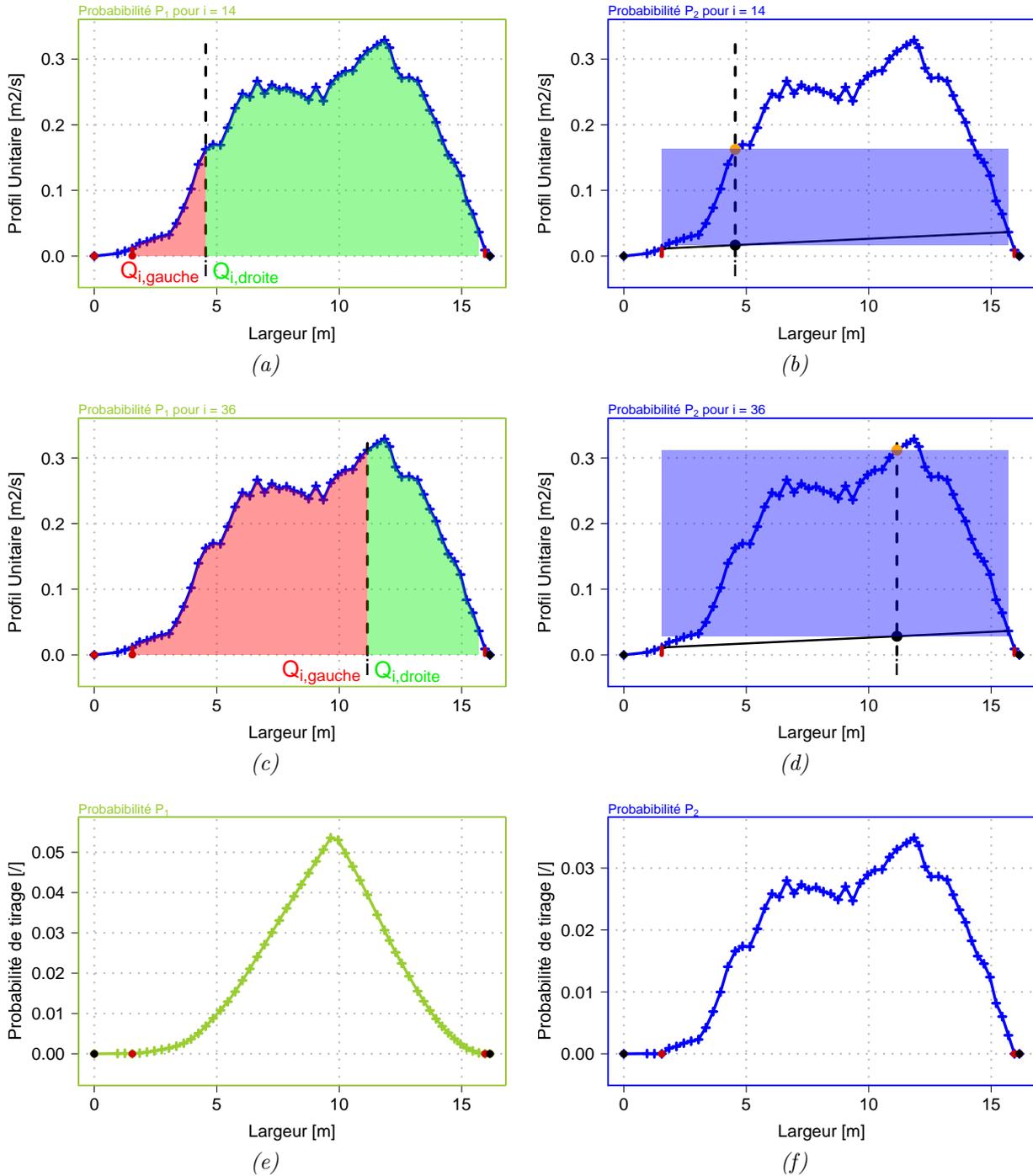


FIGURE 8.5 – Calcul des probabilités (a) $P_{1,j=3,k,i=14}$, (b) $P_{2,j=3,k,i=14}$, (c) $P_{1,j=3,k,i=36}$ et (d) $P_{2,j=3,k,i=36}$. Probabilité (e) $P_{1,j=3,k,i}$ et (f) $P_{2,j=3,k,i}$ en fonction de la position de la verticale. La probabilité de tirage $P_{1,j=3,k,i}$ est le minimum entre le débit partiel $Q_{j=3,k,i,gauche}$ et à droite $Q_{j=3,k,i,droite}$ représentés respectivement par les zones colorées en rouge et en vert sur les figures (a) et (c) pour les verticales d'indice $i = 14$ et $i = 36$. La probabilité de tirage $P_{2,j,k,i}$ est l'aire colorée en bleu sur les figures (b) et (d) pour les verticales d'indice $i = 14$ et $i = 36$. Le rectangle bleu a pour largeur la distance entre les deux verticales sélectionnées adjacentes et pour hauteur Δq_i , la différence entre le q_i mesuré et l'interpolation linéaire des q des verticales adjacentes illustrée par une ligne noire oblique.

La figure 8.6a montre la somme des probabilités $P_{1,j=3,k,i}$ et $P_{2,j=3,k,i}$ pour le tirage de la verticale numéro $j = 3$. La verticale sélectionnée est représentée à la figure par une ligne verticale orange. La figure 8.6b illustre le profil bathymétrique du jaugeage sous-échantillonné possédant 3 verticales.

La probabilité de tirage de la troisième verticale est d'autant plus forte que l'on s'éloigne des verticales déjà sélectionnées au niveau des berges.

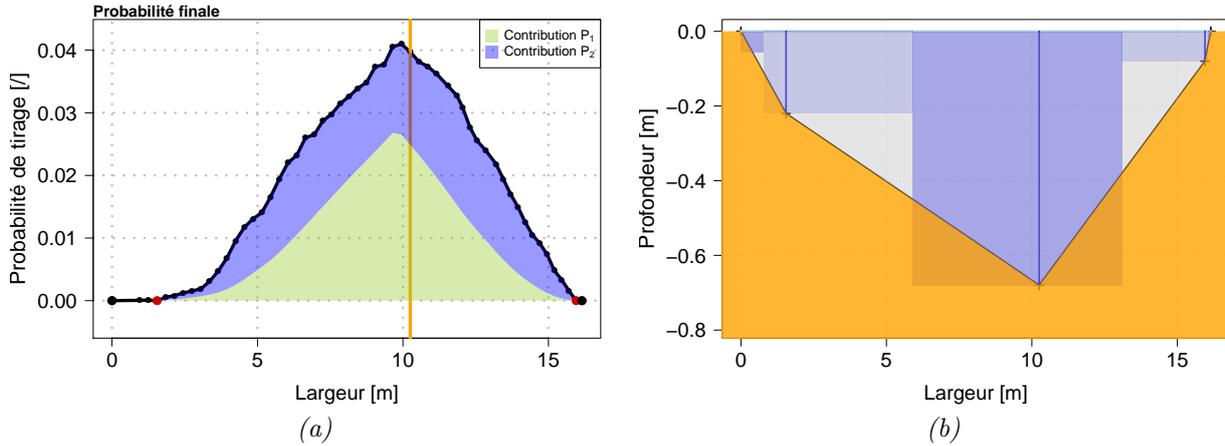


FIGURE 8.6 – (a) Probabilité de tirage de la verticale $j = 3$ en fonction de la position et contribution des probabilités $P_{1,j=3,k,i}$ et $P_{2,j=3,k,i}$. La ligne orange représente la verticale sélectionnée. (b) Profil bathymétrique du jaugeage sous-échantillonné à $j = 3$ verticales.

Sélection d'une quatrième verticale :

Pour la sélection d'une quatrième verticale (d'indice $j = 4$), les probabilités de tirage $P_{1,j=4,k,i}$ et $P_{2,j=4,k,i}$ sont recalculées. Les figures 8.7a et 8.7c illustrent le calcul de la probabilité de tirage $P_{1,j=4,k,i}$ pour les indices $i = 14$ et $i = 36$; l'aire colorée en bleu sur les figures 8.7b et 8.7d représente respectivement les probabilités de tirage $P_{2,j=4,k,i=14}$ et $P_{2,j=4,k,i=36}$.

La figure 8.8a montre la probabilité finale de tirage de la verticale $j = 4$. On observe que la probabilité de tirage de la quatrième verticale est d'autant plus forte que l'on s'éloigne des verticales déjà sélectionnées et que les irrégularités sont fortes.

La ligne orange représente la quatrième verticale sélectionnée. Le jaugeage sous-échantillonné résultant est illustré par la figure 8.8b.

Le processus de calcul, illustré à la figure 8.1, se poursuit ensuite jusqu'à ce que toutes les verticales soient sélectionnées ($j = m$) et est itéré $k = 1000$ fois afin d'obtenir des jaugeages variés.

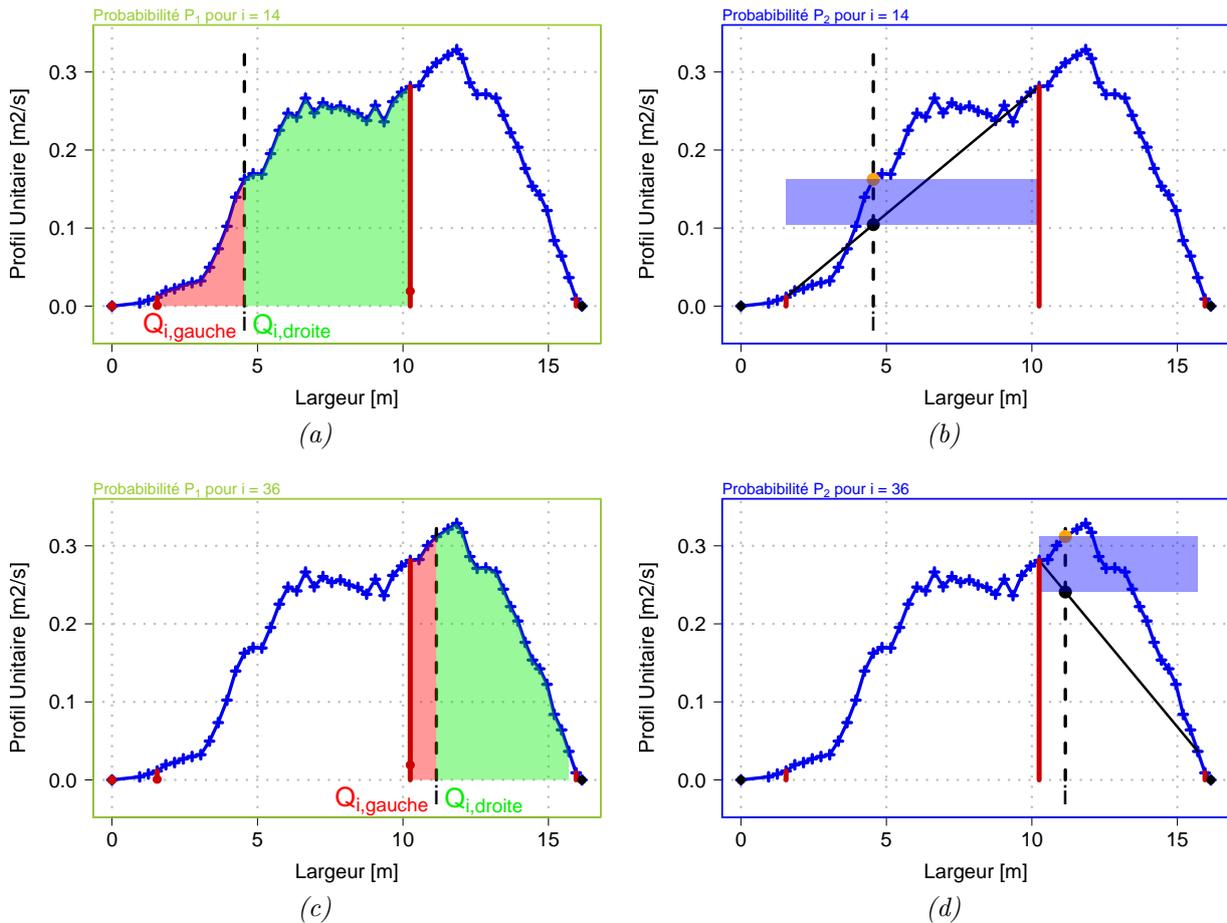


FIGURE 8.7 – Calcul des probabilités (a) $P_{1,j=4,k,i=14}$, (b) $P_{2,j=4,k,i=14}$, (c) $P_{1,j=4,k,i=36}$ et (d) $P_{2,j=4,k,i=36}$. La probabilité de tirage $P_{1,j=4,k,i}$ est le minimum entre le débit partiel $Q_{j=4,k,i,gauche}$ et à droite $Q_{j=4,k,i,droite}$ représentés respectivement par les zones colorées en rouge et en vert sur les figures (a) et (c) pour les verticales d'indice $i = 14$ et $i = 36$. La probabilité de tirage $P_{2,j,k,i}$ est l'aire colorée en bleu sur les figures (b) et (d) pour les verticales d'indice $i = 14$ et $i = 36$. Le rectangle bleu a pour largeur la distance entre les deux verticales sélectionnées adjacentes et pour hauteur Δq_i , la différence entre le q_i mesuré et l'interpolation linéaire des q des verticales adjacentes illustrée par une ligne noire oblique.

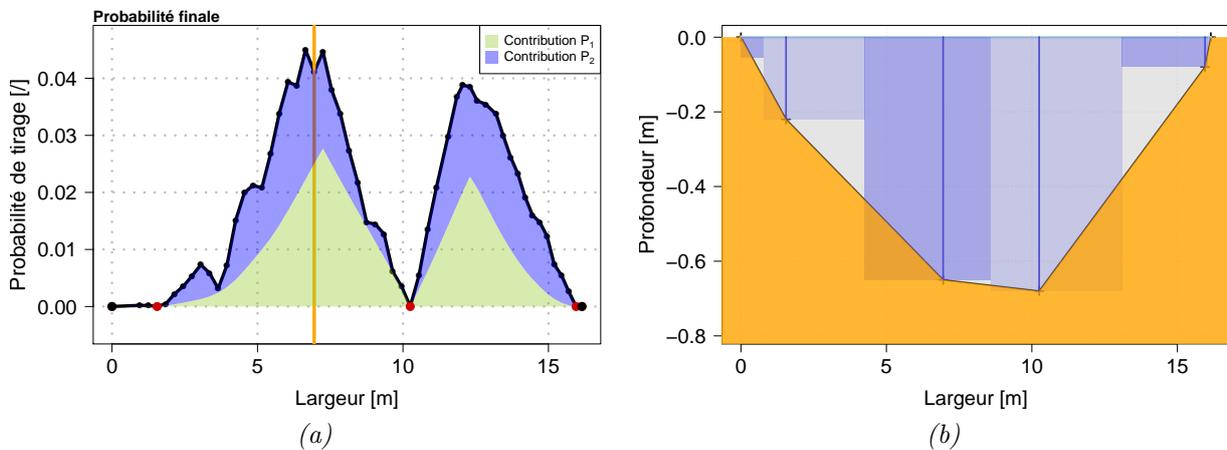


FIGURE 8.8 – (a) Probabilité de tirage de la verticale $j = 4$ en fonction de la position et contribution des probabilités $P_{1,j=4,k,i}$ et $P_{2,j=4,k,i}$. La ligne orange représente la verticale sélectionnée. (b) Profil bathymétrique du jaugeage sous-échantillonné à $j = 4$ verticales.

Estimation du terme u'_m - Analyse statistique

La méthode de sous-échantillonnage produit des jaugeages dégradés selon un échantillonnage varié tout en reproduisant le comportement de l'hydromètre. Le débit de chacun des jaugeages sous-échantillonné est calculé selon la méthode de la section médiane.

En première approche, on peut faire l'hypothèse que le jaugeage initial (avec un grand nombre m de verticales) donne la valeur vraie du débit Q_m . Il est alors possible de calculer l'erreur relative de chaque jaugeage sous-échantillonné par rapport à la valeur de débit du jaugeage de référence, comme préconisé dans la norme ISO 1088 (ISO, 2007a), selon l'équation suivante :

$$E_{j,k} = \frac{Q_{j,k} - Q_m}{Q_m} \quad (9.1)$$

où k indique l'indice du tirage ($k = 1, \dots, 1000$) et j le nombre de verticales.

9.1 Analyse en fonction du nombre de verticales

Les erreurs relatives brutes (équation 9.1) peuvent être tracées en fonction du nombre de verticales. La figure 9.1 montre ainsi la répartition des erreurs relatives en fonction du nombre de verticales pour les jaugeages sous-échantillonnés issus de celui du Buech à la station hydro-métrique de Serres.

Conformément aux attentes, la variabilité des erreurs relatives est plus forte lorsque le nombre de verticales conservées est faible.

Cette figure met également en évidence le fait que la distribution des erreurs n'est pas centrée sur 0. Par exemple, la valeur médiane des erreurs relatives des 1000 jaugeages dégradés à 10 verticales est de $-0,62\%$. La même analyse a été conduite sur les autres jaugeages de référence et montre l'existence d'un biais dont la valeur absolue et le signe dépendent de la forme de la section en travers. Le biais est d'autant plus important que la section en travers est complexe.

En pratique, l'hydromètre aura tendance à augmenter le nombre de verticales afin de décrire au mieux une section complexe. Il est néanmoins difficile de déterminer l'origine exacte de ce biais. Celui-ci peut être lié à un manque de verticales ou bien induit par la méthode de sous-échantillonnage utilisée. Dans la plupart des cas, le biais observé est faible (moins de 1% en valeur absolue à partir de 10 verticales) et l'on admet que l'expertise de l'hydromètre et que le suivi des principales recommandations métier (en décrivant notamment au mieux les gradients latéraux de vitesse et de profondeur et en choisissant des points de mesure proches des berges, de la surface et du fond) permettent de réduire ce biais.

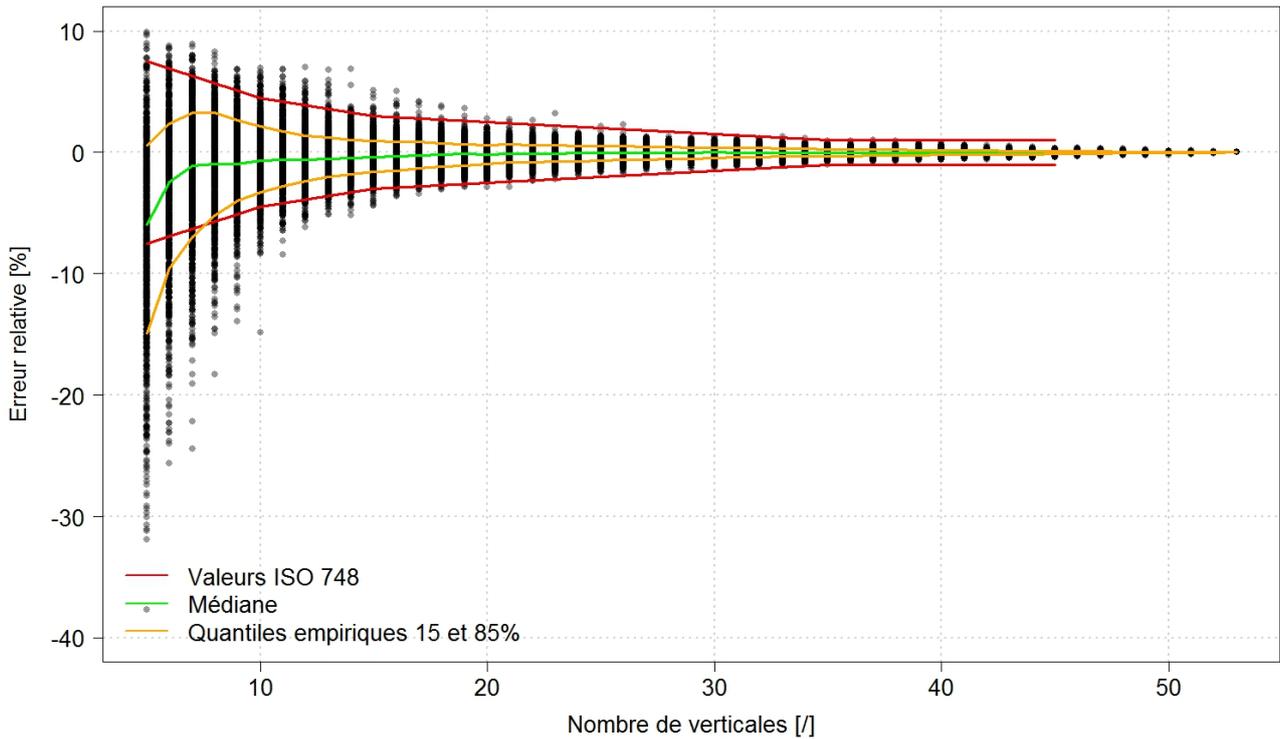


FIGURE 9.1 – Erreurs relatives en fonction du nombre de verticales pour le jaugeage de référence du Buech à Serres. Les courbes rouges représentent les valeurs d'incertitude u'_m , au niveau de confiance de 68%, issues de la norme ISO 748. Les courbes oranges sont les quantiles empiriques 15% et 85%, la courbe verte est la médiane.

Afin de comparer les valeurs du terme u'_m proposées dans la norme ISO 748, les quantiles empiriques à 15% et 85% ont été tracés à la figure 9.1 puisque la distance entre ces deux quantités constitue comme un intervalle de confiance empirique de 70% (soit une approximation d'un intervalle de confiance de 68%).

9.1.1 Comportement non gaussien

En métrologie, l'hypothèse de symétrie de la distribution des erreurs est très souvent posée. Le calcul des quantiles 15% et 85% montre que leur répartition autour de la valeur médiane est légèrement asymétrique comme illustré par la figure 9.1. Une manière d'évaluer l'asymétrie consiste à calculer un coefficient empirique d'asymétrie tel que celui proposé par Bowley (1920) défini par :

$$S_q = \frac{(p_{75\%} - p_{50\%}) - (p_{50\%} - p_{25\%})}{p_{75\%} - p_{25\%}} \quad (9.2)$$

où $p_{25\%}$, $p_{50\%}$ et $p_{75\%}$ désignent respectivement le quartile inférieur, la médiane et le quartile supérieur.

Une valeur positive de ce coefficient indique une distribution asymétrique vers la droite, traduisant le fait que le débit est plutôt sur-estimé. A l'inverse, si le coefficient est négatif, et c'est ce qui est observé sur la majorité des jaugeages sous-échantillonnés, les données sont asymétriques vers la gauche, ce qui signifie que le débit est sous-estimé. A titre d'exemple, une

valeur de $S_q = -0.03$ (donc une distribution asymétrique vers la gauche) est déduite des 1000 jaugeages dégradés à 10 verticales issus du jaugeage du Buech à Serres tel qu'illustré par la figure 9.2a.

Un fort sous-échantillonnage conduit généralement à une sous-estimation du débit. Le même constat a été relevé quand le nombre de verticales est insuffisant (*e.g.* ISO, 1983; Masson *et al.*, 1987; Herschy, 2002). Ceci s'explique par la courbure généralement concave du champ des vitesses qui est sous-estimée par manque de verticales explorées puisque les méthodes d'intégration des vitesses et des profondeurs supposent une variation linéaire des grandeurs entre deux verticales adjacentes. La définition de la méthode par exploration du champ des vitesses telle que présentée dans certains ouvrages (*e.g.* Herschy, 2002; ISO, 2005b; Huang, 2012) précise d'ailleurs qu'un facteur de proportionnalité existe entre le débit réel (équation 3.3) et le débit mesuré (équation 5.1) en pratique considéré comme égal à 1. On proposera par la suite une méthode de correction du biais dans la section 10.1.3.

Un test non paramétrique d'asymétrie a été réalisé en utilisant une méthode bootstrap (voir la définition à l'annexe A.1.1 Davison et Hinkley, 1997). Pour chaque nombre de verticales, on procède au tirage aléatoire de 1000 jaugeages dégradés (avec remise) à partir desquels on calcule le coefficient d'asymétrie de Bowley. On itère ce processus 1000 fois de manière à obtenir 1000 valeurs de coefficient d'asymétrie pour chaque nombre de verticales. Le calcul des quantiles empiriques 2,5 et 97,5% sur les 1000 réplicats permet de construire un intervalle de confiance empirique de l'asymétrie (au niveau de confiance $1 - \alpha = 95\%$) en fonction du nombre de verticales représenté à la figure 9.2b. Lorsque $S_q = 0$ est inclus dans l'intervalle de confiance, l'hypothèse nulle de symétrie de la distribution des erreurs relatives ne peut pas être rejetée (au niveau de confiance de 95%).

Pour la majorité des jaugeages de référence, on observe que l'intervalle de confiance construit inclut $S_q = 0$. On peut en déduire que la distribution des erreurs relatives n'est pas significativement asymétrique.

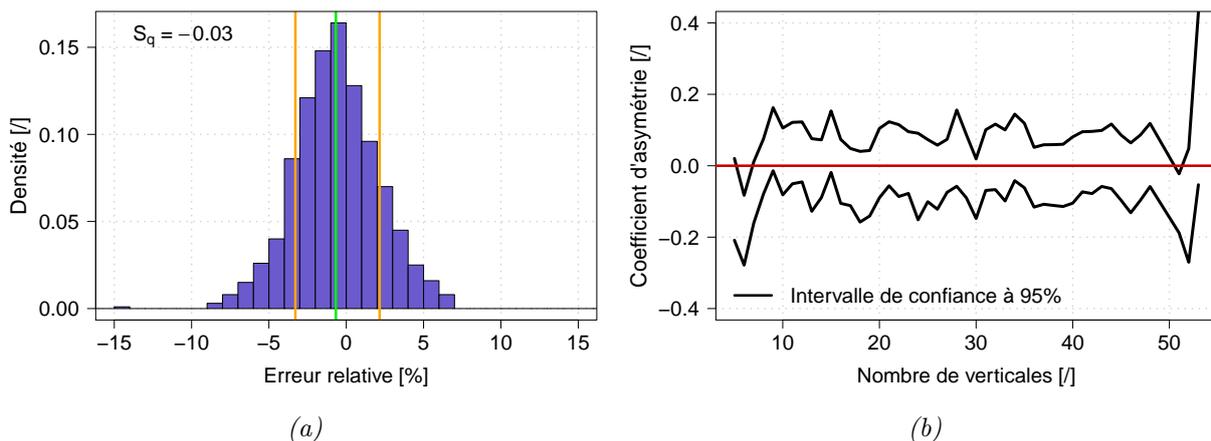


FIGURE 9.2 – (a) Exemple de distribution des erreurs relatives pour 1000 jaugeages sous-échantillonnés à 10 verticales issus du jaugeage du Buech à Serres. (b) Test non paramétrique par bootstrap. Les courbes noires délimitent un intervalle de confiance à 95%. La ligne horizontale rouge correspond à $S_q = 0$.

Néanmoins, afin de prendre en compte la faible asymétrie, on estime le terme u'_m comme le maximum entre la différence des quantiles 85% et 50% et la différence entre les quantiles 50%

et 15%, en lien avec un intervalle de confiance de 68%. Cela se traduit par l'équation 9.3.

$$u'_{m,\text{empirique}} = \max \{p_{85\%}(m) - p_{50\%}(m), p_{50\%}(m) - p_{15\%}(m)\} \quad (9.3)$$

9.1.2 Courbes d'incertitude $u'_{m,\text{empirique}} = f(m)$

Il est alors possible d'estimer le terme $u'_{m,\text{empirique}}$ pour chaque jaugeage de référence en fonction du nombre de verticales. La démarche précédente a été appliquée à chacun des jaugeages de référence aboutissant aux courbes tracées à la figure 9.3. Bien que le nombre de verticales de chaque jaugeage de référence soit différent, les courbes obtenues sont superposées dans un même référentiel.

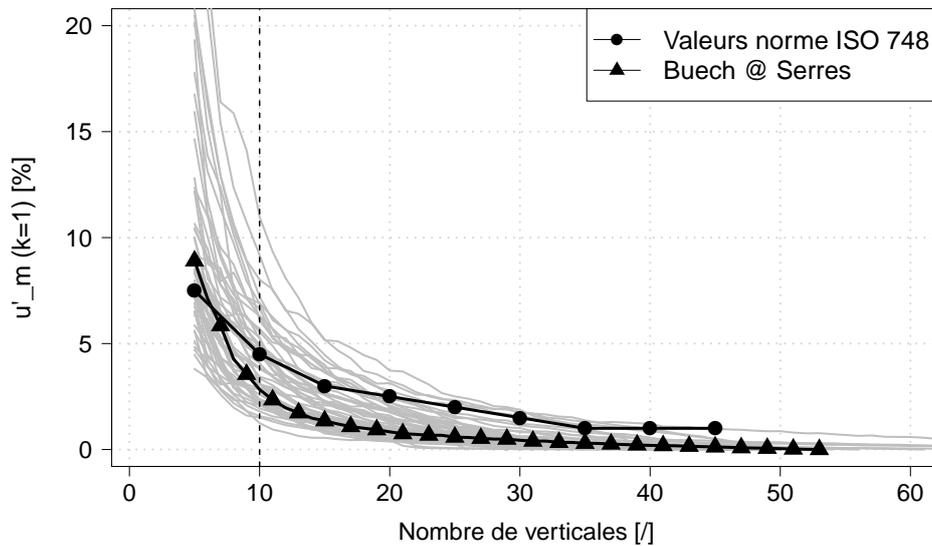


FIGURE 9.3 – Estimation du terme u'_m pour chaque jaugeage de référence en fonction du nombre de verticales (courbes grisées). La courbe issue du jaugeage de référence du Buech à Serres est représentée par des triangles noirs. Les valeurs proposées par la norme ISO 748 sont représentées par des ronds pleins.

Pour un jaugeage typique à 10 verticales, les valeurs du terme u'_m varient entre 1,2% et 12%. Cette forte variabilité entre les courbes s'explique par la particularité de chaque jaugeage de référence. En effet, les sections des jaugeages de référence ne possèdent pas les mêmes caractéristiques notamment en termes de largeur. Ensuite, chaque jaugeage est particulier en raison d'une distribution latérale spécifique des vitesses et des profondeurs (la complexité intrinsèque de la section de jaugeage). Pour un même niveau d'incertitude, il faudra ainsi un nombre de verticales d'autant plus grand que la section de jaugeage est irrégulière. A cela s'ajoute le fait que chaque jaugeage de référence ne présente pas le même nombre de verticales.

On en conclut que le nombre de verticales m n'est pas une variable suffisamment explicative de l'incertitude u'_m . Ce constat est en accord avec les limites des valeurs proposées dans la norme ISO 748 (section 6.2.3).

Ces écarts importants selon les jaugeages de référence montrent que l'erreur relative doit dépendre à la fois de la stratégie d'échantillonnage adoptée et de la complexité de la section en travers en termes de bathymétrie et de vitesses moyennes.

9.2 Une nouvelle variable explicative : l'indice de qualité d'échantillonnage (SQI)

Le nombre de verticales m n'étant pas une variable explicative adéquate, on cherche à quantifier la qualité de l'échantillonnage à travers un indicateur simple applicable à tout jaugeage. Les recommandations métier que l'on retrouve dans la littérature s'accordent sur la qualité d'un bon échantillonnage. Celui-ci doit garantir une répartition latérale des verticales suffisamment homogène (les verticales doivent être bien réparties sur la largeur du cours d'eau) et permettre une bonne description des variations de profondeur et de vitesse entre les verticales (c'est-à-dire que les variations des grandeurs mesurées doivent être faibles et du même ordre sur toute la section).

On traduit ces propos au travers d'un indice de qualité d'échantillonnage (ou SQI pour *Sampling Quality Index*) qui s'exprime comme :

$$SQI = \frac{\sigma(\Delta q)}{\sigma(q)} \frac{\sum_{i=1}^{m+1} (\Delta x_i \Delta q_i)}{Q} \quad (9.4)$$

où $\Delta x_i = |x_{i-1} - x_i|$ et $\Delta q_i = |q_{i-1} - q_i|$.

Ce critère adimensionnel possède l'avantage de prendre en compte :

- Le rapport entre l'écart-type des q entre deux verticales adjacentes ($\sigma(\Delta q)$) et l'écart-type des q sur l'ensemble du jaugeage ($\sigma(q)$). Pour une section donnée, le dénominateur de ce ratio est plutôt stable, quelle que soit la répartition des verticales, puisqu'il traduit la variabilité intrinsèque des q sur la section. Le numérateur, quant à lui, prendra des valeurs d'autant plus faibles que le nombre de verticales réalisées est grand et que les variations des q entre les verticales adjacentes est faible.
- L'espacement entre les verticales (à travers la grandeur Δx_i). Une augmentation de la distance entre les verticales engendre ainsi une valeur de SQI plus importante.
- La variation des q entre deux verticales adjacentes (Δq_i). La valeur du SQI sera d'autant plus grande quand les changements de q ne sont pas suffisamment échantillonnés.

En théorie, une valeur de $SQI = 0$ est possible mais cela traduirait un espacement des verticales infinitésimal. Dans une telle situation, le débit correspondrait à l'intégration complète du débit déduite de l'équation 3.3. A l'inverse, ce critère ne doit raisonnablement pas dépasser une valeur de 1. Une valeur trop grande de ce critère traduit un échantillonnage inapproprié et peut éventuellement traduire une erreur lors du jaugeage.

Ce critère a été appliqué à l'ensemble des 3930 jaugeages de la base de données EDF-DTG. La distribution des valeurs est représentée sous forme d'histogramme à la figure 9.4. On constate que la majorité des jaugeages ont un SQI inférieur à 0,4. La valeur médiane vaut 0,1 et la valeur maximale est de 1,11.

A titre d'illustration la figure 9.5 présente deux jaugeages sous-échantillonnés issus du jaugeage de référence de Serres (indice numéro 13 dont le profil bathymétrique est illustré en annexe B). Le jaugeage illustré à la figure 9.5a comporte 5 verticales et le SQI associé vaut 0,98. Le jaugeage présenté à la figure 9.5b possède 12 verticales pour un SQI valant 0,18. Ces deux exemples montrent que l'ajout de verticales engendre une diminution du SQI et en particulier une réduction de la somme des produits de Δx_i par Δq_i , représentée sur les figures 9.5a

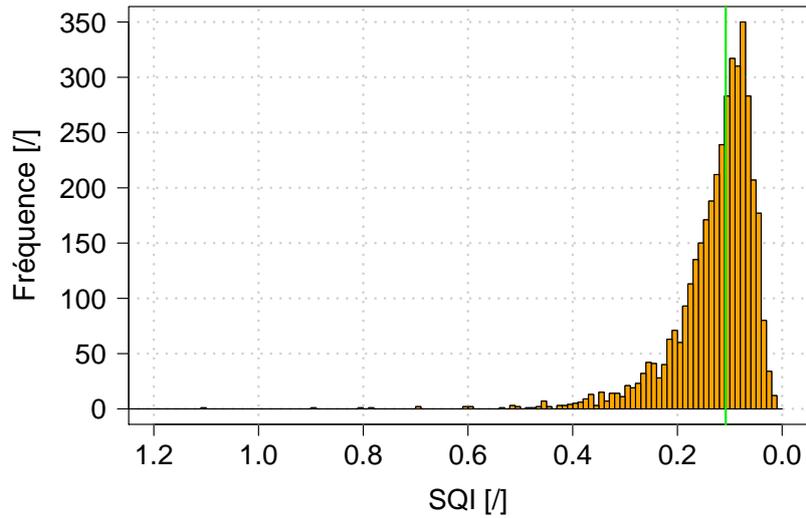
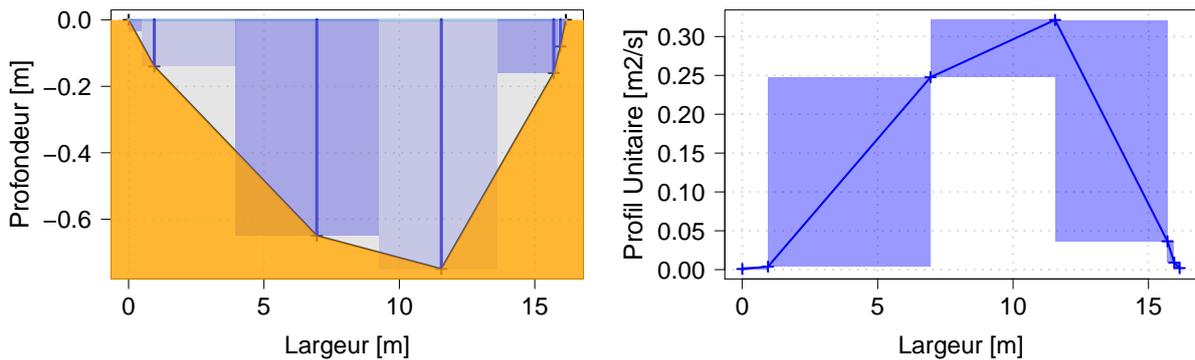
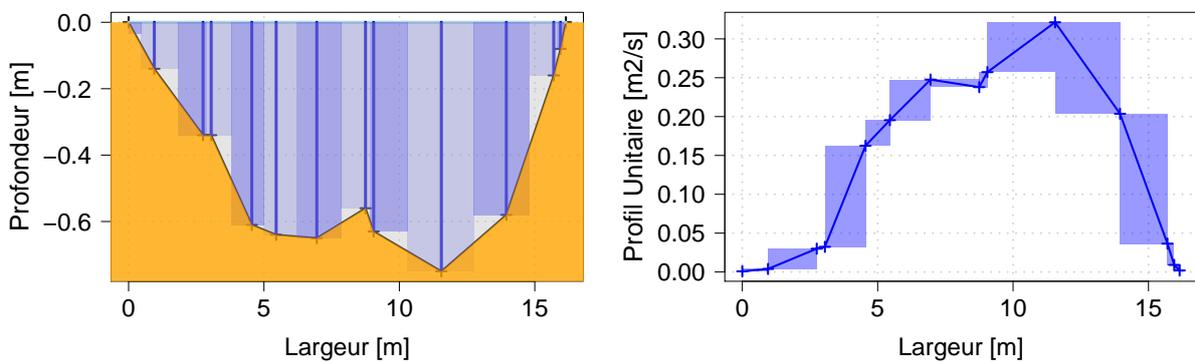


FIGURE 9.4 – Histogramme des SQI calculés sur les 3930 jaugeages de la base de données EDF-DTG. La ligne verticale verte représente la valeur médiane. Il est à noter que l'axe des abscisses est décroissant (choix arbitraire : la qualité de l'échantillonnage s'améliore dans le sens de la lecture, vers la droite).



(a)



(b)

FIGURE 9.5 – Profils latéraux de bathymétrie et des q pour deux jaugeages sous-échantillonnés du Buech à Serres (indice numéro 13) comportant 5 (figure 9.5a) et 12 verticales (figure 9.5b). Sur les figures de droite, l'aire des rectangles bleus correspond à la somme des produits de Δx_i par Δq_i dans la définition du SQI (voir équation 9.4).

et 9.5b par l'aire colorée en bleu.

La figure 9.6 montre la distribution des erreurs relatives en fonction de l'indice de qualité d'échantillonnage à partir des jaugeages sous-échantillonnés du Buech à Serres. On observe que pour un nombre fixé de verticales (5 et 15, respectivement en rouge et en vert à la figure 9.6), la valeur prise par le SQI varie. Plus le nombre de verticales augmente et plus le nuage de points tend vers des valeurs de SQI faibles (vers la droite à la figure 9.6). En parallèle, on remarque que les erreurs relatives sont de plus en plus réduites quand le SQI tend vers 0. Les jaugeages présentant un SQI faible (qui tend vers 0), pour lesquels l'échantillonnage est correct, ont donc une gamme d'erreurs relatives plus limitée, se traduisant ainsi par une incertitude faible.

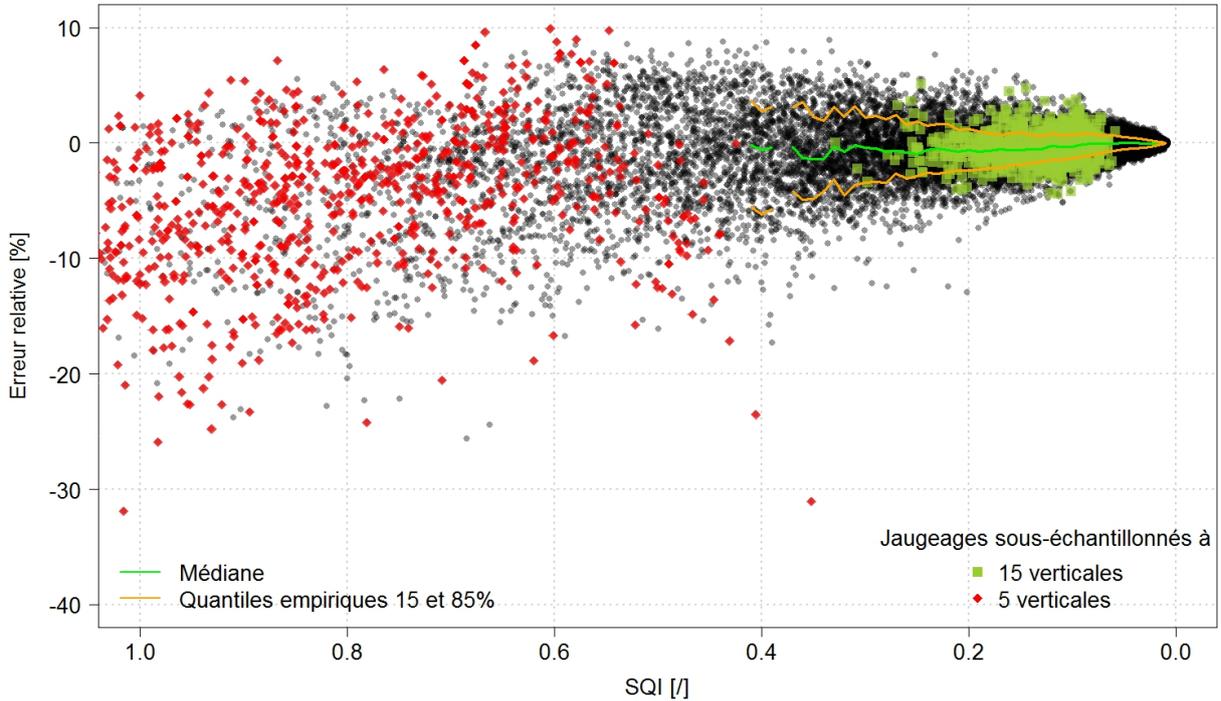


FIGURE 9.6 – Erreurs relatives en fonction de l'indice de qualité d'échantillonnage SQI et estimation du terme u'_m pour le jaugeage du Buech à Serres (jaugeage numéro 13). Les losanges rouges (respectivement les carrés verts) indiquent les 1000 jaugeages sous-échantillonnés à 5 verticales (respectivement 15). Il est à remarquer que l'axe des x est décroissant.

De la même manière que précédemment, le terme u'_m est estimé comme la valeur maximale entre la différence entre les quantiles 85% et 50% et la différence entre les quantiles 50% et 15% selon l'équation 9.3, en fonction de l'indice d'échantillonnage SQI plutôt que du nombre de verticales m .

Compte-tenu d'un nombre variant de jaugeages dégradés pour un SQI donné, un seuil de 200 valeurs est choisi pour estimer les quantiles empiriques de manière robuste. A titre de comparaison, les courbes $u'_m = f(SQI)$ obtenues pour tous les jaugeages sont reportées selon un seuil de 100 valeurs et de 200 valeurs à la figure 9.7a et la figure 9.7b respectivement.

Un seuil de 100 valeurs montre une forte irrégularité des courbes pour des valeurs de SQI élevées puisque le calcul du quantile est peu stable du fait d'un nombre restreint de jaugeages à fort SQI . En complément, les courbes $u_m = f(SQI)$ peuvent éventuellement être lissées, à l'aide par exemple d'une fonction de régression locale ou *LOESS* (Cleveland, 1979). C'est ce qui avait été choisi dans l'étude de Despax *et al.* (2016b).

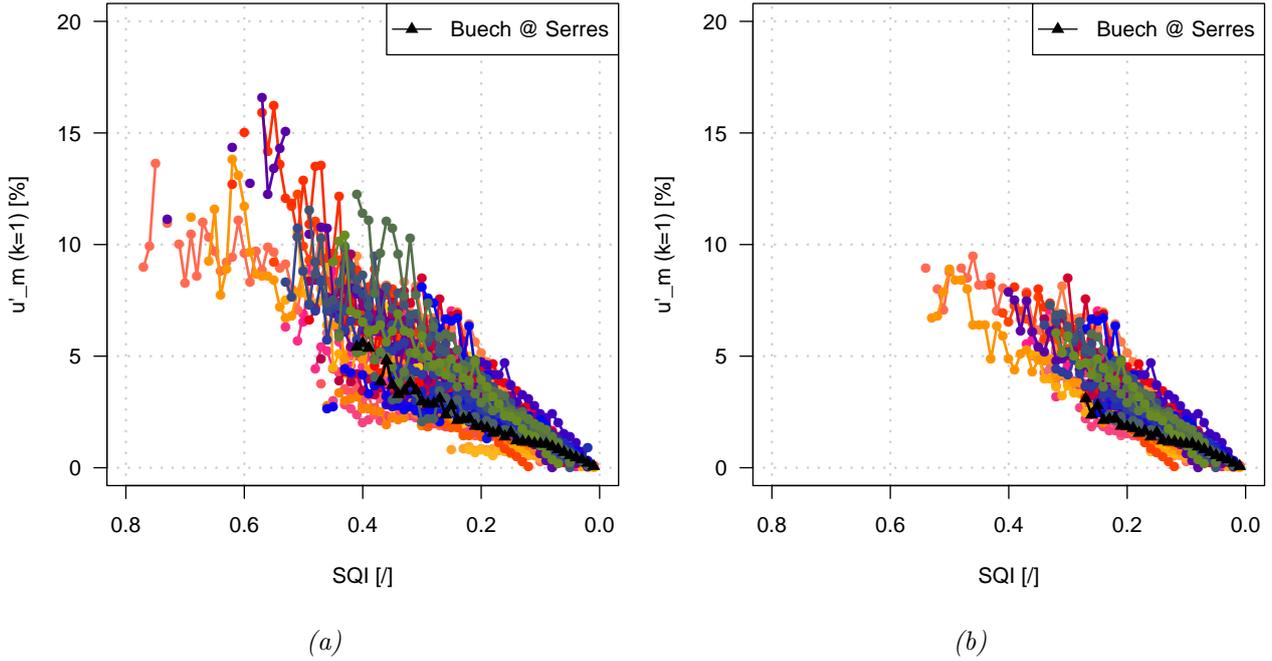


FIGURE 9.7 – Incertitude u'_m ($k = 1$) en fonction du SQI avec un seuil de (a) 100 valeurs et (b) 200 valeurs pour l'estimation des quantiles. Le jaugeage du Buech à Serres est représenté par des triangles noirs. A titre d'information, la couleur des courbes est fonction du jaugeage de référence (voir figure B.1 présentée en annexe B).

On souligne que les courbes tracées en fonction du SQI pour chaque jaugeage de référence sur les figures 9.7a. et 9.7b. sont superposées dans un même référentiel. L'incertitude estimée tend bien vers 0 lorsque le SQI tend vers 0. On note néanmoins que le SQI de chacun des jaugeages de référence est différent. En effet une incertitude nulle est observée pour différentes valeurs de SQI .

9.2.1 Incertitude résiduelle des jaugeages de référence

En première approche, il est possible de faire l'hypothèse que le jaugeage de référence possède une incertitude nulle due à l'intégration latérale des profils, puisqu'il s'agit d'une mesure à forte résolution donnant la meilleure estimation possible du débit. On aura donc pour chaque jaugeage, une estimation de l'incertitude u'_m égale à 0 pour la valeur de SQI correspondant au jaugeage de référence. Cependant la densité latérale des verticales des jaugeages de référence est différente d'un site à l'autre (le SQI varie de 0,01 à 0,12, voir tableau B.1 en annexe). On se propose donc d'estimer et de propager l'incertitude résiduelle, c'est à dire l'incertitude sur l'intégration transversale des profils unitaires q_i des jaugeages de référence à forte résolution spatiale.

Pour cela, on s'inspire des travaux de Le Coz *et al.* (2012a, 2014a) quant à l'estimation du terme $u_p(V_i)$, calculé selon les équations 6.5 et 6.6. En supposant que l'échantillonnage latéral du jaugeage de référence est suffisante, on peut modifier ces équations par les équations suivantes :

$$u_m^2 = \frac{1}{12Q^2} \left\{ \sum_{i=1}^{m-1} [(q_i - q_{i+1})(x_i - x_{i+1})]^2 + E^2(q_{\text{rive droite}}) + E^2(q_{\text{rive gauche}}) \right\} \quad (9.5)$$

Avec par exemple pour la rive gauche :

$$E(q_{\text{rive gauche}}) = \frac{0,5q_1(x_1 - x_0)}{2\sqrt{3}Q} \quad (9.6)$$

Les incertitudes résiduelles ainsi calculées sur les jaugeages de référence prennent des valeurs entre 0,2 (pour le jaugeage du 18/09/2013 du Rhône à Tricastin, d'indice 6) et 2,2% (jaugeage d'indice 19 de la Souloise à Pont de la Baume). L'ordre de grandeur médian de 1% est cohérent avec les données issues de la littérature et correspond à l'incertitude u'_m d'un jaugeage à 45 verticales proposée dans la norme ISO 748 (ISO, 2009). On constate logiquement que les jaugeages présentant les profils les plus irréguliers (un *SQI* plus élevé), comme le jaugeage de la Souloise à Pont de la Baume, possèdent une incertitude résiduelle bien supérieure à celle des jaugeages réalisés sur des canaux, à l'image de celui de la Gentille (indice 4). Les incertitudes résiduelles pour chaque jaugeage sont détaillées dans l'annexe B au tableau B.1.

Dans la logique d'une séparation des termes d'incertitude $u_m(D_i)$ et $u_m(V_i)$ (voir méthode $Q+$ à la section 6.3), les mêmes calculs peuvent être transposés pour l'estimation des incertitudes résiduelles dues à l'intégration des profondeurs et des vitesses conduisant respectivement aux équations 9.7 et 9.8.

$$u_{m,\text{résiduelle}}'^2(D_i) = \frac{1}{12A^2} \sum_{i=0}^m [(D_i - D_{i+1})(x_i - x_{i+1})]^2 \quad (9.7)$$

où, A désigne l'aire mouillée de la section de jaugeage, soit l'intégrale de la courbe $D_i = f(x)$.

$$u_{m,\text{résiduelle}}'^2(V_i) = \frac{1}{12V_{\text{int}}^2} \left\{ \sum_{i=1}^{m-1} [(V_i - V_{i+1})(x_i - x_{i+1})]^2 + E^2(V_{\text{rive droite}}) + E^2(V_{\text{rive gauche}}) \right\} \quad (9.8)$$

où, V_{int} désigne le résultat de l'intégration latérale du profil des vitesses, soit l'aire sous la courbe $V_i = f(x)$.

Avec par exemple pour la rive gauche :

$$E(V_{\text{rive gauche}}) = \frac{0,5v_1(x_1 - x_0)}{2\sqrt{3}V_{\text{int}}} \quad (9.9)$$

Les incertitudes résiduelles $u'_{m,\text{résiduelle}}(D_i)$ et $u'_{m,\text{résiduelle}}(V_i)$ sont présentées, pour chaque jaugeage de référence, au tableau B.1.

Validation du calcul de l'incertitude résiduelle

On dispose de 2 jaugeages réalisés sur la Souloise à la station de l'Infernet (comportant respectivement 33 et 34 verticales de mesure) ainsi qu'un jaugeage de référence comportant 95 verticales sur la même section (indice 20). Les verticales de ces deux jaugeages sont équiréparties sur la largeur de la section.

L'application de la méthode de dégradation (1000 tirages) nous permet de construire l'intervalle de confiance u'_m à 70% en fonction du nombre de verticales (figure 9.8) en suivant la méthodologie présentée dans la section 9.1.

L'incertitude $u'_{m,\text{empirique}}$ d'un tel jaugeage est estimée à 1,7% pour une trentaine de verticales. Les incertitudes résiduelles calculées sur les jaugeages à 33 et 34 verticales sont respectivement de 1,73% et 2,06%, ce qui correspond bien à l'incertitude issue du jaugeage de référence.

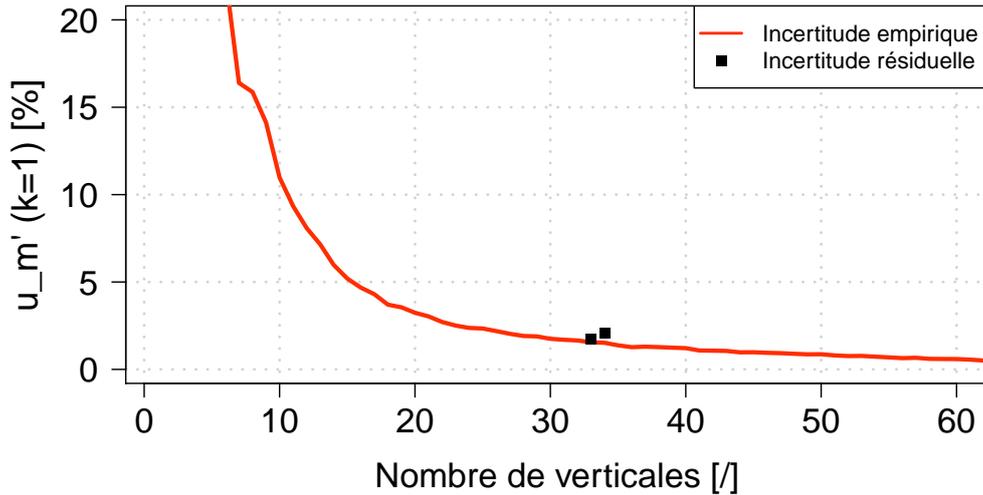


FIGURE 9.8 – Incertitude empirique $u'_{m,empirique}$ du jaugeage de référence de l'Infernet à la Souloise au niveau de confiance de 68% et incertitudes résiduelles associées aux deux jaugeages à 33 et 34 verticales

Propagation de l'incertitude résiduelle

En supposant que la covariance entre l'incertitude empirique et l'incertitude résiduelle est nulle, on peut calculer simplement l'incertitude u'_m finale comme la somme quadratique de l'incertitude empirique et de l'incertitude résiduelle comme suit :

$$u_m'^2 = u_{m,empirique}^2 + u_{m,residuelle}^2 \quad (9.10)$$

9.2.2 Courbes d'incertitude $u'_m = f(SQI)$

La prise en compte de l'incertitude résiduelle conduit aux courbes d'incertitude en fonction du SQI représentées à la figure 9.9. En comparaison de la figure 9.7b., on observe que les courbes sont mieux superposées. L'incertitude tend vers 0 lorsque l'indice SQI tend vers 0.

Malgré une meilleure superposition des courbes, on observe une classification des courbes dépendante de la complexité du jaugeage de référence initial. Ainsi, la courbe la plus haute est celle obtenue avec le jaugeage du Cernon à Saint-Georges de Luzençon (indice 16). A l'inverse, le jaugeage modélisé rectangulaire lisse (indice 45) conduit à la courbe d'incertitude la plus basse. Cela s'explique par le degré de complexité initial du jaugeage de référence. Plus la complexité initiale du jaugeage de référence est grande et plus il sera possible de générer des jaugeages variés (avec une gamme de SQI explorée plus grande). A l'inverse, un jaugeage dont la forme est très simple (jaugeage rectangulaire par exemple) ne permet pas de générer des jaugeages sous-échantillonnés variés. Ces derniers possèdent une erreur relative faible puisqu'il suffit de très peu de points de mesure pour approcher la valeur "vraie" du jaugeage de référence. Ce type de géométrie est caractérisé par un profil latéral des vitesses "plat" quand on s'éloigne des berges (voir le profil à l'annexe B).

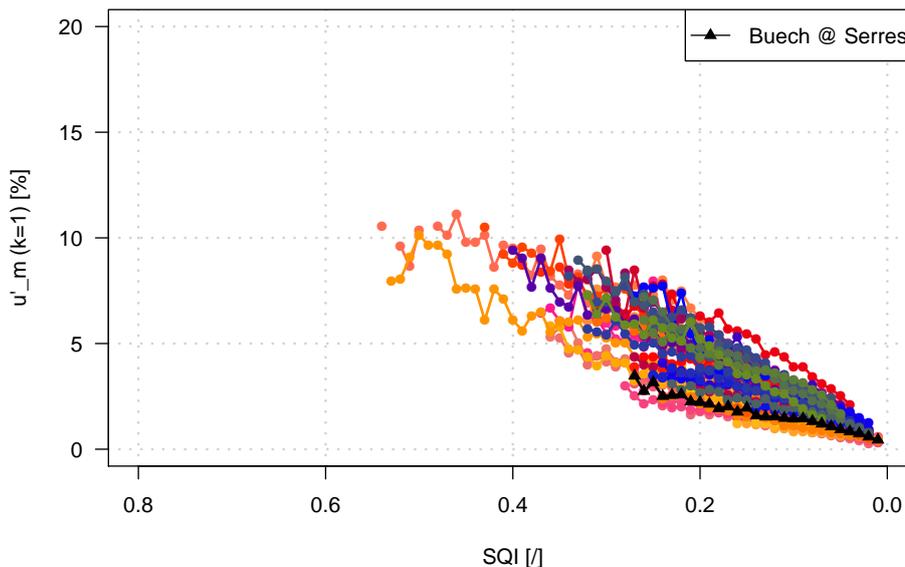


FIGURE 9.9 – Incertitude u'_m (au niveau de confiance de 68%) avec prise en compte de l'incertitude résiduelle de chacun des jaugeages en fonction du SQI avec un seuil de 200 valeurs pour l'estimation des quantiles. Le jaugeage du Buech à Serres est représenté par des triangles noirs. A titre d'information, la couleur des courbes est fonction du jaugeage de référence (voir figure B.1 présentée en annexe B).

9.3 Biais

Dans certains cas, les simulations effectuées mettent en évidence un biais généralement négatif par manque de verticales explorées. Le biais peut être calculé à partir du quantile 50% (ou médiane). Il est tracé, pour chaque jaugeage de référence, à la figure 9.10 en fonction du SQI.

Le biais varie globalement de -8 à 5%. On observe que celui-ci est généralement négatif traduisant une sous-estimation du débit lorsque le nombre de verticales est réduit. Il est difficile de conclure quant à l'origine exacte de cette sous-estimation. Celle-ci peut-être due soit à la méthode de sous-échantillonnage (qui aurait alors tendance à produire des jaugeages sous-estimant le débit) soit à la forme globale de la section d'écoulement. Un biais négatif élevé est observé pour les jaugeages numéro 46 (section rectangulaire modélisée sous TELEMAC), numéro 2 (Chavanay) et numéro 17 (Villar Loubière). La figure 9.11 montre le profil latéral des q d'un jaugeage dégradé en comparaison avec le profil du jaugeage de référence de Chavanay (jaugeage numéro 2). L'intégration latérale des q , représentée par les aires colorées à la figure 9.11, donne le débit. On constate que le nombre réduit de verticales donne, dans ce cas de figure, une sous-estimation du débit de l'ordre de -11% par rapport au débit du jaugeage de référence.

En effet, les profils latéraux (que ce soit des vitesses, des profondeurs ou des profils unitaires) sont généralement de forme concave (c'est-à-dire bombée) alors que les méthodes de dépouillement (méthodes de la section médiane ou de la section moyenne) supposent que ces profils varient linéairement entre deux verticales adjacentes.

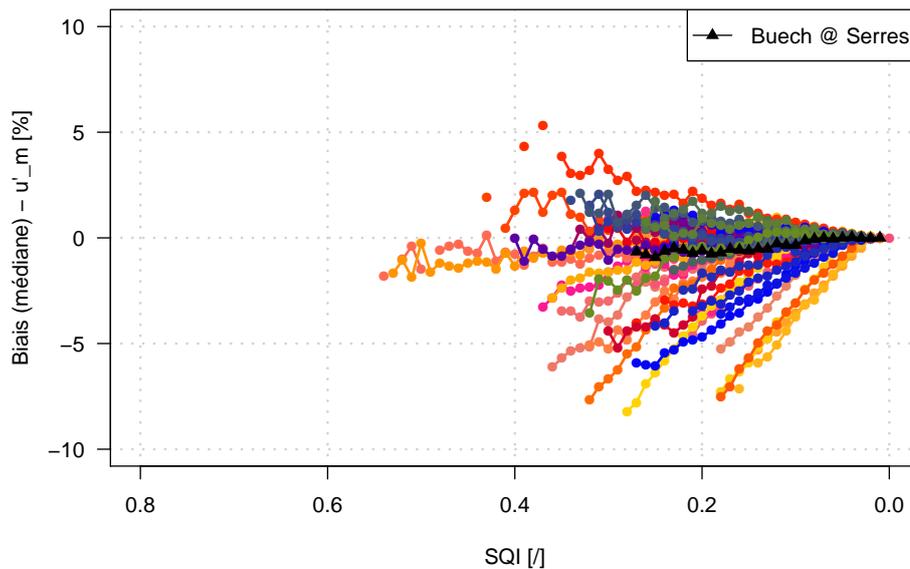


FIGURE 9.10 – Biais observé sur les jaugeages sous-échantillonnés (médiane calculée avec un seuil de 200 valeurs sur les écarts relatifs). Le jaugeage du Buech à Serres est représenté par des triangles noirs. A titre d'information, la couleur des courbes est fonction du jaugeage de référence (voir figure B.1 présentée en annexe B).

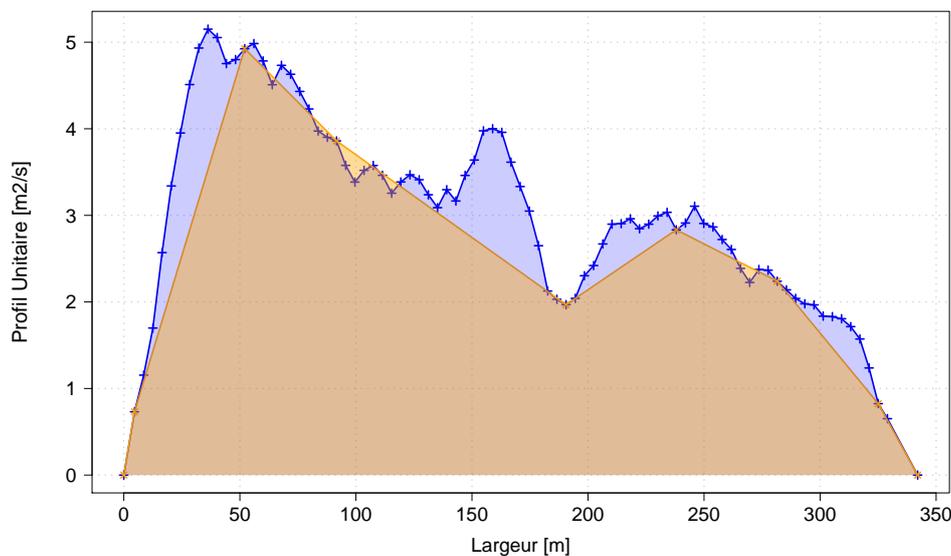


FIGURE 9.11 – Comparaison du profil latéral des q d'un jaugeage sous-échantillonné possédant 7 verticales avec les jaugeages de référence de Chavanay (indice numéro 2). Les aires colorées en bleu et en orange correspondent respectivement au débit du jaugeage de référence ($1010 \text{ [m}^3/\text{s}]$) et de son jaugeage sous-échantillonné ($898 \text{ [m}^3/\text{s}]$), soit un écart relatif de 11%.

L'application d'autres méthodes de sous-échantillonnage évoquées dans la section 8.2 ne permet pas de réduire le biais (voir l'annexe C).

On proposera une méthode permettant de corriger le biais d'un jaugeage quelconque en fonction du SQI à la section 10.1.3.

Modèles d'incertitude pour le calcul de u'_m

Le but de ce chapitre consiste à estimer l'incertitude u'_m d'un jaugeage quelconque à partir des résultats présentés dans le chapitre 9. Compte-tenu de la variabilité des courbes d'incertitude illustrée à la figure 9.9, on propose ci-dessous un premier modèle de calcul d'incertitude s'appuyant sur la comparaison de la typologie d'un jaugeage quelconque avec celle des jaugeages de la base de référence (section 10.1).

Un modèle moyen d'incertitude sera ensuite présenté, ainsi que ses avantages (section 10.2).

10.1 Modèle par typologie de jaugeage

Les jaugeages de référence, constituant notre base de données, sont caractérisés par des typologies différentes d'un site à l'autre en raison de la variabilité spatiale des écoulements et de la nature même du lit des cours d'eau étudiés. Les courbes d'incertitude présentées à la figure 9.9 illustrent bien une classification qui dépend de la complexité du jaugeage. Ainsi, les incertitudes les plus fortes sont obtenues avec des jaugeages dont les profils latéraux sont très irréguliers et caractérisés par une taille de rugosité relativement importante (la "macro" rugosité) par rapport à la hauteur d'eau dans la rivière. A l'inverse, on obtient, pour un même SQI , une incertitude plus faible pour un jaugeage réalisé dans un canal artificiel où la profondeur est plus grande et le fond relativement lisse.

On peut définir les typologies d'écoulement selon différents critères tels que le rapport largeur sur profondeur, l'asymétrie de l'écoulement ou la régularité des profils.

L'analyse des profils latéraux de vitesse et de profondeur peut mettre en évidence les conditions particulières de chaque site de jaugeage. Par exemple, un écoulement asymétrique (pour lequel le profil des vitesses n'est pas centré au milieu de la section) pourra laisser supposer l'existence d'un virage en amont ayant un effet sur la distribution des vitesses au sein de la section de jaugeage. La présence de rochers ou blocs induit également un impact marqué sur le profil latéral des vitesses. Ceux-ci peuvent réduire localement la vitesse dans leur sillage et augmenter la vitesse en périphérie. Lorsque la profondeur du cours d'eau est plus grande, l'influence de telles irrégularités est moindre car le rapport entre la hauteur des blocs et la profondeur de l'écoulement est plus faible.

On peut aussi utiliser des clés de classification, comme celles présentées par Malavoi et Souchon (2002) ou Rosgen (1994), pour caractériser certains faciès d'écoulement.

De même qu'il existe une classification en type de temps pour identifier des situations météorologiques (*e.g.* Garavaglia *et al.*, 2010), on propose d'utiliser une méthode d'analogie pour faire le lien entre une section de mesure (jaugeage quelconque appelé λ) et une situation

de référence (jaugeage de référence) pour laquelle l'incertitude a été évaluée.

Pour prendre en compte la typologie de la section de jaugeage, on cherche dans la base des jaugeages de référence, les jaugeages plus similaires (ci-après les "analogues") au jaugeage lambda considéré.

Les jaugeages de référence analogues sont sélectionnés en utilisant un critère d'analogie, noté C_i , détaillé à la section 10.1.1, et l'incertitude u'_m est calculée selon l'équation 10.1, comme moyenne pondérée des incertitudes des jaugeages analogues, les poids étant égaux aux critères d'analogie.

$$u'_m = \frac{\sum_{i=1}^A C_i u'_{m,i}}{\sum_{i=1}^A C_i} \quad (10.1)$$

où C_i désigne le critère d'analogie calculé pour le jaugeage i et A le nombre de jaugeages analogues retenus.

Lorsque que le jaugeage lambda ne possède pas de jaugeages analogues, la situation la plus défavorable, donnant l'incertitude la plus forte, est retenue. En partant de l'hypothèse que le jeu de jaugeages de référence est suffisamment grand pour bien représenter la variété des sections de mesure qu'il est possible de rencontrer, on peut raisonnablement penser qu'un jaugeage sans analogue est très particulier et que sa typologie est probablement complexe justifiant la majoration de l'incertitude.

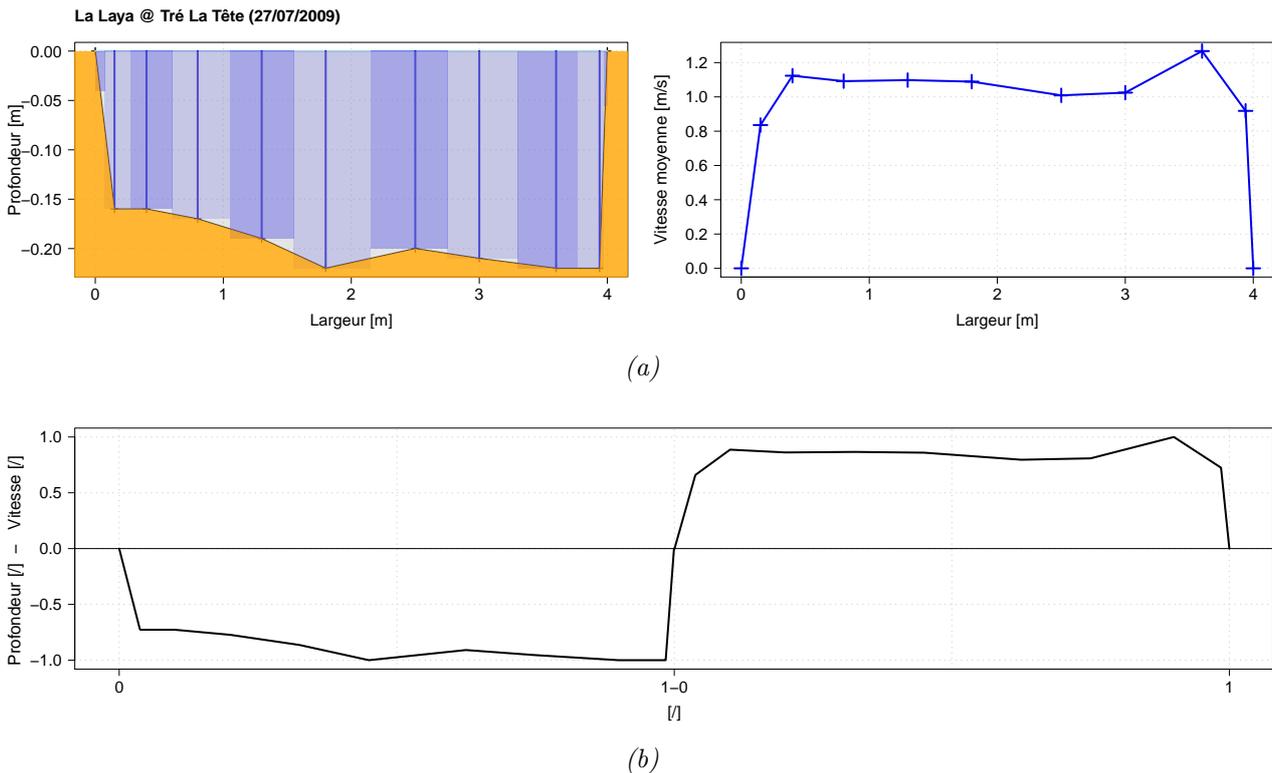


FIGURE 10.1 – Construction d'un signal adimensionné. (a) Profils latéraux de bathymétrie (à gauche) et des vitesses moyennes (à droite) du jaugeage de la Laya à Tré La Tête (27/07/2009). (b) Profils adimensionnés et concaténés.

Pour prendre en compte l'ensemble de l'information latérale contenue dans un jaugeage, on choisit de baser l'analogie sur les profils de vitesse et de bathymétrie. La figure 10.1a montre les profils latéraux de profondeur et de vitesse d'un jaugeage classique (jaugeage de la Laya à la station de Tré La Tête du 27/07/2009). Ces profils sont d'abord adimensionnés en divisant les

abscisses par la largeur de la section, les profondeurs par la profondeur maximale et les vitesses moyennes par la vitesse moyenne. Ceci permet de mettre en évidence l'importance relative des irrégularités dans les profils. Ces derniers sont enfin concaténés pour produire le signal illustré à la figure 10.1b.

Ce signal est comparé à ceux des jaugeages de référence en utilisant un critère d'analogie (section 10.1.1). On analyse les profils selon deux sens possibles à savoir de la rive droite vers la rive gauche et de la rive gauche vers la rive droite puisque le choix du zéro en abscisse reste arbitraire.

10.1.1 Choix du critère d'analogie

Afin de choisir le critère d'analogie, différents critères couramment utilisés en hydrologie ont été testés, à savoir :

- Les critères de corrélation statistique, à savoir le coefficient de corrélation linéaire classique de Pearson (Pearson et Hartley, 1958) et le coefficient de corrélation des rangs de Spearman, variant tous deux de -1 à 1.
- Le critère de Nash ou NSE (Nash et Sutcliffe, 1970) variant de $-\infty$ à 1. Il s'exprime comme :

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{x=0}^1 (ref - jau)^2}{\sum_{x=0}^1 (ref - \overline{ref})^2} \quad (10.2)$$

où ref et jau représentent les signaux adimensionnés du jaugeage de référence et du jaugeage considéré. x désigne l'abscisse du signal adimensionné (voir figure 10.1b). \overline{ref} désigne la moyenne du signal du jaugeage de référence.

- Le critère KGE (Gupta *et al.*, 2009) compris entre $-\infty$ et 1, s'exprimant selon l'équation 10.3.

$$KGE = 1 - \sqrt{(r - 1)^2 + (\alpha - 1)^2 + (\beta - 1)^2} \quad (10.3)$$

avec r , α et β désignant respectivement le coefficient de corrélation, le quotient des écarts-types et le quotient des moyennes entre les signaux du jaugeage considéré et du jaugeage de référence tels que

$$r = \frac{\sigma_{ref-jau}}{\sigma_{ref}\sigma_{jau}}, \quad \alpha = \frac{\sigma_{jau}}{\sigma_{ref}} \quad \text{et} \quad \beta = \frac{\mu_{jau}}{\mu_{ref}} \quad (10.4)$$

où $\sigma_{ref-jau}$ est la covariance entre les signaux du jaugeage considéré et le jaugeage de référence. σ_{jau} et σ_{ref} désignent les écarts-types du jaugeage et du jaugeage de référence; μ_{jau} et μ_{ref} leurs moyennes respectives. Le coefficient de corrélation r permet de mesurer la similitude latérale des profils. L'amplitude des oscillations des variations latérales des profils bathymétrique et des vitesses moyennes est évaluée à l'aide du quotient des écarts-types α . Enfin, le quotient des moyennes β permet de quantifier le biais global entre les deux signaux.

- Le critère du VE (pour *Volumetric Efficiency*) décrivant le rapport entre les intégrales des courbes du jaugeage quelconque et du jaugeage théorique.

On remarque que les critères de Nash et KGE peuvent prendre des valeurs négatives traduisant une très mauvaise corrélation.

Afin de choisir le meilleur critère d'analogie, la robustesse de chacun des critères a été évaluée en se basant sur l'ensemble des jaugeages sous-échantillonnés générés par la méthode exposée

au chapitre 8. Pour chaque jaugeage sous-échantillonné, on recherche, dans la base des jaugeages de référence, les jaugeages les plus similaires. Le principe sous-jacent est qu'un jaugeage sous-échantillonné doit avoir une analogie très forte avec le jaugeage de référence initial dont il est issu.

Pour chaque critère d'analogie, on calcule un taux de réussite, défini comme le rapport entre le nombre de fois où le jaugeage de référence initial a été sélectionné et le nombre de jaugeages sous-échantillonnés (donc 1000 jaugeages pour un nombre fixé de verticales). Un critère d'analogie sera donc d'autant plus robuste qu'il donnera un taux de réussite élevé même pour un faible nombre de verticales.

Le graphique 10.2a montre l'évolution du taux de réussite, exprimé en [%], en fonction du nombre de verticales, pour des critères d'analogie différents pour le jaugeage des Chambons.

Le taux de réussite maximal, proche de 100%, est atteint en utilisant le critère de Nash pour un nombre de 6 verticales. Le second critère est celui du KGE. Les autres indices ne donnent pas des taux de réussite satisfaisants. Cette étude montre ainsi que le critère de Nash permet d'obtenir un taux de réussite élevé, même pour un nombre limité de verticales. De plus, lorsque le taux de réussite de 100% n'est pas atteint, le jaugeage de référence est généralement choisi comme analogue en deuxième ou troisième position. Lorsque l'on cumule les taux de réussite des quatre premiers jaugeages analogues, comme illustré à la figure 10.2b, le critère de Nash ressort comme le meilleur critère d'analogie.

Le graphique 10.2c montre le taux de réussite médian, ainsi que le quantile 2,5%, en fonction du nombre de verticales sur l'ensemble des jaugeages sous-échantillonnés issus des 53 jaugeages de référence, pour les différents critères d'analogie étudiés. Les quantiles empiriques 2,5% des taux de réussite montrent également que le critère de Nash est nettement le plus robuste (figure 10.2c). On retient donc, dans la suite de cette étude, le critère de Nash qui a l'avantage d'être à la fois suffisamment simple et robuste.

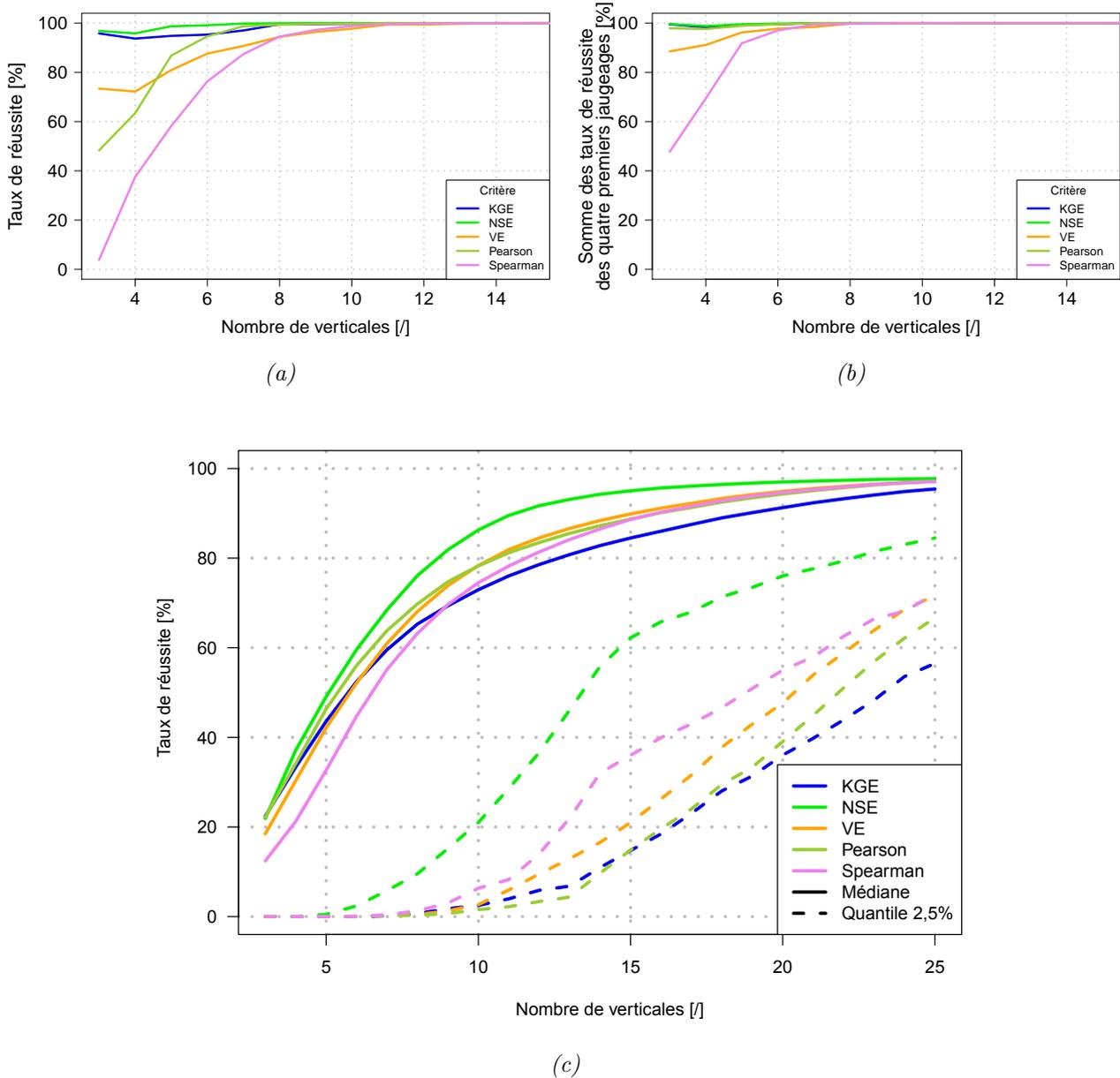


FIGURE 10.2 – Robustesse des différents critères d’analogie quant à la dégradation d’un jaugage de référence. Taux de réussite en fonction du nombre de verticales pour le jaugage des Chambons, d’indice 8, (a), somme des taux de réussite calculés sur les quatre premiers jaugages analogues (b) et taux de réussite médian pour l’ensemble des jaugages de référence (c). Les traits pleins représentent les courbes médianes et les pointillés, les quantiles empiriques à 2,5%.

10.1.2 Calibration du nombre d'analogues

La diversité des sections de mesure est telle qu'il est difficile de faire l'hypothèse qu'un jaugeage lambda ressemble à 100% à un jaugeage de référence. On choisit donc d'affecter l'incertitude u'_m à un jaugeage lambda en fonction des courbes issues de plusieurs jaugeages de référence. A l'inverse, le choix d'un nombre de jaugeages analogues trop important tendrait à utiliser un modèle lissé sans que l'information sur la complexité de la section ne soit prise en compte. D'autre part, des jaugeages non similaires (avec un score d'analogie médiocre) seraient retenus.

Une manière d'objectiver le choix du nombre d'analogues repose sur une méthode de validation croisée. Celle-ci consiste à comparer la courbe d'incertitude (fonction du critère SQI) d'un jaugeage de référence, notée $u'_{m,ref.}$ issue de la figure 9.9, avec la courbe construite à partir des autres jaugeages de référence (le jaugeage de référence d'intérêt est donc exclu), notée $u'_{m,const., A}$, avec $A = 1, \dots, 53 - 1$, le nombre de jaugeages analogues retenus. Pour cela, l'ensemble des jaugeages sous-échantillonnés, issus du jaugeage de référence considéré, sont utilisés. Pour chaque jaugeage sous-échantillonné, l'incertitude $u'_{m,j,k,A}$ (où $k = 1, \dots, 1000$ indique l'indice du tirage et j le nombre de verticales) est estimée selon l'équation 10.1 pour différents nombres A de jaugeages analogues, en rappelant que le jaugeage de référence étudié est retiré du jeu de jaugeages de référence.

On obtient ainsi le nuage de points des incertitudes estimées, $u'_{m,j,k,A}$ en fonction du SQI , illustré à la figure 10.3a pour l'ensemble des jaugeages sous échantillonnés du jaugeage du Furon à Sassenage (jaugeage numéro 12 du tableau 7.1) pour 5 analogues retenus ($A = 5$). Une courbe médiane est ajustée sur le nuage de points pour constituer $u'_{m,const., 5}$. Celle-ci est illustrée par la courbe rouge à la figure 10.3a.

La courbe construite est ensuite comparée à la courbe du jaugeage de référence $u'_{m,ref.}$ en calculant la racine carré de l'erreur quadratique moyenne (*Root Mean Square Error, RMSE*) selon l'équation 10.5.

$$RMSE(A) = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (u'_{m,i,const.,A} - u'_{m,ref.})^2} \quad (10.5)$$

où N désigne la taille du vecteur $u'_{m,ref.}$.

Par exemple, dans le cas du Furon à Sassenage, on obtient $RMSE_{A=5} = 0,93$.

Cette méthode a été répétée pour un nombre d'analogues variant de $A = 1$ à $A = 20$. Les scores de $RMSE$ obtenus sont tracés en fonction du nombre de jaugeages analogues A , sur la figure 10.3b, pour le jaugeage du Furon. On observe que la valeur minimale du $RMSE$ est atteinte pour $A = 3$. L'écart entre les courbes construites et de référence est donc minimisé pour $A = 3$ jaugeages analogues. Pour ce jaugeage, le nombre optimal de jaugeages analogues est de 3.

Cette démarche a été appliquée pour les 53 jaugeages de référence. La distribution du nombre optimal de jaugeages analogues est représentée sous forme d'histogramme à la figure 10.3c.

On observe que le nombre optimal de jaugeages dépend du jaugeage de référence considéré. Pour les courbes d'incertitudes les plus basses, issues des jaugeages les plus lisses, on remarque que plus le nombre d'analogues augmente et plus on tend vers un modèle moyen, s'éloignant ainsi du jaugeage de référence. Dans ce cas de figure, le nombre optimal de jaugeages analogues

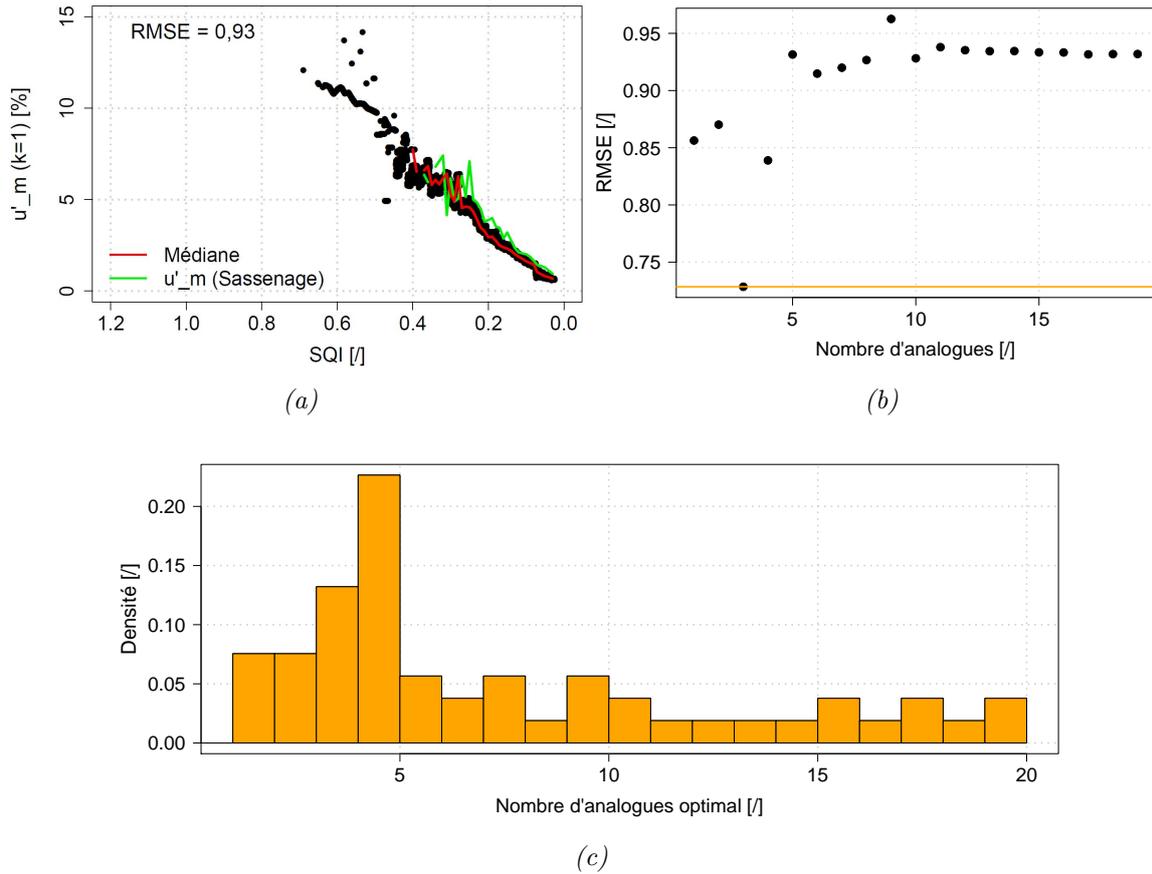


FIGURE 10.3 – (a) $u'_{m,j,k,A}$ en fonction du SQI pour l'ensemble des jaugeages sous échantillonnés du jaugeage du Furon à Sassenage (jaugeage numéro 12) pour 5 analogues retenus ($A = 5$). La courbe rouge représente la médiane (soit $u'_{m,const., 5}$) et la courbe verte, la courbe du jaugeage de référence $u'_{m,ref.}$. (b) Variation du score de $RMSE$, estimé selon l'équation 10.5, en fonction du nombre de jaugeages analogues retenus pour le jaugeage de référence du Furon à Sassenage. (c) Histogramme du nombre optimal d'analogues sur la base des 53 jaugeages de référence.

est faible. Le nombre médian optimal de jaugeages analogues, sur l'ensemble des jaugeages de référence est égal à 4. Cette valeur sera retenue dans la suite de l'étude (la section 12.1 présente une analyse de sensibilité à cette valeur).

La démarche par typologie proposée permet de prendre en compte à la fois la qualité de l'échantillonnage via le SQI et la complexité globale de la section de jaugeage par le choix de jaugeages analogues.

Ce second point implique la constitution d'un jeu de jaugeages de référence suffisamment conséquent pour représenter la variété des sections de jaugeages possiblement rencontrées. Les résultats en termes d'incertitude sont susceptibles de varier en fonction du jeu de jaugeages de référence.

10.1.3 Correction du biais

Les résultats des sous-échantillonnages montrent (section 9.3) que le biais dépend de la forme de la section de jaugeage. Ce biais, noté B , représente l'écart entre le débit vrai, noté Q_{vrai} (approché ici par Q_m , la valeur de débit du jaugeage de référence), et le débit estimé $Q_{estimé}$. Le biais est estimé pour chaque jaugeage de référence comme la médiane des erreurs

relatives en fonction du SQI . En reprenant l'équation 9.1, il s'exprime en pourcentage selon l'équation 10.6.

$$B = p \left(\frac{Q_{\text{estimé}} - Q_{\text{vrai}}}{Q_{\text{vrai}}} \right)_{50\%} \quad (10.6)$$

où $p_{50\%}$ désigne la médiane.

Ce biais peut être dû à la méthode de sous-échantillonnage, c'est-à-dire que celle-ci produirait des jaugeages systématiquement biaisés ou alors simplement du fait d'un manque de verticales explorées. En faisant l'hypothèse que le biais est principalement dû à la réduction du nombre de verticales, indépendamment de la méthode de sous-échantillonnage, il est possible de le corriger comme suit :

$$Q_{\text{vrai}} = \frac{Q_{\text{estimé}}}{1 + B} \quad (10.7)$$

où B est le biais, exprimé en pourcentage.

De la même manière que pour le calcul d'incertitude (section 10.1, équation 10.1), le biais d'un jaugeage lambda peut être calculé comme la moyenne pondérée des biais de chaque jaugeage analogue. Ce biais s'exprime comme :

$$biais = \frac{\sum_{i=1}^A C_i \text{biais}_i}{\sum_{i=1}^A C_i} \quad (10.8)$$

Le biais a été calculé selon l'équation 10.8 sur l'ensemble des 3930 jaugeages de la base de données EDF-DTG. Les figures 10.4a et 10.4b montrent respectivement, sous forme de boîtes à moustaches, les valeurs de biais et de facteur correctif, défini comme le rapport entre le débit vrai Q_{vrai} et le débit estimé $Q_{\text{estimé}}$, estimés sur les 3930 jaugeages. On constate que le biais estimé est relativement faible. Le biais médian vaut $-0,12\%$ et la distribution du biais est asymétrique vers les valeurs négatives traduisant une tendance globale à la sous-estimation du débit. Le facteur correctif correspond au facteur, noté F_y , proposé par le *Hydrometric Uncertainty Guidance* (ISO, 2007c), dû à la discrétisation latérale des profils bathymétrique et des vitesses. Le biais estimé est relativement faible (au maximum 5%). On fait l'hypothèse qu'il peut être réduit par l'hydromètre, soit un facteur correctif proche de 1 (ISO, 2007c), et que l'incertitude qui en découle est incluse dans le terme u'_m .

Dans la suite et en l'absence d'étalon de référence, on considère que l'hydromètre est capable, grâce à sa connaissance de la section de mesure et du respect des procédures métier, d'éviter ce biais ou du moins de le réduire.

10.2 Modèle moyen d'incertitude

La variabilité des courbes d'incertitude, observée à la figure 9.9, constitue une limite de l'indicateur de qualité d'échantillonnage (SQI). Cette variabilité souligne le fait que le SQI ne permet pas, à lui seul, de caractériser la complexité de la section de jaugeage en raison d'un nombre limité de verticales. Cette limite a conduit au développement d'un modèle par typologie. Ce dernier est néanmoins limité. En effet, le calcul d'incertitude et la correction de biais proposés précédemment supposent que l'on dispose d'un jeu de jaugeages de référence suffisamment conséquent pour représenter la variabilité des sections de jaugeages dont on cherche à estimer l'incertitude et le biais. Il est à penser que l'ajout, ou le retrait de jaugeages de référence ayant des morphologies différentes conduirait à une modification de la valeur d'incertitude u'_m . Il serait bénéfique d'ajouter des jaugeages de référence représentatifs de typologies de rivière

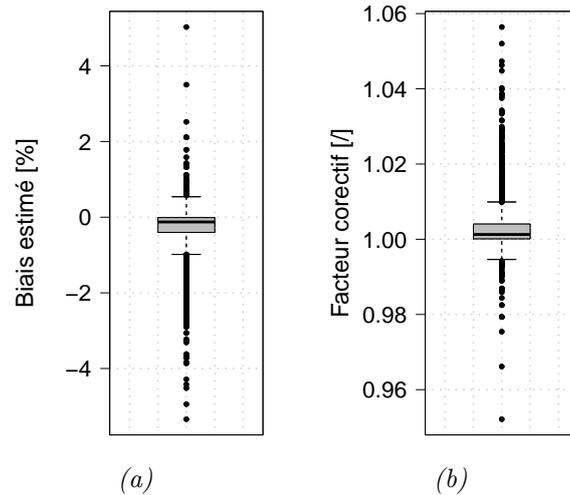


FIGURE 10.4 – (a) *Biais estimé selon l'équation 10.8 et (b) facteur correctif associé sur la base des 3930 jaugeages EDF-DTG.*

non rencontrées en France ou en Nouvelle-Zélande. Néanmoins, l'ajout d'un trop grand nombre de jaugeages pourrait conduire à des jaugeages trop similaires et il faudrait alors réaliser à nouveau une calibration du nombre de jaugeages analogues à retenir.

La sensibilité au nombre de jaugeages analogues à choisir constitue donc un inconvénient notable de l'approche par analogie, bien que le jeu de jaugeages de référence soit représentatif des jaugeages réalisés sur le périmètre du réseau hydrométrique d'EDF-DTG. La sensibilité du terme u'_m au nombre de jaugeages de référence sera étudiée dans le chapitre 12.

Pour s'affranchir de cette limitation et en se basant sur l'hypothèse que le SQI constitue l'unique variable explicative de l'incertitude latérale des profils de profondeur et de vitesse moyenne, on propose la construction d'un modèle global d'incertitude. Ce modèle global possède en outre l'avantage opérationnel d'être diffusable plus aisément.

On peut également justifier l'utilisation d'un modèle moyen d'incertitude par la faible variabilité des courbes de la figure 9.9 dans la gamme de SQI comprise entre 0 et 0,4, correspondant aux valeurs les plus fréquentes de SQI estimées sur les 3930 jaugeages EDF-DTG (voir figure 9.4).

Pour construire ce modèle, on utilise les écarts relatifs de tous les jaugeages sous-échantillonnés avec leur jaugeage de référence respectif. La méthodologie présentée au chapitre 9 est appliquée pour estimer le terme u'_m en prenant en compte l'incertitude résiduelle de chaque jaugeage de référence. Cette incertitude est ajoutée directement à l'erreur relative des jaugeages sous-échantillonnés. La figure 10.5 montre ainsi les erreurs relatives (augmentées de l'incertitude résiduelle de chaque jaugeage de référence) en fonction du SQI . Le calcul des quantiles empiriques 15, 50 et 85% permet d'estimer l'incertitude finale u'_m , selon l'équation 9.3, en fonction du SQI .

Le modèle moyen d'incertitude résultant est tracé sur la figure 10.6. Le grand nombre de données permet d'obtenir des résultats plus lissés par rapport aux courbes obtenues avec chacun des jaugeages de référence. Une gamme de SQI plus grande est également balayée du fait d'un nombre plus grand de valeurs (*cf.* seuil de 200 valeurs).

Les valeurs minimale et maximale du terme u'_m , au niveau de confiance de 68%, sont respectivement de 0,31% et 19% pour des valeurs de SQI élevées. En comparaison, les valeurs proposées par la norme ISO 748 varient seulement entre 1% et 7,5%. Cet écart peut s'expliquer

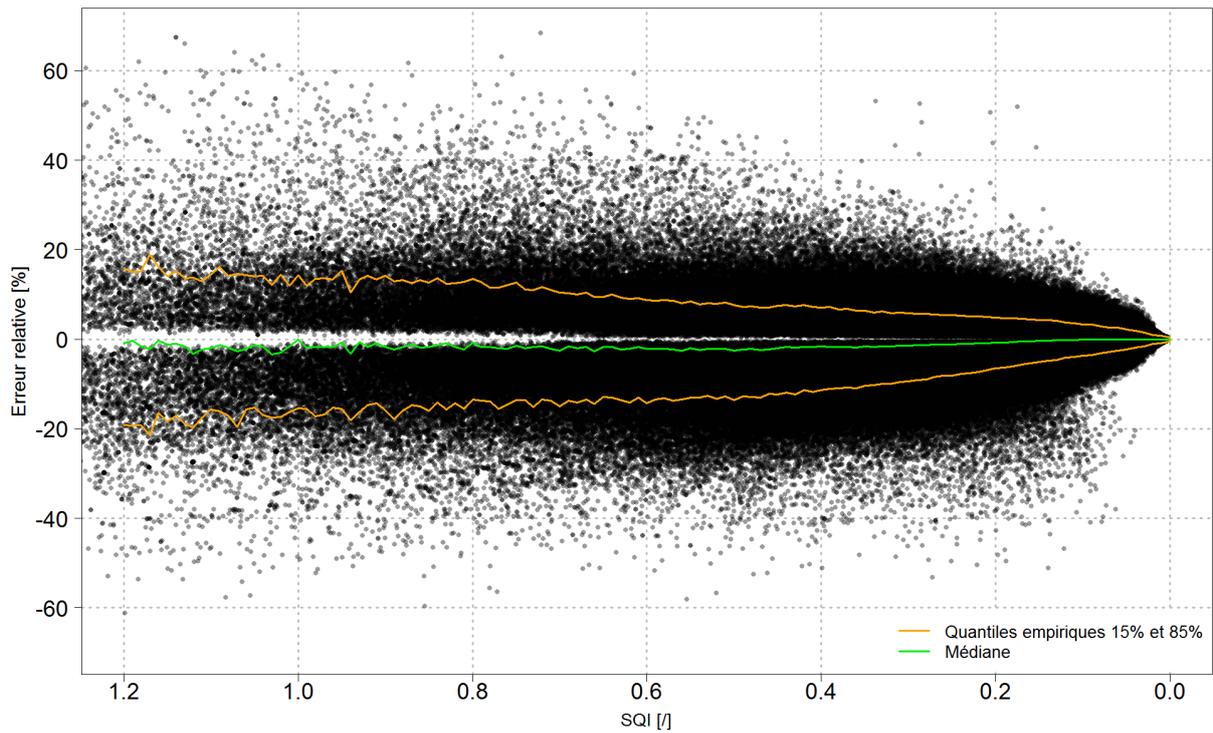


FIGURE 10.5 – Distribution des erreurs relatives en fonction du critère SQI pour l'ensemble des jaugeages sous-échantillonnés et quantiles empiriques 15 et 85% associés. La médiane est représentée en vert.

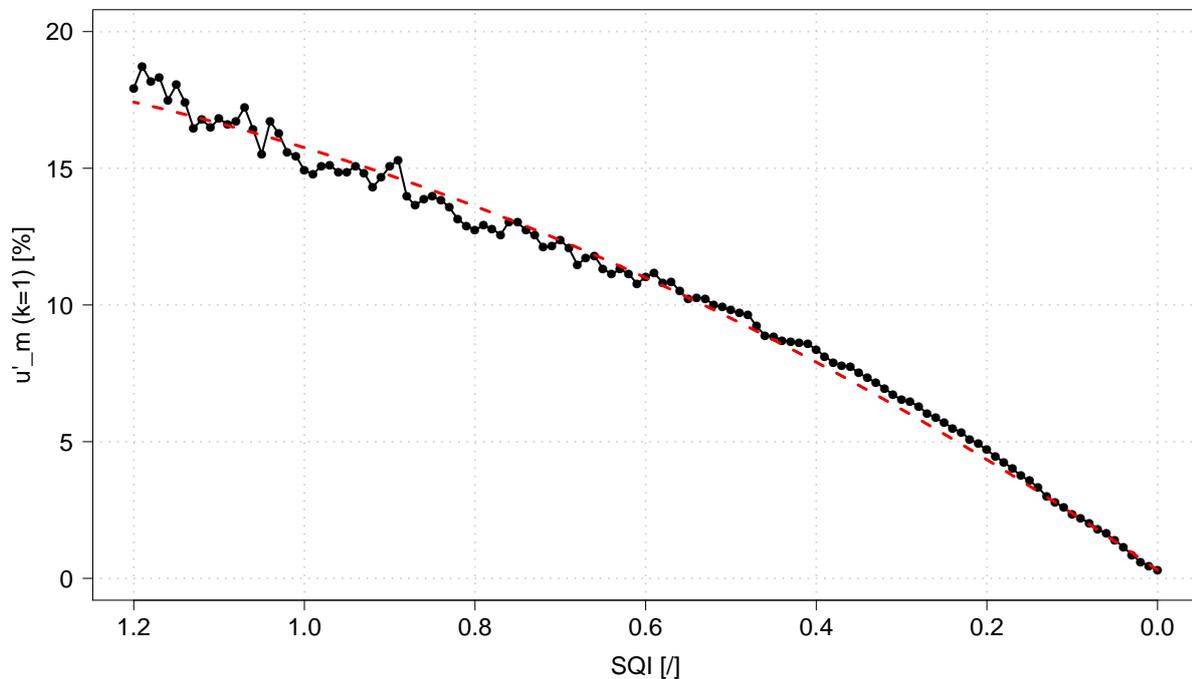


FIGURE 10.6 – Modèle moyen d'incertitude du terme u'_m en fonction du critère SQI , au niveau de confiance de 68% ($k = 1$). La courbe rouge représente l'ajustement d'un polynôme de degré 2 défini par l'équation 10.9.

par la faible variété des cours d'eau étudiés (Pelletier, 1988). Il faut néanmoins nuancer l'écart entre les deux estimations puisque les valeurs usuelles de SQI calculées sur des jaugeages de routine, illustrées à la figure 9.4 montrent que l'erreur associée est plus faible.

Pour faciliter l'estimation de ce terme, un polynôme de degré 2, défini par l'équation 10.9, a été ajusté et peut être utilisé.

$$u'_m = -5,94SQI^2 + 21,39SQI + 0,3 \quad (10.9)$$

10.3 Décomposition des sources d'incertitude

Le terme d'incertitude u'_m quantifie à la fois l'erreur due à l'intégration du profil bathymétrique et l'erreur due à l'intégration du profil latéral des vitesses. Certains auteurs (Muste *et al.*, 2012; Le Coz *et al.*, 2012a) préconisent de décomposer ce terme d'incertitude respectivement en $u'_m(D_i)$ pour l'erreur sur l'intégration de la bathymétrie et en $u'_m(V_i)$ pour l'erreur sur l'intégration latérale des vitesses moyennes. L'intérêt d'une telle décomposition permet de quantifier la contribution de chaque terme à l'incertitude totale. Ainsi, on peut identifier pour un jaugeage donné, si l'incertitude due à un manque de verticales vient majoritairement de l'exploration du fond (la bathymétrie) ou bien de la mesure de la distribution latérale des vitesses.

On adopte ici la même démarche que celle présentée pour l'estimation du terme u'_m . L'indice d'échantillonnage est calculé sur les grandeurs D et V à la place de q dans l'équation 9.4. On obtient respectivement les équations 10.10 et 10.11.

$$SQI(D) = \frac{\sigma(\Delta D)}{\sigma(D)} \frac{\sum_{i=1}^{m+1} (\Delta x_i \Delta D_i)}{A} \quad (10.10)$$

où $\Delta D_i = |D_{i-1} - D_i|$ et A désigne l'aire de la section mouillée.

$$SQI(V) = \frac{\sigma(\Delta V)}{\sigma(V)} \frac{\sum_{i=1}^{m+1} (\Delta x_i \Delta V_i)}{V_{\text{int}}} \quad (10.11)$$

où $\Delta V_i = |V_{i-1} - V_i|$ et V_{int} représente le résultat de l'intégration latérale du profil des vitesses, soit l'aire sous la courbe $V_i = f(x)$.

Pour les 53 jaugeages de référence, les courbes d'incertitude $u'_m(D_i) = f[SQI(D)]$ et $u'_m(V_i) = f[SQI(V)]$ sont tracées respectivement sur les figures 10.7a et 10.7b.

Les erreurs relatives, respectivement en termes d'aire et de vitesse débitante, en fonction de l'indice d'échantillonnage SQI appliqué à la profondeur et à la vitesse moyenne sont représentées sur les figures 10.7c et 10.7d, en prenant en compte les incertitudes résiduelles estimées respectivement par les équations 9.7 et 9.8. Un modèle moyen est ensuite calé sur l'ensemble des jaugeages sous-échantillonnés par l'estimation des quantiles empiriques 15 et 85%, comme illustré sur les figures 10.7c et 10.7d. Les figures 10.7e et 10.7f représentent enfin les modèles moyens d'incertitude $u'_m(D_i) = f[SQI(D)]$ et $u'_m(V_i) = f[SQI(V)]$.

Les valeurs d'incertitude $u'_m(V)$ atteignent 21% contre 15% pour le terme $u'_m(D_i)$. On observe que le biais sur l'estimation de l'aire mouillée de la section de jaugeage peut atteindre 10% pour $SQI(D) = 0,8$.

On observe que les courbes des modèles moyens d'incertitude $u'_m(D_i) = f(SQI(D))$ (figure 10.7e) et $u'_m(V_i) = f(SQI(V))$ (figure 10.7f) sont irrégulières lorsque les valeurs de $SQI(D)$ ou $SQI(V)$ augmentent. Ceci ne semble pas problématique au regard des valeurs de $SQI(D)$ et de $SQI(V)$ calculées sur les 3930 jaugeages de la base de données EDF-DTG, illustrées respectivement à la figure 10.8a et à la figure 10.8b. On observe d'ailleurs que les valeurs prises par $SQI(D)$ sont plus élevées que les valeurs de $SQI(V)$. Ceci s'explique par le fait que le profil latéral des vitesses moyennes est généralement plus lissé que le profil bathymétrique, d'où la probabilité d'une erreur sur l'intégration latérale des vitesses plus faible que sur l'aire de la section mouillée.

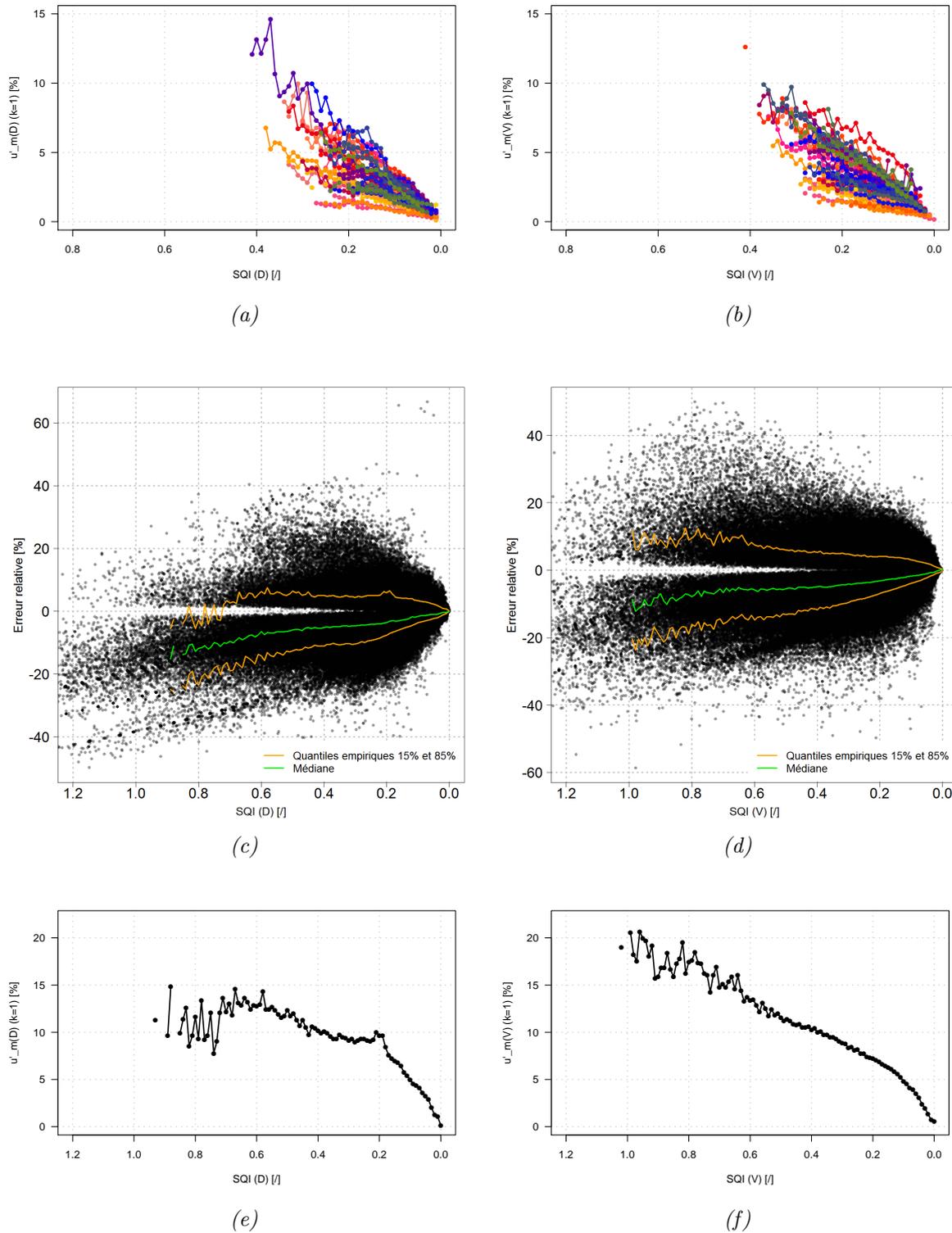


FIGURE 10.7 – Décomposition des termes d'incertitude $u'_m(D_i) = f[SQI(D)]$ et $u'_m(V_i) = f[SQI(V)]$. Courbes d'incertitude $u'_m(D_i) = f[SQI(D)]$ (a) et $u'_m(V_i) = f[SQI(V)]$ (b) pour les 53 jaugeages de référence. Erreurs relatives en termes d'aire en fonction de $SQI(D)$ (c) et en termes de vitesse débitante comme fonction de $SQI(V)$ (d). Les courbes vertes représentent les quantiles empiriques 15% et 85%. La courbe orange représente la médiane comme estimation du biais. Modèles moyens d'incertitude $u'_m(D_i) = f[SQI(D)]$ (e) et $u'_m(V_i) = f[SQI(V)]$ (f).

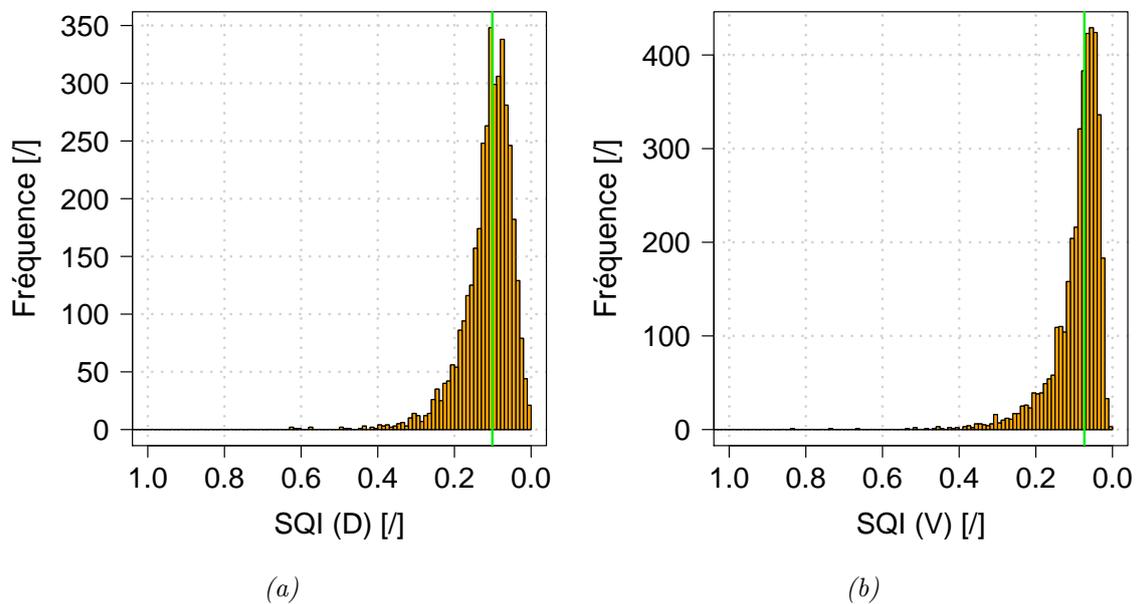


FIGURE 10.8 – Histogramme des $SQI(D)$ (a) et $SQI(V)$ (b) calculés sur les 3930 jaugages de la base de données EDF-DTG. La ligne verticale verte représente la valeur médiane. Il est à noter que l'axe des abscisses est décroissant.

Ce chapitre critique certaines valeurs d'incertitudes, issues de la norme ISO 748, couramment utilisées et propose, le cas échéant, des nouvelles estimations d'incertitude. Il s'agit notamment de proposer des valeurs d'incertitudes adaptées aux matériels utilisés par EDF-DTG, des commentaires et une méthodologie qui puisse être transposable par tout organisme.

11.1 Erreur sur les mesures de largeur

Les valeurs d'incertitude associées à la largeur des sous-sections proposées dans la littérature sont faibles, 0,5%, au niveau de confiance de 68%, selon Herschy (2002) et ISO (2009), au regard des écarts observés par Dramais *et al.* (2011) au cours d'essais interlaboratoires, de l'ordre de 5% à 6%, sur des cours d'eau de petite taille.

A nouveau, l'estimation des valeurs issues de la norme ISO 748 semble appropriée dans des bonnes conditions de déploiement et pour des cours d'eau de grande taille. L'utilisation de décimètres peut affecter la précision de la mesure de largeur du cours d'eau en raison de l'effet de flèche et de la localisation parfois approximative des berges en raison du batillage. Au regard de la largeur des cours d'eau jaugés à EDF-DTG, on retiendra une valeur de 2,5% (au niveau de confiance de 68%) pour l'estimation de ce terme, bien que cette estimation mérite une quantification plus précise et adaptée au type de support utilisé.

11.2 Erreur sur la vitesse moyenne

11.2.1 Incertitude due à l'utilisation des formules algébriques

L'utilisation des formules algébriques, présentées en section 5.1.3, pour l'estimation de la vitesse moyenne sur une verticale est plutôt rare pour les jaugeages réalisés à EDF-DTG mais très courante au sein d'autres organismes comme les DREAL, l'ONEMA et la plupart des organismes anglo-saxons. L'utilisation de cette méthode suppose l'hypothèse d'un profil parabolique et d'un écoulement uniforme. Dans le cas contraire, on rappelle qu'un coefficient correctif doit être appliqué. L'application systématique de ces méthodes par certains organismes suppose que toutes les sections de jaugeage suivent cette hypothèse, ce qui semble optimiste au regard des sections jaugées par EDF-DTG en France. On peut donc penser que les valeurs du terme $u'_p(V_i)$ suggérées par la norme ISO 748, rappelées dans le tableau 5.2, sont sous-estimées.

En utilisant l'ensemble des profils verticaux de vitesse de la base de données EDF-DTG, une première étude simple a été menée pour estimer les écarts en vitesse moyenne V_i entre l'utili-

sation de formules algébriques (avec 1, 2 ou 3 points) et l'intégration classique par distribution des points. Pour cela, des profils de vitesse réalisés avec un grand nombre de points ont été retenus. Les vitesses ont ensuite été interpolées à 20, 60 et 80% de la profondeur sous la surface de l'eau afin d'appliquer les formules algébriques normalisées (équations 5.3, 5.4 et 5.5).

La figure 11.1a montre une mesure d'un profil vertical des vitesses à 9 points à la station hydrométrique de Voiron, soit à tous les 10% de la hauteur d'eau. Le profil mesuré des vitesses en fonction de la profondeur sous la surface de l'eau est représenté par la figure 11.1b. Le profil mesuré est représenté en bleu et les vitesses utilisées pour l'application des formules algébriques apparaissent en vert.

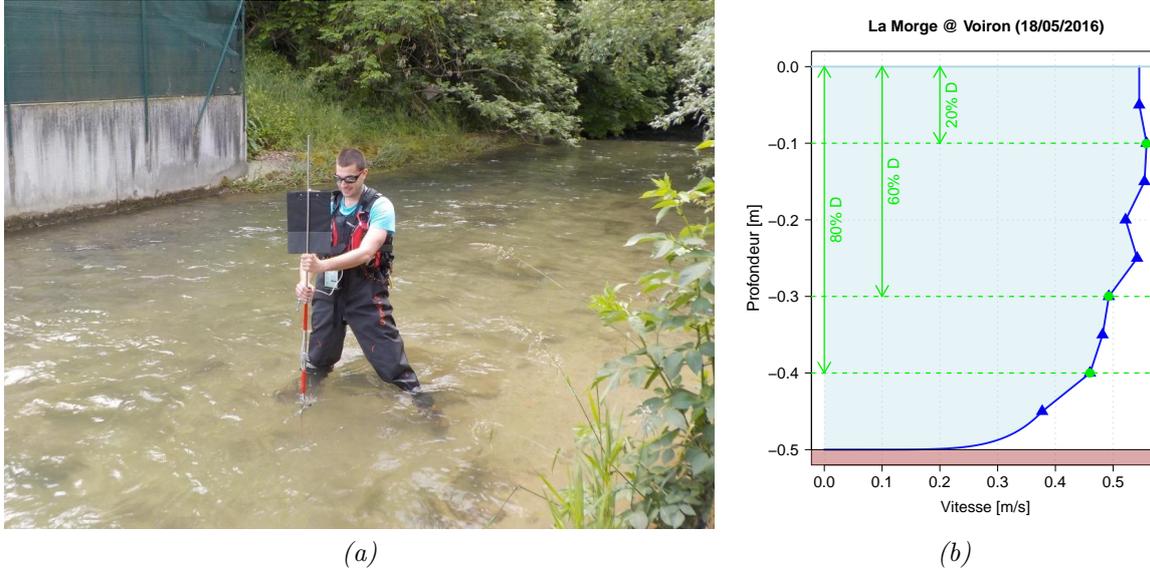


FIGURE 11.1 – Mesure d'un profil vertical des vitesses au moulinet. Photographie du site (a) et profil associé (b). Les triangles bleus correspondent aux vitesses mesurées et les points verts correspondent aux vitesses utilisées pour l'application des méthodes algébriques.

L'écart relatif entre les vitesses moyennes estimées par les deux méthodes de calcul est ensuite calculé par l'équation 11.1 pour chacun des profils retenus.

$$E(V_i) = \frac{V_{i,\text{alg.}} - V_{i,\text{dist.}}}{V_{i,\text{dist.}}} \quad (11.1)$$

avec $V_{i,\text{alg.}}$ et $V_{i,\text{dist.}}$, la vitesse moyenne du profil vertical i estimée respectivement par l'application de formule algébrique et la méthode de distribution des points, considérée ici comme référence.

L'écart-type empirique est ensuite calculé sur l'ensemble des $E(V_i)$ afin d'estimer l'incertitude du terme $u'_p(V_i)$, sous l'hypothèse d'une distribution gaussienne des erreurs, pour les trois méthodes algébriques testées. Les résultats sont reportés dans le tableau 11.1 pour les trois méthodes et en fonction du nombre de points des profils verticaux de vitesse retenus.

On remarque que, pour les trois méthodes, l'incertitude estimée croît lorsque des profils à grand nombre de points sont retenus. Cette forte variabilité est en réalité due à la complexité croissante des profils verticaux de vitesse. L'utilisation d'un grand nombre de points se justifie par l'irrégularité du profil. L'hydromètre adapte en effet l'échantillonnage des vitesses afin de bien décrire le profil. Ces mesures illustrent malgré tout la complexité réelle de profils verticaux de vitesse que l'on peut rencontrer sur les sections des stations hydrométriques d'EDF-DTG, présentant des sections plutôt étroites, de l'ordre de 10 [m].

TABLE 11.1 – Estimation du terme $u'_p V_i$ (au niveau de confiance de 68%) par le calcul de l'écart-type à partir de profils verticaux de vitesses à plus de 6, 7 et 8 points de mesure et valeurs proposées par la norme ISO 748.

Formule à	$u'_p(V_i)$ - au niveau de confiance de 68%			Valeurs ISO 748
	Écart-type des écarts estimé sur des verticales à plus de ...			
	6 points	7 points	8 points	
1 point	8,7%	11,5%	14,2%	7,5%
2 points	7,5%	8,4%	9,3%	3,5%
3 points	7,3%	9,1%	11,7%	3%
Nb de profils	6312	1179	229	

Les valeurs proposées par la norme ISO 748 sont nettement inférieures à celles calculées. La méthode d'estimation reste toutefois limitée dans la mesure où une part non négligeable des profils utilisés sont très irréguliers et que l'estimation de la vitesse par les méthodes algébriques passe ici par une interpolation linéaire des vitesses ponctuelles.

On constate de faibles écarts en termes d'incertitude, y compris selon la norme ISO 748, entre l'utilisation de formules algébriques à 2 ou 3 points. La méthode à 3 points donne des incertitudes légèrement supérieures à la méthode à 2 points.

Parmi les profils à plus de 8 points, une analyse visuelle a ensuite permis l'exclusion des profils les plus atypiques. Pour limiter le poids de l'interpolation linéaire des profils de vitesse, seuls les profils dont la position des points de mesure en hauteur coïncide avec la position normalisée des méthodes algébriques ont été retenus. Ainsi, 100, 90 et 53 profils verticaux, issus de 26 sites de mesures d'EDF-DTG, ont été retenus pour appliquer respectivement les méthodes algébriques à 1, 2 et 3 points. En complément, des profils verticaux de vitesses à 9 points ont été réalisés spécifiquement sur 5 sites. Le calcul des écarts-types empiriques sur cette base de données conduit aux résultats suivants :

TABLE 11.2 – Estimation du terme $u'_p V_i$ (au niveau de confiance de 68%) par le calcul de l'écart type à partir de profils verticaux expertisés.

Formule	Ecart-type	Nb de profils
1 point	16%	100
2 points	5,8%	90
3 points	6,7%	53

Les résultats donnent une incertitude plus élevée pour la méthode à 1 point tandis que les incertitudes estimées pour les méthodes à 2 et 3 points sont réduites par rapport aux valeurs exposées dans le tableau 11.1. On observe une incertitude plus élevée pour l'utilisation d'une formule à 3 points contre une formule à 2 points. Statistiquement, cet écart peut s'expliquer par un échantillon de profils relativement faible pour obtenir des valeurs d'écart-type robustes pour la formule à 3 points (53 profils), bien que des écarts similaires aient été observés dans le tableau 11.1 à partir de profils à plus de 7 points par verticale. D'un point de vue hydraulique, l'ajout d'un troisième point, dans une zone pour laquelle les gradients de vitesse ne sont pas élevés (voir pour rappel l'illustration d'un profil classique de vitesse sur la figure 1.5 en section 1.2.4), n'apporte que peu d'information sur la forme du profil vertical des vitesses. Selon des études citées par (Pelletier, 1988), la localisation de la vitesse moyenne sur le profil vertical, fixé à $0,6D$ sous la surface de l'eau selon les formules normalisées, varie en réalité entre $0,58D$ et $0,67D$, soit des écarts de 5 à 10% alors que l'application d'une formule à 2 points pour estimer la vitesse moyenne semble plus robuste (Barrows et Horton, 1907). L'étude de Barrows et Horton

(1907) recommande ainsi l'utilisation d'un protocole à 2 points, et c'est ce qui a été adopté au sein des organismes des Etats-Unis et du Canada (Pelletier, 1988). On précise à nouveau que ces résultats sont représentatifs des sites jaugés par EDF-DTG et que l'étude gagnerait en robustesse par l'ajout de nouveaux profils.

L'utilisation des valeurs proposées par la norme ISO 748 peut être justifiée si les profils verticaux de vitesses sont bien établis, si la section de mesure est suffisamment éloignée d'une singularité de l'écoulement et si la rugosité relative est faible. A défaut, si les profils s'écartent trop d'un profil théorique, l'utilisation des valeurs calculées ci-dessus est préconisée. Un ratio *Largeur/Profondeur* inférieur à 5 témoigne généralement de conditions de turbulence pour lesquelles les profils ne sont pas établis (Nezu *et al.*, 1985; Bonakdari *et al.*, 2008). Enfin, il est probable que cette source d'incertitude soit corrélée à l'incertitude induite par le choix de la section de mesure.

On note que l'équation 6.5 issue de la méthode $Q+$ est utilisée pour la quantification du terme $u_p^2(V_i)$ pour les jaugeages EDF-DTG puisque le protocole de mesure préconise l'utilisation d'au minimum 3 points de mesure par verticale.

11.2.2 Étalonnage du courantomètre

L'étalonnage des courantomètres se fait dans des canaux à eau calme d'une centaine de mètres de longueur (figure 11.2a). Le courantomètre est fixé sur un chariot qui se déplace à une vitesse de 0,02 à 10 [m/s] (figure 11.2b). Ce type de laboratoire est rare et les étalonnages sont coûteux. On dénombrait déjà à peine 8 laboratoires en Europe dans les années 60 (Perret, 1992), dont la plupart ne sont maintenant plus utilisés à cet effet. En Europe, l'institut fédéral de métrologie suisse (METAS) et le *Czech Calibration Station of Current Meters (CCSCM)* du *T. G. Masaryk Water Research Institute* semblent à ce jour les seuls organismes accrédités selon la norme ISO 17025 (COFRAC, 2015). Les constructeurs disposent également de canaux d'étalonnage et ne délivrent pas les données ayant servi à l'étalonnage ni l'incertitude associée.

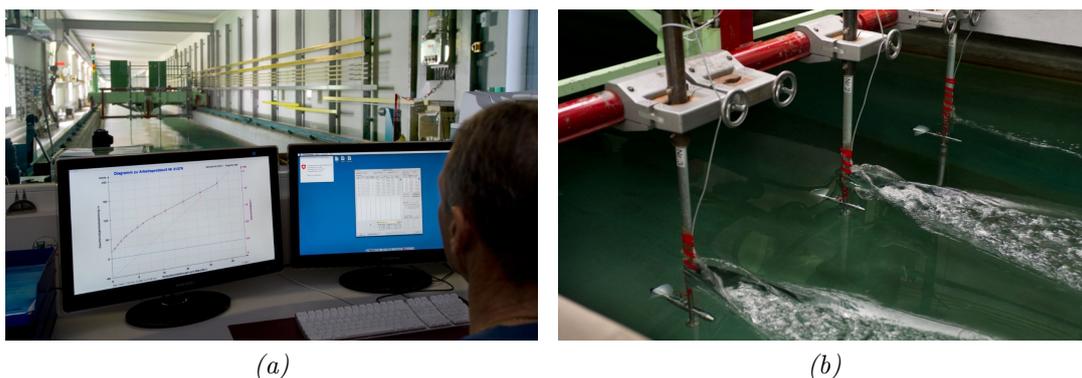


FIGURE 11.2 – (a) Canal d'étalonnage du METAS et (b) micro-moulinets en cours d'étalonnage. Source METAS.

Face aux coûts d'étalonnage des moulinets à hélice et afin de quantifier l'incertitude associée à l'étalonnage de ces derniers, EDF-DTG a réalisé un retour d'expérience (Slimani, 2014). Cette étude s'est basée sur des hélices C2 de type 1, 3 et 6 (figure 11.3a) montés sur micro-perche et C31 (figure 11.3b) sur perche profilée (diamètre 20 [cm]) et sur saumon.

Le retour d'expérience a porté sur les équations fournies à l'issue de chaque étalonnage (ayant lieu tous les 3 ans sur la période de 1998 à 2014) et pour chaque hélice. Le nombre



FIGURE 11.3 – (a) Hélices C2 de type 6, 3 et 1 (de gauche à droite) et (b) hélice C31 en bronze. Source Slimani (2014).

d'hélices ainsi que le nombre d'équations d'hélice issues des étalonnages sont renseignés dans le tableau 11.3 en fonction du type d'hélice.

TABLE 11.3 – Nombre d'hélices et d'équations d'hélice issues des étalonnages en fonction du type d'hélice.

Type d'hélice	Nombre d'hélices	Nombre d'équations d'étalonnage
C2-1	9	40
C2-3	11	54
C2-6	10	50
C31	17	48

Au vu de la faible variabilité entre les équations de chaque hélice prise individuellement et entre les équations d'un même type d'hélice (toutes les hélices C2 de type 1 par exemple) il a été montré qu'une équation par type d'hélice est suffisante.

La variabilité des équations d'étalonnage au sein d'une même population d'hélice (par exemple, 40 équations pour les hélices C2 de type 1) a ensuite permis d'estimer, par le calcul de l'écart-type, l'incertitude associée à l'utilisation d'une équation moyenne d'étalonnage. Une relation entre l'incertitude par rapport à la courbe moyenne et la vitesse estimée a été ajustée pour chaque type d'hélice. Les résultats d'incertitude, exprimés au niveau de confiance de 95%, sont consignés, pour chaque type d'hélice et en fonction de la gamme de vitesse mesurée, dans le tableau 11.4.

Les courbes d'incertitudes (au niveau de confiance de 68%) sont ensuite comparées aux valeurs de la norme ISO 748, issues des travaux de Herschy (1982), pour un étalonnage individuel ou groupé, sur la figure 11.4. Les valeurs d'incertitudes de l'ISO 748 sont proches des résultats de cette étude. On souligne que l'incertitude associée à l'hélice C2 de type 1 augmente pour des vitesses élevées puisque ce type d'hélice n'est adapté que pour des vitesses faibles à moyennes (inférieures à 1,5 [m/s]).

Les valeurs proposées par l'ISO 748 sont en adéquation avec les résultats de l'étude, néanmoins, ces valeurs seront retenues et utilisées par la suite puisqu'elles sont adaptées au matériel utilisé.

TABLE 11.4 – Incertitude u'_c (au niveau de confiance de 95%) pour différents types d'hélices en fonction de la gamme de vitesse mesurée.

Type d'hélice	Nombre de tours n [tr/s]	Vitesse v [m/s]	Incertitude u'_c à $k = 2$
			[%]
C2-1	$n < 2,1$	$v < 0,15$	$U = -156,53v^3 + 54,781v^2 - 6,5016v + 0,301$
	$2,1 \leq n < 4,6$	$0,15 \leq v < 0,29$	$U = 0,0469e^{-1,54v}$
	$4,6 \leq n < 8$	$0,29 \leq v < 0,48$	$U = 0,0084v^{-1,064}$
	$n \geq 8$	$v \geq 0,48$	$U = 0,0341v^2 - 0,0628v + 0,0412$
C2-3	$n < 1$	$v < 0,26$	$U = 0,0035v^{-1,322}$
	$1 \leq n < 2$	$0,26 \leq v < 0,51$	$U = 0,0084v^{-0,622}$
	$n \geq 2$	$v \geq 0,51$	$U = 0,0016v + 0,0124$
C2-6	$n < 3$	$v < 0,34$	$U = 0,0049v^{-1,26}$
	$n \geq 3$	$v \geq 0,34$	$U = 0,0053v^2 - 0,0127v + 0,0213$
C31	$n < 4$	$v < 0,56$	$U = 0,0033v^{-1,245}$
	$n \geq 4$	$v \geq 0,56$	$U = -0,0005v + 0,0061$

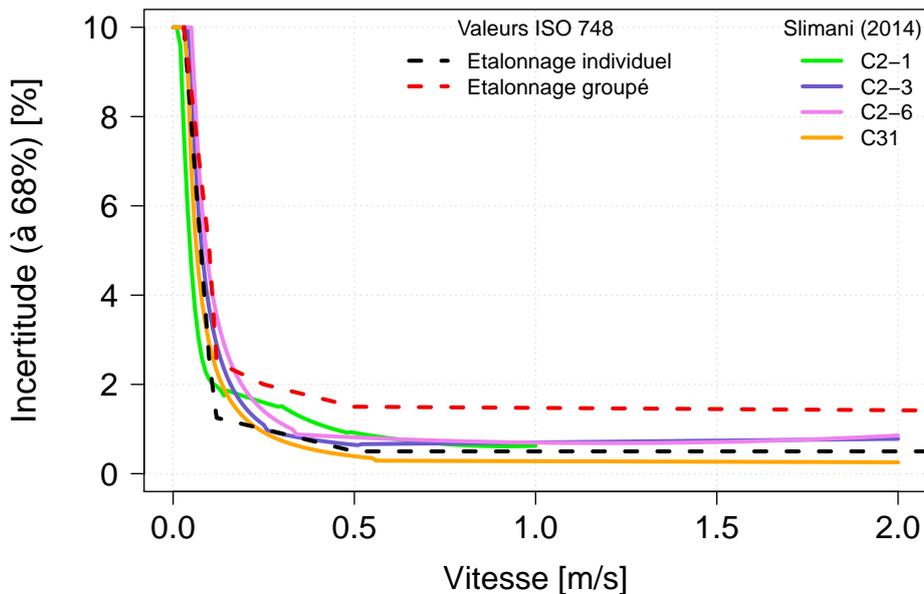


FIGURE 11.4 – Incertitude (à 68%) due à l'étalonnage d'un moulinet à hélice en fonction de la vitesse pour différents types d'hélices selon Slimani (2014) et valeurs préconisées dans la norme ISO 748 (ISO, 2009).

En complément à ces travaux, on souligne l'importance d'une vérification régulière (état général de l'hélice, test des équipages mobiles) et d'un bon entretien, permettant de se prémunir d'un éventuel biais dans la mesure des vitesses. Il conviendrait également d'objectiver l'incertitude de l'étalonnage des courantomètres acoustiques et électromagnétiques bien qu'ils soient moins utilisés que les moulinets à hélice à EDF-DTG. On note enfin que l'étalonnage en canal couvert diffère des conditions de déploiement rencontrées en rivière dans le sens où les courantomètres sont déplacés à vitesse constante sur un canal où l'eau est calme et ne sont donc pas sujets aux phénomènes de turbulence observés en milieu naturel (Pelletier, 1988).

11.2.3 Résolution du courantomètre

Le nombre de révolutions d'un moulinet à hélice est un entier. Du fait de cette troncature, les vitesses mesurées sont sous-estimées puisque les révolutions incomplètes du moulinet ne sont pas comptabilisées. Ainsi, si l'on mesure 100 révolutions, la dernière révolution incomplète du moulinet induit une erreur d'au maximum -1% sur l'estimation de la vitesse ponctuelle $v_{i,j}$. Il arrive que la préconisation du nombre minimum de 100 révolutions du moulinet ne soit pas respectée. L'incertitude induite par la résolution du courantomètre devient plus importante pour de faibles nombres de révolutions.

Un retour d'expérience sur la base des 3930 jaugeages est présenté sur la figure 11.5. Il montre la distribution de la proportion, par jaugeage, des points de mesure réalisés avec moins de 100 tours.

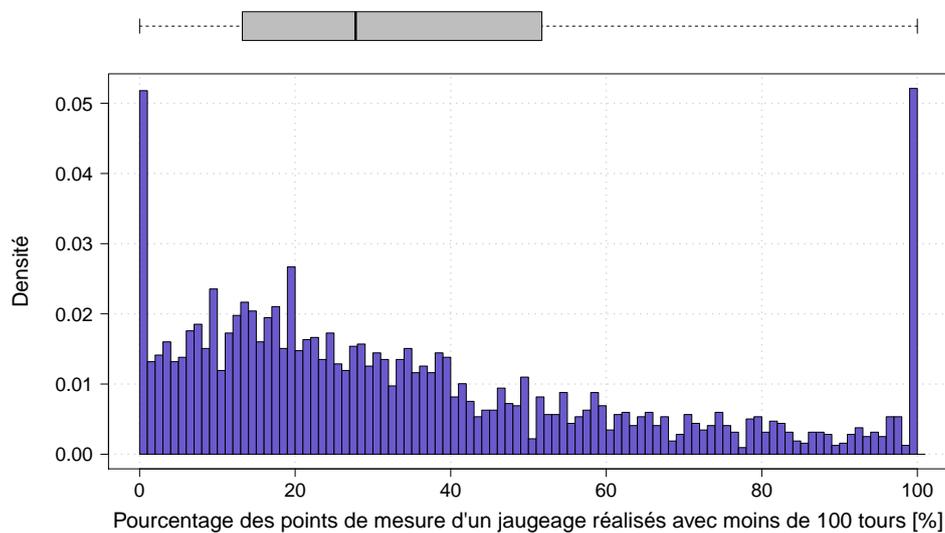


FIGURE 11.5 – Histogramme de la proportion des vitesses d'un jaugeage mesurées avec moins de 100 tours. La boîte à moustaches associée donne la médiane, les quartiles 25% et 75%. Les moustaches s'étendent jusqu'à la valeur distante de 1,5 fois la distance interquartile.

La valeur médiane représentée sur la boîte à moustaches à la figure 11.5 indique que 30% des vitesses d'un jaugeage sont mesurées avec moins de 100 tours. Il s'agit généralement des vitesses mesurées au bord de la section de jaugeages et la contribution au débit final, comme à l'incertitude finale, est faible. Néanmoins, pour 5% de l'ensemble des jaugeages, toutes les vitesses sont mesurées avec moins de 100 impulsions.

Une incertitude selon une loi rectangulaire peut être estimée comme :

$$u'_{res}(v_{i,j}) = \frac{1}{2\sqrt{3}tr_{i,j}} \quad (11.2)$$

avec $tr_{i,j}$ le nombre de révolutions associé à la mesure de vitesse ponctuelle $v_{i,j}$.

En théorie cette incertitude est asymétrique puisque l'erreur due à la résolution du moulinet induit systématiquement une sous-estimation de la vitesse (biais à corriger).

11.2.4 Intégration temporelle des vitesses

En un point donné d'une section de rivière, la vitesse fluctue constamment et de manière aléatoire au cours du temps en raison de phénomènes de turbulence (dont la définition est rappelée à la section 1.2.2). La figure 7.2a illustre bien l'oscillation des vitesses mesurées en un point fixe par ADCP au cours du temps. La vitesse moyenne en un point $v_{i,j}$ est estimée en échantillonnant la vitesse de l'écoulement sur un intervalle de temps (le temps d'exposition), généralement d'au moins 40 [s] (Pelletier, 1988) ou 30 [s] selon le protocole EDF-DTG.

En théorie, le temps d'exposition doit être fonction de la magnitude de la turbulence propre au site de mesure (Muste *et al.*, 2004). Il devrait donc être défini avant chaque mesure mais il est généralement fixé pour des raisons pratiques. En effet, la fréquence des oscillations turbulentes des vitesses dépend des conditions d'écoulement (en étiage, les pulsations de l'écoulement sont généralement plus lentes), de la géométrie du cours d'eau et de la rugosité du lit. Sur une même section, la proximité des parois provoque des turbulences plus importantes qu'au cœur de l'écoulement.

Les pulsations ont également un effet sur la précision des moulinets à hélice. En effet, ces derniers sont étalonnés dans des bassins rectilignes par déplacement à vitesse constante d'un chariot (voir section 11.2.2), loin des conditions réelles rencontrées dans un milieu naturel. D'une part, l'hélice ne se met en mouvement qu'à partir d'une vitesse minimum, dite "vitesse initiale théorique", en raison des résistances hydrauliques dues aux frottements du fluide sur les surfaces de l'hélice et des résistances mécaniques dues aux frottements dans le palier hydraulique, ce qui peut sous-estimer la vitesse mesurée. D'autre part, les turbulences et l'obstacle que représente le corps du moulinet provoquent des remous susceptibles de freiner ou d'accélérer l'hélice.

La norme ISO 748 propose des valeurs d'incertitude, exposées dans le tableau 6.2, qui dépendent de la position du point par rapport à la surface, de la vitesse et du temps d'exposition. L'incertitude est ainsi plus faible en surface qu'au fond puisque la turbulence est plus forte à proximité des parois. Au niveau des berges, les vitesses étant plus faibles, l'incertitude augmente. L'incertitude se réduit plus on allonge le temps d'exposition.

Un essai, consistant simplement à répéter 20 à 30 mesures de vitesse avec un temps d'exposition de 30 [s] en un point fixe de la section, a été réalisé sur une section de rivière. La figure 11.6 montre le profil bathymétrique et le champ des vitesses du jaugeage de la Souloise à Pont de la Baume (jaugeage du 04/11/2015) et les répétitions des mesures de vitesse y sont matérialisées par des points noirs.

Pour chaque point de mesure, l'écart-type a été calculé sur la répétition des vitesses mesurées. Celui-ci est comparé aux valeurs proposées par la norme ISO 748 dans le tableau 11.5. Une moyenne glissante a également été appliquée afin d'obtenir des estimations de vitesse sur des pas de temps de 1, 2 et 3 [min]. Les écarts-types sur ces différents pas de temps ont également été estimés et sont confrontés aux valeurs de la norme ISO 748 dans le tableau 11.5 également. L'essai numéro 1 est illustré par la figure 11.7 représentant l'évolution des vitesses estimées à différents pas de temps au cours du temps.

Pour l'essai numéro 3, les écarts-types estimés sont proches des valeurs proposées par la norme ISO 748. En revanche, les autres essais montrent des écarts significatifs avec les valeurs de la norme ISO 748. Par exemple, les essais numéro 2 et 4, réalisés dans la zone de plus forte vitesse et proche de la surface de l'eau, montrent des écarts importants (facteur 2) qui peuvent s'expliquer par une turbulence d'une magnitude importante dans une zone de forte vitesse. Les valeurs estimées sur l'essai 1 semblent donner des valeurs plus faibles que celles préconisées par

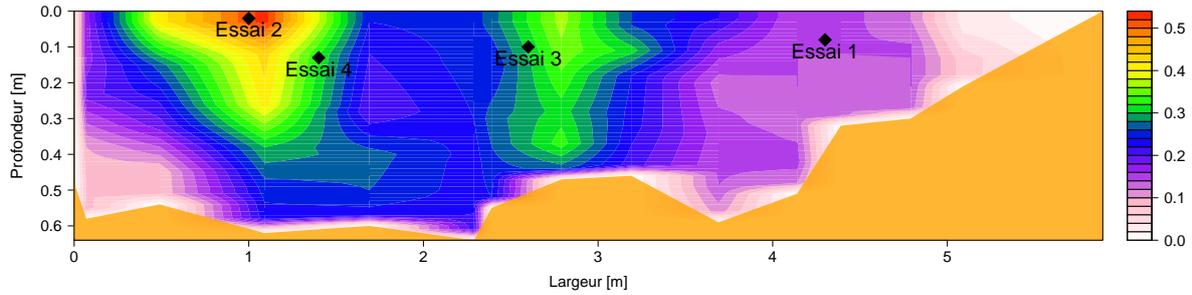


FIGURE 11.6 – Profil bathymétrique et champ des vitesses du jaugeage de la Souloise à Pont de la Baume (04/11/2015). L'échelle à droite donne la magnitude des vitesses. Les points noirs désignent la localisation des points de mesures pour lesquels la vitesse a été mesurée à plusieurs reprises.

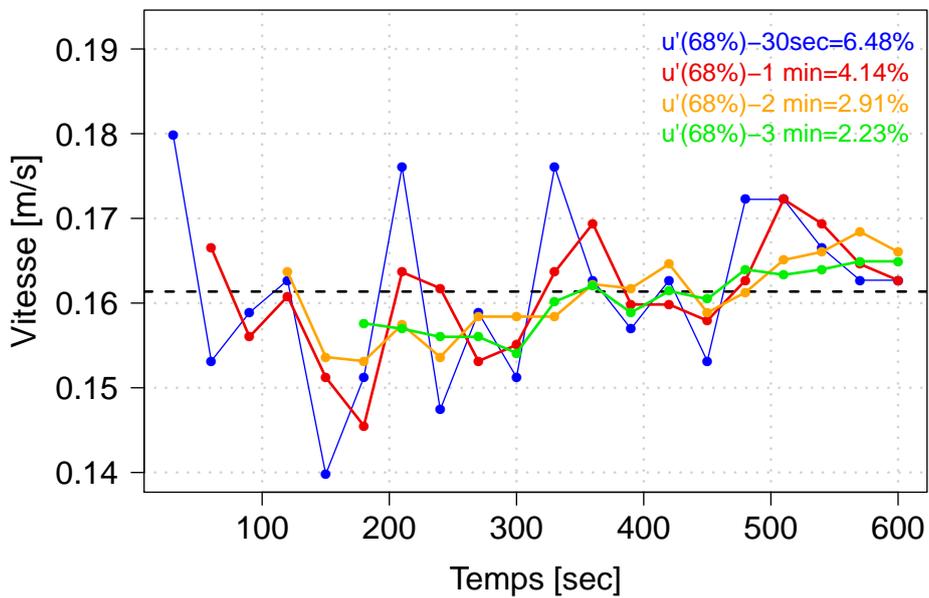


FIGURE 11.7 – Variation de la vitesse ponctuelle $\bar{v}_{i,j}$, estimée sur différents pas de temps, en fonction du temps pour l'essai numéro 1. Les écarts-types associés aux différents pas de temps sont inscrits en haut et à gauche du graphique.

TABLE 11.5 – Comparaison des écarts-types des vitesses estimées sur différents pas de temps (par application d'une moyenne glissante) et des valeurs de $u'_{exp}(V_i)$, exprimées au niveau de confiance de 68%, issues de la norme ISO 748. Nb et $\bar{v}_{i,j}$ désignent respectivement le nombre de répétitions des mesures de vitesses et la vitesse moyenne ponctuelle estimée sur l'ensemble des répétitions.

			Pas de temps							
			30 [s]		1 [min]		2 [min]		3 [min]	
	Nb	$\bar{v}_{i,j}$ [m/s]	Ecart-type	ISO 748	Ecart-type	ISO 748	Ecart-type	ISO 748	Ecart-type	ISO 748
[%]										
Essai 1	20	0,16	6,5	8	4,1	6	2,9	5	2,2	4
Essai 2	20	0,50	7,0	4	5,6	3	4,0	3	3,4	2
Essai 3	30	0,28	6,6	5	4,9	4	3,8	3	3,2	3
Essai 4	20	0,32	10,6	5	6,9	4	3,0	3	1,8	3

la norme. Cette étude s'accorde néanmoins sur le fait que l'incertitude diminue avec un temps d'exposition croissant, quelle que soit la position du point de mesure.

Bien que ces essais soient limités par le nombre restreint de points de mesure sur la section et ne soient représentatifs que d'un site de mesure dans des conditions d'écoulement données, on constate des écarts significatifs avec les valeurs de la norme ISO 748. Ces écarts s'expliquent par la configuration propre au site (en termes par exemple de rugosité et de régime d'écoulement) alors que les valeurs de la norme ISO 748 sont issues d'une moyenne d'essais réalisés sur quelques grands cours d'eau (Pelletier, 1988).

Il conviendrait d'adapter les valeurs d'incertitude aux caractéristiques du site via par exemple un indicateur, à définir, décrivant la variabilité des vitesses et la magnitude de la turbulence. Cet indicateur permettrait de faire le lien avec la fréquence observée des oscillations des vitesses. En outre, pour quantifier l'incertitude $u'_{exp}(V_i)$, des chroniques plus longues de vitesse doivent être réalisées sur plusieurs sites et en différents points de la section en travers. Globalement un temps de 300 [s] permet de stabiliser la vitesse moyenne (ISO, 2007a). Les jaugeages par ADCP peuvent être utiles pour fournir de grandes quantités de mesures (Szupiany *et al.*, 2007; Gunawan *et al.*, 2010; Lee, 2013).

Il pourrait également être envisageable, avant chaque jaugeage, de réaliser, sur un point représentatif de l'écoulement (à définir), une mesure de vitesse sur 300 [s] afin de mesurer la variabilité des vitesses au cours du temps et d'adapter éventuellement le temps d'exposition des points de mesure de vitesse du jaugeage.

11.2.5 Incertitude des verticales de type lame d'eau

L'ajout de verticales de type lame d'eau, tel que présenté dans la section 5.1.5, repose sur une approximation de la vitesse moyenne basée sur l'hypothèse de linéarité du nombre de Froude entre deux verticales de mesure. Cette approximation conduit à une source d'incertitude sur l'estimation de la vitesse moyenne, $u'_p(V_i)$, i étant l'indice d'une verticale de type lame d'eau.

Une étude a été réalisée afin de comparer la vitesse moyenne mesurée V_i à la vitesse obtenue par interpolation linéaire du nombre de Froude, notée $V_{i, \text{interp.}}$ selon l'équation 5.8. Cette étude se base sur l'ensemble des jaugeages dégradés (issus des 53 jaugeages de référence), générés par la méthode présentée dans le chapitre 8, comportant entre 20 et 30 verticales (pour exemple, on a pour chaque jaugeage de référence, 1000 jaugeages sous-échantillonnés comportant 20 verticales). Pour chacun de ces jaugeages, une verticale sur deux est convertie en verticale de type lame d'eau, c'est-à-dire que seule l'information bathymétrique est conservée. Pour chaque verticale de type lame d'eau, l'erreur relative E_{V_i} est calculée selon l'équation 11.3, en comparant la vitesse réellement mesurée V_i et la vitesse interpolée $V_{i, \text{interp.}}$.

$$E(V_i) = \frac{V_{i, \text{interp.}} - V_i}{V_i} \quad (11.3)$$

Les écarts-relatifs ont été tracés en fonction de différentes variables telles que la position relative de la verticale par rapport à la berge, les ratios m/L , $\Delta x_i/L$, $\Delta D_i/\Delta x_i$, $\Delta V_i/\Delta x_i$ ou $\Delta q_i/\Delta x_i$; où m et L désignent respectivement le nombre de verticales et la largeur de la section de jaugeage; Δx_i , ΔV_i , ΔD_i et Δq_i sont les écarts calculés en abscisse, vitesse moyenne, profondeur et q calculés à partir des verticales adjacentes d'indices respectifs $i - 1$ et $i + 1$. Parmi ces variables, aucune ne semble explicative de l'erreur relative. Une tendance se dégage néanmoins lorsque l'on trace les écarts-relatifs en fonction de la position par rapport à la berge. La figure 11.8 montre l'écart-type des erreurs relatives calculé en fonction de la position relative de la verticale par rapport à la berge. Cet écart-type peut être considéré comme l'estimation de l'incertitude $u'_p(V_i)$, au niveau de confiance de 68%, des verticales de type lame d'eau.

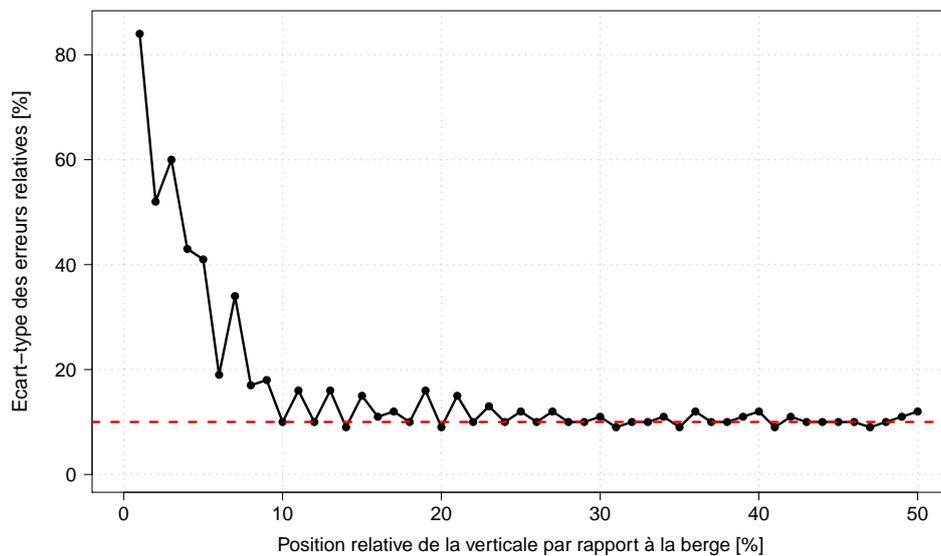


FIGURE 11.8 – *Ecart-type des erreurs relatives en fonction de la position relative de la verticale par rapport à la berge.*

On note que l'incertitude augmente lorsque l'on s'approche des berges, c'est-à-dire dans des zones où les gradients de vitesse et de profondeur sont élevés. A proximité des berges l'hypothèse de linéarité du nombre de Froude n'est pas vérifiée. En l'absence de tendance nette, on retiendra une valeur d'incertitude de 10% (au niveau de confiance de 68%), bien que des études plus approfondies méritent d'être conduites. En outre, il convient de placer les verticales de type lame d'eau suffisamment loin des berges.

Il a été également étudié la plus-value d'une interpolation linéaire du nombre de Froude en comparaison à une interpolation linéaire simple sur les vitesses moyennes des verticales adjacentes. Comme constaté par des études précédentes (Fulford et Sauer, 1986), l'utilisation du nombre de Froude n'apporte que peu d'information, mais elle propose une contrainte (réduction du degré de liberté) basé sur la physique de l'écoulement.

11.3 Incertitude sur l'estimation du débit

Les erreurs portant sur l'estimation du débit sont relatives aux choix de calcul pour intégrer latéralement et extrapoler les profondeurs et les vitesses, aux conditions opérationnelles et environnementales de déploiement ainsi qu'aux choix réalisés par l'hydromètre (voir l'inventaire dressé dans la section 5.3). Les erreurs dues à l'intégration latérale des profils de vitesse moyenne et de bathymétrie ainsi que l'erreur due au choix des verticales de mesure sont incluses dans le terme u'_m qui a été objectivé précédemment. Les erreurs dues aux extrapolations sont quantifiées par les équations 6.8 et 6.9 dans la méthode $Q+$.

Les paragraphes qui suivent visent à quantifier ou à commenter les sources d'incertitudes supplémentaires qui influent sur l'estimation du débit. Les incertitudes dues au stress et au niveau d'expérience de l'hydromètre, difficiles à quantifier, ne sont pas traitées ici bien qu'elles aient une influence non négligeable sur l'estimation du débit. Généralement, ces sources d'incertitude sont supposées incluses dans le terme u'_s , terme que l'on peut qualifier de "fourre-tout".

11.3.1 Choix de la section de mesure

Le choix de la section de mesure, exposé dans la section 5.1.1, affecte directement la qualité du jaugeage (Le Coz *et al.*, 2011). Les caractéristiques de l'écoulement ainsi que les caractéristiques géométriques sont en effet très variables d'une section à une autre. Le moindre obstacle, même de petite taille, est susceptible d'engendrer une perturbation de l'écoulement en modifiant la direction des filets liquides. Certains sites sont également plus propices au développement de tourbillons ou de courants secondaires, augmentant la difficulté d'estimer correctement les vitesses ponctuelles $v_{i,j}$.

L'estimation de cette source d'incertitude est délicate, même au travers d'essais interlaboratoires. Il faudrait sur un bief d'un cours d'eau, réaliser simultanément plusieurs jaugeages sur différentes sections de mesure tout en maintenant stable toutes les autres sources d'incertitude, y compris celles liées à l'opérateur (perturbation éventuelle de l'écoulement, maintien vertical de la perche ...), ce qui est impossible. Ainsi, au lieu de fixer un nombre fixe de verticales, il faudrait que chacun des jaugeages présente la même densité latérale de verticales, soit un SQI identique pour toutes les sections de mesure. La quantification de cette source d'incertitude nécessite des moyens lourds comme le *River Experimental Center d'Andong* en Corée, canal artificiel à débit contrôlé qui reproduit un cours d'eau. L'organisation d'essais interlaboratoires au moyen d'ADCP pourrait être utile pour quantifier l'influence de la section de jaugeage (Le Coz, 2016). Cette technique de mesure, plus rapide et permettant un échantillonnage latéral du champ des vitesses plus dense, est en effet moins sensible à l'effet opérateur si les différents paramètres de calcul sont fixés et qu'un même type d'appareil est utilisé.

L'incertitude due au choix de la section de mesure est certainement liée aux autres termes d'incertitude ; en particulier à l'incertitude des mesures des vitesses ponctuelles $u'_{exp}(v_{i,j})$ (car dépendante de la géométrie et de la turbulence de la section), à l'incertitude due à l'intégration verticale des vitesses $u'_p(V_i)$ (en raison de la dépendance à la distribution verticale des vitesses) et à l'incertitude u'_m , dépendante de la distribution latérale des vitesses et de la profondeur sur la section de jaugeage. Ces corrélations possibles, difficiles à quantifier, peuvent augmenter ou réduire l'incertitude finale.

11.3.2 Variabilité du débit

Le Coz *et al.* (2012a) proposent de quantifier l'incertitude u'_{var} , due à une variation de débit au cours de la mesure selon l'équation 11.4, à partir de l'hypothèse d'une distribution de probabilité rectangulaire et en se basant sur une courbe de tarage déjà établie de la forme $Q = f(h)$ (équation 3.2.1).

$$u'_{var} = \frac{Q(h_{\max}) - Q(h_{\min})}{2\sqrt{3}Q} \quad (11.4)$$

avec Q le débit jaugé, $Q(h_{\max})$ et $Q(h_{\min})$ les débits estimés par la courbe de tarage (équation 3.2.1) associés respectivement à la cote à l'échelle maximale h_{\max} et minimale h_{\min} au cours de la mesure.

Bien que le débit estimé par la courbe de tarage puisse être corrélé à l'estimation du débit, on considère, en l'absence d'essais permettant de valider ce calcul, que cela donne une bonne approximation de l'incertitude due à la variation du débit puisque la sensibilité (voir la section 4.3.2 pour la définition de ce terme) de la courbe de tarage est prise en compte dans le calcul.

Étant donné la diversification de la boîte à outils des moyens de mesure mise à disposition de l'hydromètre, on privilégiera d'autres techniques de jaugeages ou à défaut un protocole de mesure avec moins de verticales de mesure et l'ajout de verticales de type lame d'eau (section 5.1.5), pour réduire le temps de réalisation de mesure. La charte qualité de l'hydrométrie (Perret *et al.*, 2017) rappelle que le niveau de l'eau ne doit pas varier de plus de 1 [cm] à l'étiage et de 5 [cm] en crue pendant la mesure.

11.3.3 Corrélation des sources d'incertitude

Des corrélations entre les différentes sources d'incertitude sont possibles (Muste, 2009; Muste *et al.*, 2012). Ce terme, noté $u_{\text{cor}}(v_{i,j})$ (incertitude absolue au niveau de confiance de 68%), s'exprime, selon l'application littérale du GUM (voir section 6.1), comme :

$$u_{\text{cor}} = 2 \sum_{i=0}^m \sum_{j=i+1}^{m-1} \frac{\partial Q}{\partial x_i} \frac{\partial Q}{\partial x_j} u(x_i, x_j) \quad (11.5)$$

Le terme $u(x_i, x_j)$ désigne la covariance entre les grandeurs x_i et x_j .

L'utilisation d'un même courantomètre par jaugeage, ayant la même erreur systématique, induit des corrélations sur les erreurs de vitesse que l'on note $u'_c(v_{i,j})$. En ne considérant que les corrélations sur les erreurs dues à l'utilisation d'un seul courantomètre, l'équation 11.5 devient :

$$u_{\text{cor}} = 2 \sum_{i=1}^m \sum_{k=1}^m \sum_{j=1}^{n_j} \sum_{l=j+1}^{n_j-1} \frac{\partial Q}{\partial v_{i,j}} \frac{\partial Q}{\partial v_{k,l}} u_c(v_{i,j}, v_{k,l}) \quad (11.6)$$

où Q peut être considéré comme le modèle mathématique qui relie le mesurande aux grandeurs d'influence, exprimé par l'équation 5.1 et $u_c(v_{i,j}, v_{k,l})$ désigne la covariance entre les mesures de vitesses $v_{i,j}$ et $v_{k,l}$ (avec $(i, j) \neq (k, l)$).

La covariance peut s'exprimer comme :

$$u_c(v_{i,j}, v_{k,l}) = r(v_{i,j}, v_{k,l}) u(v_{i,j}) u(v_{k,l}) \quad (11.7)$$

où $r(v_{i,j}, v_{k,l})$ est la corrélation (comprise entre -1 et 1) entre les grandeurs $v_{i,j}$ et $v_{k,l}$ et $u(v_{i,j})$ désigne l'erreur sur la vitesse ponctuelle $v_{i,j}$. Le niveau de corrélation entre les erreurs étant difficile à quantifier, on suppose dans ce paragraphe une corrélation maximale positive valant 1.

Il faut estimer pour chaque point de mesure les dérivées partielles $\frac{\partial Q}{\partial v_{i,j}}$. Pour alléger la démonstration, on prend l'exemple d'un jaugeage réalisé à 3 points par verticale. Les dérivées partielles sont estimées par les équations suivantes :

Pour $i = 2$ à $m - 1$ et $j \neq 2$:

$$\frac{\partial Q}{\partial v_{i,j}} = 0,25 B_i D_i \quad (11.8)$$

Pour $i = 2$ à $m - 1$ et $j = 2$:

$$\frac{\partial Q}{\partial v_{i,j}} = 2 \times 0,25 B_i D_i \quad (11.9)$$

Puisque les vitesses moyennes au niveau des premières verticales de mesure sont utilisées pour extrapoler le profil des vitesses au niveau des berges, le calcul des dérivées partielles est

quelque peu différent :

Pour $i = 1$ ou m et $j \neq 2$:

$$\frac{\partial Q}{\partial v_{i,j}} = 0,25 \times (B_{rive} D_{rive} \frac{m_{rive}}{m_{rive} + 1} + B_i D_i) \quad (11.10)$$

Pour $i = 1$ ou m et $j = 2$:

$$\frac{\partial Q}{\partial v_{i,j}} = 2 \times 0,25 \times (B_{rive} D_{rive} \frac{m_{rive}}{m_{rive} + 1} + B_i D_i) \quad (11.11)$$

L'ensemble de ces calculs a été programmé et la prise en compte du terme u_{cor} est discutée dans la section 12.2.1.

Application de la méthode Flaure et influence des différents termes d'incertitude

Ce chapitre propose l'analyse des résultats d'incertitude sur 3930 jaugeages issus de la base de données EDF-DTG, présentée à la section 3.1.5. La section 12.1 propose d'abord une confrontation entre les estimations du terme u'_m selon la méthode FLAURE avec un modèle par typologie de jaugeages et avec un modèle moyen. Cette section traite également de la sensibilité du calcul d'incertitude par typologie au nombre de jaugeages analogues retenus et au nombre de jaugeages constituant l'ensemble des jaugeages de référence.

Les valeurs d'incertitude élargie $U'(Q)$ selon la méthode FLAURE sont présentées dans la section 12.2 sur l'ensemble des jaugeages de la base de données EDF-DTG. L'effet de l'objectivation des termes d'incertitude présentés au chapitre 11 sur la méthode FLAURE y est discuté dans la section 12.2.1. La section 12.3 présente enfin la confrontation des résultats d'incertitude élargie ($U'(Q)$) de la méthode FLAURE aux méthodes présentées dans le chapitre 6 sur les 3930 jaugeages ainsi que sur 6 jaugeages sélectionnés.

12.1 Calcul du terme u'_m

12.1.1 Par typologie

Jaugeages de référence sélectionnés

Parmi les 53 jaugeages de référence, il est possible de voir quels jaugeages sont les plus fréquemment retenus. Pour cela, le terme u'_m est calculé par le modèle d'incertitude par typologie de jaugeage présenté dans la section 10.1 en appliquant l'équation 10.1. Le critère d'analogie retenu est le critère de Nash (Nash et Sutcliffe, 1970). On choisit de conserver les quatre jaugeages les plus ressemblants au jaugeage étudié. Le critère SQI est estimé selon l'équation 9.4 et les courbes d'incertitudes présentées à la figure 9.9 sont utilisées.

Les calculs ont été réalisés sur les 3930 jaugeages de la base de données EDF-DTG. Sur les 3930, seuls 35 jaugeages ne possèdent pas de jaugeage analogue parmi les 53 jaugeages de référence, soit moins de 1% des jaugeages. On peut considérer que ces jaugeages sont soit des jaugeages hors bonnes pratiques, soit des jaugeages très atypiques. Dans ce cas de figure, on associe l'incertitude maximale (la courbe la plus haute à la figure 9.9) associée à la valeur du SQI calculé.

Pour chacun des 53 jaugeages de référence, sa fréquence d'apparition en tant que premier, deuxième, troisième ou quatrième jaugeage analogue a été calculée. Le graphique 12.1 illustre la fréquence d'apparition de chaque jaugeage en fonction de son indice (les indices sont rappelés

dans le tableau 7.1). Les jaugeages sont classés en fonction de la fréquence totale d'apparition, c'est-à-dire la fréquence d'apparition cumulée en tant que premier, deuxième, troisième ou quatrième jaugeage analogue.

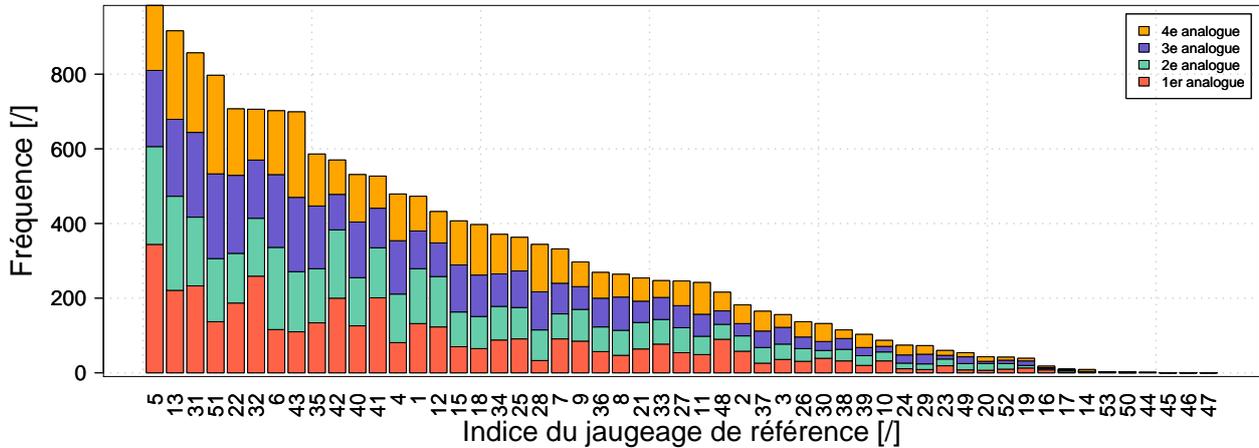


FIGURE 12.1 – Fréquence d'apparition de chaque jaugeage de référence en fonction de son indice et de son ordre d'apparition (premier, deuxième, troisième ou quatrième jaugeage analogue). Les indices des jaugeages sont classés par ordre décroissant de la fréquence cumulée d'apparition.

La figure 12.1 montre que le jaugeage le plus souvent retenu est le jaugeage d'indice 5 (la Durance à Rocherousse) puis le jaugeage numéro 13 (Le Buech à Serres). Les jaugeages 45, 46 et 47, de forme rectangulaire et issus de la modélisation hydraulique, ne sont jamais retenus. Il est normal que ces jaugeages ne soient pas sélectionnés en tant que jaugeages analogues puisque leur typologie n'est pas représentative des sections de mesure du réseau EDF-DTG.

La répartition des critères de Nash associés aux quatre meilleurs jaugeages analogues est montrée à la figure 12.2 en fonction de l'indice des jaugeages analogues.

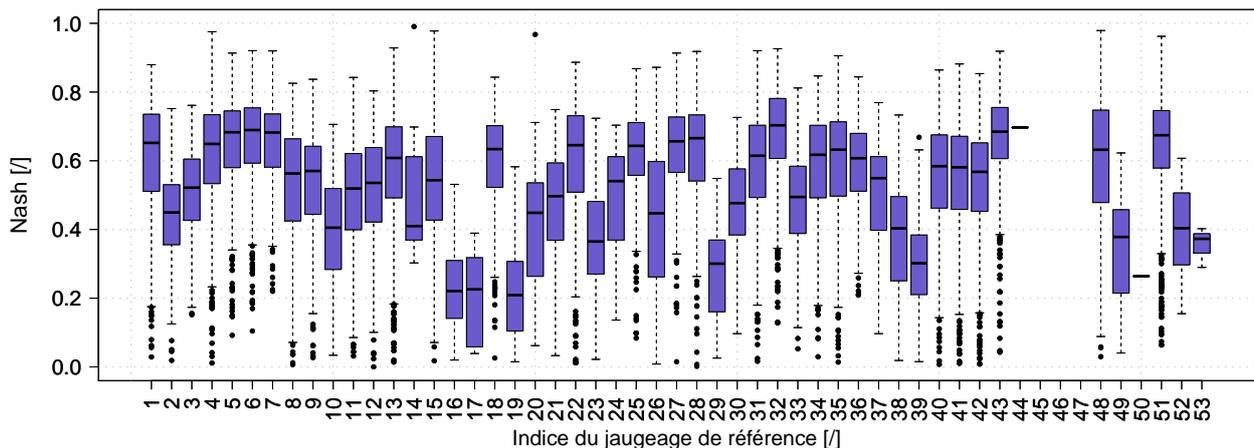


FIGURE 12.2 – Boîtes à moustaches des quatre meilleurs scores de Nash en fonction de l'indice du jaugeage de référence. Les boîtes s'étendent du quartile 25% au quartile 75% et les moustaches s'étendent jusqu'à la valeur distante de 1,5 fois la distance interquartile. Les points à l'extérieur représentent les valeurs extrêmes.

On constate que l'indice de Nash oscille autour d'une valeur médiane de 0,6, ce qui souligne

qu'une analogie parfaite, c'est-à-dire avec un score de Nash proche de 1, est rare, et montre l'intérêt d'utiliser plusieurs jaugeages analogues pour l'estimation du terme u'_m . Les jaugeages 16 et 17 (respectivement le jaugeage du Cernon à St Georges de Luzençon et le jaugeage de la Séveraisse à Villar Loubière), dont la bathymétrie est particulièrement irrégulière, présentent des valeurs de Nash plus faibles et sont rarement sélectionnés en tant que jaugeage analogue comme on le voit à la figure 12.1.

Influence du nombre de jaugeages analogues retenus

Les mêmes calculs ont été réalisés sur la base des 3930 jaugeages en retenant 1, 8 et 12 jaugeages analogues. Les valeurs d'incertitude du terme u'_m sont comparées à celles obtenues en retenant le nombre optimal de 4 jaugeages analogues.

Les écarts absolus entre l'utilisation de 4 analogues et la sélection de l jaugeages analogues sont estimés en appliquant l'équation 12.1.

$$E_{l,4} = u'_{m,l \text{ analogue(s)}} - u'_{m,4 \text{ analogues}} \quad (12.1)$$

où A désigne le nombre de jaugeages analogues retenus.

Les figures 12.3a et 12.3b montrent la distribution des écarts absolus sur l'estimation du terme u'_m entre l'utilisation de 4 analogues et respectivement 1 et 12 jaugeages analogues, les écarts étant calculés en appliquant l'équation 12.1 avec respectivement $A = 1$ et $A = 12$.

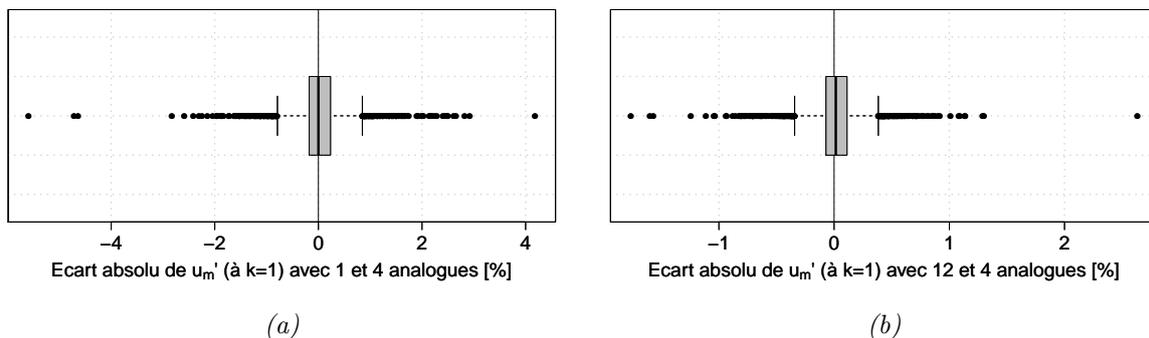


FIGURE 12.3 – Histogrammes des écarts absolus entre l'estimation du terme u'_m entre l'utilisation de 4 jaugeages analogues avec l'utilisation de (a) 1 et (b) 12 jaugeage(s) analogue(s).

Les écarts entre un modèle à 1 et à 4 analogues sont plus élevés que les écarts entre un modèle à 1 et 12 analogues puisque le modèle n'utilisant qu'un seul jaugeage analogue est plus sensible à des courbes d'incertitude isolées (voir les courbes à la figure 9.9). L'augmentation du nombre de jaugeages analogues sélectionnés revient à lisser le faisceau de courbes présentés à la figure 9.9.

Les distributions empiriques de u'_m , représentées pour différents nombres de jaugeages analogues à la figure 12.4, ne permettent pas de mettre en évidence de différences significatives dans le calcul du terme u'_m . Les courbes sont en effet bien superposées.

Sensibilité au nombre de jaugeages de la base de référence

Un sous-échantillonnage de l'ensemble des jaugeages de référence a été réalisé de manière à étudier l'influence d'un nombre réduit de jaugeages de référence. Au lieu de 53 jaugeages de référence, 12 jaugeages ont été retenus, en retenant des morphologies variées, correspondant

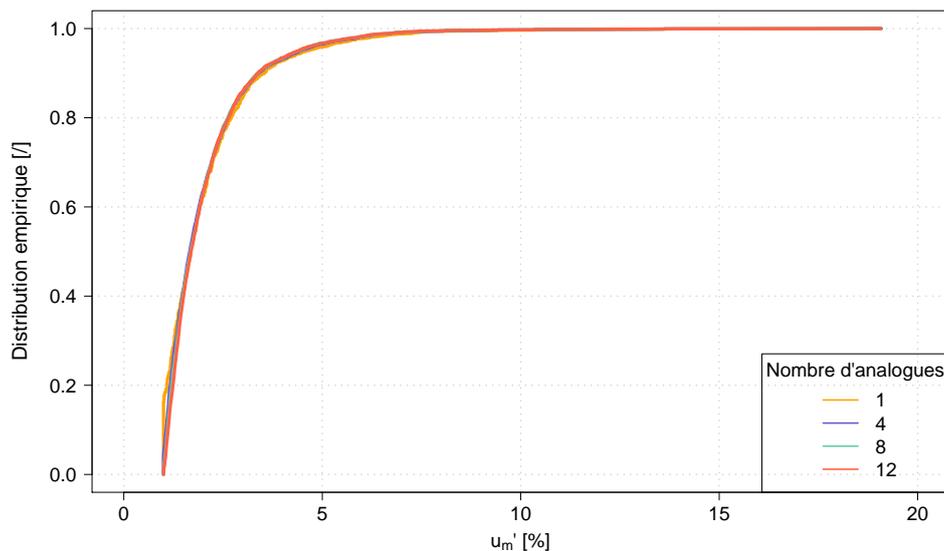


FIGURE 12.4 – Distribution empirique de l'incertitude u'_m selon différents nombres de jaugeages analogues sélectionnés.

aux indices 1, 2, 4, 5, 8, 9, 11, 12, 13, 14, 22 et 27 du tableau 7.1.

Le faisceau des courbes retenues est illustré à la figure 12.5. On constate qu'une gamme plus restreinte de SQI est explorée.

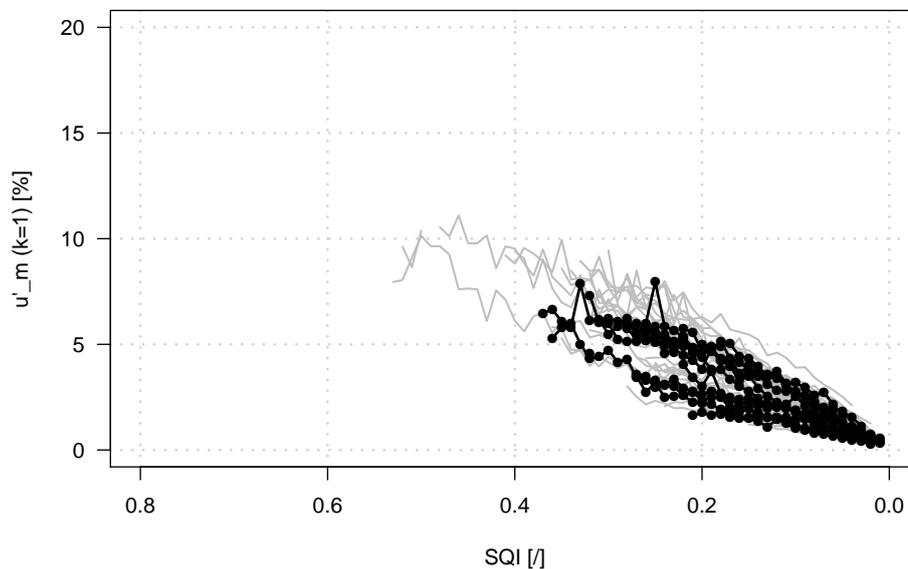


FIGURE 12.5 – Incertitude u'_m (au niveau de confiance de 68%) en fonction du SQI , en noir pour les 12 jaugeages de référence retenus et en grisé pour l'ensemble des 53 jaugeages de référence, avec un seuil de 200 valeurs pour l'estimation des quantiles.

Le nombre de jaugeages de référence analogues est fixé à 4.

La figure 12.6a montre la distribution des écarts absolus entre les valeurs u'_m calculées en se basant sur un ensemble de 12 et 53 jaugeages de référence. Les écarts sont estimés avec

l'équation 12.2 comme :

$$E_{12,53} = u'_{m, 12 \text{ jaugeages}} - u'_{m, 53 \text{ jaugeages}} \quad (12.2)$$

Les écarts absolus sont très faibles, la valeur médiane étant de $-0,07\%$. Les distributions empiriques des incertitudes u'_m calculées selon 12 et 53 jaugeages de référence sont représentées à la figure 12.6b.

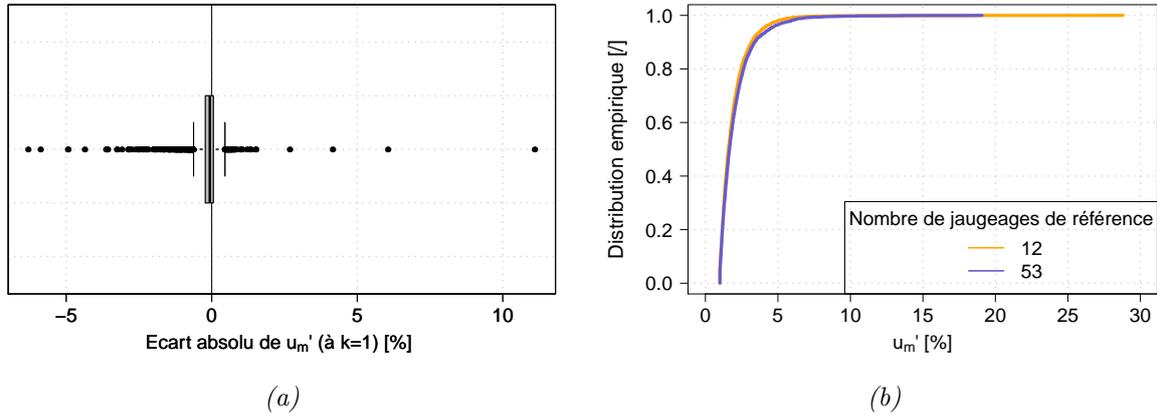


FIGURE 12.6 – (a) Boîte à moustaches des écarts absolus entre l'estimation du terme u'_m avec l'utilisation d'un jeu de 53 ou de 12 jaugeages de référence. (b) Distribution empirique de l'incertitude u'_m selon un jeu de 53 (en bleu) et de 12 jaugeages de référence (en orange).

La comparaison des deux distributions montre des incertitudes plus élevées pour un modèle basé sur 53 jaugeages. Ceci s'explique par le retrait de jaugeages de référence qui diminue la borne haute de l'incertitude. Bien que le nombre de jaugeages sans analogue augmente avec le retrait de certains jaugeages de référence, ce cas de figure entraîne une affectation de l'incertitude maximale qui reste toujours inférieure à l'incertitude maximale issue des 53 jaugeages de référence.

12.1.2 Modèle moyen

On a montré que les résultats d'incertitude du terme u'_m sont assez peu sensibles au jeu de jaugeages de référence ainsi qu'au nombre de jaugeages de référence analogues retenus. Ce constat permet de justifier l'utilisation d'un modèle moyen. Ce modèle moyen est basé sur l'hypothèse que le *SQI* permet de caractériser la complexité de la section de jaugeage. Celui-ci est également plus simple à appliquer comme illustré à la figure 10.6.

La figure 12.7a montre la distribution des écarts absolus entre les valeurs u'_m calculées par le modèle par typologie ($u'_{m, \text{typ}}$) et par le modèle moyen ($u'_{m, \text{moy}}$), les écarts étant estimés par l'équation 12.3.

$$E_{\text{moy., typ.}} = u'_{m, \text{moy.}} - u'_{m, \text{typ.}} \quad (12.3)$$

La valeur médiane des écarts absolus est égale à $-0,26\%$, traduisant des valeurs légèrement plus faibles pour le modèle moyen comme le montre la comparaison des distributions empiriques des incertitudes, représentées à la figure 12.7b. On observe une valeur minimale d'incertitude plus forte pour le modèle par typologie comparé au modèle moyen. Ceci peut s'expliquer par l'influence des jaugeages issus de la modélisation hydraulique sur le modèle moyen. Ces derniers

conduisent à des incertitudes plus faibles que les autres jaugages et tirent le modèle moyen d'incertitude vers le bas alors qu'ils sont rarement sélectionnés en tant que jaugages analogues.

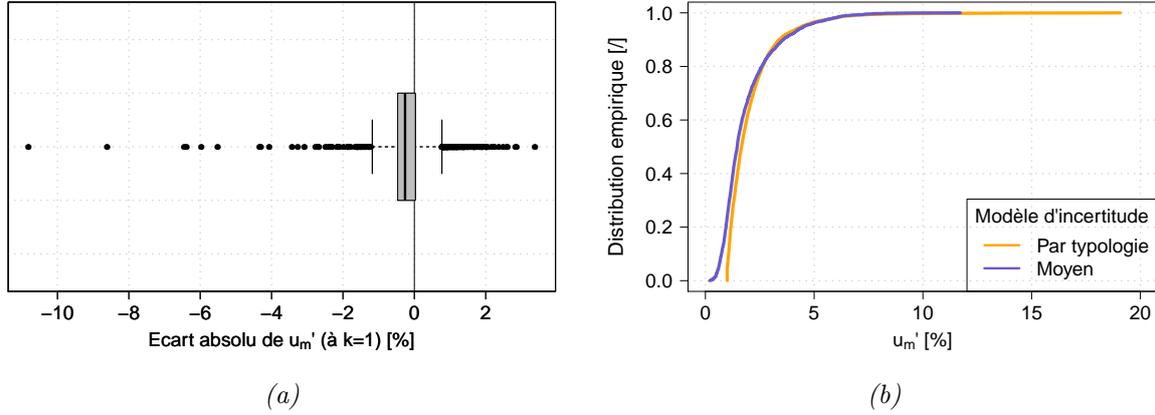


FIGURE 12.7 – (a) Boîte à moustaches des écarts absolus entre l'estimation du terme u'_m selon un modèle par typologie et un modèle moyen. (b) Distribution empirique de l'incertitude u'_m selon le modèle moyen (en bleu) et le modèle par typologie (en orange).

12.1.3 Modèle moyen par décomposition des sources d'incertitude

Comme proposé dans la section 10.3 et recommandé par Muste *et al.* (2012), le terme d'incertitude du terme u'_m est calculé selon un modèle moyen avec et sans séparation des termes. Les valeurs d'incertitude u'_m sont comparées à la combinaison des incertitudes $u'_m(D_i)$ et $u'_m(V_i)$ comme suit :

$$u'_{m, \text{sep.}} = \sqrt{u'^2_m(D_i) + u'^2_m(V_i)} \quad (12.4)$$

Sur la base des 3930 jaugages d'EDF-DTG, l'incertitude u'_m obtenue selon un modèle moyen est comparée à l'incertitude $u'_{m, \text{sep.}}$ estimée par séparation des termes $u'_m(D_i)$ et $u'_m(V_i)$.

Les écarts entre les deux approches sont estimés par l'équation 12.5 :

$$E_{\text{moy., sep.}} = u'_{m, \text{moy.}} - u'_{m, \text{sep.}} \quad (12.5)$$

La figure 12.8a illustre la distribution des écarts absolus entre ces deux approches et la figure 12.8b montre la comparaison des distributions empiriques de l'incertitude. Ces deux figures mettent en évidence des valeurs d'incertitude plus élevées, de l'ordre de 1% (la valeur médiane valant $-0,42\%$), lorsque les termes d'incertitude sont séparés. Cet écart peut s'expliquer par le fait que la valeur minimale prise par les termes $u'_m(D_i)$ et $u'_m(V_i)$ est du même ordre que la valeur minimale du terme u'_m seul.

12.1.4 Confrontation des modèles - Synthèse

On compare les valeurs de u'_m obtenues par l'application d'un modèle par typologie selon 4 jaugages analogues, avec un modèle moyen et un modèle moyen avec décomposition des termes. Pour chaque mode de calcul, les distributions empiriques sont tracées à la figure 12.9.

Les écarts observés entre les différents modèles sont relativement faibles, généralement de l'ordre de 1%. Étant donnée la difficulté de calibrer le modèle d'incertitude, en l'absence de valeur de référence, on retient le modèle moyen (avec ou sans décomposition des termes) pour les raisons suivantes :

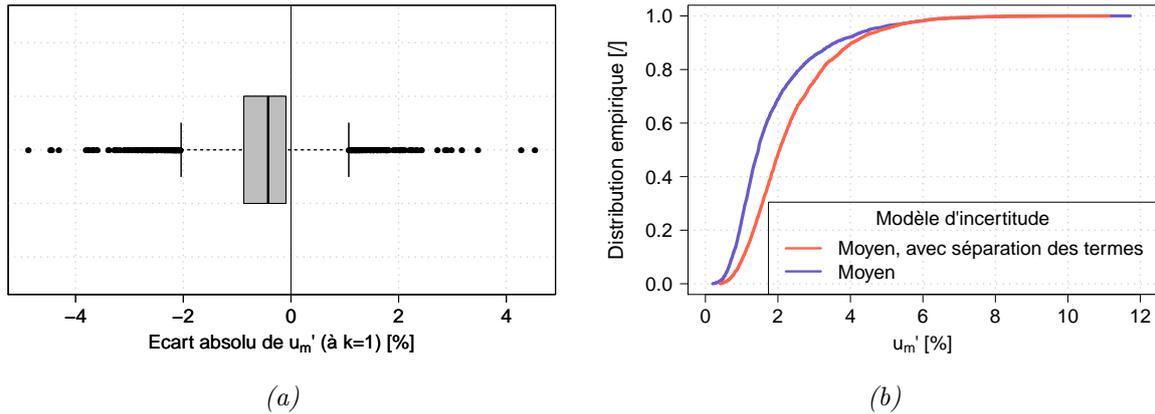


FIGURE 12.8 – (a) Boîte à moustaches des écarts absolus entre l'estimation du terme u'_m selon un modèle moyen avec et sans séparation des termes $u'_m(D_i)$ et $u'_m(V_i)$ et (b) comparaison des distributions empiriques de l'incertitude.

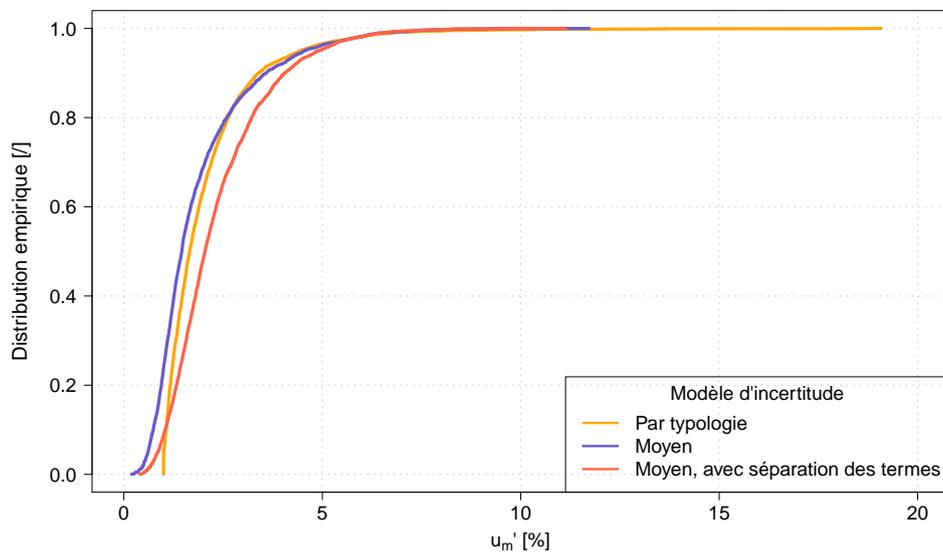


FIGURE 12.9 – Comparaison des distributions empiriques des incertitudes u'_m (au niveau de confiance de 68%) pour les trois modes de calcul de la méthode FLAURE : modèle par typologie, modèle moyen et modèle avec séparation des termes $u'_m(D_i)$ et $u'_m(V_i)$.

- Moins sensible au jeu de jaugeages de référence, bien qu'il faille un nombre suffisant de jaugeages pour balayer des situations variées.
- Pas de calibration nécessaire du nombre de jaugeages analogues à retenir.
- Pas d'extrapolation des courbes vers des fortes valeurs de SQI .
- Conceptuellement plus simple (basé sur l'hypothèse que le SQI suffit à caractériser la complexité d'une section en travers) et mise en œuvre aisée.

12.2 Incertitude élargie selon la méthode FLAURE

L'incertitude élargie selon la méthode FLAURE en utilisant un modèle moyen a été calculée pour l'ensemble de 3930 jaugeages de la base EDF-DTG. La figure 12.10a, donnant l'incertitude élargie $U'(Q)$ (au niveau de confiance de 95%) en fonction du nombre de verticales, peut être

mise en relation avec les figures 6.1a, 6.4a, 6.4c et 6.5a, illustrant respectivement les incertitudes $U'(Q)$ selon la norme ISO 748, la méthode $Q+$ (avec un angle α fixé ou estimé selon l'équation 6.10) et la méthode *IVE*.

La figure 12.10b donne l'incertitude $U'(Q)$ en fonction du SQI ainsi que la répartition des SQI calculés sur la base de jaugeages EDF-DTG.

On observe à la figure 12.10a des résultats d'incertitude plus contrastés que ceux issus de la norme ISO 748. Ainsi, pour un jaugeage à 10 verticales, l'incertitude $U'(Q)$ varie entre 3,5 et 24% pour la méthode FLAURE tandis que le calcul de la norme ISO 748 conduit à des valeurs comprises entre 8 et 12%.

La figure 12.10b montre une forte dépendance de l'incertitude élargie à l'indice de qualité d'échantillonnage SQI en raison d'un poids important du terme u'_m sur l'incertitude élargie $U'(Q)$. En effet, comme le montre le diagramme du poids moyen des différents termes d'incertitude sur l'incertitude finale (figure 12.11), le terme u'_m contribue en moyenne à 43% de l'incertitude élargie (figure 12.11a) ou 56% si l'on considère une décomposition du terme u'_m en $u'_m(D_i)$ et $u'_m(V_i)$ (figure 12.11b).

L'histogramme des SQI , présenté à la figure 12.10b, montre que, dans l'ensemble, les valeurs du SQI ne dépassent que rarement une valeur de 0,4 (quantile empirique à 99%) et que plus de 90% des jaugeages d'EDF-DTG se caractérisent par un SQI inférieur à 0,2.

12.2.1 Effet de l'objectivation des différents termes d'incertitude

Pour les différents termes investigués précédemment, exposés au chapitre 11 (hors u'_m), l'écart absolu en termes d'incertitude élargie $U'(Q)$ a été calculé entre la situation initiale (absence ou valeur initiale) et la situation objectivée (prise en compte du terme ou modification de la valeur initiale). Le modèle d'estimation d'incertitude retenu pour l'estimation du terme u'_m est le modèle moyen. Les écarts absolus maximum et médian d'incertitude $U'(Q)$ sont renseignés dans le tableau 12.1 en modifiant un par un les termes $u'(B_i)$, $u'_{cor}(v_{i,j})$ et $u'_{res}(v_{i,j})$. L'estimation de ces termes est présentée respectivement dans les sections 11.1, 11.3.3 et 11.2.3.

TABLE 12.1 – Influence des valeurs d'incertitude en termes d'écart absolu d'incertitude combinée élargie.

Terme	Valeur u' (à $k = 1$)		Écart absolu sur $U'(Q)$	
	initiale	testée	maximum	médian
$u'(B_i)$	0,5	2,5	1%	0,4%
$u'_{cor}(v_{i,j})$		Eq. 11.6	1%	0,2%
$u'_{res}(v_{i,j})$		Eq. 11.2	0,3%	0,01%

Pour les trois termes étudiés, on constate que l'écart maximal d'incertitude est relativement faible. Ceci s'explique par la prépondérance des autres termes notamment les termes u'_m et $u'_p(V_i)$.

En ce qui concerne la prise en compte du terme $u'_{cor}(v_{i,j})$, l'impact des corrélations des mesures de vitesse est probablement plus élevé pour les jaugeages par ADCP en raison d'un nombre plus important de mesures (Olivier *et al.*, 2009).

La résolution conduit, quant à elle, à une augmentation d'incertitude finale inférieure à 0,3% puisque les vitesses mesurées avec moins de 100 tours ne contribuent que très peu au débit calculé et donc à l'incertitude finale.

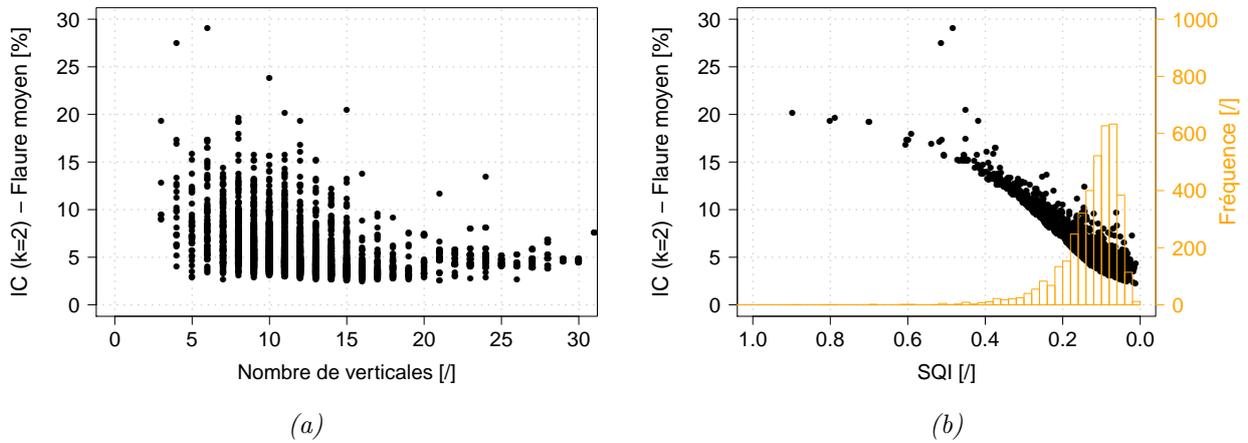


FIGURE 12.10 – Incertitudes élargies $U'(Q)$ (au niveau de confiance de 95%) selon la méthode FLAURE appliquée à la base des 3930 jaugeages EDF-DTG en fonction (a) du nombre de verticales et (b) de l'indice d'échantillonnage SQI. L'histogramme orange montre la distribution des SQI.

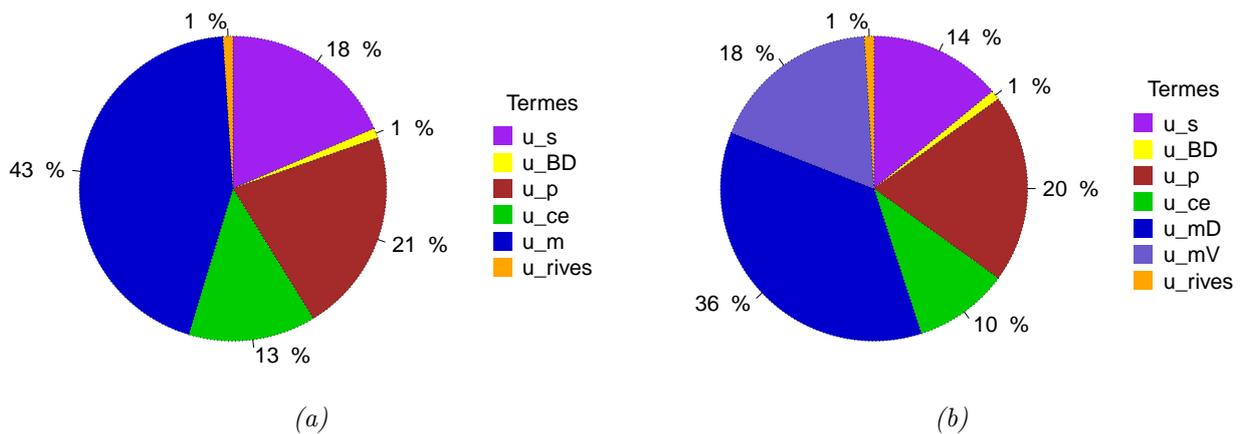


FIGURE 12.11 – Contribution médiane des différentes sources d'incertitude selon la méthode FLAURE (a) avec modèle moyen et (b) avec séparation des termes $u'_m(D_i)$ et $u'_m(V_i)$. Les termes d'incertitude correspondent respectivement aux termes u'_s , $\sqrt{u'^2(B_i) + u'^2(D_i)}$, $u'_p(V_i)$, $\sqrt{u'^2_c(v_{i,j}) + u'^2_{exp}(v_{i,j})}$ et u'_m décomposé ou non en $u'_m(D_i)$ et $u'_m(V_i)$. u_{rives} désigne la contribution des sous-sections de rive.

L'effet de l'objectivation du terme $u'_p(V_i)$ (voir section 11.2.1), portant sur l'incertitude sur l'estimation de la vitesse moyenne V_i par l'utilisation des formules algébriques, est discuté à la section 14.2.3.

12.2.2 Effet de l'ajout de verticales de type lame d'eau

192 jaugeages ont été réalisés avec l'ajout de verticales de type lame d'eau (voir pour rappel la section 5.1.5). La figure 12.12a montre la distribution des écarts relatifs en termes de débit entre un dépouillement avec et sans lame d'eau. Les écarts-relatifs sont calculés selon l'équation 12.6.

$$E_{i, \text{ lame}} = \frac{Q_{i, \text{ avec lame}} - Q_{i, \text{ sans lame}}}{Q_{i, \text{ sans lame}}} \quad (12.6)$$

L'ajout de verticales intermédiaires n'induit pas de tendance particulière sur les débits estimés. En effet, la médiane des écarts vaut 0.

La figure 12.12b montre la distribution des écarts relatifs en incertitude finale $U'(Q)$ entre un dépouillement avec et sans lame d'eau. Lorsque l'écart est négatif, cela traduit une diminution de l'incertitude lorsque l'on ajoute les verticales lame d'eau. La valeur médiane des écarts absolus témoigne d'une réduction de 0,15% d'incertitude. Globalement, on observe donc une diminution de l'incertitude calculée selon la méthode FLAURE lorsqu'on l'on ajoute des verticales de type lame d'eau. Néanmoins, pour certains jaugeages, l'ajout de verticales de type lame d'eau conduit à une augmentation de l'incertitude puisque cet ajout peut augmenter la valeur de SQI . Il se pose ici la question de la représentativité du SQI pour des jaugeages avec un très faible nombre de verticales (jaugeage très sous-échantillonné).

L'ajout de verticales de type lame d'eau conduit au final à une réduction de la contribution des termes $u'_m(D_i)$ et $u'_m(V_i)$ comme l'illustre les figures 12.12c et 12.12d montrant respectivement la contribution médiane des différents composants d'incertitude selon un dépouillement sans lame d'eau et avec prise en compte des verticales de type lame d'eau. On observe une forte réduction de la contribution des termes $u'_m(D_i)$ et $u'_m(V_i)$ grâce à l'ajout des verticales de type lame d'eau. En revanche, l'incertitude $u'_p(V_i) = 10\%$ associée aux verticales de type lame d'eau, estimée à la section 11.2.5, conduit à une augmentation marquée de la contribution de ce terme à l'incertitude finale. D'autres investigations devront être menées pour estimer plus finement ce terme en fonction d'une ou plusieurs variable(s) explicative(s) à définir.

Bien que l'écart en termes d'incertitude soit relativement limité, l'ajout de verticales lame d'eau permet une meilleure connaissance de la bathymétrie de la section et entraîne une modification de la valeur de débit. Ce protocole de mesure présente un intérêt certain pour les rivières dont le débit change rapidement (en crue notamment) afin réduire la durée de la mesure.

12.3 Comparaison des incertitudes élargies selon les quatre méthodes analytiques

Les quatre méthodes analytiques (norme ISO 748, Q_+ , IVE et FLAURE), sont appliquées sur les 3930 jaugeages de la base de données EDF-DTG en utilisant les équations présentées au chapitre 6 et en partie III concernant la méthode FLAURE. Les valeurs d'incertitude et les équations retenues pour les calculs sont renseignées dans le tableau 12.2. On choisit deux variantes de calcul pour la méthode Q_+ (angle α fixe ou calé selon l'équation 6.10). Les termes

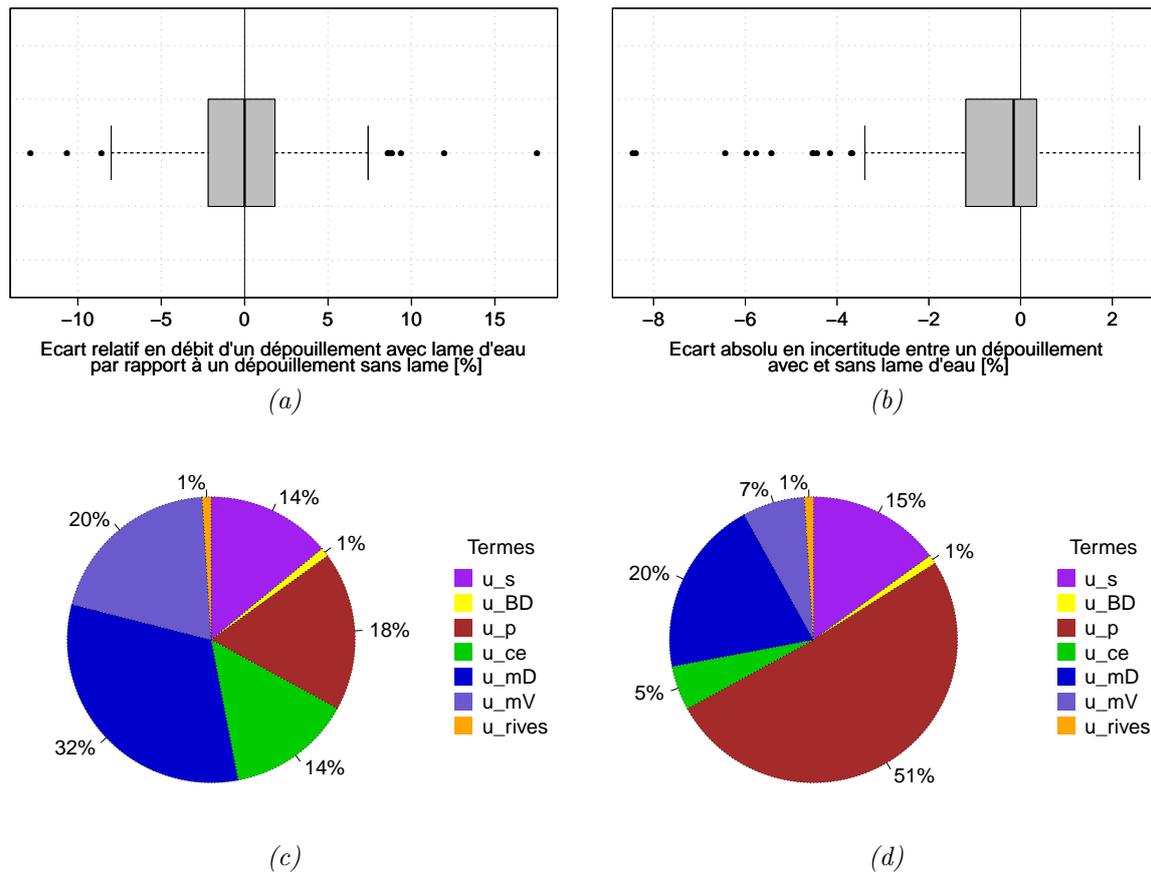


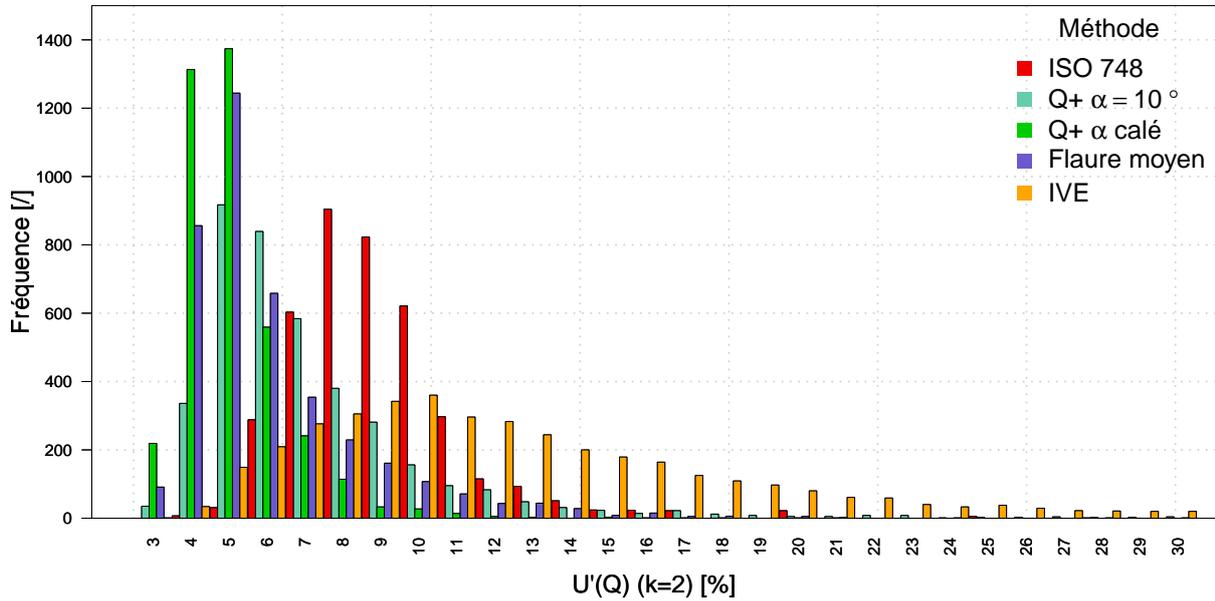
FIGURE 12.12 – Boîtes à moustaches des écarts entre un dépouillement avec et sans lame d'eau. (a) en termes de débit (écarts relatifs) et (b) en termes d'écart absolu d'incertitude au niveau de confiance de 95%. Répartition des contributions relatives médianes des différents composants d'incertitude calculés selon un dépouillement (a) sans lame d'eau et (b) avec lame d'eau. Les termes d'incertitude correspondent respectivement aux termes u'_s , $\sqrt{u'^2(B_i) + u'^2(D_i)}$, $u'_p(V_i)$, $\sqrt{u'^2_c(v_{i,j}) + u'^2_{exp}(v_{i,j})}$ et u'_m décomposé en $u'_m(D_i)$ et $u'_m(V_i)$. u_{rives} désigne la contribution des sous-sections de rive.

investigués à la section 11 ne sont ici pas considérés, y compris les possibles corrélations entre les erreurs de mesure, puisque l'influence sur les résultats finaux d'incertitude est marginale.

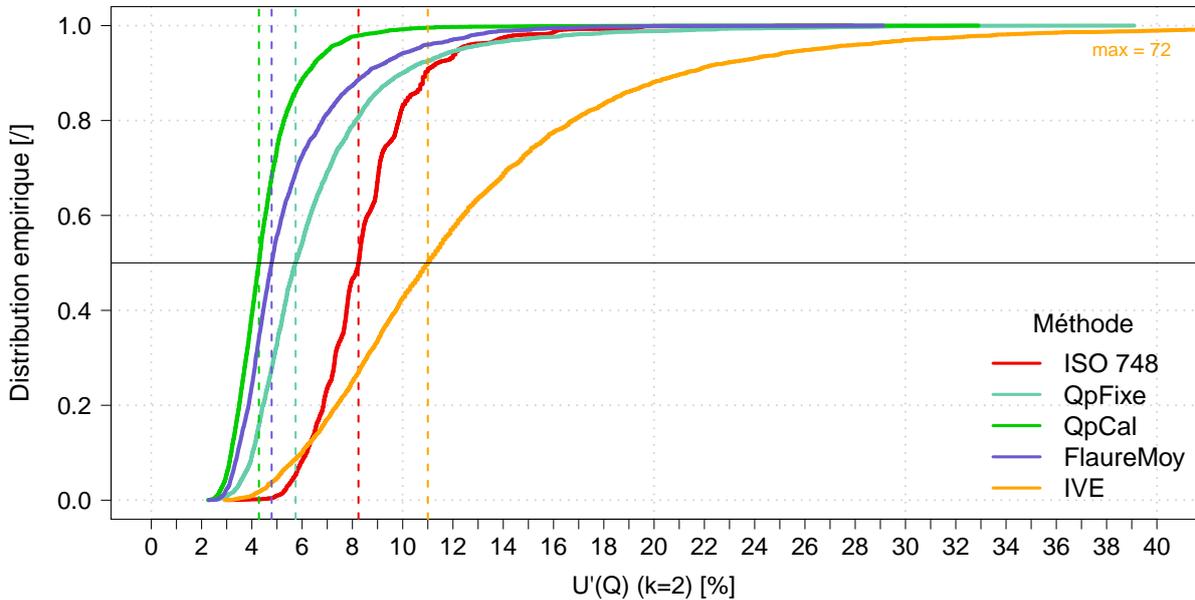
Pour faciliter la comparaison des méthodes de calcul, la distribution des incertitudes selon les quatre méthodes est présentée sous forme d'histogrammes à la figure 12.13a puis sous forme de distributions empiriques à la figure 12.13b.

La confrontation des différentes méthodes montre que les incertitudes les plus élevées sont obtenues avec la méthode *IVE*. Plus de 50% des jaugeages ont une incertitude supérieure à 11% ce qui semble être un ordre de grandeur bien trop élevé au regard des niveaux d'incertitude communément admis. Forray *et al.* (1998) suggèrent que "80% des jaugeages sont réalisés à mieux que 6%" d'incertitude. La distribution des incertitudes selon la méthode ISO 748 laisse également penser que les incertitudes sont trop élevées. Les méthodes *Q+* et *FLAURE* semblent, en revanche, s'accorder avec les valeurs de Forray *et al.* (1998) et donnent des valeurs similaires. On note que les incertitudes *Q+* calculées selon un angle α estimé selon l'équation 6.10 donnent les résultats d'incertitude les moins variés.

La figure 12.14 permet de mettre en évidence les niveaux de corrélation entre les incerti-



(a)



(b)

FIGURE 12.13 – Incertitudes élargies $U'(Q)$ (au niveau de confiance de 95%) selon les quatre méthodes analytiques appliquées à la base des 3930 jaugeages EDF-DTG présentées sous forme (a) d’histogrammes et de (b) distributions empiriques. Les lignes verticales colorées sont les valeurs médianes d’incertitude selon les différentes méthodes. La valeur maximale d’incertitude atteinte en appliquant la méthode IVE est de 72%.

CHAPITRE 12. APPLICATION DE LA MÉTHODE FLAURE ET INFLUENCE DES DIFFÉRENTS TERMES D'INCERTITUDE

TABLE 12.2 – Valeurs utilisées, pour chaque composant d'incertitude, pour l'estimation de l'incertitude élargie selon les quatre méthodes analytiques.

Méthode	ISO 748	Q+ α fixe	Q+ α calé	FLAURE modèle moyen	IVE
Notation	ISO	<i>QpFixe</i>	<i>QpCal</i>	<i>FlaureMoy</i>	<i>IVE</i>
u'_s	1%				
$u'(B_i)$	0,5%				
$u'(D_i)$	0,5%				Eq. 6.13
$u'_p(V_i)$	Annexe E de la norme ISO 748	Eq. 6.5			Eq. 6.13
$u'(v_{i,j})$	$u'_c(v_{i,j})$ et $u'_e(v_{i,j})$ selon l'annexe E de la norme ISO 748				Eq. 6.13
u'_m	Eq. 6.3	Eq. 6.8 et Eq. 6.9	Eq. 6.8 et Eq. 6.9 avec α estimé selon Eq. 6.10	Eq. 9.4 et fig. 10.6	Inclus dans $u'(D_i)$ et $u'(V_i)$
u'_{rives}	Non pris en compte	u'_{rives} selon les Eq. 6.8 et Eq. 6.9			Non pris en compte

tudes calculées selon les quatre méthodes analytiques. On constate que les méthodes FLAURE et IVE sont les plus corrélées, avec un coefficient de corrélation linéaire de Pearson de 0,73. Statistiquement, ces deux méthodes se basent sur le calcul d'un écart-type calculé sur les vitesses moyennes et sur les profondeurs des verticales. L'incertitude selon ces deux méthodes est d'autant plus forte que les vitesses et les profondeurs sont irrégulières. De même, les méthodes FLAURE et Q+ selon un angle α estimé par l'équation 6.10 sont également bien corrélées entre elles. La méthode Q+ étant sensible à l'estimation de l'angle α , son calage sur le profil bathymétrique mesuré rend l'incertitude corrélée à l'irrégularité du profil bathymétrique.

L'ajustement d'une régression linéaire sur les nuages de point permet de mettre en évidence un facteur de proportionnalité entre les différentes méthodes de calcul. Bien que les corrélations soient assez faibles, on peut dégager les tendances suivantes : la méthode IVE donne des incertitudes deux fois plus importantes que la méthode FLAURE et la méthode Q+ avec un angle α calé par l'équation 6.10 donne des incertitudes plus faibles d'un facteur de 0,8 que la méthode FLAURE.

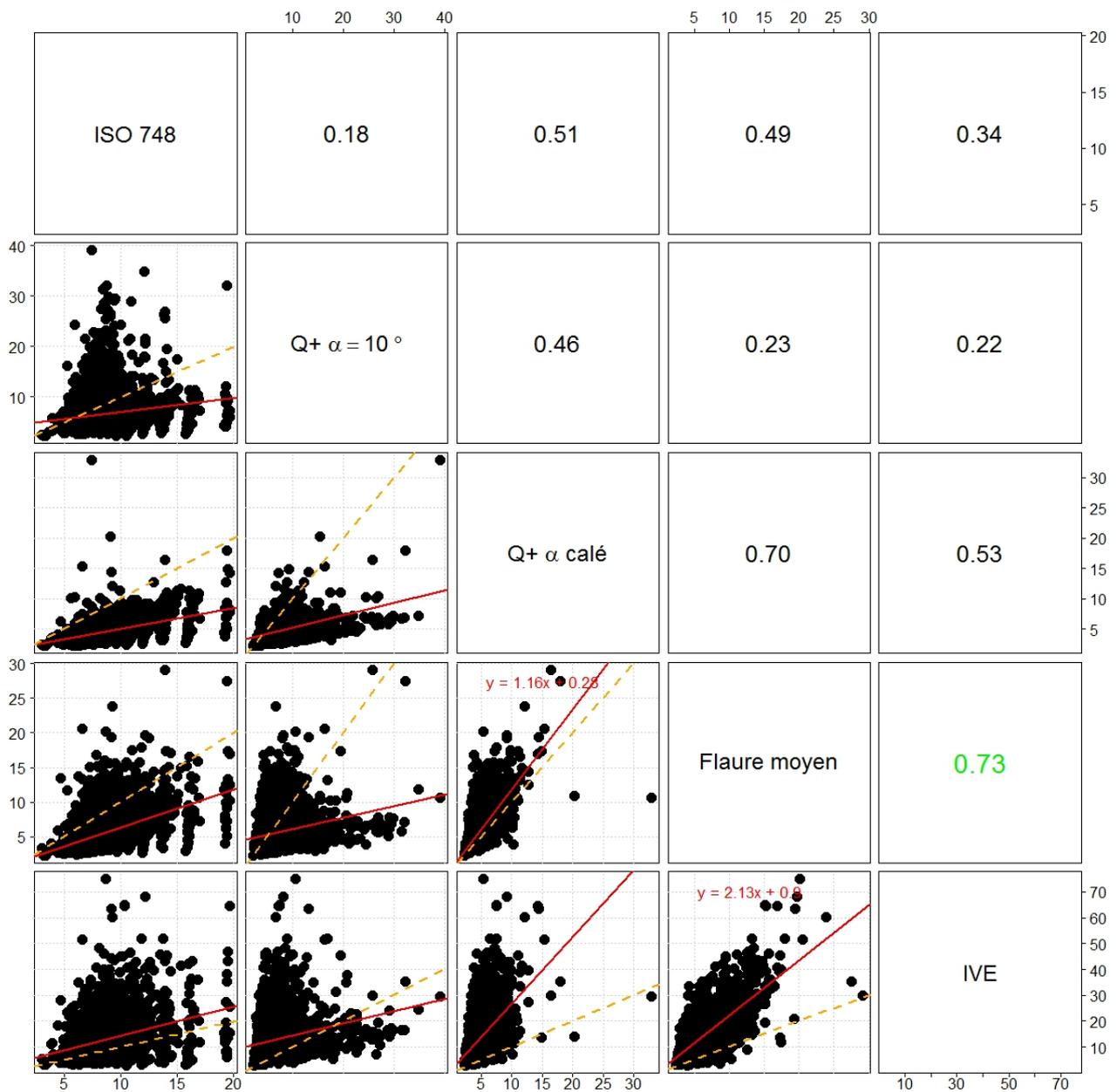


FIGURE 12.14 – Diagramme des nuages de points des incertitudes $U'(Q)$ (au niveau de confiance de 95%) selon les quatre méthodes analytiques appliquées à la base des 3930 jaugeages EDF-DTG. Les lignes obliques en orange représentent la première bissectrice. La régression linéaire est matérialisée par une courbe rouge. Celle-ci n'est significative que pour la confrontation des incertitudes FLAURE avec les incertitudes IVE et Q+ avec angle α calé et les équations respectives sont inscrites en rouge. Les valeurs inscrites dans la diagonale supérieure donnent le coefficient de corrélation linéaire de Pearson pour les incertitudes.

12.3.1 Quelques exemples

Six jaugeages de la base de données EDF-DTG ayant 10 ou 11 verticales ont été sélectionnés. Leurs profils bathymétriques ainsi que les profils latéraux des vitesses moyennes sont tracés à la figure 12.15. Les caractéristiques en termes de débit, de nombre de verticales et de SQI ainsi que les valeurs d'incertitude selon les quatre méthodes analytiques sont présentées dans le tableau 12.3. Les trois premiers cas ont été choisis pour leurs profils très irréguliers. Les trois derniers montrent des profils peu irréguliers et plutôt lisses.

TABLE 12.3 – Caractéristiques de 6 jaugeages sélectionnés dans la base de données EDF-DTG en termes de débit, nombre de verticales et SQI ainsi que leurs incertitudes respectives. Les incertitudes sont exprimées au niveau de confiance de 95%. * m désigne le nombre de verticales. *sep. fait référence à la méthode FLAURE avec séparation des termes $u'_m(D_i)$ et $u'_m(V_i)$.

Jaugeage	Débit	m^*	SQI	ISO 748	IVE	$Q+$	$Q+$ calé	FLAURE moyen	FLAURE sep.*
Rivière @ Station (Date)	[m ³ /s]	[/]	[/]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]
Arc @ La Saussaz (25/09/2002)	1,100	10	0,51	9,0	36,0	4,5	8,1	16	14
Romanche @ Freney d'Oisans (16/04/2013)	0,376	10	1,11	9,3	60,2	6,7	12	24	15
Gaves @ Arras Nouaux (07/03/2012)	0,895	11	0,46	8,4	39,3	7,2	4,8	15	16
Arc @ Bramans (25/01/2012)	3,350	10	0,05	9,0	10,4	6,7	3,0	3,2	3,5
Jordane @ Clavieres (11/01/2000)	3,600	10	0,06	9,0	8,4	11	3,8	3,5	4,3
Lot @ Bramonas (28/05/1998)	13,40	10	0,08	8,9	6,8	5,0	2,9	3,4	6,5

Sur les trois jaugeages les plus irréguliers, on constate à nouveau que les valeurs d'incertitude selon les méthodes $Q+$ avec angle α calé, IVE et FLAURE varient de la même manière. En revanche, les incertitudes selon la méthode IVE semblent bien trop élevées. Pour les 6 jaugeages, les valeurs calculées selon la norme ISO 748 sont très stables, en raison d'un nombre similaire de verticales. Bien que le jaugeage de Arras Nouaux soit plus complexe que les jaugeages de Bramans, Clavières et Bramonas, l'incertitude associée selon la norme ISO 748 est la plus faible. Les valeurs estimées par la méthode $Q+$ avec un angle α fixe sont critiquables puisqu'il aurait fallu associer à chacun des jaugeages une valeur d'angle expertisée.

Les valeurs d'incertitude selon la méthode FLAURE donnent des résultats cohérents avec la complexité des sections de jaugeage. Les jaugeages les plus irréguliers sont les plus incertains, avec une incertitude de l'ordre de 15%. Les jaugeages les plus lisses conduisent, quant à eux, à une incertitude plus faible d'environ 3%. La forte incertitude FLAURE associée au jaugeage de la Romanche à la station du Freney d'Oisans s'explique par une forte valeur de SQI . On note que ce jaugeage présente la plus forte valeur de SQI parmi la base des 3930 jaugeages EDF-DTG. Celui-ci est en effet très sensible aux variations de q que l'on observe à la figure 12.16.

Pour ce jaugeage, le calcul du SQI par application de l'équation 9.4 est détaillé à l'équation 12.7. On constate que le produit de Δx_i par Δq_i , exprimé en [m³/s], illustré par les rectangles bleus à la figure 12.16 est nettement supérieur au débit.

$$\begin{aligned}
 SQI &= \frac{\sigma(\Delta q)}{\sigma(q)} \frac{\sum_{i=1}^{m+1} (\Delta x_i \Delta q_i)}{Q} \\
 &= \frac{0,0917}{0,0911} \frac{0,4051}{0,3763} \\
 &= 1,007 * 1,085
 \end{aligned} \tag{12.7}$$

Pour ce jaugeage, la méthode FLAURE avec séparation des termes $u'_m(D_i)$ et $u'_m(V_i)$ conduit en revanche à une incertitude nettement plus faible, puisque le SQI calculé sur les grandeurs D_i et V_i vaut respectivement 0,31 et 0,37. On observe en effet que le profil bathymétrique

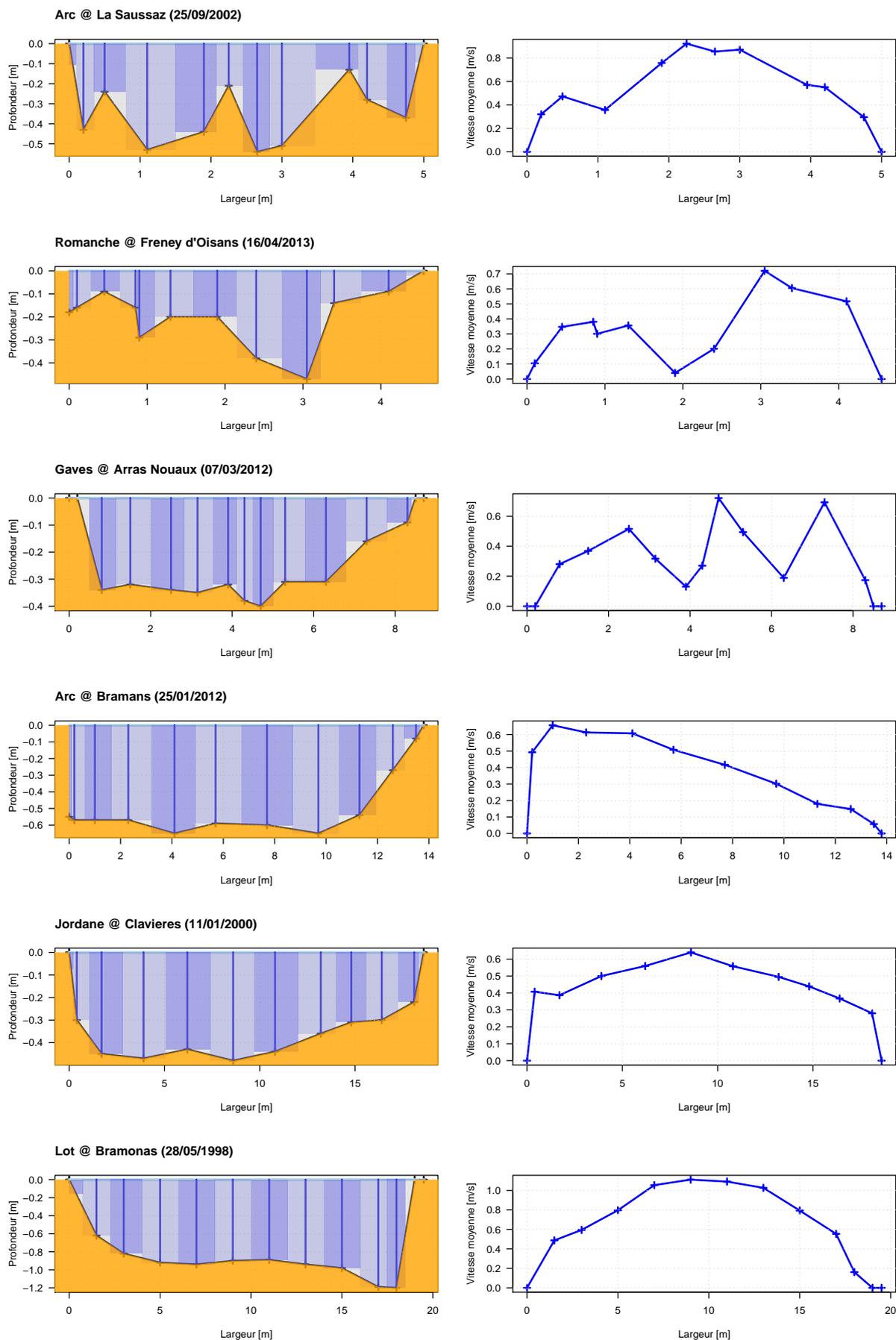


FIGURE 12.15 – Profils bathymétriques (à gauche) et profils latéraux des vitesses moyennes (à droite) pour les six jaugeages tests étudiés.

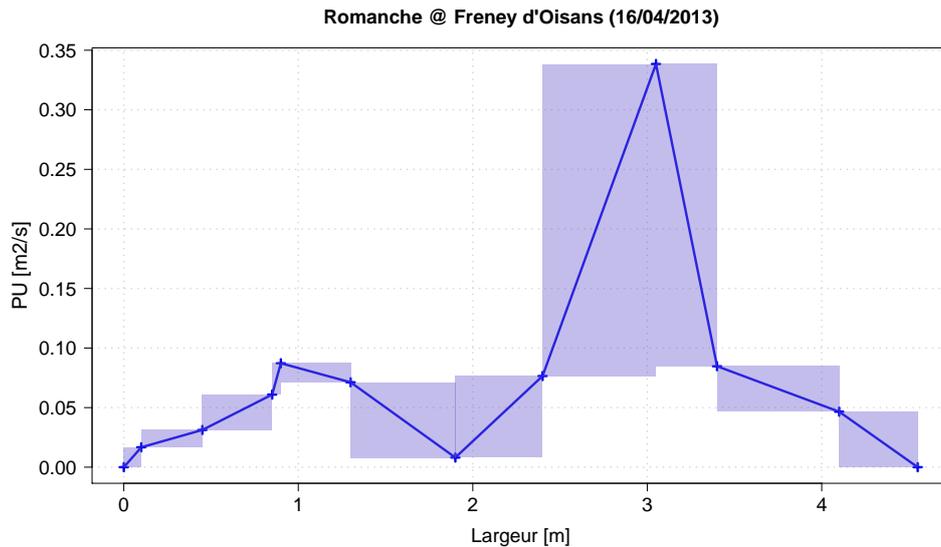


FIGURE 12.16 – Profil latéral des q du jaugeage de la Romanche à la station hydrométrique du Freney d'Oisans (16/04/2013). L'aire des rectangles bleus correspond au produit de Δx_i par Δq_i dans la définition du SQI (voir équation 9.4).

et le profil latéral des vitesses moyennes, représentés à la figure 12.15, sont plus lissés que le profil latéral des q . On peut néanmoins s'interroger sur la pertinence du choix de la section. En effet, la faible valeur de vitesse (et de profil unitaire q) au milieu de la section (abscisse 2 [m]) révèle la présence probable d'un gros bloc en amont de la verticale de mesure. Dans le sillage de celui-ci, les vitesses sont très faibles. Pour les cinq autres jaugeages, on ne constate pas de différence significative dans l'estimation de l'incertitude en utilisant un modèle moyen avec et sans séparation des termes $u'_m(D_i)$ et $u'_m(V_i)$.

12.3.2 Effet du protocole de mesure

Les quatre méthodes analytiques (norme ISO 748, $Q+$, IVE et $FLAURE$), ont été appliquées sur les 192 jaugeages d'une base de données de jaugeages issue de l'USGS (pour rappel, les valeurs d'incertitude et les équations retenues pour les calculs sont renseignées dans le tableau 12.2).

Les caractéristiques de ces jaugeages en termes de débit, aire de la section mouillée, largeur au miroir, profondeur maximale et vitesse débitante sont présentées à la figure 12.17. Cette figure peut être mise en relation avec la figure 3.9, présentant les caractéristiques des 3930 jaugeages EDF-DTG.

Le nombre médian de verticales est de 26, pour 1 point de mesure de vitesse par verticale (vitesse moyenne obtenue par la méthode algébrique décrite à la section 5.1.3). Le protocole de l'USGS préconise un grand nombre de verticales de mesure et un plus faible nombre de points par verticale (1 ou 2, avec application des méthodes algébriques exposées en section 5.1.3) tandis que le protocole de EDF-DTG préconise un nombre plus faible de verticales (une dizaine) avec des profils verticaux de vitesses mieux explorés (5 points de mesure ponctuelle de vitesse par verticale). Ces différences peuvent s'expliquer par la nature des cours d'eau mesurés. Ces derniers sont, en majeure partie, répartis sur les massifs montagneux du réseau hydrométrique d'EDF-DTG (voir la figure 2.1b) alors qu'historiquement, les cours d'eau mesurés par l'USGS (avant l'apparition massive des ADCP) sont des cours d'eau de piedmont et de plaines.

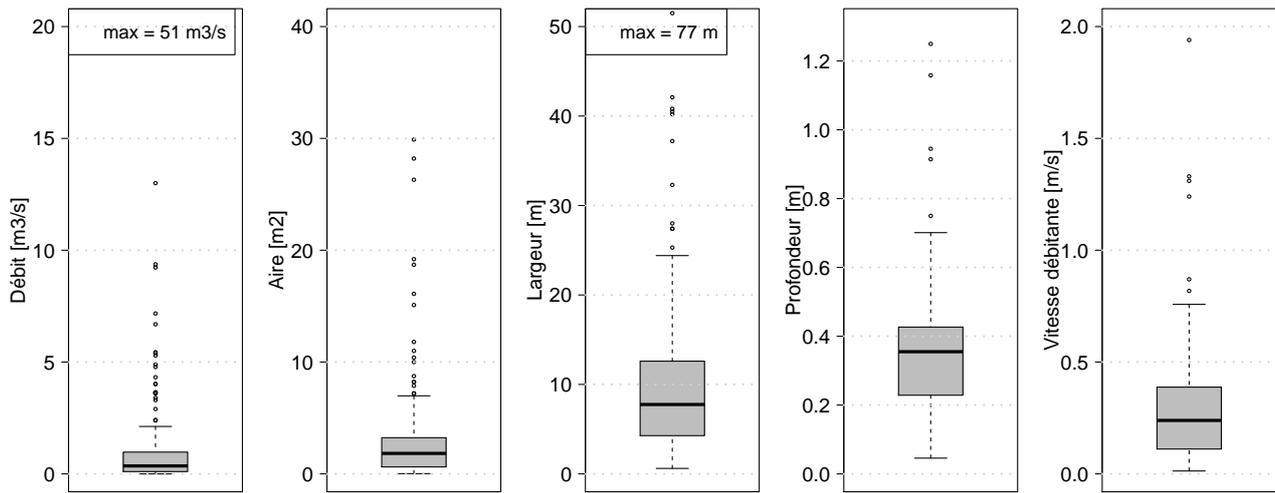


FIGURE 12.17 – Boîtes à moustaches des débits, aires de la section mouillée, largeurs au miroir, profondeurs maximales et vitesses débitantes des 192 jaugeages réalisés par l’USGS. Les boîtes s’étendent du quartile 25% au quartile 75% et les moustaches s’étendent jusqu’à la valeur distante de 1,5 fois la distance interquartile.

Globalement, on observe que les cours d’eau mesurés sont plus petits (débits, aire et profondeurs plus faibles) bien qu’ils restent du même ordre de grandeur que les jaugeages de la base de données EDF-DTG. Les vitesses débitantes sont, dans la majorité des cas (98% des cas), inférieures à 1 [m/s].

Les valeurs d’incertitude selon les quatre méthodes sont représentées sous forme de distributions empiriques à la figure 12.13b en comparaison des valeurs estimées sur la base des 3930 jaugeages EDF-DTG.

La comparaison des résultats d’incertitude des deux bases de données montre que la distribution des incertitudes selon la méthode $Q+$ avec un angle α fixe ne varie pas quel que soit le protocole de mesure (USGS ou EDF-DTG). On observe une augmentation sensible de l’incertitude selon le méthode FLAURE et selon la méthode $Q+$ avec un angle α calé. Comme attendu, on observe une diminution de l’incertitude selon la norme ISO 748 puisque le nombre de verticales a augmenté. On observe enfin une très forte diminution de l’incertitude selon la méthode IVE , de l’ordre de 4%, ce qui est le signe que la méthode de calcul IVE semble plutôt mieux adaptée au protocole de mesure de l’USGS.

La confrontation des deux protocoles de mesure ne permet pas de montrer que l’un d’entre eux est meilleur. On note d’ailleurs que si l’incertitude estimée diminue, ce n’est pas forcément le signe d’une valeur de débit plus robuste, c’est-à-dire proche de la valeur vraie.

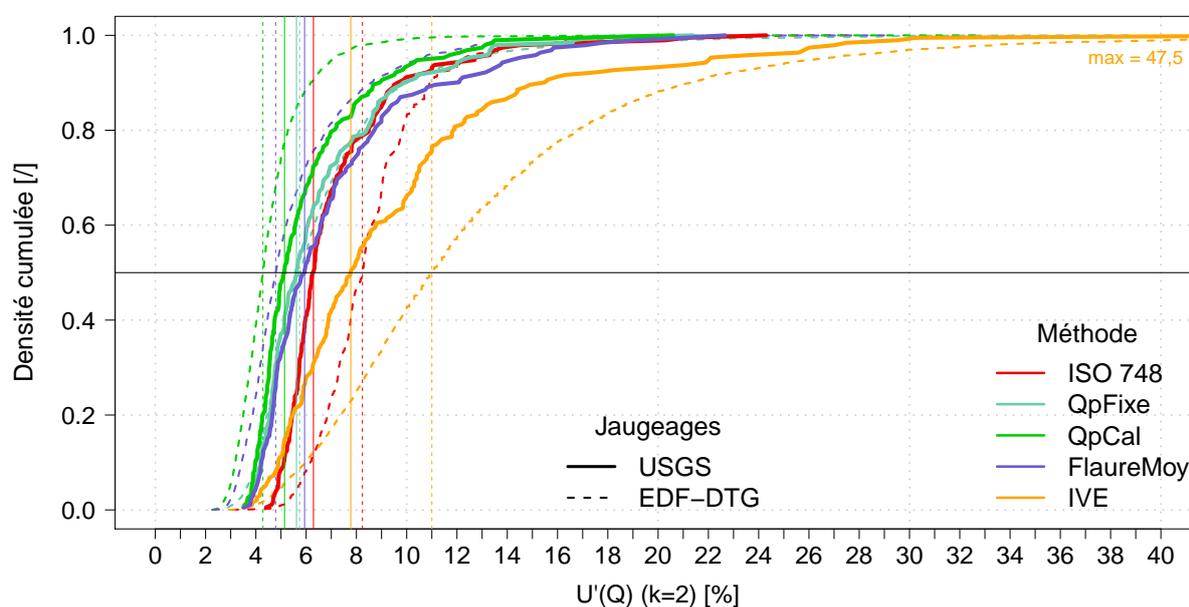


FIGURE 12.18 – Incertitudes élargies $U'(Q)$ (au niveau de confiance de 95%) selon les quatre méthodes analytiques appliquées à la base des 192 jaugeages de l'USGS, présentées sous forme de distributions empiriques. Les lignes verticales colorées sont les valeurs médianes d'incertitude selon les différentes méthodes. La valeur maximale d'incertitude atteinte en appliquant la méthode IVE est de 47,5%.

Conclusion de la partie III

La méthode FLAURE, présentée dans la partie III, expose l'objectivation de certaines sources d'incertitude pour l'application analytique du calcul d'incertitude.

Une attention particulière a porté sur l'estimation du terme u'_m puisque celui-ci est prépondérant dans l'estimation de l'incertitude finale $U'(Q)$. Cette étude a porté sur un jeu de jaugeages de référence, représentatifs des sites de mesure d'EDF-DTG, à haute résolution latérale de mesure. La méthode de sous-échantillonnage développée au chapitre 8 a permis de générer des jaugeages similaires à des jaugeages réalisés par un hydromètre, permettant ainsi une analyse statistique pour l'estimation du terme u'_m .

La définition d'un indice d'échantillonnage SQI a permis une meilleure caractérisation de l'incertitude u'_m en relation avec la qualité et la densité de l'échantillonnage latéral des profondeurs et de la vitesse moyenne. Cet indice est plus adapté pour estimer l'incertitude u'_m que le nombre de verticales. Il présente l'avantage d'être suffisamment simple à calculer et ne nécessite pas de mesures supplémentaires au cours du jaugeage.

Différents modèles pour le calcul de ce terme ont été proposés dans le chapitre 10. Le modèle par typologie de jaugeage, bien que plus élaboré que le modèle moyen, se heurte à la difficulté de calibrer le nombre de jaugeages analogues à retenir et à l'exhaustivité du panier de jaugeages de référence. Le modèle moyen, moins sensible au nombre de jaugeages de référence, est plus simple à mettre en œuvre, tout en donnant des valeurs d'incertitudes proches du modèle par typologie. Il se justifie par la bonne superposition des courbes d'incertitude en fonction du SQI , observée sur la figure 9.9, surtout lorsque les jaugeages modélisés sous TELEMAC sont retirés. La décomposition de l'incertitude en deux termes $u'_m(D_i)$ et $u'_m(V_i)$ permet de montrer que l'incertitude provient, le plus souvent, des erreurs sur l'exploration latérale de la bathymétrie plutôt que des erreurs sur l'exploration latérale des vitesses moyennes. Le protocole par ajout de lame d'eau est ainsi utile pour réduire les erreurs sur la bathymétrie.

Les travaux portant sur les autres termes d'incertitude ont ensuite démontré qu'ils doivent être quantifiés à chaque site de mesure. Certains termes, comme celui dû au choix de la section, restent difficiles à quantifier. La définition de nouveaux critères, permettant par exemple de caractériser la turbulence d'un site, constitue une piste de travail et permettra certainement d'objectiver les autres sources d'erreur afin de s'affranchir des valeurs issues de la norme ISO 748.

L'application des différentes méthodes analytiques aux 3930 jaugeages de la base EDF-DTG a permis de comparer les ordres de grandeur des incertitudes produites. La méthode IVE semble clairement surestimer les incertitudes tandis que la norme ISO 748 ne donne pas

des valeurs d'incertitude adaptées à la complexité de chaque section de mesure. Les méthodes $Q+$ et FLAURE produisent quant à elles des résultats d'incertitude proche, du même ordre de grandeur que les valeurs proposées par Forray *et al.* (1998). Le calage automatique de l'angle α semble toutefois limité puisqu'il conduit à des valeurs d'incertitude un peu faibles. L'analyse des corrélations entre les différentes méthodes a ensuite montré que la méthode FLAURE conduit à des valeurs plutôt bien corrélées aux valeurs produites par les méthodes *IVE* et $Q+$ avec un angle α calé automatiquement. Cela témoigne du fait que les trois méthodes captent les oscillations de la bathymétrie et des vitesses moyennes. Elles sont, toutes trois, bien sensibles à la complexité des sections.

En l'absence de valeur de débit de référence, il est difficile de statuer sur la méthode la plus robuste permettant de quantifier l'incertitude d'un jaugeage au courantomètre et de calibrer les différents composants d'incertitude. On retiendra que l'avantage de la méthode FLAURE par rapport à la méthode $Q+$ est l'absence de paramètre subjectif (angle α) à fixer.

Pour approcher la vraie valeur d'incertitude, il faudrait en principe plusieurs répétitions (30 au moins) de jaugeages (indépendants) sous une condition de stabilité du débit (Huang, 2012). Pour calibrer ainsi chaque composant d'incertitude, il faudrait réaliser ce type d'essai tout en fixant toutes les autres sources d'incertitude. Ce type d'essai est lourd et difficile à mettre en œuvre en milieu naturel. Les essais interlaboratoires, appliqués au jaugeage au courantomètre présentés dans la partie IV permettent néanmoins d'estimer l'incertitude de la technique de mesure en réalisant une répétition de jaugeages simultanés par plusieurs équipes en conditions de répétabilité et de reproductibilité.

QUATRIÈME PARTIE

Essais interlaboratoires



Campagne d'essai interlaboratoire sur le Cernon à St Georges de Luzençon (Aveyron, France). Photo : G. Dramais.

Essais interlaboratoires appliqués aux jaugeages au courantomètre

Des essais interlaboratoires ont été mis en œuvre dans le domaine de l'hydrométrie afin de quantifier l'incertitude de méthodes de jaugeage. Contrairement aux méthodes analytiques présentées dans le chapitre 6, on rappelle que les essais interlaboratoires ne permettent pas d'estimer l'incertitude d'une mesure mais celle de la méthode de mesure, et ce, uniquement dans les conditions expérimentales des essais. Ils constituent néanmoins un outil utile pour l'étude des incertitudes en hydrométrie (Dramais *et al.*, 2013a; Le Coz *et al.*, 2016).

Les erreurs de mesure sont estimées à partir de la répétition de jaugeages simultanés par plusieurs équipes en conditions de répétabilité et de reproductibilité (voir les définitions correspondantes à la section A.1.1), pour une plage de débit constant. Cela demande une logistique assez lourde mais, depuis quelques années, des comparaisons interlaboratoires de jaugeages à l'ADCP ont lieu régulièrement dans le monde de l'hydrométrie, par exemple en Angleterre (Everard, 2007, 2009), en Croatie (Terek et Nimac, 2008) et en France depuis 2009 sous l'impulsion du *Groupe Doppler Hydrométrie* (Le Coz *et al.*, 2009; Pobanz *et al.*, 2011; Hauet *et al.*, 2012). Ces comparaisons ont été transposées à la technique de jaugeage par courantomètre lors d'essais réalisés en 2011 (Dramais *et al.*, 2011) et en 2013 (Despax *et al.*, 2014). La description des sites et du protocole ainsi que les résultats des essais sont largement commentés dans les rapports d'essais respectifs (pour plus de détails, le lecteur se référera aux citations correspondantes). L'objectif de ce chapitre consiste à rappeler les grands principes de ces essais et de proposer une analyse homogène de ces deux essais.

13.1 Description générale des essais

Les intercomparaisons réalisées à proximité d'Aix-en-Provence, dans les Bouches-du-Rhône (Dramais *et al.*, 2011), et Nant, dans l'Aveyron (Despax *et al.*, 2014), visaient à quantifier la performance métrologique de la méthode de jaugeage par courantomètre sur perche en accord avec la démarche exposée dans la section 4.2.3.

Ces essais ont réuni respectivement 11 et 13 équipes, ou laboratoires au sens de la norme 5725 (ISO, 1994a), sur quatre petits cours d'eau français : l'Ouvèze à Entrechaux, le Toulourenc à Malaucène (Veaux), le Cernon à Saint-Georges de Luzençon et le Durzon à Nant (voir la figure 13.1).

Les débits mesurés lors des deux campagnes correspondent à 0,4 [m³/s] pour le Toulourenc, 0,7 [m³/s] pour le Cernon et 1 [m³/s] pour l'Ouvèze et le Durzon. La largeur de ces cours d'eau est de l'ordre de la dizaine de mètres. Ces cours d'eau ont été sélectionnés pour la stabilité de



FIGURE 13.1 – (a) L’Ouvèze à Entrechaux, (b) le Toulourenc à Malaucène (Veaux), (c) le Cernon à Saint-Georges de Luzençon et (d) le Durzon à Nant. Photographies tirées de Dramais et al. (2011) et Despax et al. (2014).

leur débit.

Les caractéristiques principales des cours d’eau jaugés sont présentés dans le tableau 13.1 et les profils latéraux (de vitesse moyenne et de profondeur) sont consultables à l’annexe F.

On remarque que les propriétés des cours d’eau jaugés sont similaires aux cours d’eau habituellement jaugés à EDF-DTG dont les caractéristiques en termes de débit médian et de largeur sont mentionnées dans la section 3.1.5 et illustrées à la figure 3.9.

Un protocole commun a été retenu pour que les résultats soient exploitables dans les conditions d’essais interlaboratoires (ISO, 1994b). Le nombre de verticales de mesure ainsi que le nombre de points par verticale ont été imposés. De ce fait, le choix commun à toutes les équipes d’utiliser trois points par verticale ne s’exprime pas dans l’incertitude estimée par l’approche interlaboratoires. De même, l’incertitude due à l’échantillonnage latéral de la section de mesure ne s’exprime pas au cours des essais puisque le nombre de verticales est fixé (à 15 ou 20 verticales). Les résultats d’incertitude seront donc représentatifs d’un jaugeage ayant des caractéristiques similaires aux sites jaugés et pour le protocole imposé. Un temps d’exposition de 30 secondes a été retenu pour l’ensemble des essais. Des mesures complémentaires, par ADCP et par dilution au sel, ont également été réalisées au cours de ces essais ainsi qu’un relevé limnimétrique pour suivre la stabilité du débit.

TABLE 13.1 – Caractéristiques en termes de débit moyen [m^3/s], de largeur [m], d’aire [m^2] et de vitesse débitante [m/s] des quatre cours d’eau jaugés aux cours des essais interlaboratoires, nombre de laboratoires et de verticales associés. Deux séries de mesures ont été réalisées sur le site de Nant (essais # 1 et # 2).

Cours d’eau	Débit	Largeur	Aire	Vitesse débitante	Nombre de	
(Station)	moyen [m^3/s]	min-max [m]	min-max [m^2]	min-max [m/s]	Laboratoires	Verticales
Ouvèze (Entrechaux)	1,14	8,9 - 11,8	2,2 - 3,0	0,39 - 0,55	11	15
Toulourenc (Malaucène)	0,35	3,9 - 6,9	0,9 - 1,2	0,28 - 0,50	11	15
Cernon (St Georges de Luzençon)	0,75	8,4 - 15,7	2,8 - 5,0	0,15 - 0,33	12	20
Durzon (Nant) (# 1)	0,92	4,7 - 7,0	1,8 - 3,0	0,29 - 0,56	13	15
(# 2)	0,90	5,6 - 6,6	1,8 - 3,0	0,29 - 0,56	11	15

Pour chaque site, le débit est estimé à deux reprises, à l’exception du site du Durzon pour lequel deux séries de deux répétitions ont été réalisées. La distance entre chaque opérateur dans la rivière varie entre 5 et 15 [m] afin de limiter la perturbation de l’écoulement vers l’opérateur à l’aval. De plus, chaque opérateur commence la mesure depuis la rive opposée à la rive de début de mesure de l’opérateur amont.

13.2 Résultats des mesures

Bien que chaque équipe dispose de son propre logiciel de dépouillement, les calculs de débit ont été effectués à nouveau de manière à uniformiser le dépouillement sur les deux campagnes d’intercomparaison. Les formules algébriques de la norme ISO 748 ont été appliquées pour l’estimation de la vitesse moyenne V_i sur chaque verticale. Les profils latéraux des vitesses sont extrapolés en loi puissance (avec un paramètre de rugosité fixé à $m = 6$). La méthode de la section médiane est utilisée pour la délimitation des sous-sections.

Les débits calculés sont reportés à la figure 13.2, sous forme de boîtes à moustaches, pour chaque site de mesure ainsi que le coefficient de variation, défini comme le rapport entre l’écart-type et la moyenne empiriques.

L’analyse des coefficients de variation montre que les essais réalisés en 2011 donnent des valeurs de débit plus dispersées que les essais de 2013. Ce constat peut être expliqué par les variations de débit observées au cours des mesures. Il a en effet été constaté une diminution d’environ 8% et de 15% respectivement pour les sites de l’Ouvèze et du Toulourenc en 2011 tandis que le débit est resté stable lors des essais de 2013.

Qualitativement, le site du Cernon a été désigné comme celui présentant des sections plus irrégulières et plus diversifiées. Afin d’objectiver ce constat, le SQI , considéré ici comme un indicateur de complexité de la section de mesure, a été calculé selon l’équation 9.4 pour chaque mesure et les résultats sont présentés à la figure 13.3. Les coefficients de variation sont également indiqués sur cette figure.

Globalement, on constate que le SQI varie entre 0,05 et 0,25 pour l’ensemble des sites, les valeurs maximales ne dépassant jamais 0,25 pour les sites de l’Ouvèze, du Toulourenc et du Durzon. Le coefficient de variation des SQI au sein de ces trois sites est de l’ordre de 0,5 et l’on remarque que le Durzon présente des sections de mesure plus homogènes (coefficient de variation de 40%). Bien que le nombre de verticales soit supérieur pour les jaugeages du

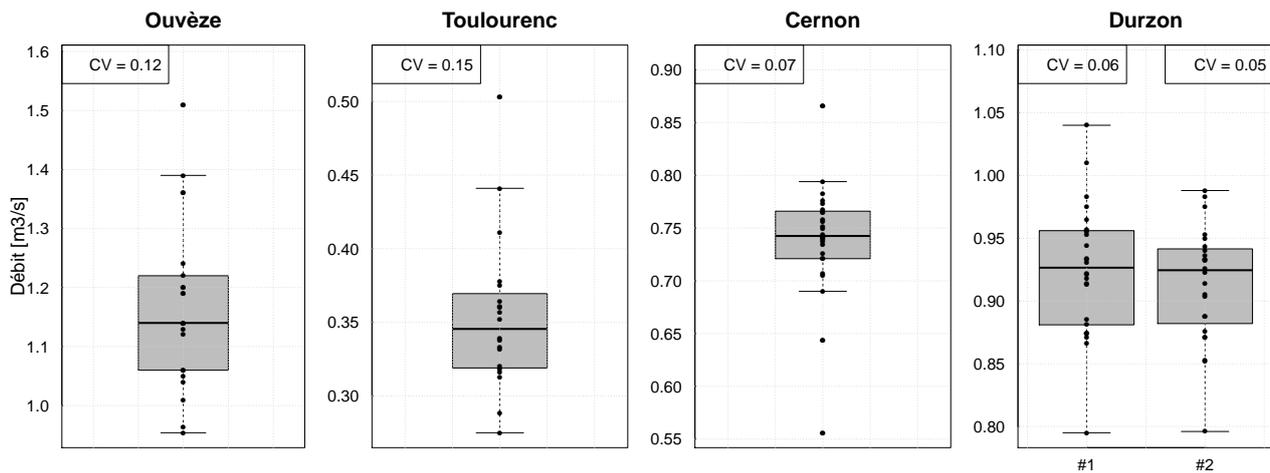


FIGURE 13.2 – Boîtes à moustaches des débits mesurés pour chaque essai, pour l’Ouvèze, le Toulourenc, le Cernon et le Durzon, (avec 2 répétitions de mesure par essai) et coefficient de variation associé (CV). Les boîtes s’étendent du quartile 25% au quartile 75% et les moustaches s’étendent jusqu’à la valeur distante de 1,5 fois la distance interquartile.

Cernon (20 contre 15), les valeurs de SQI sont nettement plus élevées et le coefficient de variation (0,73) traduit une diversité plus importante parmi les sections de jaugeage. L’analyse visuelle des profils latéraux de vitesse et de profondeur, présentés dans l’annexe F, confirme que le site du Cernon présente les profils les plus variés et les plus irréguliers.

13.2.1 Mesures complémentaires

Des jaugeages par dilution au sel ainsi que des jaugeages à l’ADCP ont été réalisés sur les différents sites de mesures. Pour le site de l’Ouvèze, les mesures complémentaires ont été réalisées uniquement par ADCP. Les résultats de débit n’ont pas pu mettre en évidence un éventuel biais entre les mesures au courantomètre et les mesures complémentaires. D’une part l’ordre de grandeur d’incertitude pour ce type de mesures (de l’ordre de 5 à 10% dans les conditions des essais) ne permet pas de quantifier le biais des jaugeages au courantomètre. D’autre part, les conditions de déploiement non propices mettent parfois en doute la qualité des mesures complémentaires. Par exemple, la condition de bon mélange n’a pas été validée sur le site du Cernon. Concernant les jaugeages par ADCP, le rapport entre le débit exploré et le débit estimé est faible sur l’ensemble des sites (inférieur à 50%), en raison de la faible profondeur, induisant un poids important des extrapolations en surface, au fond et au niveau des berges. La répétition de mesures à l’ADCP sur le site du Durzon a permis d’affirmer la stabilité du débit au cours des essais.

13.3 Résultats d’incertitude

On rappelle ci-dessous les différentes étapes aboutissant au calcul d’incertitude selon la méthode des essais interlaboratoires (présentée dans la section 4.2.3) :

1. Recueil, mise en forme des données et examen des valeurs,
2. Vérification de l’homogénéité des résultats par le calcul de la statistique de Mandel,
3. Détection des valeurs aberrantes (mise en œuvre des tests de Grubbs et Cochran),

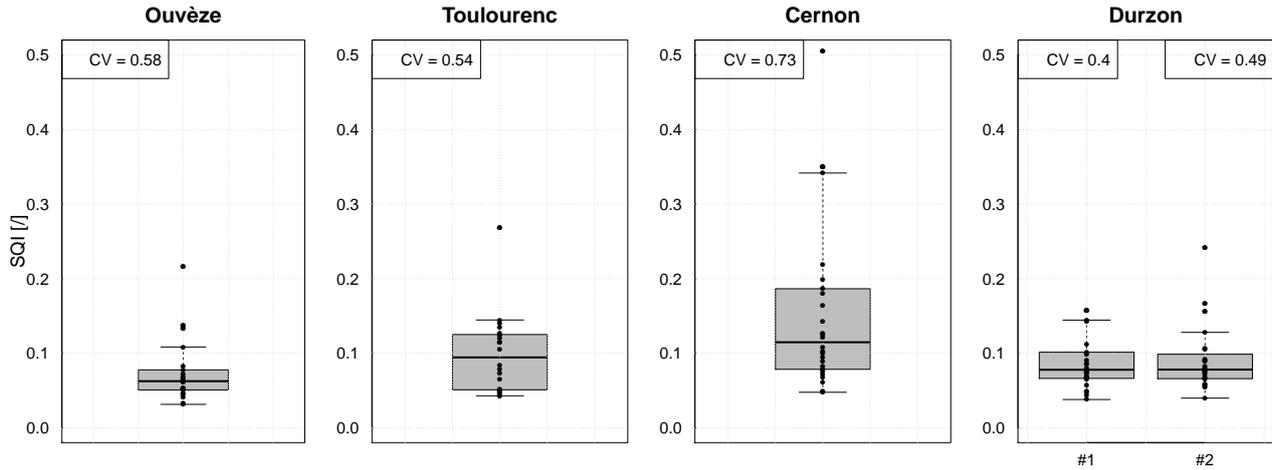


FIGURE 13.3 – Boîte à moustaches des SQI calculés pour chaque essai, pour l'Ouvèze, le Toulourenc, le Cernon et le Durzon, (avec 2 répétitions de mesure par essai) et coefficient de variation associé (noté CV). Les boîtes s'étendent du quartile 0,25% au quartile 0,75% et les moustaches s'étendent jusqu'à la valeur distante de 1,5 fois la distance interquartile.

4. Estimation de la variance du résultat (s_R^2 , équation 4.5) à partir des écarts-types de répétabilité (s_r) et interlaboratoires (s_L) estimés par les équations respectives 4.6 et 4.7.

Pour les trois premières étapes, le lecteur se référera aux rapports d'essais d'Aix (Dramais *et al.*, 2011) et de Nant (Despax *et al.*, 2014).

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

L'intervalle de confiance (à 95%) associé à l'estimation de l'incertitude (soit l'incertitude de l'incertitude) a été calculé sur l'ensemble des essais. L'équation 13.1 conduit à l'estimation de l'intervalle de confiance autour de 2σ , selon l'équation 13.2 (Despax *et al.*, 2014; Le Coz *et al.*, 2016)

$$A_R = 1.96 \sqrt{\frac{p[1 + n(\gamma^2 - 1)]^2 + (n - 1)(p - 1)}{2\gamma^4 n^2 (p - 1)p}} \quad (13.1)$$

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

$$2\sigma_R(1 + A_R) < U(Q) < 2\sigma_R(1 - A_R) \quad (13.2)$$

L'estimation de l'incertitude ainsi que son intervalle de confiance ont été calculés sur chacun des essais. Les résultats en termes d'incertitude (au niveau de confiance de 95%) sont présentés, en pourcentage, dans le tableau 13.2.

La forte dispersion des valeurs de débit des essais d'Aix conduit à des incertitudes nettement supérieures aux essais de Nant, en raison de la variation de débit observé sur les sites de

TABLE 13.2 – Estimation des écarts-types de répétabilité s_r et interlaboratoires s_L , de l'incertitude et de l'intervalle de confiance associé pour les différents essais interlaboratoires. L'incertitude est exprimée au niveau de confiance de 95% ($k = 2$).

Site	s_r	s_L	$U'(Q)$	Intervalle de confiance
	($k = 1$) [%]	($k = 1$) [%]	($k = 2$) [%]	($k = 2$) [%]
Ouvèze	4,7	5,8	15 %	11 - 24 %
Toulourenc	5,5	5,7	16 %	12 - 25 %
Cernon	3,0	4,5	11 %	8 - 17 %
Durzon (# 1)	2,7	4,5	10 %	8 - 16 %
Durzon (# 2)	2,1	3,9	9 %	6 - 15 %

l'Ouvèze et du Toulourenc. La complexité des sections de jaugeage du Cernon par rapport au Durzon se traduit par un écart de seulement 1% d'incertitude. On peut supposer qu'un protocole imposant 15 verticales pour les jaugeages du Cernon aurait certainement conduit à une valeur d'incertitude plus élevée pour ce site. L'intercomparaison n'a cependant pas pu mettre en évidence un effet flagrant de site entre les deux rivières en raison d'un protocole différent.

Confrontation des essais aux méthodes analytiques

Les méthodes analytiques, ISO 748, $Q+$, IVE et $FLAURE$, ont été appliquées à l'ensemble des jaugeages des essais interlaboratoires. Les résultats d'incertitudes sont confrontés aux estimations des essais interlaboratoires en section 14.1. Les écarts entre les deux approches sont ensuite discutés et des pistes les expliquant sont abordées en section 14.2. Des préconisations sont ensuite envisagées pour les futurs essais interlaboratoires (section 14.3).

La confrontation des deux approches a fait l'objet d'une discussion dans Despax et al. (2016a) dont une copie se trouve dans l'annexe D.

14.1 Confrontations des estimations d'incertitude des deux approches

14.1.1 Paramètres de calculs

Les quatre méthodes analytiques sont testées en appliquant les équations présentées au chapitre 6 et en partie III concernant la méthode $FLAURE$. Les valeurs d'incertitude et les équations retenues pour les calculs sont consignées dans le tableau 14.1. On choisit deux variantes de calcul pour les méthodes $Q+$ et $FLAURE$. Les autres termes inventoriés (section 5.3) ne sont ici pas considérés, y compris les possibles corrélations entre les erreurs de mesure.

Puisque l'on utilise une méthode algébrique pour l'estimation des vitesses moyennes (méthode à 3 points par verticale), le terme $u'_p(V_i)$ est calculé de la même manière pour les méthodes ISO 748, $Q+$ et $FLAURE$. Les valeurs des termes u'_s , $u'(B_i)$ et $u'(D_i)$ sont également identiques pour ces trois méthodes. En l'absence de valeurs objectivées et adaptées au matériel de mesure utilisé, les termes $u'_c(v_{i,j})$ et $u'_{exp}(v_{i,j})$ sont estimés selon les valeurs de l'annexe E de la norme ISO 748. Il a été montré, sur les sites du Cernon et du Durzon, que la sensibilité du calcul d'incertitude selon la méthode $Q+$ à l'angle α est limitée (Despax *et al.*, 2014) et n'est donc pas discutée par la suite.

Les résultats d'incertitude selon les différentes méthodes sont tracés et confrontés aux estimations des essais interlaboratoires sur les figures 14.1 et 14.2 pour les différents sites de mesure.

TABLE 14.1 – Valeurs utilisées, pour chaque composant d’incertitude, pour l’estimation de l’incertitude élargie des jaugages issus des essais interlaboratoires selon les quatre méthodes analytiques.

Méthode	ISO 748	Q+ α fixe	Q+ α calé	FLAURE par typologie	FLAURE modèle moyen	IVE
<i>Notation</i>	<i>ISO</i>	<i>QpFixe</i>	<i>QpCal</i>	<i>FlaureAnl</i>	<i>FlaureMoy</i>	<i>IVE</i>
u'_s	1%					
$u'(B_i)$	0,5%					
$u'(D_i)$	0,5%					Eq. 6.13
$u'(V_i)$	$u'_p(V_i)$, $u'_c(v_{i,j})$ et $u'_{exp}(v_{i,j})$ selon l’annexe E de la ISO 748					Eq. 6.13 en remplaçant les D_i par V_i
u'_m	Eq. 6.3	Eq. 6.8 et Eq. 6.9	Eq. 6.8 et Eq. 6.9 avec α estimé selon Eq. 6.10	Eq. 9.4, Eq. 10.1 et fig. 9.9	Eq. 9.4 et fig. 10.6	Inclus dans $u'(D_i)$ et $u'(V_i)$
u'_{rives}	Non pris en compte	u'_{rives} selon les Eq. 6.8 et Eq. 6.9				Non pris en compte

Comme montré précédemment, les valeurs d'incertitudes selon la norme ISO 748 dépendent uniquement du nombre de verticales (figure 14.1a). La variabilité résiduelle que l'on observe (coefficients de variation inférieurs à 0,1) est due aux gammes de vitesses mesurées. En effet, les valeurs des termes $u'_c(v_{i,j})$ et $u'_{exp}(v_{i,j})$ augmentent fortement pour des faibles vitesses.

De même, le calage automatique de l'angle α pour la méthode $Q+$ conduit à des résultats peu variables et à des estimations faibles, de l'ordre de 3%, au regard de l'incertitude calculée selon l'approche interlaboratoire (figure 14.2a). La méthode $Q+$ avec un angle α fixe, conduit à des incertitudes sensiblement plus élevées, de l'ordre de 5% pour l'ensemble des sites (figure 14.1b).

A l'inverse, la méthode IVE est très sensible à la complexité des sections de mesure (figure 14.1c). Le Cernon, site le plus complexe au regard du SQI , donne les incertitudes les plus élevées (jusqu'à 40%). La variabilité et l'ordre de grandeur des résultats d'incertitude semblent toutefois bien trop forts comparés à la dispersion des résultats en termes de débit observé sur la figure 13.2.

Les variantes de la méthode FLAURE par analogie (figure 14.2b) et selon un modèle moyen (figure 14.2c) donnent des résultats très proches. Comme pour la méthode IVE , la méthode FLAURE est sensible à la diversité des sections de mesure du site du Cernon mais les valeurs d'incertitudes restent plus faibles, de l'ordre de 5%. Les valeurs d'incertitude selon les méthodes FLAURE et $Q+$ avec angle α fixé sont similaires.

La confrontation des résultats de l'approche interlaboratoire aux méthodes analytiques (norme ISO 748, $Q+$ et FLAURE) montre un écart du simple au double. La méthode IVE donne des résultats cohérents à l'approche interlaboratoire compte-tenu d'un nombre élevé de verticales, néanmoins son application à des jaugeages de routine donne des valeurs très élevées (voir section 6.4.1). Pour toutes les méthodes, la variation du débit observée sur les sites d'Aix n'est pas pris en compte dans l'estimation analytique de l'incertitude.

14.2 Comparaison des résultats

Les écarts entre les estimations d'incertitude selon les deux approches peuvent être interprétés comme :

- Une sur-estimation de l'incertitude par l'approche interlaboratoires,
- Une sous-estimation des incertitudes selon les méthodes analytiques,

Il est toutefois probable que les écarts observés soient dus à la conjugaison des deux points précédents.

14.2.1 Sur-estimation de l'incertitude par l'approche interlaboratoires

Une sur-estimation systématique de l'incertitude par les essais interlaboratoires peut être due à un protocole d'essai imparfait.

En premier lieu, il a été montré que la variabilité du débit au cours des essais d'Aix en 2011 est certainement à l'origine de fortes valeurs d'incertitude comparées à celles estimées à Nant en 2013.

Ensuite, la variabilité des sections de mesure peut également entraîner une variabilité importante de l'écart-type de répétabilité. Le protocole, imposant un nombre de verticales de mesures, n'est ainsi pas adapté à toutes les sections pour mesurer le débit avec la même densité latérale de verticales. Ceci se traduit par une variabilité marquée des indices de qualité

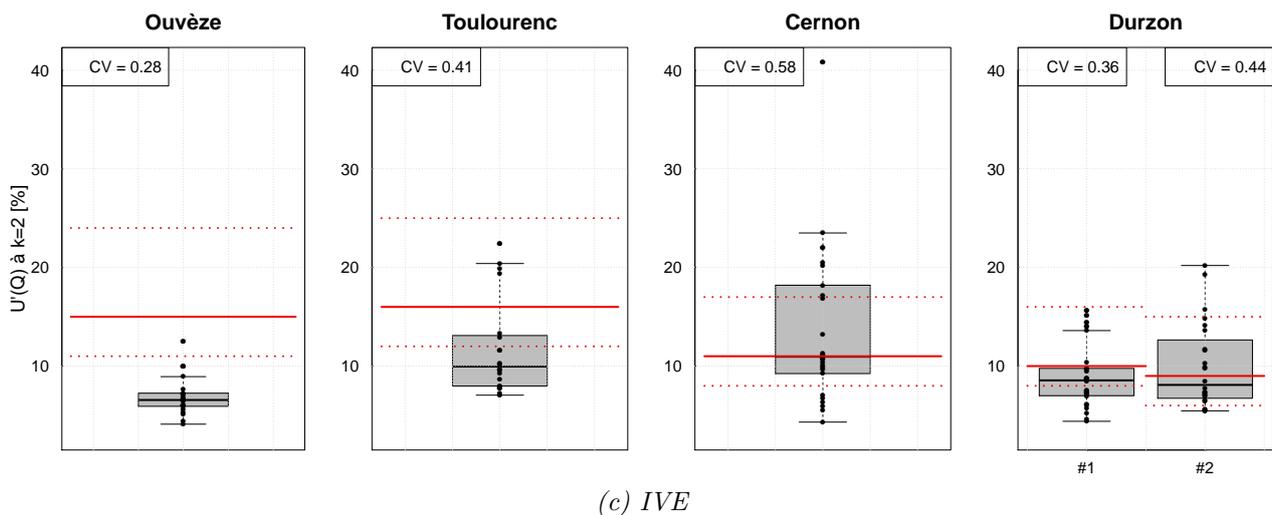
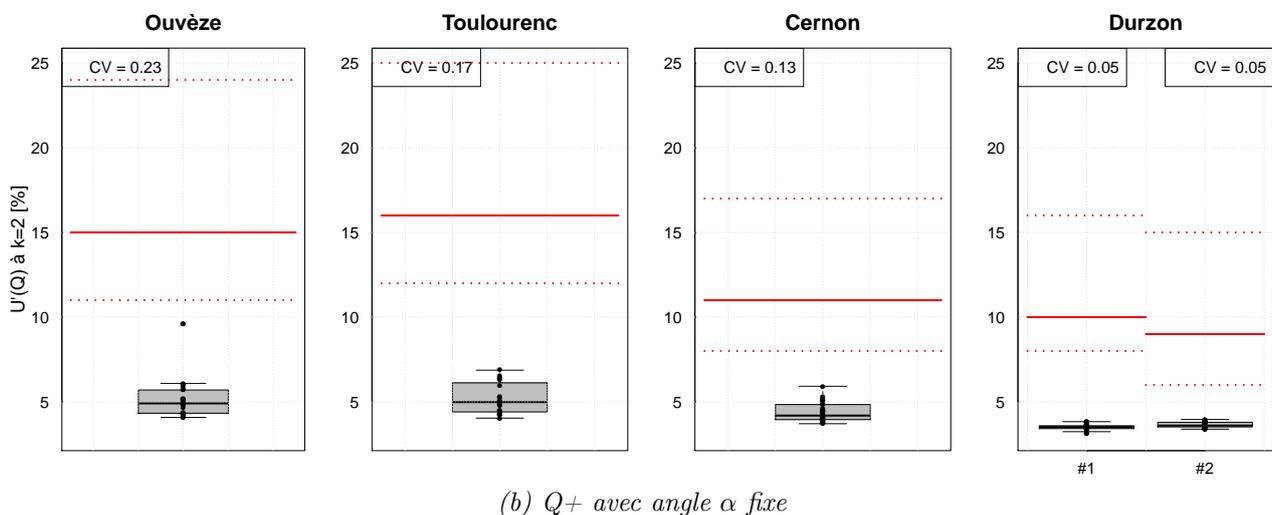
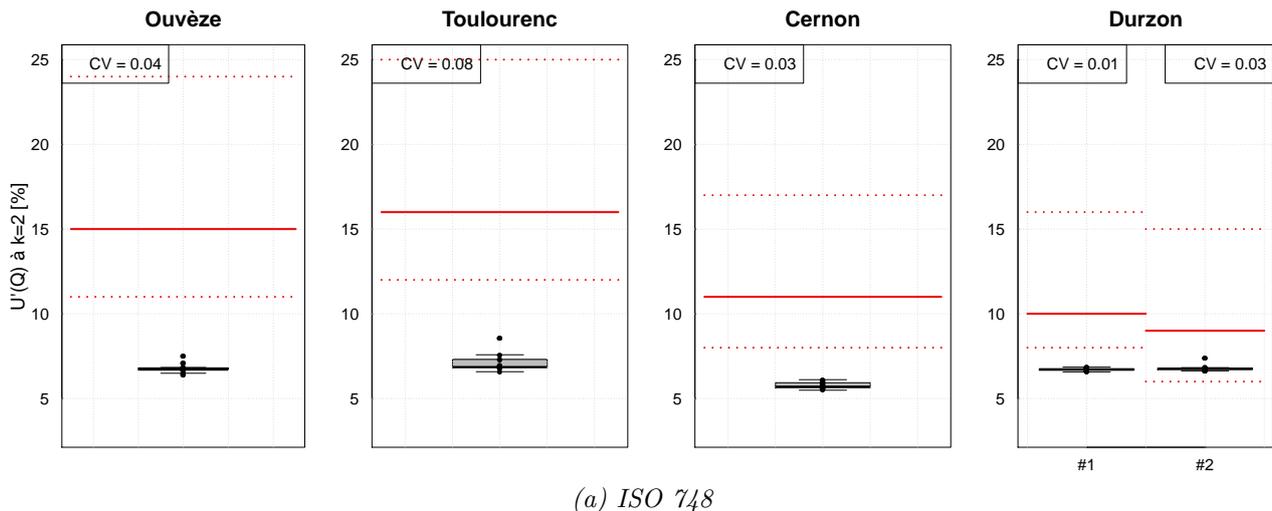
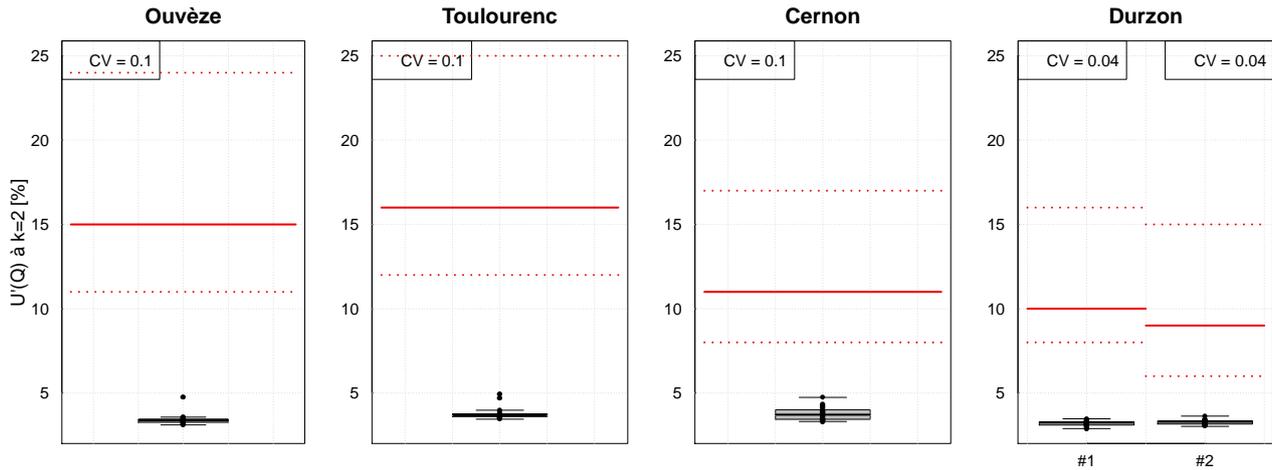
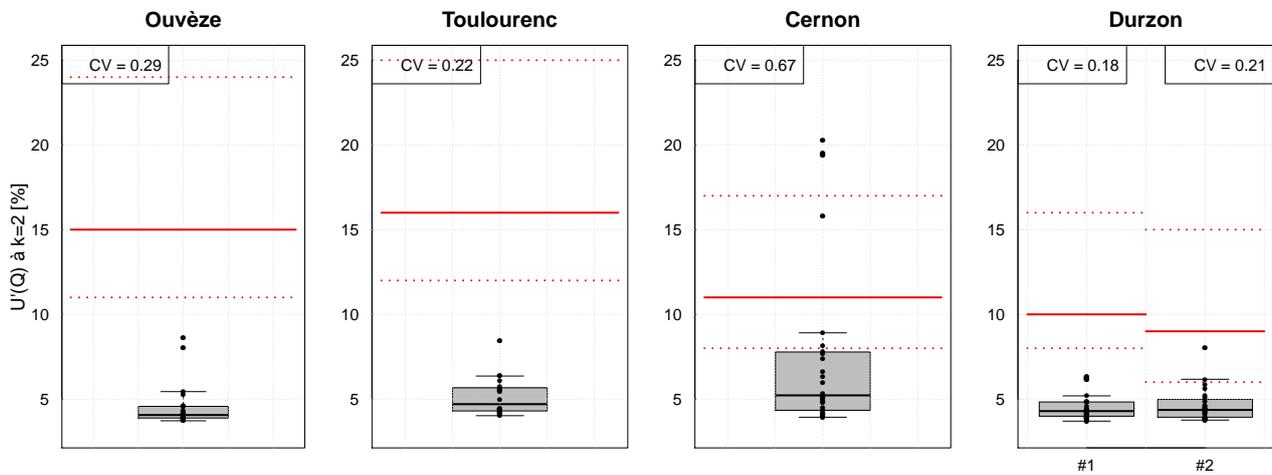


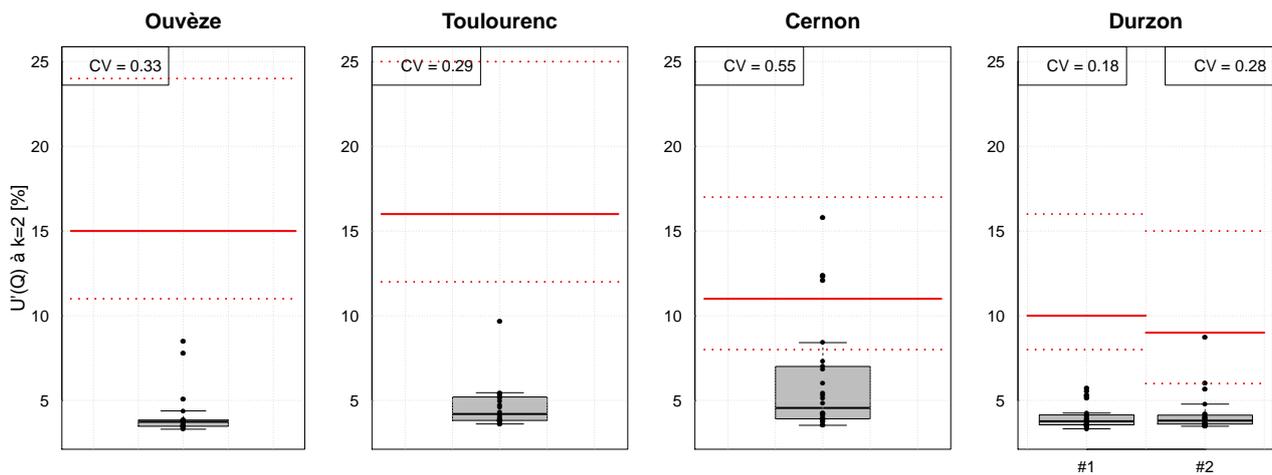
FIGURE 14.1 – Boîtes à moustaches des incertitudes $U'(Q)$, exprimées au niveau de confiance de 95%, pour chaque essai et selon les différentes méthodes. Les boîtes s’étendent du quartile 25% au quartile 75% et les moustaches s’étendent jusqu’à la valeur distante de 1,5 fois la distance interquartile. Les lignes rouges représentent les estimations de l’incertitude par la méthode des essais interlaboratoires, les lignes en pointillé délimitent l’intervalle de confiance associé. On relève que la valeur maximale d’incertitude selon la méthode IVE est de 40%.



(a) $Q+$ avec angle α calé



(b) FLAURE, par analogie



(c) FLAURE, modèle moyen

FIGURE 14.2 – Boîtes à moustaches des incertitudes $U'(Q)$, exprimées au niveau de confiance de 95%, pour chaque essai et selon les différentes méthodes. Les boîtes s'étendent du quartile 25% au quartile 75% et les moustaches s'étendent jusqu'à la valeur distante de 1,5 fois la distance interquartile. Les lignes rouges représentent les estimations de l'incertitude par la méthode des essais interlaboratoires, les lignes en pointillés délimitent l'intervalle de confiance associé.

d'échantillonnage (le *SQI*) illustrée à la figure 13.3. La présence d'une dizaine d'équipes sur un même site de mesure conduit également à s'interroger sur la qualité des sections de mesure. Certaines sections de mesure n'auraient certainement pas été choisies en "conditions normales".

De même, l'utilisation de méthodes algébriques (nombre de points par verticales fixé) n'est pas toujours adaptée aux conditions de l'écoulement. Les figures 14.3b et 14.3c illustrent deux profils adimensionnels de vitesse mesurés selon la méthode algébrique à 3 points en comparaison d'un profil théorique. La figure 14.3a montre le profil bathymétrique du jaugeage étudié (transect numéro 6 sur le Cernon) ainsi que la localisation des deux verticales sur la section de la rivière.

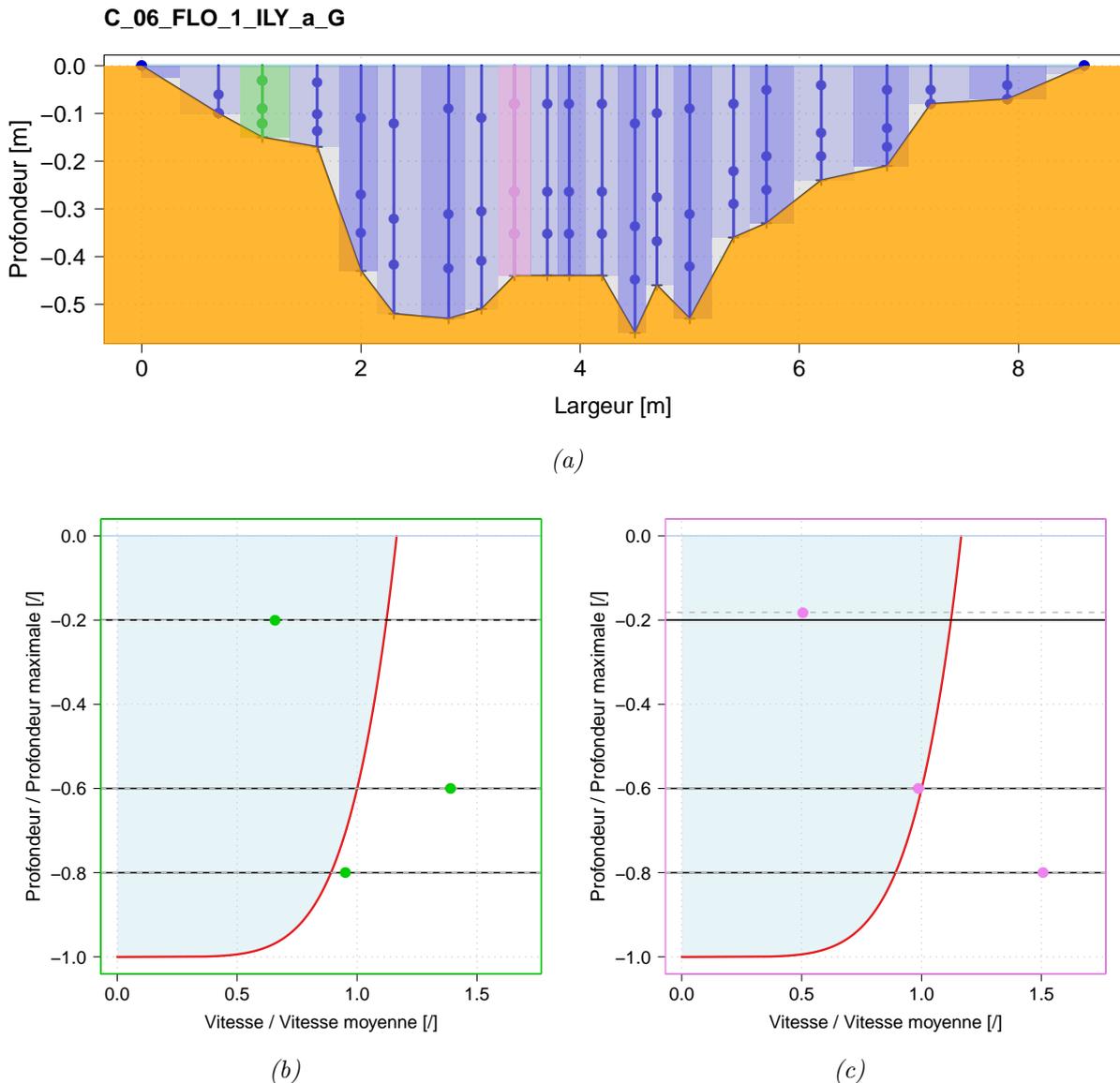


FIGURE 14.3 – (a) Profil bathymétrique d'un jaugeage sur le Cernon et profils verticaux adimensionnels des vitesses mesurés aux abscisses (b) 1,1 [m] et (c) 3,4 [m]. Le profil en rouge représente un profil théorique. Les lignes horizontales noires représentent la position théorique du point de mesure. On observe sur la figure 14.3c, un décalage pour le point de mesure le plus haut.

On constate que les profils sont éloignés d'un profil théorique classique, bien que l'estimation de la vitesse moyenne puisse être proche de la vitesse réelle. Ces écarts peuvent être dus à la

proximité de la berge ou à la présence d'un obstacle en amont. Ceci témoigne probablement d'un choix de section de jaugeage non adéquat. La faible largeur des cours d'eau implique une perturbation du profil des vitesses en raison des effets de bord. En théorie et en dehors de toute singularité, plus on s'éloigne d'une berge et plus le profil des vitesses se rapproche d'un profil théorique (González *et al.*, 1996). L'utilisation de formules algébriques pour des cours d'eau de faible largeur n'est pas à recommander.

D'autre part, on remarque que la position des points de mesures, rappelée sur la figure 5.3c, n'est pas toujours respectée. Les écarts relatifs entre la position théorique et la position réelle des points de mesure (renseignée sur la fiche du jaugeage) ont été calculés sur l'ensemble des profils. L'écart-type de ces écarts relatifs est de l'ordre de 20% avec des écarts plus marqués sur la position des points bas (à 80% de la profondeur sous la surface). Ces écarts induisent des estimations erronées de la vitesses moyenne V_i .

Les profils des vitesses peuvent également être perturbés par la présence d'un ou plusieurs jaugeur(s) à l'amont de chaque section de mesure. Il semble néanmoins que la distance minimale, de l'ordre de 5 [m] séparant deux jaugeurs consécutifs ne puissent pas perturber significativement les profils des vitesses (Dargahi, 1989) bien qu'une analyse visuelle des profils latéraux de vitesse sur les sections d'Aix ait mis en évidence une possible perturbation de l'écoulement (Dramais *et al.*, 2011). Par précaution, la distance séparant les opérateurs a ainsi été augmentée entre les essais d'Aix et ceux de Nant. Sur le Durzon, l'analyse des données du jaugeage le plus en amont et d'un jaugeage en aval au courantomètre acoustique (ADC) n'a pas mis en évidence de perturbation de l'écoulement due à la présence d'opérateurs dans le lit de la rivière (Despax *et al.*, 2014).

Bien que les tests statistiques n'aient pas permis d'identifier des horsains significatifs (valeurs singulières), on peut supposer que les résultats d'incertitude sont sensibles à des valeurs isolées en raison d'un nombre restreint de participants et de répétitions. La largeur de l'intervalle de confiance (tableau 13.2) autour de l'estimation de l'incertitude en témoigne. A titre de comparaison, les essais interlaboratoires réalisés au cours des régates ADCP (Le Coz *et al.*, 2009; Pobanz *et al.*, 2011; Hauet *et al.*, 2012) semblent donner des résultats plus proches de ce qui était attendu (6% pour des bonnes conditions de déploiement et 6 traversées) en raison d'un nombre d'équipes et de répétitions plus importants.

En plus de l'hypothèse que les sections de jaugeages soient favorables ou similaires pour tous les laboratoires, les essais supposent que les laboratoires ont des instruments de même performance et que les opérateurs ont les mêmes compétences (même niveau d'expérience). On peut donc penser que la validité de ces hypothèses est peu probable dans le cadre des essais d'Aix et de Nant, conduisant probablement à une sur-évaluation de l'incertitude.

Enfin, le biais, ou erreur systématique, n'a pas pu être quantifié en l'absence de débit de référence précis. Il est possible que la prise en compte de l'incertitude due au biais de la technique de jaugeage puisse augmenter sensiblement l'estimation de l'incertitude.

14.2.2 Sous-estimation des méthodes analytiques

En lien avec la figure 14.3, l'utilisation de formules algébriques pour estimer la vitesse moyenne ne semble ici pas adaptée aux conditions d'écoulement. L'incertitude $u_p(V_i)$ calculée selon les valeurs proposées par la norme ISO 748 est ainsi trop optimiste, comme discuté dans la section 11.2.1. A cela s'ajoute parfois le mauvais placement des points de mesure sur cer-

taines verticales de mesure, comme l'illustre le décalage des points de mesure observé sur la figure 14.3c. On peut supposer que les valeurs d'incertitude du terme $u_p(V_i)$ doivent être ici ré-évaluées.

La prise en compte de la complexité de la section de mesure dans l'estimation de l'incertitude par les méthodes *IVE* et *FLAURE* ou via l'angle α de la méthode *Q+* semble répondre aux limitations de la norme ISO 748 bien que la comparaison avec les essais interlaboratoires ne permette pas de calibrer l'incertitude due à l'intégration latérale des profils (bathymétrique et de vitesse moyenne). Il est néanmoins possible que ce terme soit encore sous-estimant.

La prise en compte des possibles corrélations des sources d'incertitude (voir la section 11.3.3) et l'augmentation du terme $u(B_i)$ ne permettent pas, à eux seuls, d'expliquer les écarts entre les deux approches.

Bien qu'il soit difficile de mettre en évidence la perturbation de l'écoulement des jaugeurs sur les sections à l'aval, l'omission de cette source d'incertitude peut également contribuer à l'écart observé entre les deux approches. D'autres effets, liés à l'expérience du jaugeur tels que le maintien correct de la perche ou le placement du courantomètre rectiligne à la section de mesure sont omis dans l'analyse d'incertitude. Leur ajout pourrait réduire l'écart avec les valeurs d'incertitude des essais interlaboratoires.

Les approches analytiques présentent également des limites d'un point de vue mathématique. Elles se basent en effet sur l'utilisation d'un développement de Taylor de premier ordre (hypothèse de linéarité) et sur l'hypothèse d'une distribution normale de l'incertitude. Ces hypothèses peuvent être discutées mais il est difficile de conclure quant à une sous-estimation ou à une sur-estimation de l'incertitude due au non respect de ces hypothèses. La propagation des distributions des variables d'entrée à travers un modèle mathématique du processus de mesure par une approche numérique (Monte-Carlo) pourrait permettre de répondre à ces limitations (section 4.2.2) mais les conclusions de Muste *et al.* (2012) ne semblent pas montrer d'écarts significatifs entre les deux approches.

14.2.3 Impact de l'objectivation des termes d'incertitude sur les méthodes analytiques

La situation défavorable de certaines sections de jaugeage au cours des essais interlaboratoires motive la ré-évaluation des valeurs proposées par la norme ISO 748 du terme d'incertitude $u'_p(V_i)$. L'effet de l'objectivation de ce terme sur l'estimation de l'incertitude selon la méthode *FLAURE* ainsi que la ré-évaluation du terme $u'(B_i)$ donnent les résultats présentés à la figure 14.4. Ceux-ci sont présentés sous forme de boîte à moustaches et sont mis en relation avec les estimations issues de l'approche interlaboratoires. Les résultats peuvent être confrontés aux résultats présentés à la figure 14.2c. Les valeurs du terme $u'_p(V_i)$ sont issues du tableau 11.2. La valeur du terme $u'(B_i)$ est fixée à 2,5% au lieu 0,5%.

On constate une légère augmentation de l'incertitude finale $U'(Q)$. L'écart absolu, en pourcentage, varie de 0,07% à 2,8%, et vaut en moyenne 1,3%. On observe également une diminution du coefficient de variation. L'écart absolu est d'autant plus fort que la valeur du *SQI* est faible. Ceci s'explique par le fait que lorsque le *SQI* diminue, la contribution du terme u'_m sur l'incertitude finale $U'(Q)$ diminue.

L'augmentation de ces deux termes d'incertitude permet de réduire, en partie, l'écart entre l'estimation de l'incertitude selon l'approche interlaboratoires et les méthodes analytiques.

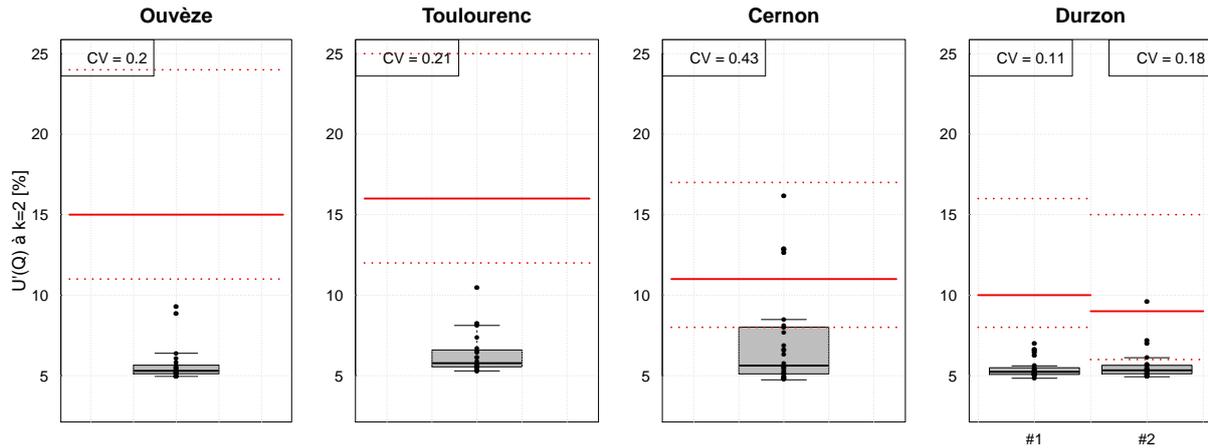


FIGURE 14.4 – Boîtes à moustaches des incertitudes $U'(Q)$ selon la méthode FLAURE, exprimées au niveau de confiance de 95%, pour chaque essai. Les boîtes s'étendent du quartile 25% au quartile 75% et les moustaches s'étendent jusqu'à la valeur distante de 1,5 fois la distance interquartile. Les lignes rouges sont les estimations de l'incertitude par la méthode des essais interlaboratoires, les lignes en pointillés délimitent l'intervalle de confiance associé.

14.3 Synthèse et préconisations

La confrontation des méthodes analytiques avec l'approche interlaboratoires permet de mettre en évidence les limites des deux méthodes d'estimation d'incertitude.

Les essais interlaboratoires, appliqués aux jaugeages au courantomètre, nécessitent d'une part une logistique lourde limitant le nombre de laboratoires présents et, d'autre part la durée d'un jaugeage limite le nombre de répétitions de mesure. Les estimations d'incertitude qui en découlent sont donc statistiquement limitées et incertaines.

D'un point de vue hydraulique, la présence inévitable de plusieurs opérateurs simultanément dans l'eau peut induire des perturbations dans l'écoulement. Ces dernières peuvent contribuer à la variabilité des débits mesurés, augmentant de fait l'estimation de l'incertitude. En conditions habituelles, ce type de perturbation n'a pas lieu et c'est pourquoi cette source d'incertitude n'est pas estimée par les méthodes analytiques.

On a également montré que les essais interlaboratoires nécessitent d'imposer un protocole fixé pour tous les laboratoires, notamment en termes de nombre de verticales et de nombre de points par verticales, bien qu'il ne soit pas forcément adapté aux conditions de l'écoulement sur chaque section de mesure.

Les méthodes analytiques sont, elles, limitées à l'exhaustivité et à la difficulté de quantifier toutes les sources d'incertitude. Si les incertitudes des matériels de mesure sont plutôt simples à quantifier par la répétition de mesure dans des conditions d'essais maîtrisées, les erreurs dues à l'environnement, au site de mesure ou à l'opérateur sont bien plus difficiles à quantifier. Les travaux visant à quantifier le terme u'_m montrent à quel point il est difficile de proposer un calcul adapté aux conditions de chaque site de mesure. Ainsi, si la méthode FLAURE semble mieux prendre en compte la qualité de l'échantillonnage sur l'estimation des erreurs dues à l'intégration latérale des profils de vitesse et de bathymétrie, il faudrait étendre ce type d'étude pour objectiver toutes les sources d'incertitude en fonction des conditions propres à chaque site de mesure. Il serait ainsi utile de définir des indicateurs représentatifs des conditions de mesure pour quantifier certains termes d'incertitude. Par exemple, l'incertitude due à l'intégration

temporelle des vitesses au cours du temps devrait être adaptée aux conditions de turbulence. Enfin, on a souligné que les corrélations entre les différents termes d’incertitude sont également difficiles à évaluer (section 11.3.3).

Bien que le protocole des essais interlaboratoires propose des tests statistiques pour exclure d’éventuelles valeurs aberrantes, un examen systématique des profils, verticaux et latéraux, des vitesses doit être conduit pour mettre en évidence soit une mesure incohérente soit un site de mesure non adéquat. C’est ce type d’analyse qui a permis de mettre en évidence l’effet des oscillations turbulentes de l’écoulement au cours de la régata ADCP de Génissiat en 2010 (Hauet *et al.*, 2012; Le Coz *et al.*, 2016), expliquant ainsi la différence d’incertitude entre deux sites de mesure voisins.

Il est également utile de veiller au respect des protocoles de mesure. On a constaté, sur certaines verticales, le non respect de la position des points de mesure pour l’application des formules algébriques normalisées. Ces écarts ont pu augmenter la variabilité des résultats de débit et donc l’incertitude associée.

Au-delà de l’intercomparaison simple, il serait utile, en vue de futurs essais, de définir un plan d’expérience permettant d’isoler certaines sources d’incertitude omises dans les méthodes analytiques. Les erreurs dues à l’instrumentation (et son paramétrage), à l’opérateur ainsi qu’au choix d’une section de mesure ne sont pas distinguées dans l’estimation de l’incertitude puisqu’un laboratoire est caractérisé par son instrumentation, son ou ses opérateurs (s) et la section de mesure. Il serait ainsi intéressant de quantifier l’incertitude due au choix de la section de mesure. En effet, lors des essais interlaboratoires en rivière, le choix de la section de mesure est contraint pour des raisons pratiques car il faut rassembler les équipes sur un bief relativement court. Certains sites sont moins favorables que d’autres puisqu’il n’est pas possible de garantir la même qualité de section de mesure pour l’ensemble des sections de jaugeage (les critères de qualité sont rappelés dans la section 5.1.1). Le choix de la section peut ainsi induire une sur-estimation de l’incertitude selon l’approche interlaboratoires puisque la variabilité observée des sections de jaugeage, illustrée par la variabilité des *SQI* sur la figure 13.3, peut entraîner une variabilité plus importante des débits et donc, *in fine*, de l’incertitude. D’autre part, ce terme n’est pas quantifié dans les méthodes analytiques (voir section 11.3.1), pouvant expliquer en partie la sous-estimation probable de l’incertitude estimée par les méthodes analytiques.

14.3.1 Estimation de l’incertitude liée à la section de mesure

Au cours d’un essai interlaboratoires, un laboratoire (noté i) est caractérisé par la section de mesure, l’opérateur et l’instrument utilisé. Afin d’isoler la composante d’incertitude due à la section de mesure, il faut procéder à des permutations du couple opérateur/instrument sur les différentes sections de mesure. Une permutation avait été réalisée sur le site du Durzon à Nant, entre les séries (e, f) et (g, h) sans que des écarts significatifs en termes de débit n’aient été observés (Despax *et al.*, 2014).

Le Coz (2016) propose, dans l’optique d’un essai interlaboratoires de mesure par ADCP à Chauvan, en novembre 2016, une analyse statistique plus fine afin de séparer la composante d’incertitude due à la section de mesure, en permutant les couples opérateur/instrument sur différentes sections. En définissant k l’indice de l’essai (ou indice de la permutation), l’équation 4.4 s’écrit :

$$Q_{i,j,k} = \overline{\overline{Q}}_k^{(i,j)} + B_{i,k} + \epsilon_{i,j,k} \quad (14.1)$$

où $Q_{i,j,k}$ est la $j^{\text{ième}}$ mesure de débit du laboratoire i lors de l'essai k . $\overline{\overline{Q}}_k^{i,j}$ ¹ est la moyenne des débits obtenus au cours de l'essai k (en prenant en compte toutes les répétitions i et tous les laboratoires j). $B_{i,k}$ et $\epsilon_{i,j,k}$ désignent respectivement le biais du laboratoire i et l'erreur aléatoire. On note bien que le biais B , propre au couple opérateur/instrument, repéré par l'indice y , ne dépend pas de l'indice j de la répétition de mesure.

En définissant x l'indice de la section de mesure et y , l'indice du couple opérateur/instrument, la décomposition du biais et des erreurs aléatoires donne : $B_{i,k} = B_{x,k} + B_{y,k}$ et $\epsilon_{i,j,k} = \epsilon_{x,j,k} + \epsilon_{y,j,k}$. L'équation 14.1 devient alors :

$$Q_{i,j,k} = \overline{\overline{Q}}_k^{(i,j)} + B_{x,k} + B_{y,k} + \epsilon_{x,j,k} + \epsilon_{y,j,k} \quad (14.2)$$

Soit $\Delta\overline{\overline{Q}}_k^{(i,j)}$ la différence entre le débit moyen tous essais confondus et le débit moyen de l'essai k , tel que : $\overline{\overline{Q}}_k^{(i,j)} = \overline{\overline{\overline{Q}}}^{(i,j,k)} + \Delta\overline{\overline{Q}}_k^{(i,j)}$. Dans des conditions d'essais avec un débit stabilisé ($\Delta\overline{\overline{Q}}_k^{(i,j)}$ faible), on peut considérer que les erreurs B et ϵ ne dépendent pas de l'indice de l'essai k . On obtient alors :

$$Q_{i,j,k} - \Delta\overline{\overline{Q}}_k^{(i,j)} = \overline{\overline{\overline{Q}}}^{(i,j,k)} + B_x + B_y + \epsilon_{x,j} + \epsilon_{y,j} \quad (14.3)$$

En appliquant une moyenne à l'équation 14.3 sur les participants y et sur les essais k , on peut considérer que le biais moyen $\overline{B}_y^{(y)}$ est inclus dans la moyenne des débits $\overline{\overline{\overline{Q}}}^{(i,j,k)}$ et que l'erreur moyenne $\overline{\epsilon}_y^{(y)} \simeq 0$ si le nombre de participants est suffisant. On obtient l'estimation suivante :

$$\widehat{Q}_{x,j} = \overline{Q_{x,y,j,k} - \Delta\overline{\overline{Q}}_k^{(i,j)}^{(y,k)}} = \overline{\overline{\overline{Q}}}^{(i,j,k)} + B_x + \epsilon_{x,j} \quad (14.4)$$

Étant donné que le nombre de participants est égal au nombre de sections de mesure, on a :

$$\widehat{Q}_{x,j} = \overline{Q_{x,j,y} - \Delta\overline{\overline{Q}}_k^{(x,j)}^{(y)}} = \overline{\overline{\overline{Q}}}^{(x,j,y)} + B_x + \epsilon_{x,j} \quad (14.5)$$

L'équation 14.5 permet donc d'isoler les composantes de biais B_x et d'erreur aléatoire $\epsilon_{x,j}$ due à la section de mesure. La correction des mesures de chaque essai k par l'écart du débit moyen de l'essai au débit moyen global ($\Delta\overline{\overline{Q}}_k^{(x,j)}$) permet de compenser les différences de débit moyen entre les essais. On obtient alors pour chaque section x , une valeur moyenne corrigée $\widehat{Q}_{x,j}$ de débit estimée à partir des valeurs de débits de chaque participant y mesurés sur une section x .

On peut finalement appliquer les traitements statistiques de l'approche interlaboratoires sur les valeurs $\widehat{Q}_{x,j}$ pour évaluer l'écart-type interlaboratoires de l'erreur systématique B_x et l'écart-type de répétabilité de l'erreur aléatoire $\epsilon_{x,j}$. L'intercomparaison a alors lieu sur les sections de mesure.

Ce type d'essai reste malgré tout difficile à appliquer à des jaugeages au courantomètre en raison de la durée d'un jaugeage. Il est en effet difficile de réaliser une dizaine de permutation d'équipes tout en maintenant un débit stable. On pourra néanmoins transposer les résultats obtenus lors de la prochaine intercomparaison d'ADCP en faisant l'hypothèse que l'effet de la section de mesure est identique selon les deux techniques de jaugeage. Cette hypothèse est discutable dans la mesure où les ADCP sont capables de mesurer les composantes tridimensionnelles

1. Les notations $\overline{\overline{x}}$ et $\overline{\overline{\overline{x}}}$ désignent la moyenne des valeurs de x respectivement sur deux et trois indices.

des vitesses par rapport aux jaugeages au moulinet. Une section pour laquelle l'écoulement n'est pas orthogonal est en effet plus préjudiciable pour un jaugeage au moulinet à hélice que pour un jaugeage ADCP.

Le Coz (2016) propose aussi de décomposer l'incertitude due aux participants, mais on peut s'attendre pour des essais ADCP que la part de cette incertitude soit négligeable puisque les participants n'ont que peu d'influence sur le jaugeage. En revanche, cette part n'est pas négligeable pour les jaugeages au courantomètre mais la répétition et la permutation des équipes sont trop lourdes à envisager pour quantifier ce terme sous l'hypothèse de stabilité du débit.

A l'issue de ce type d'intercomparaison, l'incertitude due à la section devra être mise en relation avec un indicateur pertinent de manière à pouvoir transposer l'évaluation de l'incertitude à toute configuration de rivière. Cet indicateur peut être, par exemple, un indice de sinuosité ou de courbure du tronçon de rivière, un critère d'asymétrie de l'écoulement, (Le Coz *et al.*, 2016), des paramètres de rugosité relative (rapport de la taille des gros blocs sur la profondeur hydraulique) ou encore la magnitude des courants secondaires.

Conclusion de la partie IV

On a montré que les essais interlaboratoires appliqués à l'hydrométrie et en particulier aux jaugeages au courantomètre sont utiles puisqu'ils répondent à la difficulté d'évaluer toutes les composantes d'incertitude exprimées par la méthode analytique du GUM (méthode de référence). Ces essais permettent une estimation expérimentale de l'incertitude de mesure pour la méthode de jaugeage testée, uniquement dans les conditions données des essais.

La confrontation avec les méthodes analytiques a montré les limites des deux approches et a souligné la difficulté d'évaluer l'incertitude des jaugeages au courantomètre. D'une part, la logistique lourde à mettre en œuvre pour les jaugeages au courantomètre ne permet pas de réaliser des essais interlaboratoires dans les règles de l'art (difficulté de maintenir un débit stable, perturbation possible de l'écoulement par les hydromètres, choix de la section de mesure pas forcément propice. . .). Pour des jaugeages lents tels que les jaugeages au courantomètre, il vaut mieux augmenter le nombre de participants plutôt que d'augmenter le nombre de répétitions en raison des risques de variation de débit au cours d'essais longs (il faut deux heures environ pour obtenir deux mesures consécutives de débit). En outre, il a été montré qu'au delà de 4 à 6 répétitions de mesures, il n'y a pas de gain significatif en termes d'intervalle de confiance sur l'incertitude estimée (Le Coz *et al.*, 2016) . D'autre part, la quantification objective (c'est-à-dire valable quels que soient le matériel, les conditions de déploiement et environnementales) et exhaustive de l'ensemble des sources d'erreur pour l'application des méthodes analytiques est délicate.

Les deux approches s'enrichissent néanmoins l'une de l'autre. Les protocoles d'essais interlaboratoires sont désormais mieux définis (Le Coz *et al.*, 2016) tandis que l'estimation des différents composants d'incertitude, selon l'approche analytique, s'affine.

En vue de prochains essais interlaboratoires au courantomètre, il serait judicieux de réaliser plus de répétitions ou de réunir un plus grand nombre de participants afin de compenser l'incertitude élevée sur les résultats d'incertitude (tableau 13.2). En cas d'augmentation du nombre de participants, il faudra veiller à limiter la perturbation de l'écoulement par les opérateurs dans l'eau et à garantir des sections de mesure suffisamment propices (c'est-à-dire qui respectent au mieux les préconisations exposées en section 5.1.1).

Les futurs essais interlaboratoires de mesure par ADCP et les calculs proposés par Le Coz (2016) laissent espérer la possibilité d'estimer l'incertitude due au choix de la section de mesure. A l'image du *SQI* qui qualifie l'échantillonnage d'une section de mesure, l'incertitude due au choix de la section de mesure devra être reliée à un indicateur pertinent représentatif des conditions de l'écoulement et des caractéristiques morphologiques du tronçon de rivière.

La multiplication des essais interlaboratoires dans des conditions d'essais variés en parallèle à la définition de nouveaux indicateurs doit permettre une meilleure connaissance de l'incertitude de mesure des techniques de jaugeages afin de valider le développement de méthodes de calcul analytique des incertitudes applicables à tout jaugeage.

En l'absence de valeur de débit de référence sur un site naturel ou de mesure de débit avec une incertitude très faible, la quantification du biais de la technique de mesure est délicate. Celle-ci devra être envisagée lors des prochains essais interlaboratoires. Elle pourra passer par la comparaison des différentes techniques de mesure (*e.g.* Olivier *et al.*, 2009; Tazioli, 2011), comme illustré à la figure 14.5. Un jaugeage à forte résolution spatiale, réalisé sur une section idéale (voir la description en section 5.1.1), avec des appareils de mesures étalonnés, pourrait être, par exemple, un bon moyen d'obtenir une valeur de débit avec une faible incertitude.



FIGURE 14.5 – Exemple de comparaison entre deux techniques de jaugeage (ADCP et courantomètre). Source : USGS.

Conclusions générales et perspectives

Les jaugeages constituent un maillon essentiel de la production de données hydrométriques. Ces données alimentent diverses études hydrologiques et participent directement aux processus de gestion de la ressource en eau. Les évolutions réglementaires (comme par exemple le débit réservé à l'aval des ouvrages) et la pression accrue sur la ressource en eau nécessitent une quantification précise de l'incertitude des mesures de débit pour participer à une bonne gestion de la ressource en eau. Bien que la technique de mesure par exploration du champ des vitesses par courantomètre soit assez ancienne, la proportion des mesures réalisée par cette technique reste importante (plus de 30% des mesures de débit) et son utilisation reste dans bien des cas incontournable. Le problème de la quantification des incertitudes des mesures de débit par cette technique demeure toujours d'actualité d'autant que ce problème est transposable à des techniques de mesure plus récentes (ADCP et SVR notamment) reposant elles aussi sur l'exploration du champ des vitesses.

La problématique de cette thèse, portant sur l'évaluation de l'incertitude des jaugeages au courantomètre, a été abordée d'un point de vue opérationnel et expérimental, tout en restant dans le cadre des méthodes normalisées d'expression de l'incertitude (méthode du GUM et approche interlaboratoires). La complexité des cours d'eau justifie un tel cadre expérimental dans la mesure où la connaissance des phénomènes physiques, qui régissent les caractéristiques géométriques et la distribution des vitesses, semble insuffisante à l'échelle de la section en travers d'un cours d'eau.

Conclusion concernant de la méthode FLAURE

La méthode FLAURE développée dans cette thèse est basée sur l'amélioration des méthodes analytiques existantes (norme ISO 748, $Q+$ et *IVE*) qui suivent le cadre de référence du GUM pour l'expression des incertitudes. La méthode FLAURE a conduit à une objectivation de certains termes d'incertitude, et en particulier à une nouvelle estimation du terme d'incertitude prépondérant u'_m portant sur les erreurs dues à l'échantillonnage latéral de la bathymétrie et des vitesses moyennes. La quantification de ces erreurs, par une approche par typologie de jaugeage ou selon un modèle moyen, semble adaptée à tout type de section en travers, qu'elle soit de forme géométrique simple (canal trapézoïdal par exemple) ou de forme plus irrégulière, typique d'un cours d'eau naturel, grâce à la définition d'un indice de qualité d'échantillonnage noté *SQI*. Le calcul de l'incertitude u'_m présente l'avantage de ne pas nécessiter de mesures complémentaires sur site ou d'estimation arbitraire d'un paramètre. L'approche peut ainsi être appliquée simplement à tout jaugeage historique, à condition de disposer des données brutes de mesure.

La méthode originale de sous-échantillonnage (que l'on peut assimiler à une simulation de type Monte-Carlo informé), qui a été développée et appliquée à des jaugeages de référence variés, a permis de générer des jaugeages conformes à l'expertise de l'hydromètre et conduit ainsi à une estimation consistante de l'incertitude sur l'intégration latérale des profils latéraux de vitesse moyenne et de profondeur.

Apports des essais interlaboratoires

L'absence d'étalon en terme de débit d'un cours d'eau nécessite la confrontation des méthodes analytiques à des essais interlaboratoires, rassemblant simultanément plusieurs participants sur un même site de mesure. Ce type d'essai, conduit à deux reprises en 2011 (Aix) et 2013 (Nant), n'a toutefois pas permis de valider l'une des quatre méthodes analytiques (norme ISO 748, $Q+$, *IVE* et *FLAURE*) dans les conditions des essais. Les essais interlaboratoires restent imparfaits en raison d'une logistique lourde pour appliquer la méthode dans les "règles de l'art", d'un nombre limité de participants et des risques de variation de débit au cours des essais. Ils conduisent ainsi à des valeurs d'incertitudes elles-mêmes très incertaines. D'autre part, les limites des méthodes analytiques, liées à la difficulté de quantifier l'ensemble des facteurs d'influence et à la difficulté de prise en compte des possibles liens entre les erreurs, modélisés par le biais de covariance, peuvent expliquer les écarts observés en terme d'incertitude entre l'approche analytique et l'approche interlaboratoires.

Les essais ont néanmoins permis de quantifier l'incertitude des jaugeages au courantomètre dans les conditions de l'essai (avec toutefois une forte incertitude) et de mettre en évidence les insuffisances des méthodes analytiques. La confrontation des deux approches a notamment mis en évidence le besoin de quantifier l'incertitude due au choix de la section de mesure. Des prochains essais permettront certainement d'estimer cette dernière.

On a montré au cours de cette étude que les méthodes de propagation analytique ou par des essais interlaboratoires sont applicables pour l'estimation de l'incertitude des jaugeages au courantomètre. Les premières nécessitent la modélisation du processus de mesurage et la quantification des différents facteurs d'influence mais elles permettent l'estimation de l'incertitude pour tout jaugeage de routine ainsi que la décomposition des sources d'incertitude, utile pour améliorer les protocoles de mesure. L'absence de référence en terme de débit reste néanmoins une difficulté majeure et impacte la possibilité d'aboutir à une valeur fiable de l'incertitude de mesure par cette méthode. Cette difficulté a conduit à la mise en œuvre d'essais interlaboratoires. Ces derniers permettent d'estimer une incertitude uniquement dans les conditions de l'essai, ce qui rend difficile la possibilité de transposer la valeur d'incertitude à un jaugeage quelconque. Les essais se confrontent de plus à la lourdeur logistique d'organisation, ce qui limite la possibilité d'obtenir des valeurs d'incertitude dans des conditions variées. On a néanmoins démontré que les deux méthodes s'enrichissent de leur confrontation par la mise en évidence de leurs limites respectives.

De telles confrontations permettront, à terme, d'aboutir à des valeurs d'incertitude de plus en plus fiables.

Perspectives de recherche

D'autres travaux de recherches sont encore nécessaires pour valider la méthode *FLAURE*. Premièrement, la variabilité résiduelle des courbes d'incertitude du terme u'_m en fonction du *SQI* (voir la figure 9.9) semble être le signe que l'indice d'échantillonnage demeure conceptuellement imparfait. Cela constitue une limite à l'utilisation du modèle moyen d'incertitude. Le modèle par typologie reste, quant à lui, limité par la calibration délicate du nombre de jaugeages analogues à retenir et par le nombre limité de jaugeages de référence.

L'estimation de l'incertitude du terme u'_m est basée sur le calcul du SQI pour un jaugeage quelconque et sa valeur dépend de l'échantillonnage latéral des q . Il est difficile de justifier l'hypothèse selon laquelle le SQI caractérise à lui seul la complexité du milieu. Si le SQI semble bien faire le lien avec l'erreur sur l'échantillonnage latéral des vitesses moyennes et de la bathymétrie, il se pose la question du nombre de points suffisants pour caractériser la complexité de la section de jaugeage et atteindre une valeur de débit robuste. Une analogie avec la théorie du traitement du signal, notamment avec le théorème d'échantillonnage de Nyquist-Shannon, pourrait répondre à ce problème. Ce théorème établit les conditions qui permettent un échantillonnage correct d'un signal de largeur spectrale et d'amplitude limitées. Le même problème se pose pour l'échantillonnage temporel des vitesses ponctuelles.

De manière générale, si la théorie de l'échantillonnage permet de répondre à ces problématiques, il sera nécessaire de faire le lien entre l'échantillonnage et les processus physiques qui régissent la complexité du milieu avec l'incertitude.

On note toutefois que l'indice de qualité d'échantillonnage demeure plus pertinent que le nombre de verticales et plus objectif qu'une valeur d'angle fixée par l'hydromètre comme proposé par la méthode Q_+ . En outre, l'estimation d'incertitude selon le modèle moyen de la méthode FLAURE semble donner des valeurs d'incertitude cohérentes sur des exemples de jaugeages de routine.

Des investigations supplémentaires devront être menées pour quantifier plus finement tous les autres termes d'incertitude. Une attention particulière doit être portée à l'estimation du terme $u_p(V_i)$ dû à l'intégration verticale du profil de vitesse, en particulier lors de l'application des méthodes algébriques. Il est probable qu'un effet systématique dû à la section de mesure soit omis et que l'importance de ce terme se trouve réduit dans la composition finale de l'incertitude. Les jaugeages en conditions plus spécifiques (déploiement sous la glace ou déploiement à l'aide de saumon lesté) méritent également des études complémentaires pour prendre en compte les incertitudes dues à de tels protocoles de mesure.

En complément, il serait utile de définir des indicateurs additionnels permettant de valoriser l'expertise des hydromètres. Par exemple, si l'incertitude estimée semble faible devant la complexité constatée *in situ* par l'hydromètre, celui-ci doit pouvoir ré-évaluer l'incertitude sans que cette dernière soit trop sensible à la subjectivité de son expertise.

L'incertitude, estimée par les méthodes analytiques, reste valable pour des jaugeages réalisés dans "les règles de l'art". Il arrive que les jaugeages s'écartent de ces règles, notamment lors des mesures en crue. Dans ce cas de figure, le problème provient souvent de la variation du niveau d'eau pendant la mesure. Ces jaugeages constituent néanmoins des données rares, qui, bien qu'imprécises, doivent être valorisés et dont l'incertitude associée doit être estimée. Celle-ci pourrait, par exemple, être fonction de la sensibilité de la courbe de tarage pour prendre en compte l'effet d'une variation du niveau d'eau.

Les prochains essais interlaboratoires de mesure par ADCP permettront certainement de quantifier l'incertitude due au choix de la section de mesure, incertitude qu'il faudra ensuite relier à un indicateur pertinent qui décrive par exemple la sinuosité du tronçon de cours d'eau ou la turbulence des vitesses dans la section de mesure. D'autres essais interlaboratoires de jaugeages au courantomètre dans des conditions variées seront nécessaires, tout en veillant à maintenir un espace suffisamment grand entre les opérateurs, en respectant scrupuleusement le protocole imposé et en s'assurant que le débit est stable au cours des essais.

En parallèle à une quantification plus fine des mesures élémentaires (largeur, profondeur et vitesses) par rapport à des étalons de référence, il conviendra d'estimer le biais de la technique de mesure en confrontant des jaugeages au courantomètre à d'autres techniques de mesures

(dilution ou ADCP par exemple). Les deux méthodes d'estimation de l'incertitude (analytique et par essais interlaboratoires) possèdent en effet en commun l'inconvénient de ne pas quantifier le biais. Le dispositif expérimental du *River Experimental Center* d'Andong, en Corée, fournissant un débit contrôlé dans un canal artificiel simulant des conditions naturelles, peut apparaître comme une solution pour estimer ce biais. D'autres facteurs d'influence, jusqu'alors omis et difficiles à modéliser, tels que le stress de l'opérateur, son niveau d'expérience, le manque de temps et les conditions climatiques, qui impactent la mesure de débit, gagneraient à être quantifiés.

Dans l'attente d'une validation du calcul d'incertitude, il restera utile de confronter l'estimation de l'incertitude selon la méthode FLAURE aux autres méthodes, *IVE* et *Q+* en particulier.

Perspectives opérationnelles

En complément des autres méthodes existantes, la méthode FLAURE, dont le modèle moyen facilite l'application du calcul d'incertitude, devra être mise en œuvre et diffusée pour une application la plus large possible par les services opérationnels d'hydrométrie. L'hydromètre puis l'hydrologue ou le décisionnaire, auront ainsi une information sur la qualité de la mesure de débit.

Il se pose alors la question de l'acceptabilité de l'incertitude. Le calcul d'incertitude présente en effet un intérêt pour le règlement des litiges si, et seulement si, le protocole de mesure et les méthodes d'estimation d'incertitude sont partagés entre les parties prenantes. Un consensus devra aussi émerger afin de mettre en avant l'une des méthodes de calcul d'incertitude dans la perspective d'une révision de la norme ISO 748 dans les prochaines années.

Ensuite, les travaux portant sur l'estimation du terme u'_m pourront être transposés à d'autres techniques de jaugeages par exploration du champ des vitesses comme les jaugeages par radar (Welber *et al.*, 2016) ou par analyse d'image (LSPIV).

Concernant le protocole de mesure, il serait intéressant d'approfondir l'étude des jaugeages à haute résolution spatiale de points de mesure de vitesse. En effet, le sous-échantillonnage des verticales de mesure couplé à un sous-échantillonnage des points de mesure par verticale pourrait permettre d'identifier le protocole de mesure le plus adapté pour obtenir une valeur robuste de débit (des premiers résultats sont exposés à l'annexe G). Faut-il favoriser une augmentation du nombre de verticales, au détriment du nombre de points par verticale pour obtenir une valeur de débit plus robuste (c'est-à-dire proche de la valeur vraie) du débit ? Le protocole optimal donnerait-il des incertitudes plus faibles ?

L'incertitude qui découle du jaugeage devra ensuite être propagée jusqu'à l'hydrogramme par un modèle d'incertitude associé au tracé des courbes de tarage (*e.g.* Le Coz *et al.*, 2014b; Morlot, 2014). Pour cela, il serait intéressant de s'appuyer sur des stations hydrométriques pour lesquelles la majeure partie des jaugeages est réalisée au courantomètre. La propagation de l'incertitude des jaugeages permettra de mettre en évidence la part de cette dernière sur la valeur finale d'incertitude et éventuellement son influence sur les chroniques de débit produites. Les critères utilisés en hydrologie (Nash, KGE ou VE, dont les définitions sont exposées à la section 10.1.1) pourraient être appliqués aux chroniques de débit et aux valeurs d'incertitude associées pour comparer les résultats avec et sans prise en compte de l'incertitude. Le calcul des incertitudes pourra également être un outil d'aide au quotidien à la validation des données de débit.

Il serait enfin intéressant d'estimer le gain financier apporté par une meilleure connaissance de l'incertitude associée aux données de débit.

Bibliographie

- ALDEGHERI, M. (1979). *Manuel d'hydrométrie*, volume IV : mesure des débits à partir des vitesses. Office de la Recherche Scientifique et Technique Outre-Mer, Paris, France. 313 p.
- ASN (1984). *Règle I.2.e. : Prise en compte du risque d'inondation d'origine externe*, volume I : Conception générale de la centrale et principes généraux applicables à l'ensemble de l'installation. Chapitre 2 : Principes généraux relatifs à la protection contre les agressions externes. République Française. 7 p.
- AUDINET, M. (1995). *Hydrométrie appliquée aux cours d'eau*. Eyrolles. 453 p.
- AVILA, K., MOXEY, D., de LOZAR, A., AVILA, M., BARKLEY, D. et HOF, B. (2011). The onset of turbulence in pipe flow. *Science*, 333(6039):192–196.
- BARROWS, H. K. et HORTON, R. E. (1907). Determination of stream flow during the frozen season. Rapport technique 187, US Geological Survey. 100 p.
- BELLEVILLE, A. et BLANCHARD, B. (2016). Evaluation de la criticité des sites à l'aval des aménagements hydroélectriques et mise en oeuvre de parade - Méthode et retour d'expérience. (Assessing public safety downstream hydroelectric plants and risk mitigation implementation - Methodology and feedbacks [in french]). In *Colloque CFBR : Sécurité des barrages et enjeux, Chambéry*. 16 p.
- BENOIST, J.-C. et BIRGAND, F. (2002). Les dispositifs de mesure des débits dans les bassins versants agricoles. *Ingénieries Eau Agriculture Territoires*, (32):51–63.
- BEVEN, K. et BINLEY, A. (1992). The future of distributed models : model calibration and uncertainty prediction. *Hydrological Processes*, 6:279–298.
- BLANQUART, B. (2013). Panorama des méthodes d'estimation des incertitudes de mesure. *La Houille Blanche*, 6:9–15.
- BOITEN, W. (2000). *Hydrometry*. Balkema. 246 p.
- BONAKDARI, H., LARRARTE, F., LASSABATERE, L. et JOANNIS, C. (2008). Turbulent velocity profile in fully-developed open channel flows. *Environmental Fluid Mechanics*, 8(1):1–17.
- BOWLEY, A. L. (1920). *Elements of statistics*, volume 2. PS King. 391 p.
- CARTER, R. W. et ANDERSON, I. E. (1963). Accuracy of current meter measurements. *Journal of the Hydraulics Division*, 4(1):105–115.

- CETMEF (2001). *Hydraulique des cours d'eau. La théorie et sa mise en pratique.* 62 p.
- CHERY, L. et FILALI, R. (2004). Les banques de données et leur utilisation pour la prévision des situations extrêmes. *La Houille Blanche*, (5):35–41.
- CHOW, V. T. (1959). *Open channel hydraulics.* 680 p.
- CLEVELAND, W. S. (1979). Robust locally weighted regression and smoothing scatterplots. *Journal of the American statistical association*, 74(368):829–836.
- COFRAC (2015). Exigences pour l'accréditation des laboratoires selon la norme NF EN ISO/CEI 17025 - LAB REF 02 - rev. 9. Rapport technique. 56 p.
- COHN, T., KIANG, J. et MASON, R. (2013). Estimating discharge measurement uncertainty using the interpolated variance estimator. *Journal of Hydraulic Engineering*, 139(5):502–510.
- COSTA, J., CHENG, R., HAENI, F., MELCHER, N., SPICER, K., HAYES, E., PLANT, W., HAYES, K., TEAGUE, C. et BARRICK, D. (2006). Use of radars to monitor stream discharge by noncontact methods. *Water Resources Research*, 42(7):1–14.
- DARGAHI, B. (1989). The turbulent flow field around a circular cylinder. *Experiments in Fluids*, 8(1-2):1–12.
- DAVISON, A. C. et HINKLEY, D. V. (1997). *Bootstrap methods and their application*, volume 1. Cambridge University press. 583 p.
- DE HUU, M. et WÜTHRICH, B. (2012). Gravity wave effects on the calibration uncertainty of hydrometric current meters. In *Proceedings of the 9th International Group for Hydraulic Efficiency Measurement conference, Trondheim, Norway.* 9 p.
- DE VINCI, L. (1894–1904). *Il Codice Atlantico.* nella Biblioteca Ambrosiana di Milano.
- DEGOUTTE, G. (2006). *Aide mémoire d'hydraulique à surface libre.* 32 p.
- DESPAX, A., DRAMAIS, G. et HAUET, A. (2014). Comparaison de mesures du débit des petits cours d'eau par courantomètres sur perche. Journées d'intercomparaison des 15, 16 et 17 octobre 2013. Rapport d'essais, Groupe Doppler. 54 p.
- DESPAX, A., FAVRE, A.-C., BELLEVILLE, A., HAUET, A., LE COZ, J., DRAMAIS, G. et BLANQUART, B. (2016a). Field inter-laboratory experiments versus propagation methods for quantifying uncertainty in discharge measurements using the velocity-area method. In *Proceedings of River Flow 2016, Saint-Louis, USA.* 7 p.
- DESPAX, A., PERRET, C., GARÇON, R., HAUET, A., BELLEVILLE, A., LE COZ, J. et FAVRE, A.-C. (2016b). Considering sampling strategy and cross-section complexity for estimating the uncertainty of discharge measurements using the velocity-area method. *Journal of Hydrology*, 533:128–140.
- DI BALDASSARRE, G. et MONTANARI, A. (2009). Uncertainty in river discharge observations : a quantitative analysis. *Hydrology and Earth System Sciences*, 13(6):913–921.
- DICKINSON, W. T. (1967). Accuracy of discharge determinations. Rapport technique, Colorado State University. 62 p.

- DOTTORI, F., MARTINA, M. L. V. et TODINI, E. (2009). A dynamic rating curve approach to indirect discharge measurement. *Hydrology and Earth System Sciences Discussions*, 6(1):859–896.
- DRAMAIS, G., BLANQUART, B. et LE COZ, J. (2011). Comparaison de méthodes de mesure du débit des petits cours d'eau. Journées d'intercomparaison des 17 et 18 mai 2011. Rapport d'essais. 53 p.
- DRAMAIS, G., BLANQUART, B., LE COZ, J., PIERREFEU, G., HAUET, A., ATMANE, D. et POBANZ, K. (2013a). Les essais interlaboratoires en hydrométrie : méthodologie et cas d'applications. *SHF, Colloque Hydrométrie 2013, Paris*. 10 p.
- DRAMAIS, G., LE COZ, J., LE BOURSICAUD, R., HAUET, A., LAGOY, M. et OTHERS (2013b). Jaugeage par radar mobile : protocole et résultats. *SHF, Colloque Hydrométrie 2013, Paris*. 8 p.
- EVERARD, N. (2007). ADCP Regatta (2007) River Severn at Bewdley 21st August 2007. Rapport d'essais, UK Environment Agency. 12 p.
- EVERARD, N. (2009). ADCP Regatta (2009) River Severn at Bewdley 4th June 2009. Rapport d'essais, UK Environment Agency. 30 p.
- FALKENMARK, M. et WIDSTRAND, C. (1992). Population and water resources : a delicate balance. *Population bulletin*, 47(3):1–36.
- FERRO, V. (1999). Friction factor for gravel-bed channel with high boulder concentration. *Journal of Hydraulic Engineering*, 125(7):771–778.
- FORRAY, N., AUER, J. C., BROCHOT, J. F., ERAUD, Y., FAVRIAUX, A., GHIO, M., LALLEMENT, C., LANG, M., ODIER, M. et SCHERER, C. (1998). Charte qualité de l'hydrométrie. Code de bonnes pratiques. 50 p.
- FRAZIER, A. H. (1974). *Water current meters in the Smithsonian collections of the National Museum of History and Technology*. Numéro 28. US Govt. Print. Off. 92 p.
- FULFORD, J. et SAUER, V. B. (1986). Comparison of velocity interpolation methods for computing open-channel discharge. *U.S. Geological Survey Water-supply Paper*, pages 139–144.
- FULFORD, J. M. (2009). Discharge Uncertainty Example : Wading Measurements of Discharge Using a Point Velocity Meter and the Velocity-Area Method. Rapport technique, WMO. 14 p.
- GARAVAGLIA, F., GAILHARD, J., PAQUET, E., LANG, M., GARÇON, R. et BERNARDARA, P. (2010). Introducing a rainfall compound distribution model based on weather patterns sub-sampling. *Hydrology and Earth System Sciences*, 14(6):951–964.
- GARCIA-AZNAR, P. (2014). Mesure de débit en rivière par profileur acoustique Doppler horizontal : limitations et améliorations. Rapport de stage. 47 p.
- GAUME, E. et BORGA, M. (2008). Post-flood field investigations in upland catchments after major flash floods : proposal of a methodology and illustrations. *Journal of flood risk management*, 1(4):175–189.
- GIUNTOLI, I., MAUGIS, P. et RENARD, B. (2013). Évolution des débits de rivières en France. ONEMA, 5 p.

- GONZÁLEZ, J. A., MELCHING, C. S. et OBERG, K. A. (1996). Analysis of open-channel velocity measurements collected with an acoustic doppler current profiler. In *RIVERTECH 96, Proceedings from the 1st International Conference On New/Emerging Concepts for Rivers Organized by the International Water Resources Association, Chicago, Illinois, USA*. 8 p.
- GONZÁLEZ-CASTRO, J. A. et MUSTE, M. (2007). Framework for Estimating Uncertainty of ADCP Measurements from a Moving Boat by Standardized Uncertainty Analysis. *Journal of Hydraulic Engineering*, pages 1390–1410.
- GRAF, W. et ALTINAKAR, M. (1993). *Hydraulique Fluviale, Tome 1 : Écoulement uniforme et non uniforme*. Presses Polytechniques et Universitaires Romandes, Lausanne. 259 p.
- GRAF, W., H., A. et al. (1998). *Fluvial hydraulics : Flow and transport processes in channels of simple geometry*. Numéro 551.483 G7. 692 p.
- GUNAWAN, B., STERLING, M. et KNIGHT, D. (2010). Using an acoustic doppler current profiler in a small river. *Water and Environment Journal*, 24(2):147–158.
- GUPTA, H. V., KLING, H., YILMAZ, K. K. et MARTINEZ, G. F. (2009). Decomposition of the mean squared error and NSE performance criteria : Implications for improving hydrological modelling. *Journal of Hydrology*, 377(1–2):80–91.
- HAUET, A. (2006). *Estimation de débit et mesure de vitesse en rivière par Large-Scale Particle Image Velocimetry*. Thèse de doctorat, Université de Grenoble. 321 p.
- HAUET, A., CREUTIN, J.-D. et BELLEUDY, P. (2008a). Sensitivity study of large-scale particle image velocimetry measurement of river discharge using numerical simulation. *Journal of Hydrology*, 349(1):178–190.
- HAUET, A., KRUGER, A., KRAJEWSKI, W., BRADLEY, A., MUSTE, M., CREUTIN, J. D. et WILSON, M. (2008b). Experimental System for Real-Time Discharge Estimation Using an Image-Based Method. *Journal of Hydrologic Engineering*, 13(2):105–110.
- HAUET, A., LE COZ, J., DRAMAIS, G., CARRE, C., LEGRAS, D., PIERREFEU, G. et GODAYER, C. (2009). Méthodes innovantes pour la mesure des débits fluviaux en continu : profileur Doppler fixe horizontal (H-aDcp) et analyse d’images (LSPIV). *La Houille Blanche*, (3):123–131.
- HAUET, A., LE COZ, J., SEVREZ, D., DRAMAIS, G., HÉNAULT, F., PERRET, C., PIERREFEU, G., POBANZ, K. et THOLLET, F. (2012). Intercomparaison ADCP sur le canal de La Gentille (12-16/09/2011). [adcp intercomparison in the gentille canal (2011/09/12-16)]. Rapport d’essais, Groupe Doppler. 62 p.
- HERNLA, M. (1996). Messunsicherheit und Fähigkeit. *Qualitat und Zuverlässigkeit*, 41:1156–1166.
- HERSCHY, R. W. (1975). *The accuracy of existing and new methods of river gauging*. Thèse de doctorat, University of Reading. 485 p.
- HERSCHY, R. W. (1982). Current meter calibration - individual rating versus group rating. In *IAHS, International symposium on advances in hydrometry*, numéro 134, pages 25–36.
- HERSCHY, R. W. (1993a). The stage-discharge relation. *Flow Measurement and Instrumentation*, 4(1):11–15.

- HERSCHY, R. W. (1993b). The velocity-area method. *Flow Measurement and Instrumentation*, 4(1):7–10.
- HERSCHY, R. W. (2002). The uncertainty in a current meter measurement. *Flow Measurement and Instrumentation*, 13(5–6):281–284.
- HERSCHY, R. W. (2009). *Streamflow Measurement, 3rd edition*. Taylor & Francis, New York. 887 p.
- HIDAYAT, H., VERMEULEN, B., SASSI, M., TORFS, P. et HOITINK, A. (2011). Discharge estimation in a backwater affected meandering river. *Hydrology and Earth System Sciences*, 15(8):2717–2728.
- HOITINK, A., BUSCHMAN, F. et VERMEULEN, B. (2009). Continuous measurements of discharge from a horizontal acoustic doppler current profiler in a tidal river. *Water Resources Research*, 45(11).
- HUANG, H. (2012). Uncertainty Model for In Situ Quality Control of Stationary ADCP Open-Channel Discharge Measurement. *Journal of Hydraulic Engineering*, 138(1):4–12.
- ISHIKAWA, K. (1982). *Guide to quality control*. Numéro TS156. I3713 1994.
- ISO (1983). ISO/TR 7178 :1983 - Liquid flow measurement in open channels – Velocity-area methods – Investigation of total error. 27 p.
- ISO (1989). ISO/TR 9209 :1989 - Measurement of liquid flow in open channels - Determination of the wetline correction. 8 p.
- ISO (1990). ISO 9823 :1990 - Hydrometry – Velocity-area method using a restricted number of verticals. 17 p.
- ISO (1994a). ISO 5725-1 :1994 - Exactitude (justesse et fidélité) des résultats et méthodes de mesure – Partie 1 : Principes généraux et définitions. 29 p.
- ISO (1994b). ISO 5725-2 :1994 - Exactitude (justesse et fidélité) des résultats et méthodes de mesure – Partie 2 : Méthode de base pour la détermination de la répétabilité et de la reproductibilité d’une méthode de mesure normalisée. 55 p.
- ISO (1994c). ISO 9555-1 :1994 - Measurement of liquid flow in open channels – Tracer dilution methods for the measurement of steady flow – Part 1 : General. 57 p.
- ISO (2005a). ISO 13528 :2005 - Statistical methods for use in proficiency testing by interlaboratory comparisons. 66 p.
- ISO (2005b). ISO 5168 :2005 - Mesure de débit des fluides – Procédures pour le calcul de l’incertitude. 76 p.
- ISO (2005c). NF EN ISO 6416 :2005 - Mesure du débit à l’aide de la méthode ultrasonique (acoustique). 62 p.
- ISO (2007a). ISO 1088 :2007 - Hydrometry - Velocity–area methods using current-meters – Collection and processing of data for determination of uncertainties in flow measurement. 57 p.
- ISO (2007b). ISO 3455 :2007 - Hydrometry – calibration of currentmeters in straight open tanks. 20 p.

- ISO (2007c). ISO/TS 25377 :2007 - Hydrometry – Hydrometric Uncertainty Guidance (HUG). 59 p.
- ISO (2009). ISO 748 :2009 - Hydrometry – measurement of liquid flow in open channels using current-meters or floats. 58 p.
- ISO (2010). ISO 21748 :2010 - Lignes directrices relatives à l'utilisation d'estimations de la répétabilité, de la reproductibilité et de la justesse dans l'évaluation de l'incertitude de mesure. 38 p.
- JCGM (2008a). Evaluation of measurement data - Guide to the expression of uncertainty in measurement. Guide 100, BIPM. 132 p.
- JCGM (2008b). Evaluation of measurement data - Supplement 1 to the "Guide to the expression of uncertainty in measurement" - propagation of distributions using a monte carlo method. Guide 1, BIPM. 90 p.
- JCGM (2008c). International vocabulary of metrology - Basic and general concepts and associated terms (vim). vocabulaire international de métrologie - Concepts fondamentaux et généraux et termes associés (vim). Guide 3, BIPM. 104 p.
- KIANG, J., COHN, T. et MASON, R. (2009). Quantifying uncertainty in discharge measurements : A new approach. *In World Environmental and Water Resources Congress 2009*. American Society of Civil Engineers. 8 p.
- LACAZE, Y., CHESNEAU, S. et CHALÉON, C. (2010). Quantification de la fiabilité de l'information hydrométrique en période d'étiage. *La Houille Blanche*, (4):80–89.
- LANG, M., PERRET, C., RENOUF, E., SAUQUET, E. et PAQUIER, A. (2006). Incertitudes sur les débits de crue. *La Houille Blanche*, 6:33–41.
- LANG, M., POBANZ, K., RENARD, B., RENOUF, E. et SAUQUET, E. (2010). Extrapolation of rating curves by hydraulic modelling, with application to flood frequency analysis. *Hydrological Sciences Journal*, 55(6):883–898.
- LE BOURSICAUD, R., PÉNARD, L., HAUET, A. et LE COZ, J. (2014). Estimation des débits de crue à partir de films de témoins. Journées Hydrométrie du SCHAPI, Toulouse, 37 p.
- LE COZ, J. (2011). Coefficient de fond des jaugeages par exploration du champ des vitesses. Rapport technique, Irstea, 11 p.
- LE COZ, J. (2012). A literature review of methods for estimating the uncertainty associated with stage-discharge relations. *WMO, Lyon, France*. 21 p.
- LE COZ, J. (2016). Propositions pour le calcul d'incertitude pour l'intercomparaison de Chauvan 2016. Rapport technique, 6 p.
- LE COZ, J., BLANQUART, B., POBANZ, K., DRAMAIS, G., PIERREFEU, G., HAUET, A. et DESPAX, A. (2016). Estimating the uncertainty of streamgauging techniques using in situ collaborative interlaboratory experiments. *Journal of Hydraulic Engineering*, 7(142):04016011.
- LE COZ, J., CAMENEN, B., DRAMAIS, G., RIBOT-BRUNO, J., FERRY, M. et ROSIQUE, J.-L. (2011). Contrôle des débits réglementaires. Application de l'article L. 214-18 du Code de l'environnement. Guide. 132 p.

- LE COZ, J., CAMENEN, B., PEYRARD, X. et DRAMAIS, G. (2012a). Uncertainty in open-channel discharges measured with the velocity-area method. *Flow Measurement and Instrumentation*, 26:18–29.
- LE COZ, J., CAMENEN, B., PEYRARD, X. et DRAMAIS, G. (2014a). Erratum to "Uncertainty in open-channel discharges measured with the velocity-area method [flow measurement and instrumentation 26 (2012) 18-29]". *Flow Measurement and Instrumentation*.
- LE COZ, J., G., P., SAYSSET, G., BROCHOT, J. et MARCHAND, P. (2008). *Mesures hydrologiques par profileur Doppler*. Quae. 164 p.
- LE COZ, J., HAUET, A., PIERREFEU, G., DRAMAIS, G. et CAMENEN, B. (2010). Performance of image-based velocimetry (LSPIV) applied to flash-flood discharge measurements in Mediterranean rivers. *Journal of Hydrology*, 394(1):42–52.
- LE COZ, J., PIERREFEU, G., BROCHOT, J.-F., SAYSSET, G. et MARCHAND, P. (2007). Jaugeage des rivières par ADCP : pour une culture commune. *La Houille Blanche*, (4):111–118.
- LE COZ, J., POBANZ, K., FAURE, J., PIERREFEU, G., BLANQUART, B. et CHOQUETTE, Y. (2012b). Stage-discharge hysteresis evidenced by multi-ADCP measurements. *In River Flow 2012 conference, San José, Costa Rica*, pages 1277–1283.
- LE COZ, J., RENARD, B., BONNIFAIT, L., BRANGER, F. et LE BOURSICAUD, R. (2014b). Combining hydraulic knowledge and uncertain gaugings in the estimation of hydrometric rating curves : A Bayesian approach. *Journal of Hydrology*, 509:573–587.
- LE COZ, J., SAYSSET, G. et PIERREFEU, G. (2009). Régate ADCP Vézère 2009. Rapport d'essais, Groupe Doppler. 14 p.
- LEE, K. (2013). *Evaluation of methodologies for continuous discharge monitoring in unsteady open-channel flows*. Thèse de doctorat, University of Iowa. 264 p.
- LEE, K., HO, H.-C., MARIAN, M. et WU, C.-H. (2014). Uncertainty in open channel discharge measurements acquired with streampro adcp. *Journal of Hydrology*, 509:101–114.
- LELEU, I., TONNELIER, I., PUECHBERTY, R., GOUIN, P., VIQUENDI, I., COBOS, L., FORAY, A., BAILLON, M. et NDIMA, P.-O. (2014). La refonte du système d'information national pour la gestion et la mise à disposition des données hydrométriques. *La Houille Blanche*, (1):25–32.
- LEVESQUE, V. A. et OBERG, K. A. (2012). Computing discharge using the index velocity method. Rapport technique, US Geological Survey. 148 p.
- MALAVOI, J.-R. et BRAVARD, J.-P. (2010). *Éléments d'hydromorphologie fluviale*. Onema. 224 p.
- MALAVOI, J.-R. et SOUCHON, Y. (2002). Description standardisée des principaux faciès d'écoulement observables en rivière : clé de détermination qualitative et mesures physiques. *Bulletin Français de la Pêche et de la Pisciculture*, (365-366):357–372.
- MASSON, J., GHIO, M., LALLEMENT, C., PARSY, C. et PHILIPPE, J. (1987). Débitmétrie : précision des stations de jaugeage. *La Houille Blanche*, (4-5):333–338.
- MATHEVET, T., PERRET, C., GARÇON, R., PERIERS, P., GOUTX, D., GIBEY, J.-M., OUDIN, R., XHAARD, H. et ROY, J.-L. (2010). Modèles de prévision et prise de décision pour le soutien d'étiage de la Loire. *La Houille Blanche*, (5):40–51.

- MCMILLAN, H., KRUEGER, T. et FREER, J. (2012). Benchmarking observational uncertainties for hydrology : rainfall, river discharge and water quality. *Hydrological Processes*, 26(26):4078–4111.
- MORLOT, T. (2014). *La gestion dynamique des relations hauteur-débit des stations d'hydrométrie et le calcul des incertitudes associées. Un indicateur de gestion, de qualité et de suivi des points de mesure.* Thèse de doctorat, Université de Grenoble, Grenoble. 293 p.
- MORLOT, T., PERRET, C., FAVRE, A.-C. et JALBERT, J. (2014). Dynamic rating curve assessment for hydrometric stations and computation of the associated uncertainties : Quality and station management indicators. *Journal of Hydrology*, 517:173–186.
- MOYEED, R. A. et CLARKE, R. T. (2005). The use of bayesian methods for fitting rating curves, with case studies. *Advances in Water Resources*, 28(8):807–818.
- MUSTE, M. (2009). Guidelines for the assessment of uncertainty of hydrometric measurements. WMO, Iowa City, 24 p.
- MUSTE, M., LEE, K. et BERTRAND-KRAJEWSKI, J.-L. (2012). Standardized uncertainty analysis for hydrometry : a review of relevant approaches and implementation examples. *Hydrological Sciences Journal*, 57(4):643–667.
- MUSTE, M., YU, K., PRATT, T. et ABRAHAM, D. (2004). Practical aspects of adcp data use for quantification of mean river flow characteristics ; part ii : fixed-vessel measurements. *Flow Measurement and Instrumentation*, 15(1):17–28.
- NASH, J. E. et SUTCLIFFE, J. V. (1970). River flow forecasting through conceptual models part I - A discussion of principles. *Journal of Hydrology*, 10(3):282–290.
- NEZU, I., NAKAGAWA, H. et TOMINAGA, A. (1985). Secondary currents in a straight channel flow and the relation to its aspect ratio. In *Turbulent shear flows 4*, pages 246–260. Springer.
- NIHEI, Y. et KIMIZU, A. (2008). A new monitoring system for river discharge with horizontal acoustic doppler current profiler measurements and river flow simulation. *Water Resources Research*, 44(4).
- OBERG, K. et MUELLER, D. S. (2007). Validation of streamflow measurements made with acoustic Doppler current profilers. *Journal of Hydraulic Engineering*, 133(12):1421–1432.
- OLIVIER, A., PIERREFEU, G., SCOTTI, M. et BLANQUART, B. (2009). Incertitude des mesures de débit réalisées a l'ADCP. *La Houille Blanche*, (3):132–137.
- PARZEN, E. (1962). On estimation of a probability density function and mode. *The Annals of Mathematical Statistics*, 33(3):1065–1076.
- PEARSON, E. S. et HARTLEY, H. O. (1958). *Biometrika Tables for Statisticians*. 240 p.
- PELLETIER, P. M. (1988). Uncertainties in the single determination of river discharge : a literature review. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 15(5):834–850.
- PERRET, C. (1992). Les moulinets. Etalonnages - Comportement - Entretien. Rapport technique. 59 p.
- PERRET, C. (2014). Métier surveillance et prévision hydrométéorologique - analyse de l'activité production de données - vision moyen terme. Rapport interne, EDF. 23 p.

- PERRET, C., HAUET, A., PARREL, D., SAYSSET, G., VIGNON, P. et SCHNEGG, P. (2012). Le réseau d’observation hydroclimatologique de montagne d’EDF–Etat des lieux. Mesures de débit par dilution d’un traceur fluorescent. *La Houille Blanche*, (3):18–25.
- PERRET, C., POLIGOT-PITSCH, S., PUECHBERTY, R., BELLEVILLE, A., BATTAGLIA, P., BOMPART, P., CHAUVEL, G., COUSSEAU, J., LE COZ, J., DRAMAS, G., GLAZIOU, G., HÉLOUIN, S., LANG, M., HAUET, A., LARRARTE, F., MARCHAND, P., MOCQUET, M., PAYRARSTE, O. et RAUZY, G. (2017). Charte qualité de l’hydrométrie. Code de bonnes pratiques. (*En cours de rédaction.*). Ministère de l’Environnement, de l’Énergie et de la Mer, Guide, 92 p.
- PETERSEN-ØVERLEIR, A. (2006). Modelling stage-discharge relationships affected by hysteresis using the Jones formula and nonlinear regression. *Hydrological Sciences Journal*, 51(3):365–388.
- POBANZ, K., LE COZ, J. et PIERREFEU, G. (2011). Intercomparaison ADCP sur le Rhône à l’aval du barrage de Génissiat (12-15/10/2010). Rapport d’essais, Groupe Doppler. 59 p.
- R CORE TEAM (2013). *R : A Language and Environment for Statistical Computing*. R Foundation for Statistical Computing, Vienne, Autriche.
- RANTZ, S. *et al.* (1982). *Measurement and computation of stream flow. Volume 1 : Measurement of stage and discharge ; Volume 2 : Computation of discharge*. US Geological Survey water-supply paper. 631 p.
- ROOS, P., van BECKUM, F. et van GROESEN, E. (1999). Cross-sectional river shapes : a variational discharge-resistance formulation. Rapport technique 1495, Faculty of Mathematical Sciences, University of Twente. 22 p.
- ROSGEN, D. L. (1994). A classification of natural rivers. *Catena*, 22(3):169–199.
- SAUER, V. B. et MEYER, R. W. (1992). Determination of error in individual discharge measurements. Rapport technique, US Geological Survey, 25 p.
- SCHMIDT, A. (2002). *Analysis of Stage-Discharge Relations for Open-Channel Flows and their Associated Uncertainties*. Thèse de doctorat, University of Illinois, Urbana-Champaign. 329 p.
- SCHUMM, S. A. (1977). *The fluvial System*. Wiley-Interscience Pub., New-York, USA. 338p.
- SHRESTHA, R. R. et SIMONOVIC, S. P. (2010). Fuzzy set theory based methodology for the analysis of measurement uncertainties in river discharge and stage. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 37(3):429–440.
- SLIMANI, N. (2014). Validation, qualification de capteurs de hauteur d’eau et étalonnage des hélices à moulinet. Rapport de fin d’études, IUT de Saint-Etienne. 40 p.
- STROFFEK, S. (2010). Bon état des eaux, satisfaction des usages, risques de pénuries : quels outils au service d’une stratégie de réponse graduée ? *La Houille Blanche*, (5):16–22.
- SZUPIANY, R. N., AMSLER, M. L., BEST, J. L. et PARSONS, D. R. (2007). Comparison of fixed-and moving-vessel flow measurements with an adp in a large river. *Journal of Hydraulic Engineering*, 133(12):1299–1309.
- TAZIOLI, A. (2011). Experimental methods for river discharge measurements : comparison among tracers and current meter. *Hydrological Sciences Journal*, 56(7):1314–1324.

- TEREK, B. et NIMAC, N. (2008). Interkomparacijsko mjerenje protoka akustickim Doppler (ADCP) protokomjerima. Rapport d'essais.
- TURNIPSEED, D. P. et SAUER, V. B. (2010). Discharge measurements at gaging stations. Rapport technique, US Geological Survey. 108 p.
- UNITED NATIONS DEVELOPMENT PROGRAMME (2006). *Human Development Report - Beyond scarcity : Power, poverty and the global water crisis*. United Nations. 440 p.
- VIGNON, P. (2001). Jaugeage par exploration du champs de vitesses. Méthode du moulinet Hydrométrique. Document interne EDF-DTG, 12 p.
- VOGEL, F. et KETCHAM, C. (2015). Colorado, un fleuve qui a perdu sa mer. *GEO Magazine*, (442):34–55.
- VÖRÖSMARTY, C. J., GREEN, P., SALISBURY, J. et LAMMERS, R. B. (2000). Global water resources : vulnerability from climate change and population growth. *Science*, 289(5477):284–288.
- WELBER, M., LE COZ, J., LARONNE, J. B., ZOLEZZI, G., ZAMLER, D., DRAMAI, G., HAUET, A. et SALVARO, M. (2016). Field assessment of noncontact stream gauging using portable surface velocity radars (SVR). *Water Resources Research*, 52:1108–1126.
- WESTERBERG, I. et MCMILLAN, H. (2014). Uncertainty in hydrological signatures for characterising rainfall-runoff processes. In *EGU General Assembly Conference Abstracts*, volume 16, page 5893.
- WHALLEY, N., IREDALE, R. S. et CLARE, A. F. (2001). Reliability and uncertainty in flow measurement techniques - some current thinking. *Physics and Chemistry of the Earth, Part C : Solar, Terrestrial & Planetary Science*, 26(10–12):743–749.
- WMO (2010). *Manual on stream gauging - Vol I*. WMO, Geneva. 252 p.
- YOBBI, D., YORKE, T. H. et MYCYK, R. T. (1996). A guide to safe field operations. Rapport technique, DTIC Document. 34 p.
- YOUNG, K. B. (1950). A comparative study of mean-section and mid-section methods for computation of discharge measurements. Rapport technique, US Geological Survey.
- ZIN, I. (2002). *Incertainces et ambiguïté dans la modélisation hydrologique : discussion, développements méthodologiques et application à l'hydrologie de crue en Ardèche*. Thèse de doctorat, Université de Grenoble. 200 p.

Cette annexe s'appuie sur les définitions du Vocabulaire International de Métrologie (VIM) proposées par le *Joint Committee for Guides in Metrology* (JCGM, 2008c). Ce guide fournit un ensemble de définitions dont quelques-unes sont exposées ci-dessous.

A.1 Définitions

Le mesurande se définit comme « *la grandeur que l'on veut mesurer* » (JCGM, 2008c). On définit le mesurage comme « *le processus consistant à obtenir expérimentalement une ou plusieurs valeurs que l'on peut raisonnablement attribuer à une grandeur* » (JCGM, 2008c). En hydrométrie, le mesurande est le débit vrai que l'on cherche à estimer. Un jaugeage (ou mesure ponctuelle du débit) constitue un exemple de mesurage.

En l'absence de biais (ou erreur systématique), l'incertitude de mesure définit un intervalle autour de la valeur mesurée qui inclut la valeur vraie (le mesurande) avec une probabilité plus ou moins grande. L'incertitude de mesure peut être caractérisée par un écart-type appelé incertitude-type (dans le cas d'une distribution normale de l'erreur) ou la demi-étendue d'un intervalle ayant une probabilité de couverture déterminée (voir, pour complément, l'annexe A). On note que l'incertitude représente un intervalle de confiance autour de la valeur mesurée selon une certaine probabilité alors que l'erreur désigne l'écart entre le résultat d'un mesurage et la valeur vraie du mesurande (inconnue).

L'erreur systématique est représentée sur les figures A.1c et A.1d par l'intervalle entre la valeur vraie et la valeur mesurée estimée par le processus de mesurage. L'intervalle de confiance est représenté sur les figures A.1a, A.1b, A.1c et A.1d par des lois gaussiennes (courbes en cloche).

On distingue sur ces quatre figures et selon la distribution des valeurs mesurées ou estimées les situations suivantes :

- *Mesures justes et fidèles* : caractérisées par une faible dispersion des résultats, centrés sur la valeur vraie (figure A.1a),
- *Mesures justes mais non fidèles* : dont les résultats sont centrés sur la valeur vraie mais fortement dispersés (figure A.1b),
- *Mesures fidèles mais pas justes* : dont la distribution est faiblement dispersée mais dont la moyenne est éloignée de la valeur vraie (figure A.1c),
- *Mesures ni justes ni fidèles* : pour lesquelles la distribution est éloignée de la valeur vraie et fortement dispersée (figure A.1d).

Bien qu'il soit souvent difficile d'atteindre la valeur vraie du mesurande, l'incertitude associée à une mesure doit pouvoir donner une information quantitative à l'utilisateur sur la qualité du résultat de manière à comparer des résultats de mesurage soit entre eux, soit par rapport à des valeurs de référence (étalon, limite ou consigne).

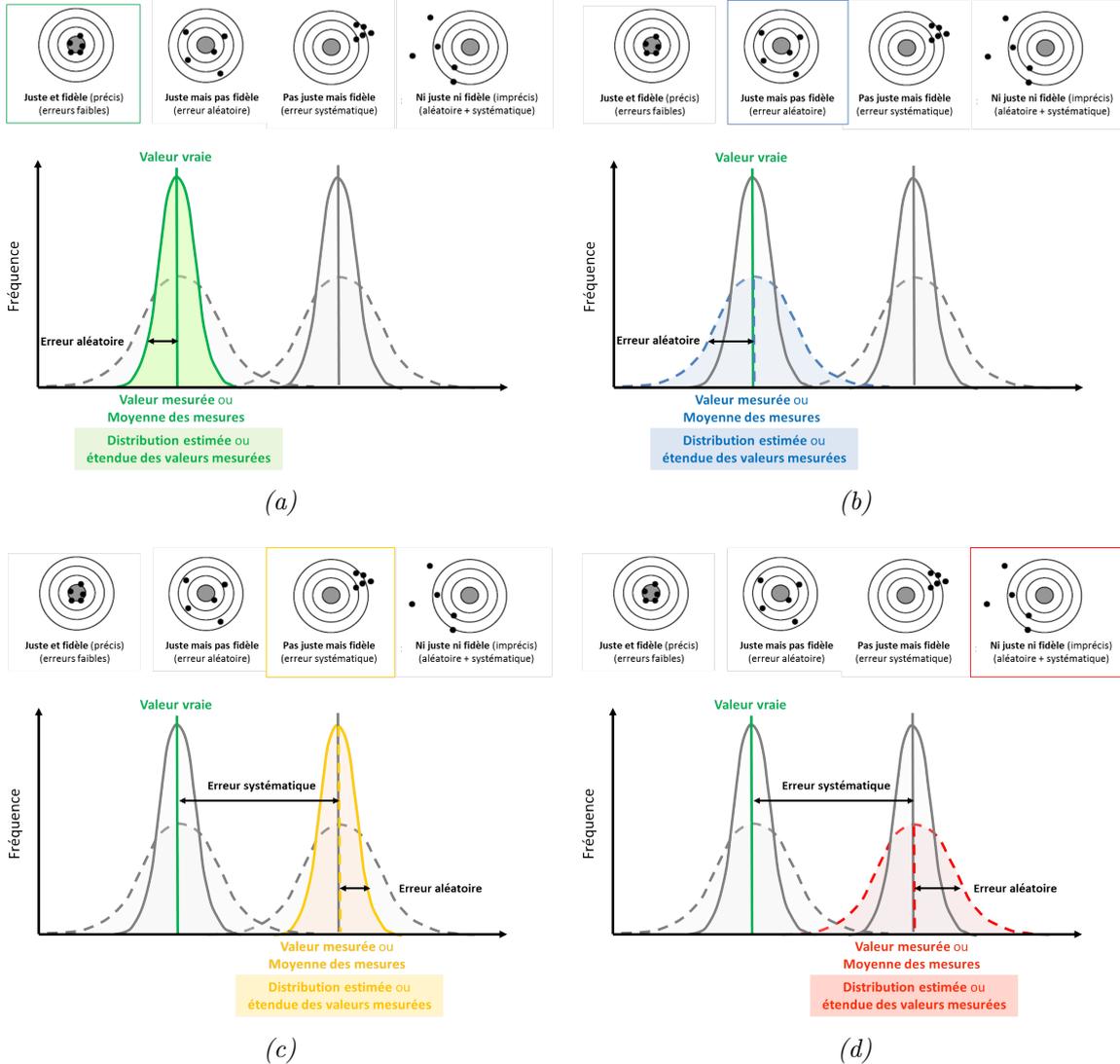


FIGURE A.1 – Justesse et fidélité d'une mesure ou d'une succession de mesures.

Le *Guide to the expression of Uncertainty in Measurement* (GUM, JCGM, 2008a) distingue deux modes d'estimation des incertitudes-types à savoir l'évaluation de *type A* et de *type B*. Une évaluation de *type A* de l'incertitude correspond à une distribution statistique des valeurs provenant de séries de mesurages et peut être caractérisée par un écart-type en faisant l'hypothèse d'une distribution gaussienne des erreurs (voir section A.2.1). Les autres méthodes sont qualifiées d'évaluation de *type B* de l'incertitude. Elles correspondent à des écarts-types évalués à partir de densités de probabilités fondées sur l'expérience (par exemple une loi uniforme comme présentée à la section A.2.2) ou tout autre type d'information (valeur à dire d'expert par exemple).

A.1.1 Définitions complémentaires

Bootstrap : En statistiques, la technique de bootstrap est une méthode d'inférence statistique permettant d'évaluer la sensibilité des indicateurs estimés, tels que l'écart-type, la moyenne ou les quantiles empiriques, aux particularités de l'échantillon utilisé, en analysant des sous-échantillons possibles.

Les définitions suivantes sont extraites du VIM (JCGM, 2008c).

Condition de répétabilité : « condition de mesurage dans un ensemble de conditions qui comprennent la même procédure de mesure, les mêmes opérateurs, le même système de mesure, les mêmes conditions de fonctionnement et le même lieu, ainsi que des mesurages répétés sur le même objet ou des objets similaires pendant une courte période de temps. »

Condition de reproductibilité : « condition de mesurage dans un ensemble de conditions qui comprennent des lieux, des opérateurs et des systèmes de mesure différents, ainsi que des mesurages répétés sur le même objet ou des objets similaires. »

Étalonnage (*Calibration* en anglais) : « opération qui, dans des conditions spécifiées, établit en une première étape une relation entre les valeurs et les incertitudes de mesure associées qui sont fournies par des étalons et les indications correspondantes avec les incertitudes associées, puis utilise en une seconde étape cette information pour établir une relation permettant d'obtenir un résultat de mesure à partir d'une indication. »

Facteur d'élargissement : « nombre supérieur à un par lequel on multiplie une incertitude-type composée pour obtenir une incertitude élargie. »

Incertitude-type composée ou combinée : « incertitude-type obtenue en utilisant les incertitudes-types individuelles associées aux grandeurs d'entrée dans un modèle de mesure ».

Inférence statistique : méthode statistique qui consiste à induire les caractéristiques inconnues d'une population à partir d'un échantillon issu de cette population.

Résolution : « plus petite variation de la grandeur mesurée qui produit une variation perceptible de l'indication correspondante ».

Probabilité de couverture : « probabilité que l'ensemble des valeurs vraies d'un mesurande soit contenu dans un intervalle élargi spécifié. » On utilisera comme synonyme, le concept statistique de niveau de confiance.

A.2 Lois de distribution des erreurs utilisées dans la thèse

A.2.1 Distribution selon une loi normale

On suppose souvent que la distribution des valeurs de x_i suit une loi normale (théorème central limite), comme illustré à la figure A.2. L'incertitude est alors simplement approchée par le calcul de l'écart-type empirique. Cela revient à une évaluation de l'incertitude de "type A" (JCGM, 2008a), comme exprimé à l'équation A.1.

$$u(x_i) = \sigma(x_i) \tag{A.1}$$

A.2.2 Distribution selon une loi uniforme

Lorsque l'on ne sait pas si les valeurs x_i suivent une loi normale, on peut faire l'hypothèse qu'elles suivent une loi uniforme. Cela revient à supposer que toute valeur x_i est comprise entre $x_i - a$ et $x_i + a$ avec la même probabilité d'être la valeur vraie. Cela se traduit par une forme rectangulaire illustrée à la figure A.3.

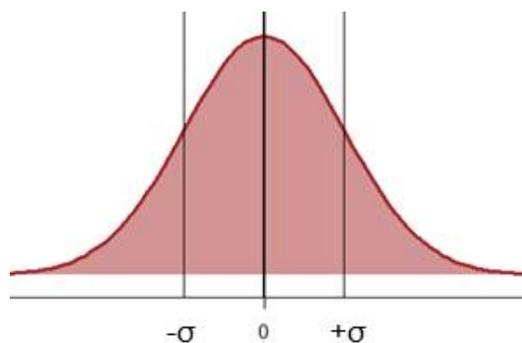


FIGURE A.2 – Loi normale.

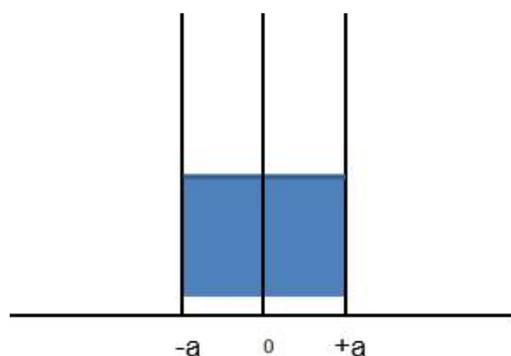


FIGURE A.3 – Loi uniforme.

L'incertitude-type est alors calculée selon l'équation A.2. On parle alors d'évaluation de l'incertitude de "type B" (JCGM, 2008a) car la forme de la distribution est fixée *a priori*.

$$u(x_i) = \frac{a_i}{2\sqrt{3}} \quad (\text{A.2})$$

D'autres formes de distribution d'incertitudes peuvent être utilisées comme par exemple une distribution en forme triangle isocèle, mais celles-ci ne sont pas abordées puisqu'elles ne sont pas abordées dans cette thèse.

Jaugeages de référence

Dans l'étude, les résultats des jaugeages sont tracés selon un code couleur illustré par la figure B.1. Les indices des jaugeages font référence au tableau 7.1 et au tableau B.1.

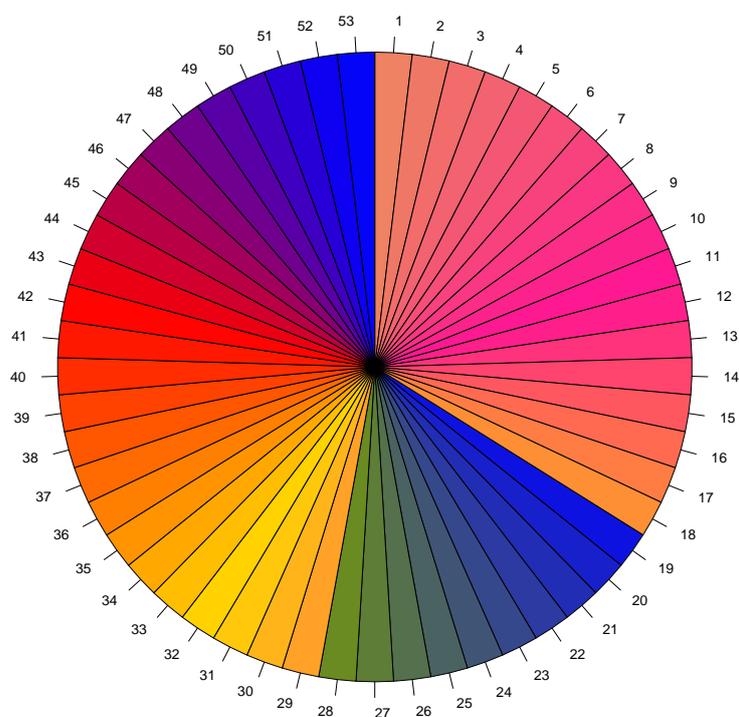


FIGURE B.1 – Code couleur des jaugeages en fonction de leur indice (voir tableau 7.1 ou tableau B.1).

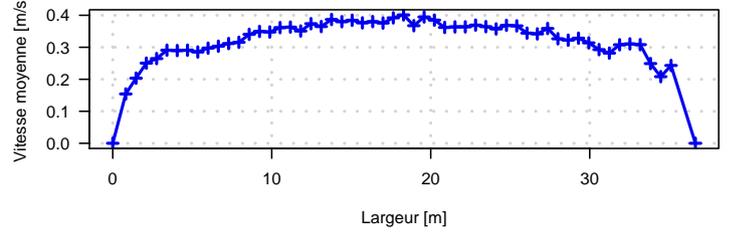
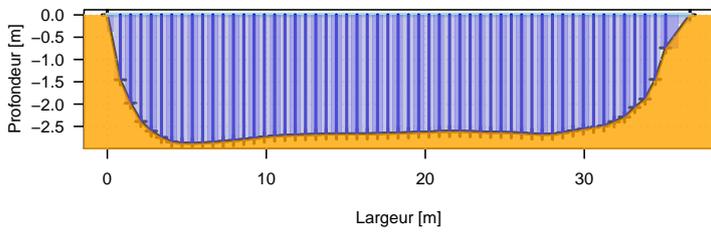
Les incertitudes résiduelles $u'_{m,\text{résiduelle}}(D_i)$ et $u'_{m,\text{résiduelle}}(V_i)$ de chaque jaugeage de référence sont présentées au tableau B.1.

Les figures suivantes représentent les profils bathymétriques et les profils latéraux des vitesses moyennes pour chacun des 53 jaugeages de référence.

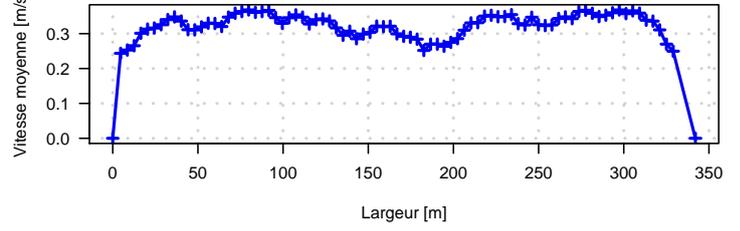
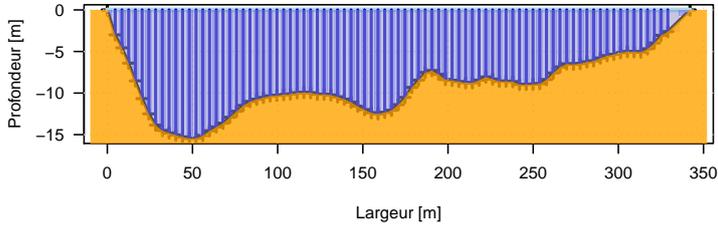
TABLE B.1 – Incertitudes résiduelles (au niveau de confiance de 68%) et valeurs de SQI pour chaque jaugeage de référence identifié par son indice, sa station, son cours d'eau et sa date. *MCM désigne les jaugeages réalisés au courantomètre et *TELE les jaugeages issus de modélisation hydraulique 2D avec le logiciel TELEMAC.

Indice	Station	Rivière	Type	Date	SQI	$u'_{m,residuelle}$	$u'_{m,residuelle}(D_i)$	$u'_{m,residuelle}(V_i)$
				AAAA/MM/JJ	[/]	[%]	[%]	[%]
1	Allassac	Vézère	ADCP	2009/02/05	0,01	0,30	0,46	0,23
2	Chavanay	Rhône	ADCP	2008/12/18	0,01	0,26	0,33	0,14
3	Chavanay	Rhône	ADCP	2014/08/06	0,01	0,31	0,24	0,26
4	Miramont Comminges	Gentille	ADCP	2011/09/13	0,02	0,19	1,24	0,10
5	Rocherousse	Durance	ADCP	2013/10/09	0,01	0,50	0,45	0,44
6	Tricastin	Rhône	ADCP	2013/09/18	0,01	0,20	0,16	0,14
7	Tricastin	Rhône	ADCP	2014/03/04	0,01	0,30	0,22	0,22
8	Les Chambons	Buech	MCM*	2014/07/22	0,04	0,94	2,12	0,82
9	Nant 1	Durzon	MCM*	2013/10/16	0,05	1,38	1,31	1,36
10	Nant 2	Durzon	MCM*	2013/10/17	0,04	0,87	0,28	0,81
11	Pont-En-Royans	Vernaison	MCM*	2001/01/27	0,04	0,93	1,32	0,82
12	Sassenage	Furon	MCM*	2013/07/10	0,03	0,92	0,52	0,77
13	Serres	Buech	MCM*	2014/07/22	0,01	0,38	0,47	0,34
14	Seuil de Premont	Arc	MCM*	2014/07/23	0,02	0,63	0,60	0,55
15	Seuil de Premont Canal	Arc	MCM*	2014/07/23	0,01	0,55	0,60	0,40
16	St Georges de Luzencon	Cernon	MCM*	2013/10/16	0,10	1,60	1,44	1,32
17	Villar Loubière	Séveraisse	MCM*	2010/01/28	0,10	1,02	1,77	0,81
18	Voiron	Morge	MCM*	2013/07/10	0,03	0,72	0,59	0,56
19	Pont de la Baume	Souloise	MCM*	2015/06/05	0,12	0,45	1,37	0,62
20	Infernet	Souloise	MCM*	2015/07/30	0,02	0,47	0,61	0,58
21	Cemetery	Akatarawa	MCM*	2002/09/10	0,02	0,54	0,52	0,66
22	Water treatment plant	Waikanae	MCM*	2008/02/28	0,04	0,71	1,22	0,75
23	Water supply intake	Waitohu	MCM*	2003/03/13	0,05	0,45	3,29	1,60
24	Hautotara	Huangarua	MCM*	2003/09/01	0,06	0,75	2,45	0,84
25	Hautotara	Huangarua	MCM*	2005/04/19	0,02	1,22	0,60	0,57
26	Pine Avenue	Hutt River	MCM*	2005/09/12	0,08	0,35	0,98	1,73
27	Te Marua	Hutt River	MCM*	2002/09/10	0,04	0,91	0,87	1,44
28	Te Marua	Hutt River	MCM*	2003/08/04	0,04	0,48	1,18	1,24
29	McLennans	Mangatarere	MCM*	2004/11/09	0,08	2,20	0,88	0,96
30	Gorge	Mangatarere	MCM*	2004/01/12	0,02	0,59	0,30	0,46
31	Wouters Culvert	Taratahi	MCM*	1999/12/10	0,02	0,78	0,66	0,72
32	Harwoods	Takaka	MCM*	2014/02/13	0,02	0,96	0,84	1,22
33	Harwoods	Takaka	MCM*	2014/12/09	0,05	1,79	1,27	0,93
34	Harwoods	Takaka	MCM*	2014/04/14	0,02	0,92	0,51	0,50
35	Harwoods	Takaka	MCM*	2014/05/08	0,02	0,77	1,06	0,52
36	Harwoods	Takaka	MCM*	2014/09/10	0,03	1,81	0,59	0,97
37	Harwoods	Takaka	MCM*	2013/06/13	0,05	1,21	0,88	1,04
38	Harwoods	Takaka	MCM*	2013/10/24	0,07	1,40	1,34	1,39
39	Harwoods	Takaka	MCM*	2014/01/13	0,05	1,55	0,95	1,82
40	Harwoods	Takaka	MCM*	2014/01/15	0,02	0,61	1,05	0,60
41	Harwoods	Takaka	MCM*	2013/03/17	0,05	0,79	0,71	0,97
42	Harwoods	Takaka	MCM*	2003/03/05	0,09	0,99	0,92	1,72
43	Harwoods	Takaka	MCM*	2015/12/11	0,05	1,03	0,74	1,10
Indice	Forme	Nature du fond	Type	Date	SQI	$u'_{m,residuelle}$	$u'_{m,residuelle}(D_i)$	$u'_{m,residuelle}(V_i)$
44	Rectangle	Lisse	TELE*		0,02	0,60	0,01	0,45
45	Rectangle	Lisse	TELE*		0,02	0,62	0,01	0,47
46	Rectangle	Rugueux	TELE*		0,04	0,80	0,12	0,53
47	Rectangle	Rugueux	TELE*		0,07	1,25	0,36	0,54
48	Trapèze	Lisse	TELE*		0,01	1,80	0,41	0,39
49	Asymétrique	Lisse	TELE*		0,03	1,64	0,59	0,43
50	Asymétrique	Rugueux	TELE*		0,07	0,72	0,76	0,64
51	Idem jaugeage 4	-	TELE*		0,01	1,20	0,32	0,33
52	Idem jaugeage 17	-	TELE*		0,07	1,45	0,69	0,46
53	Idem jaugeage 17	-	TELE*		0,03	1,25	0,15	0,46
				Minimum	0,01	0,19	0,01	0,10
				Maximum	0,12	2,20	3,29	1,82

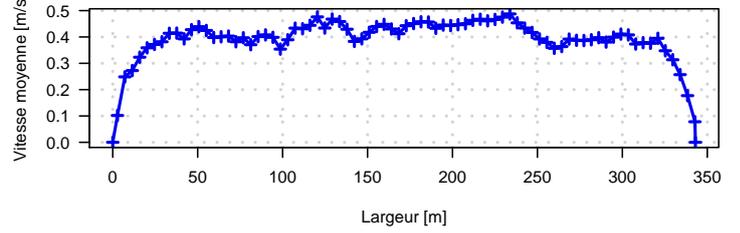
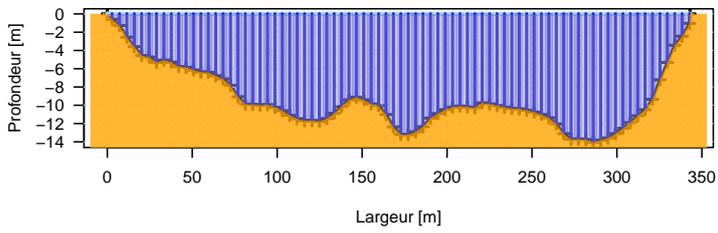
1 - Vézère @ Allasac (20090205)



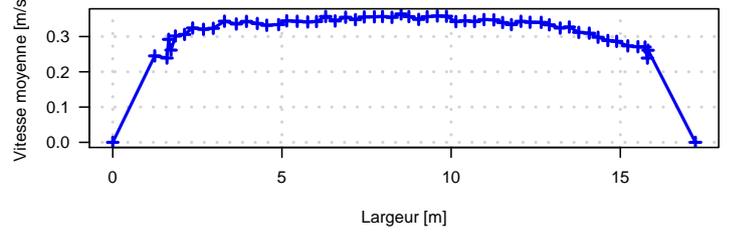
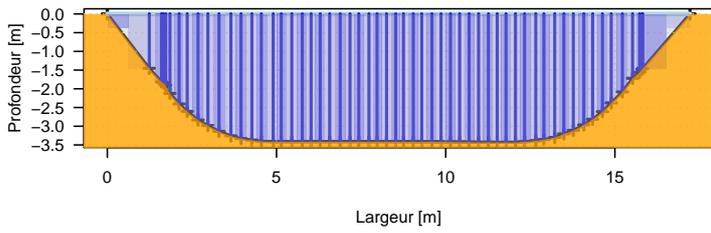
2 - Rhône @ Chavanay (20081218)



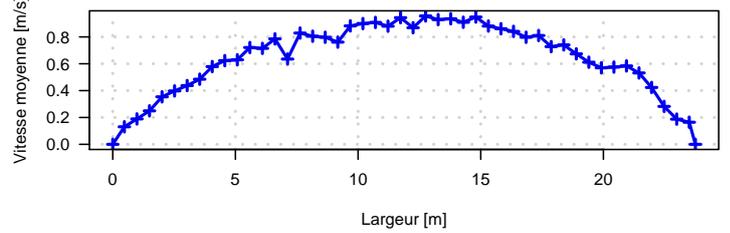
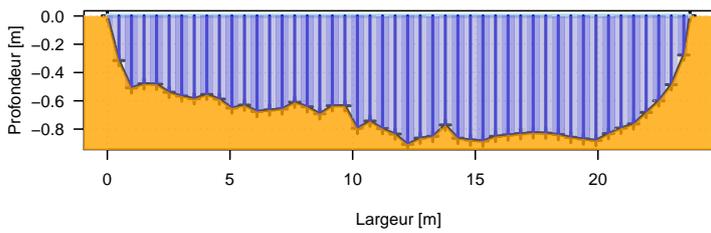
3 - Rhône @ Chavanay (20140806)



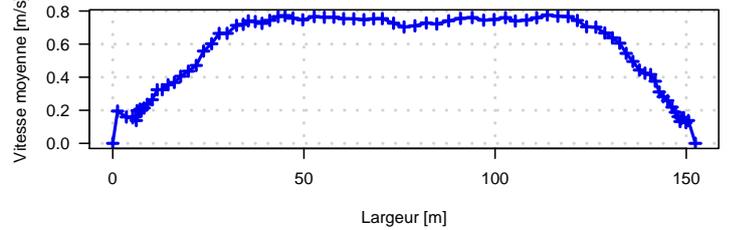
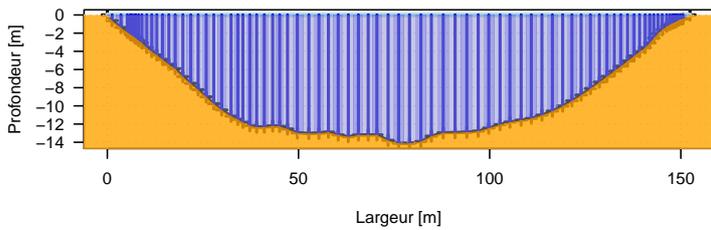
4 - Gentille @ M. Comminges (20110913)



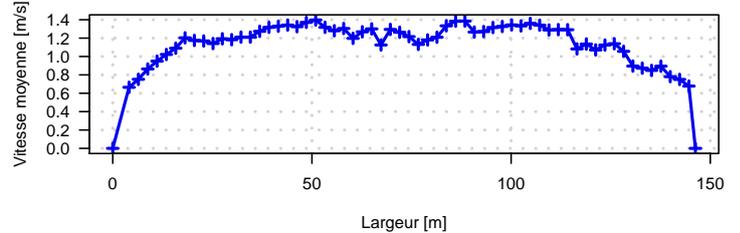
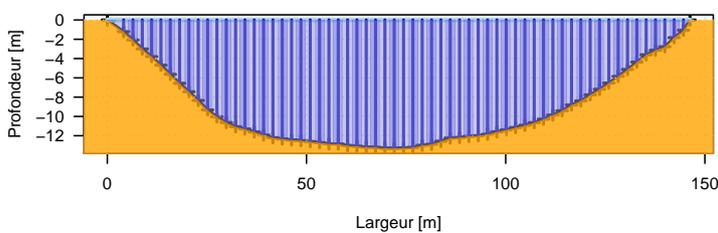
5 - Durance @ Rocherousse (20131009)



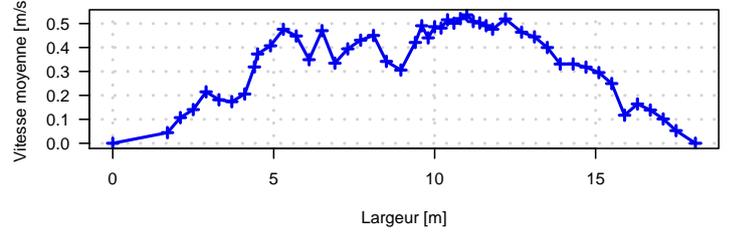
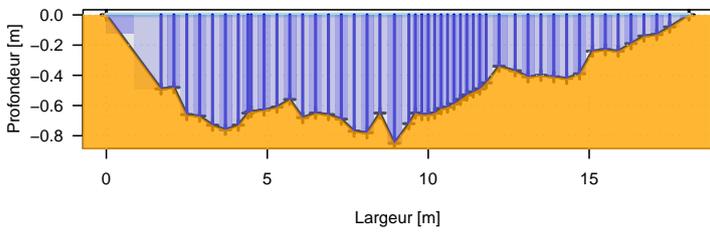
6 - Rhône @ Tricastin (20130918)



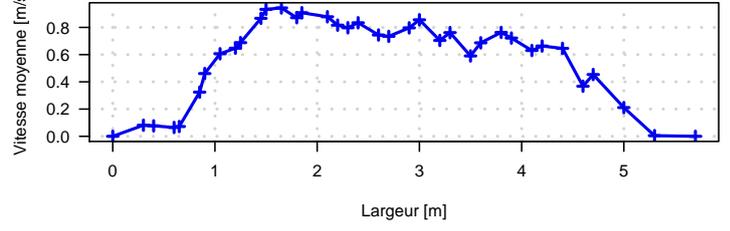
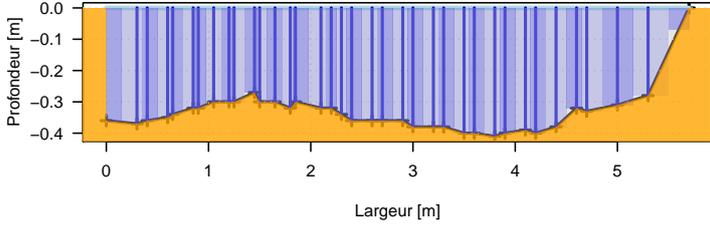
7 - Rhône @ Tricastin (20140304)



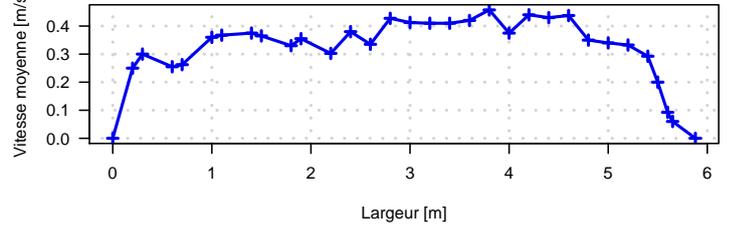
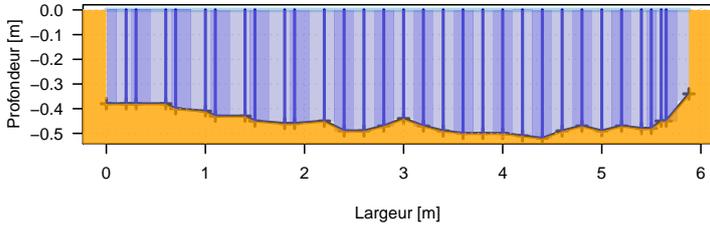
8 – Buech @ Les Chambons (20140722)



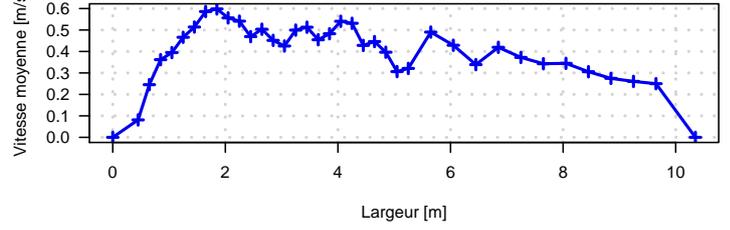
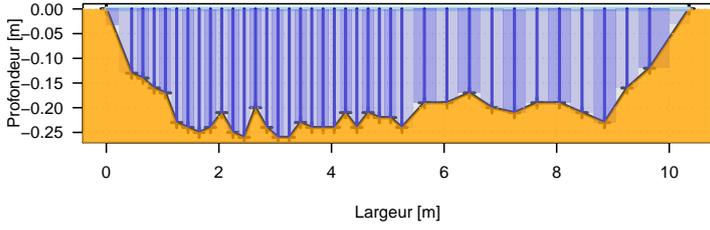
9 – Durzon @ Nant 1 (20131016)



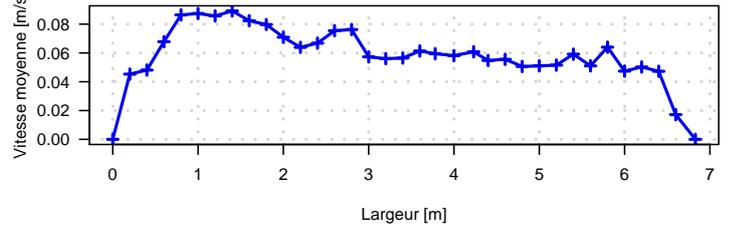
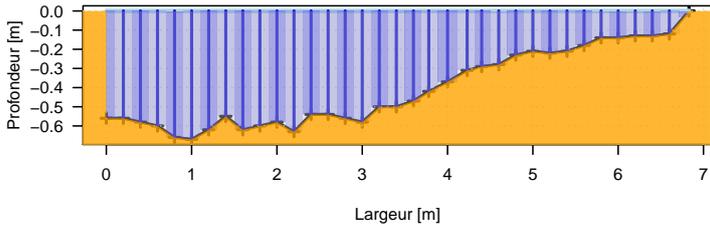
10 – Durzon @ Nant 2 (20131017)



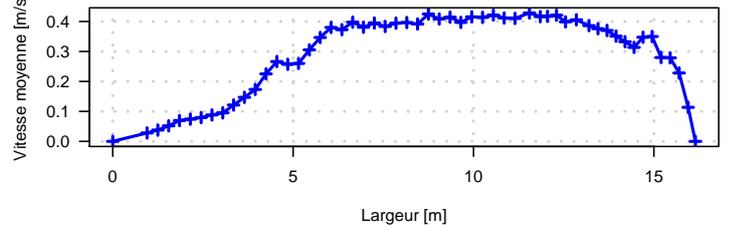
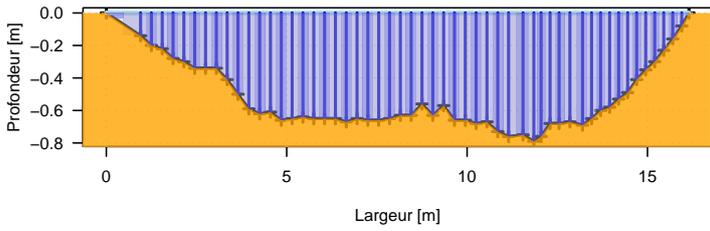
11 – Vernaison @ Pt-En-Royans (20010127)



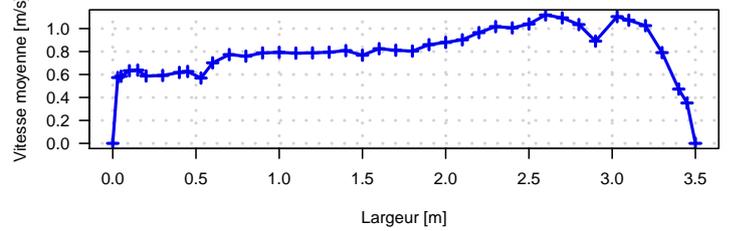
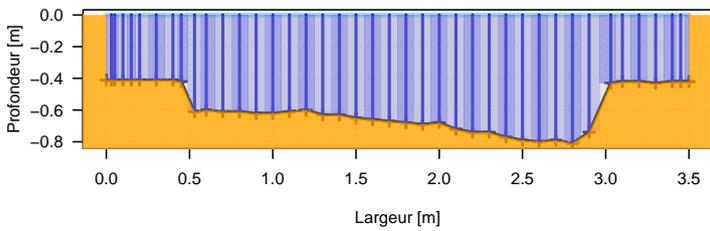
12 – Furon @ Sassenage (20130710)



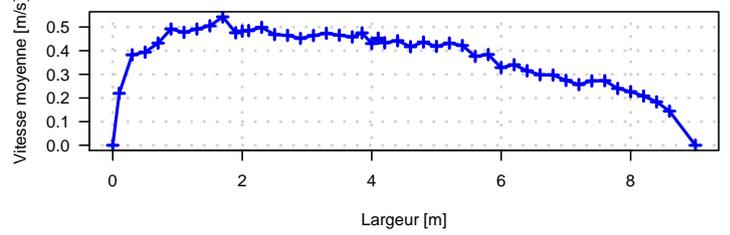
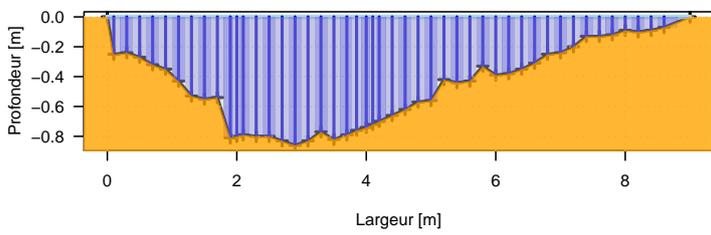
13 – Buech @ Serres (20140722)



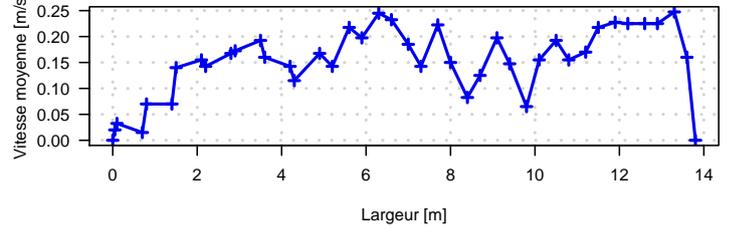
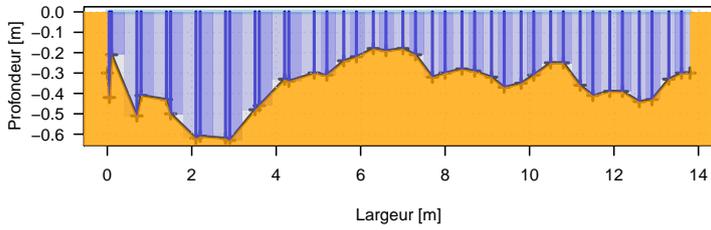
14 – Arc @ S.de Premont (20140723)



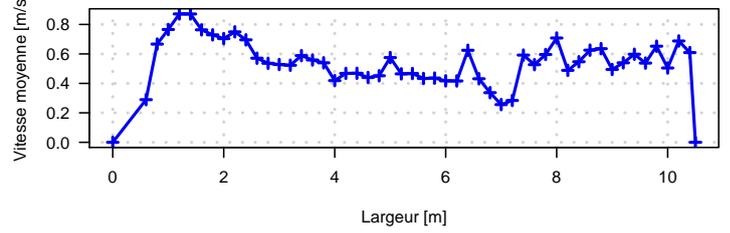
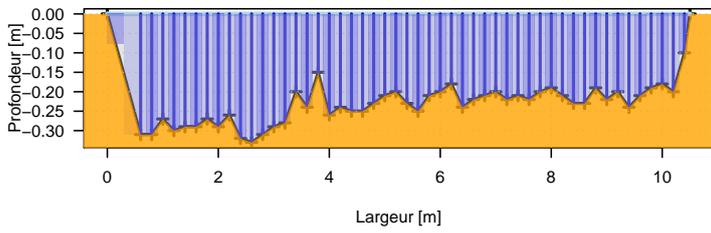
15 – Arc @ S. de Premont Cnl (20140723)



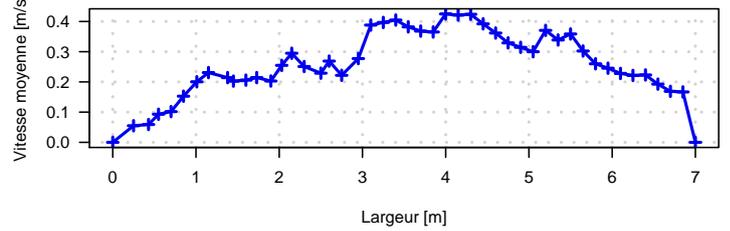
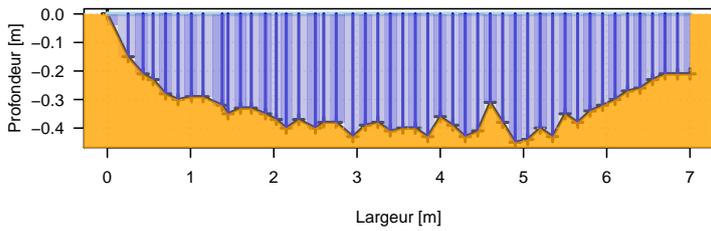
16 – Cernon @ St G.de Luz. (20131016)



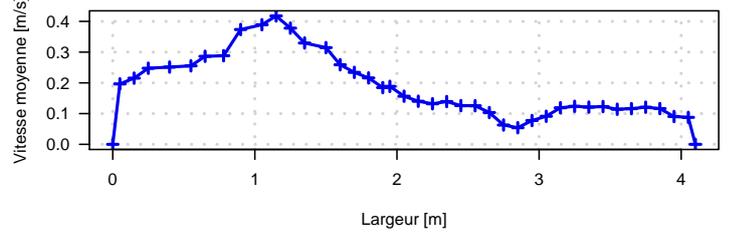
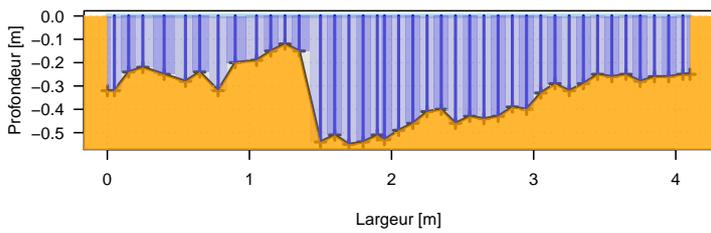
17 – Séveraisse @ V. Loubière (20100128)



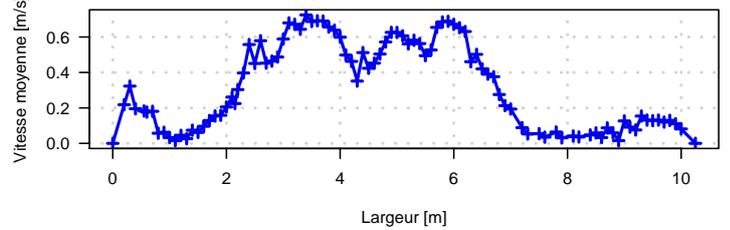
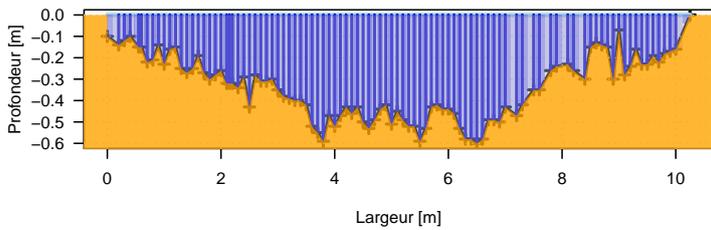
18 – Morge @ Voiron (20130710)



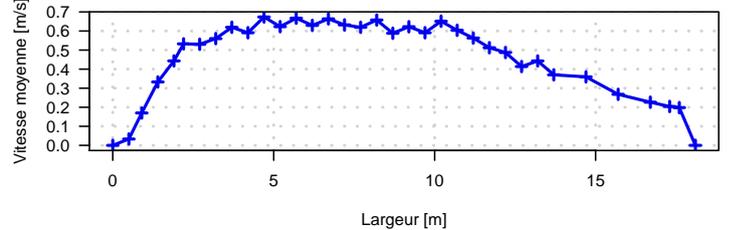
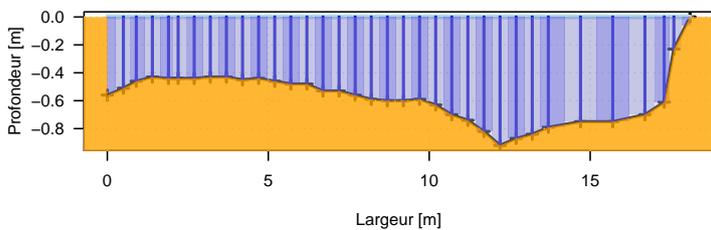
19 – Souloise @ Pt. Beaume (20130710)



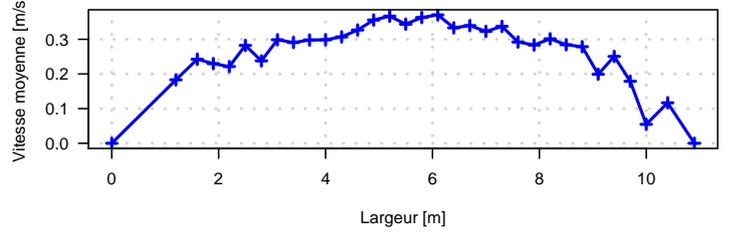
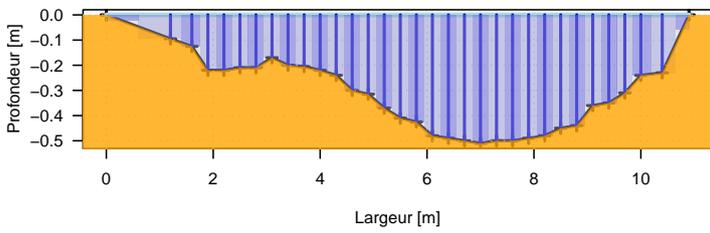
20 – Souloise @ Infernet (20130710)



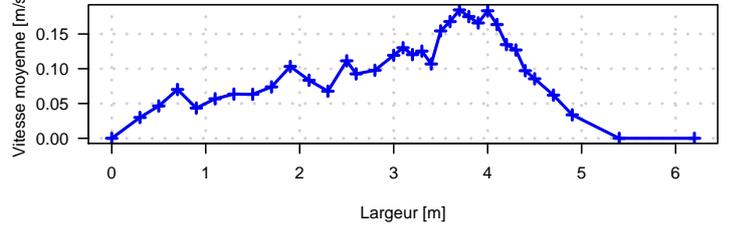
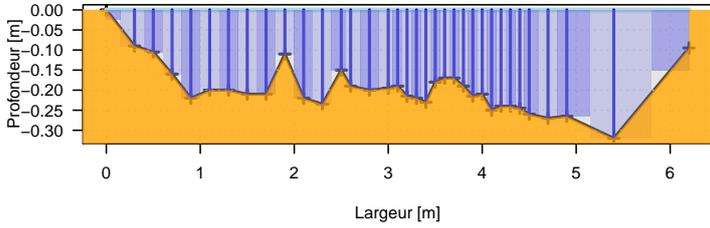
21 – Akatarawa @ Cemetery (20020910)



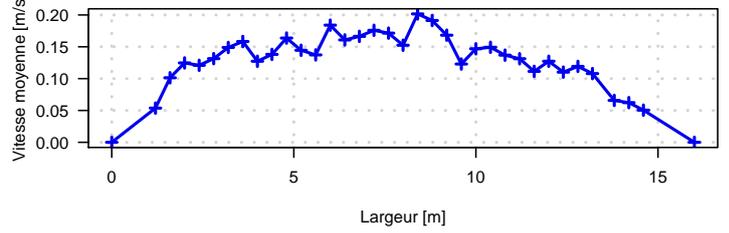
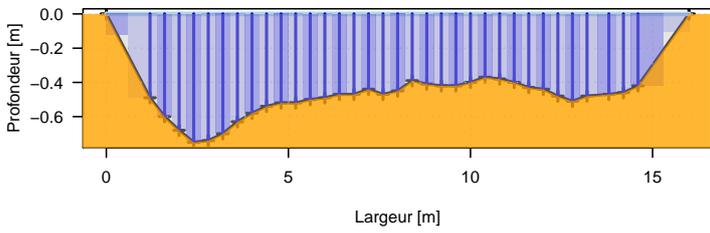
22 – Waikanae @ W. T. plant (20080228)



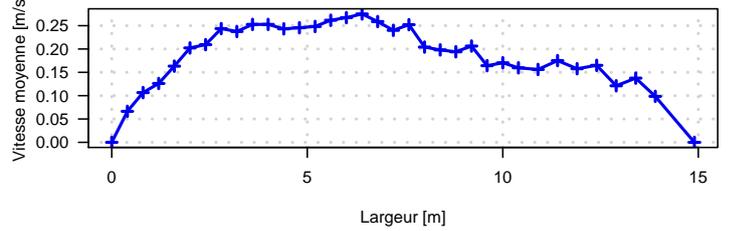
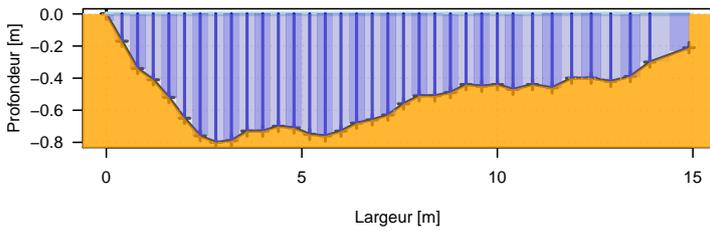
23 – Waitohu @ W.S. intake (20030313)



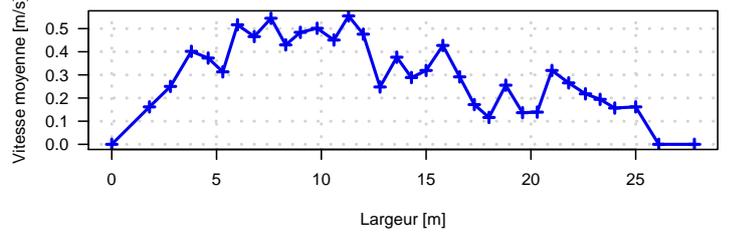
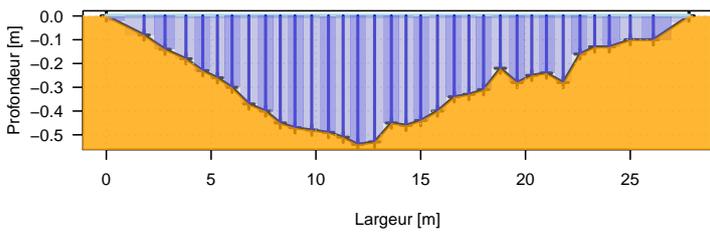
24 – Huangarua @ Hautotara (20030901)



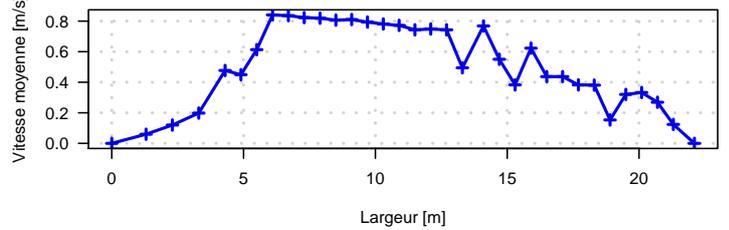
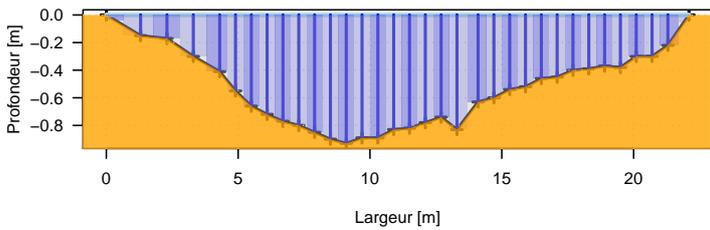
25 – Huangarua @ Hautotara (20050419)



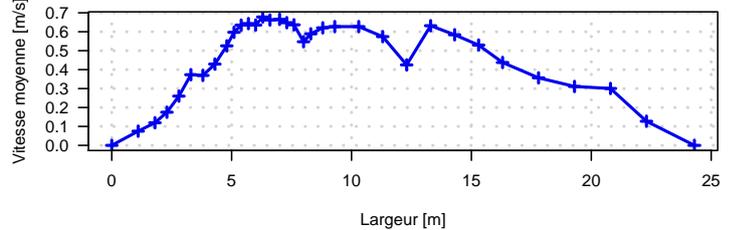
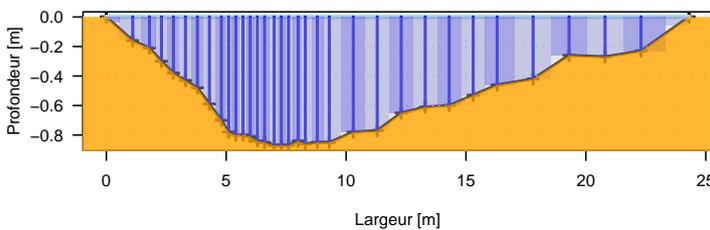
26 – Hutt River @ Pine Avenue (20050912)



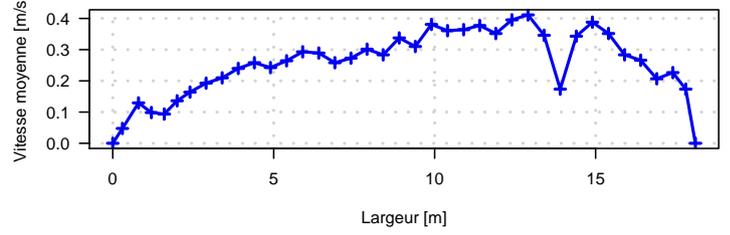
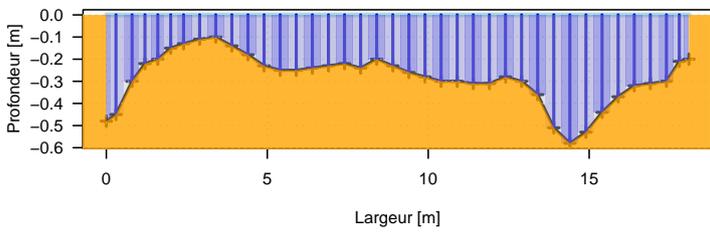
27 – Hutt River @ Te Marua (20020910)



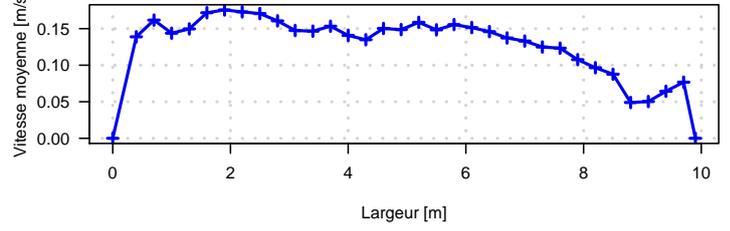
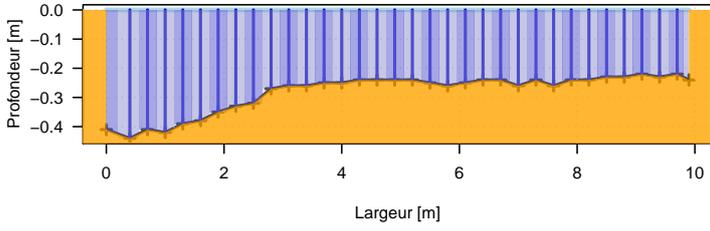
28 – Hutt River @ Te Marua (20030804)



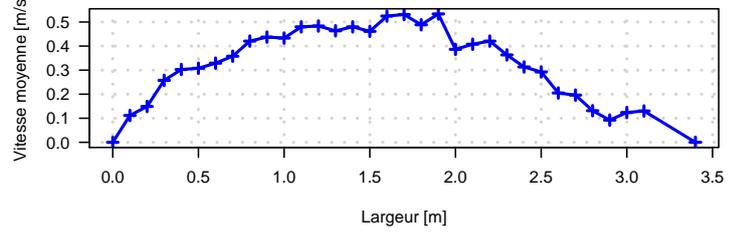
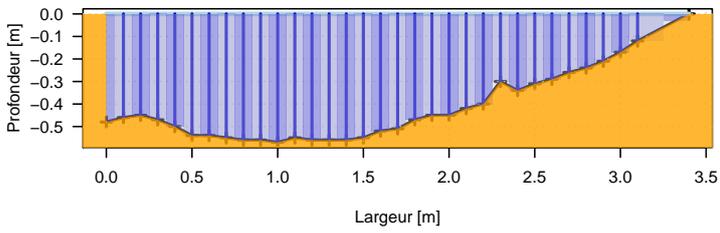
29 – Mangatarere @ McLen. (20041109)



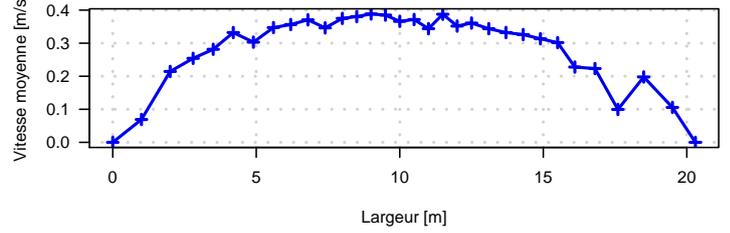
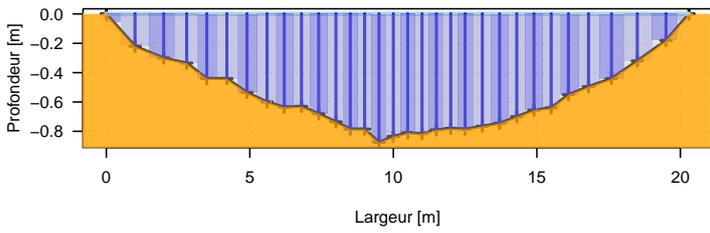
30 – Mangatarere @ Gorge (20040112)



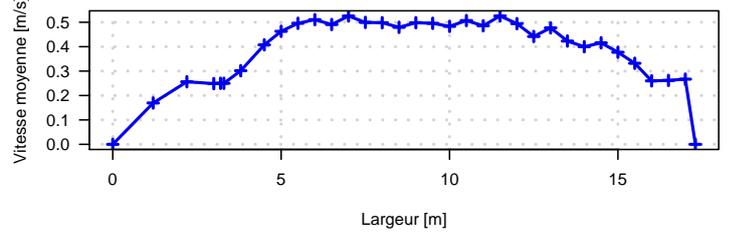
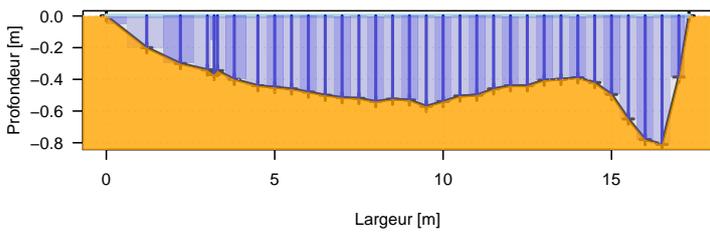
31 – Taratahi @ Wouters C. (19991210)



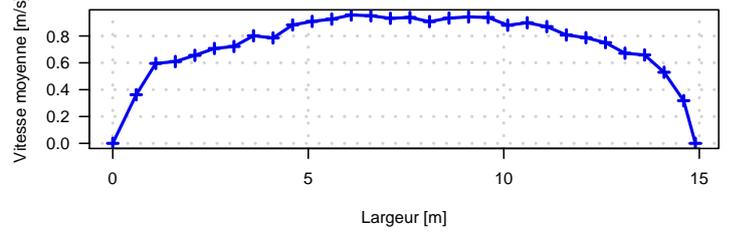
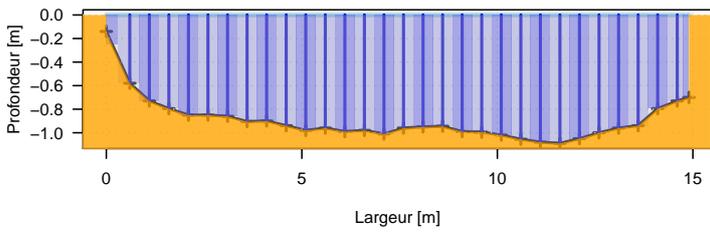
32 – Takaka @ Harwoods (20140213)



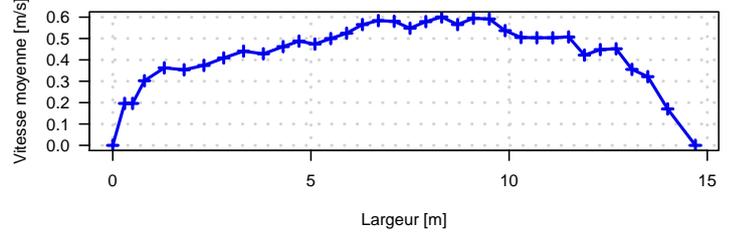
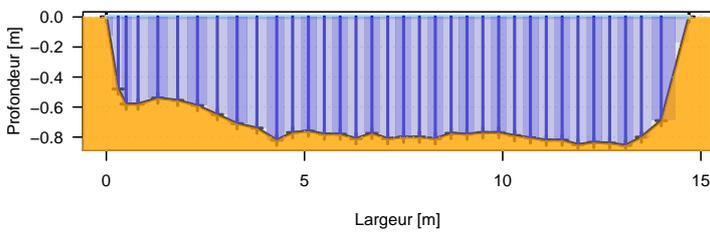
33 – Takaka @ Harwoods (20141209)



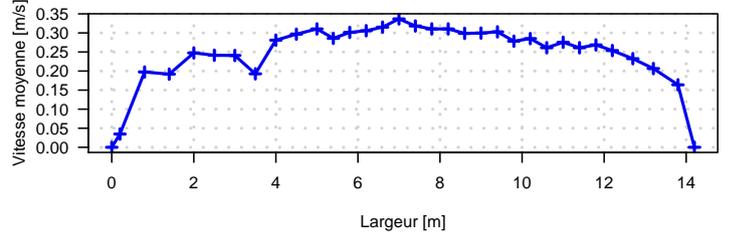
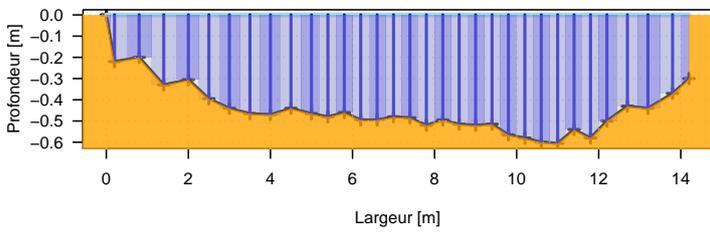
34 – Takaka @ Harwoods (20140414)



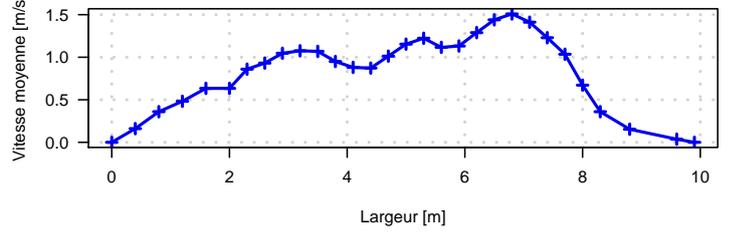
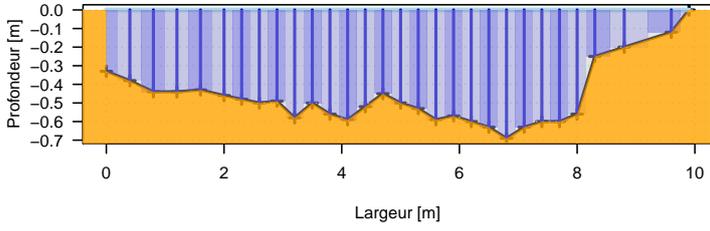
35 – Takaka @ Harwoods (20140508)



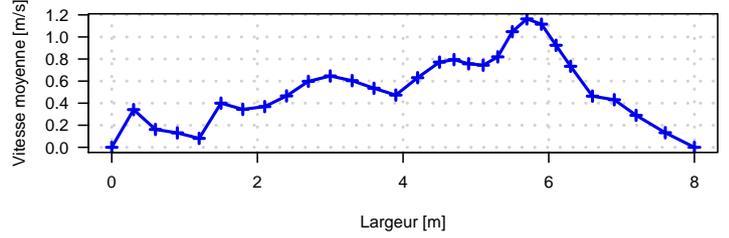
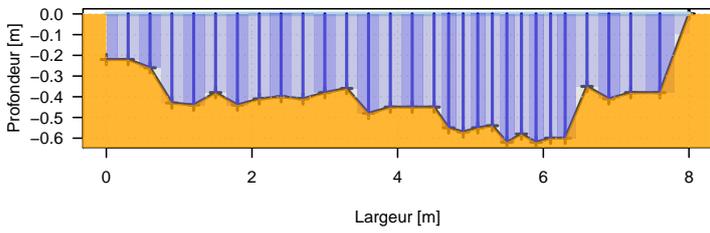
36 – Takaka @ Harwoods (20140910)



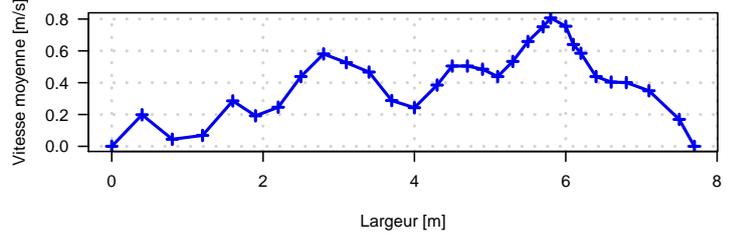
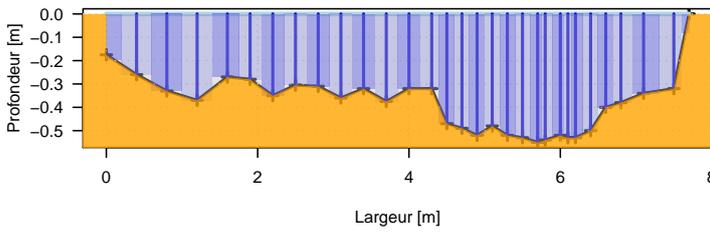
37 – Takaka @ Harwoods (20130613)



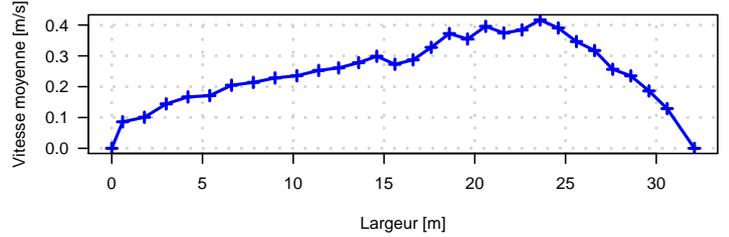
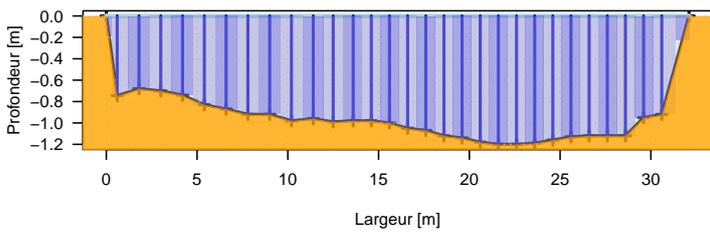
38 – Takaka @ Harwoods (20131024)



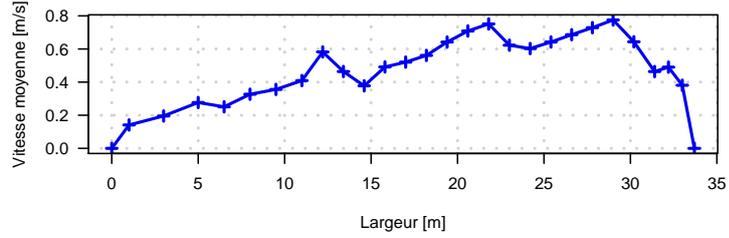
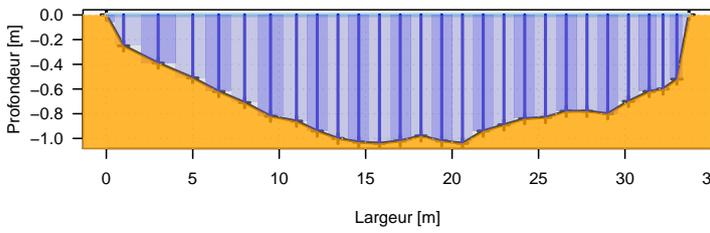
39 – Takaka @ Harwoods (20140113)



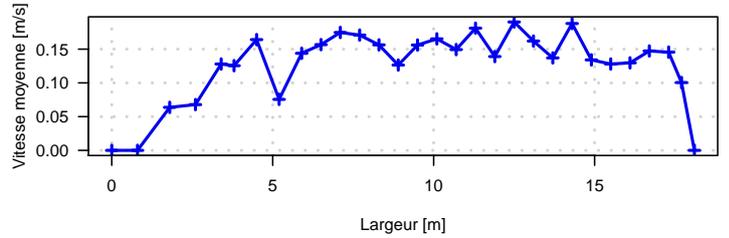
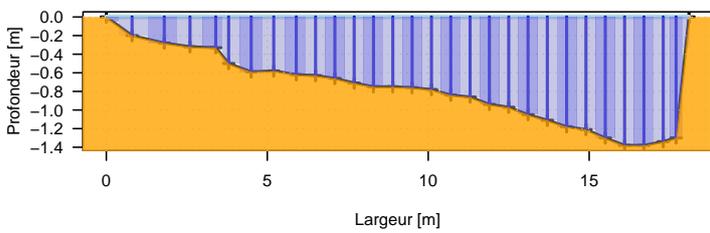
40 – Takaka @ Harwoods (20140115)



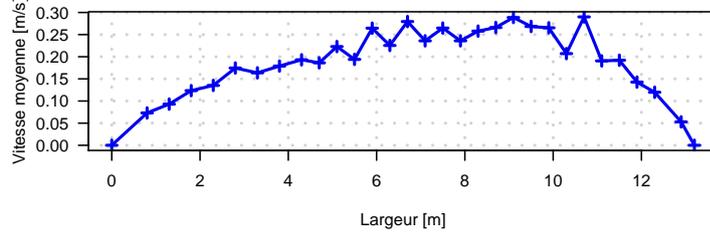
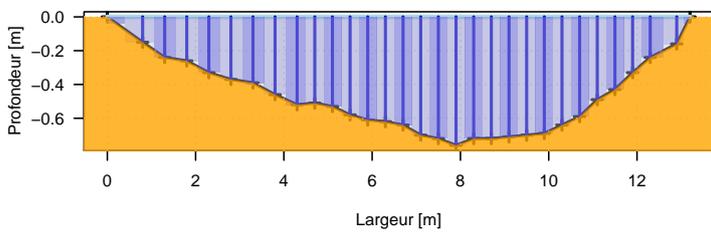
41 – Takaka @ Harwoods (20130317)



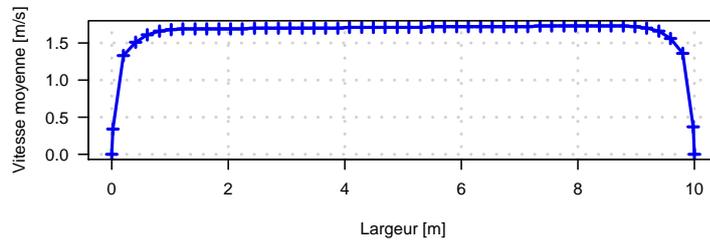
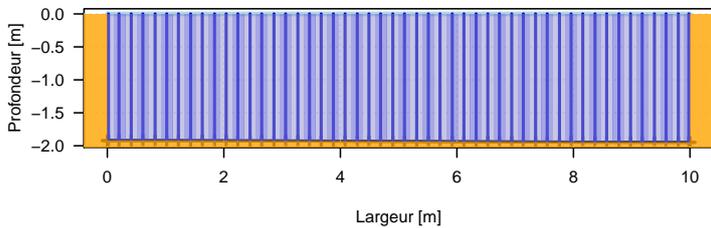
42 – Takaka @ Harwoods (20030305)



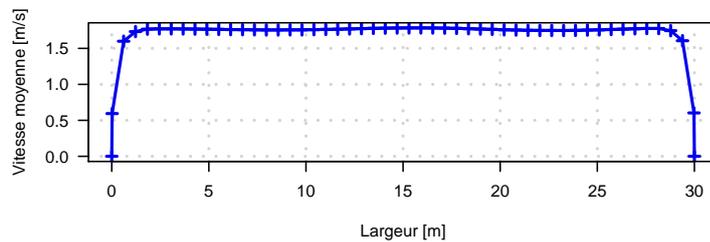
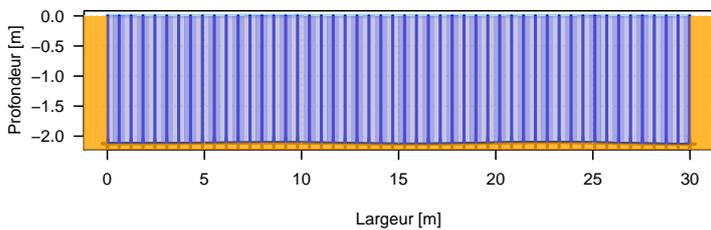
43 – Takaka @ Harwoods (20151211)



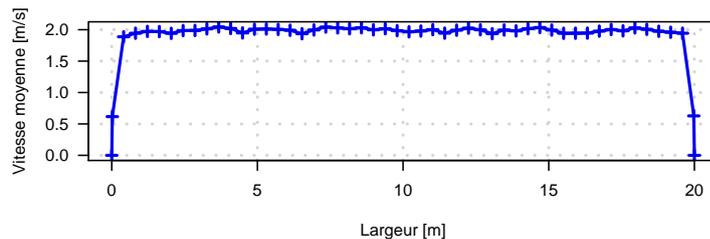
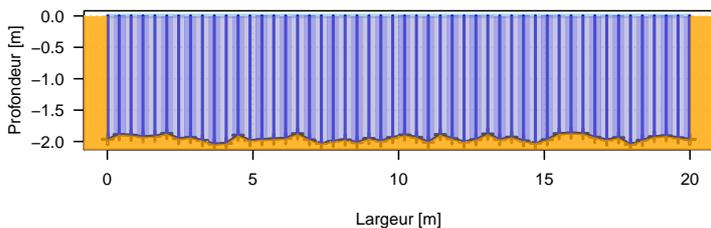
44 – Telemac @ Rectangle



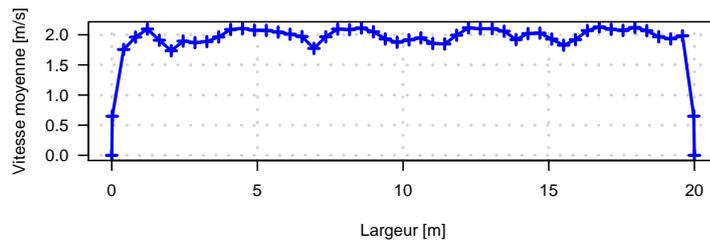
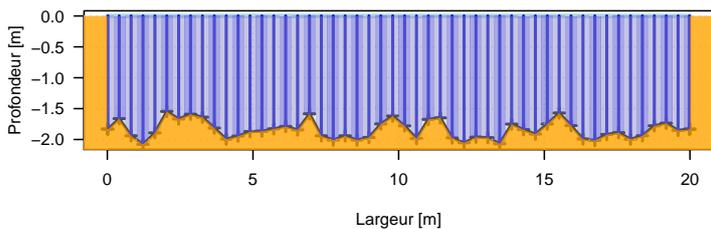
45 – Telemac @ Rectangle



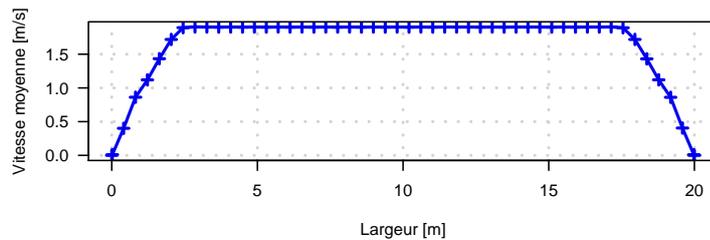
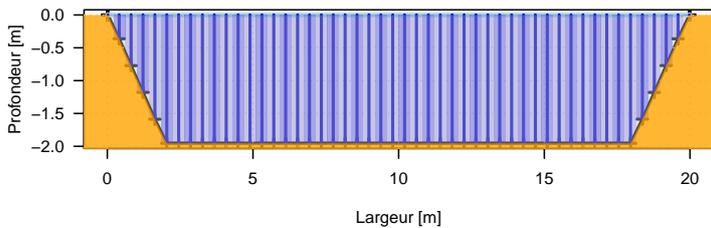
46 – Telemac @ Rectangle



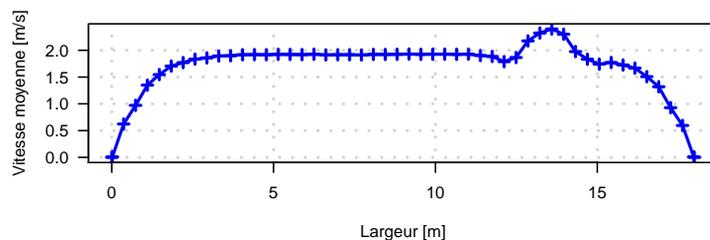
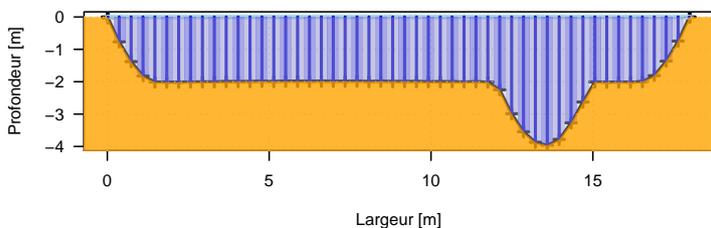
47 – Telemac @ Rectangle



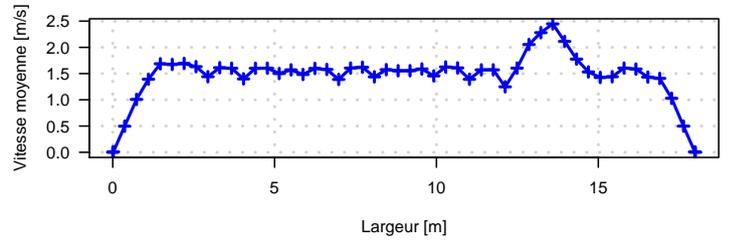
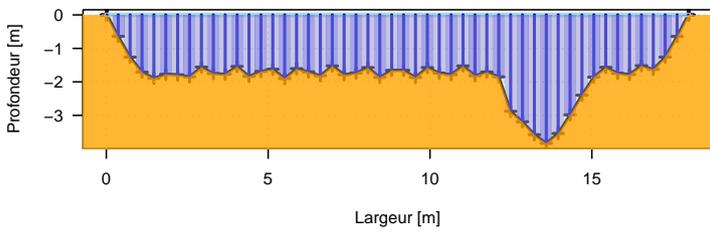
48 – Telemac @ Trapèze



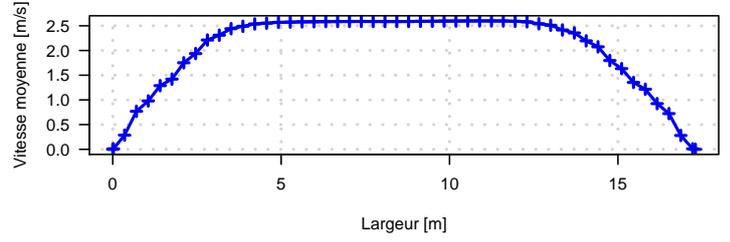
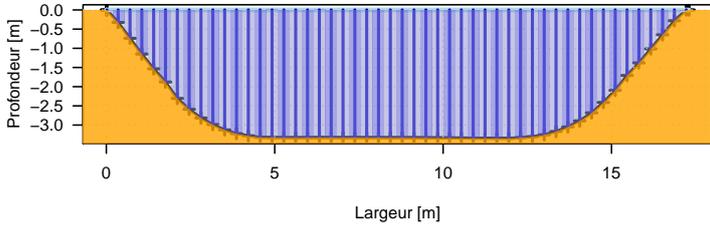
49 – Telemac @ Asymétrique



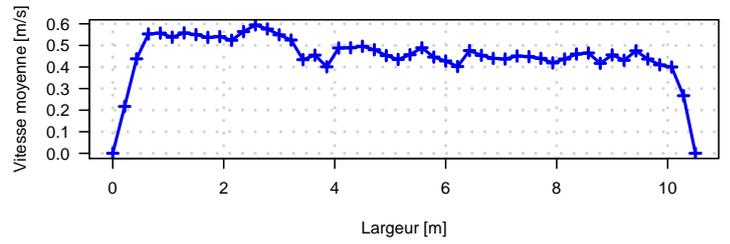
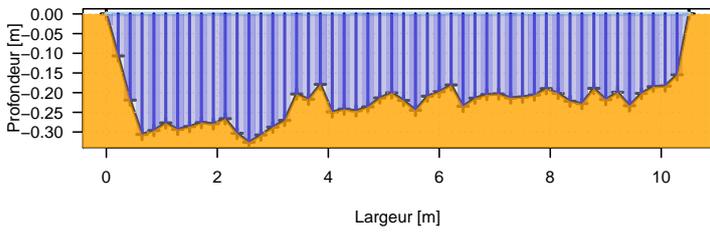
50 – Telemac @ Asymétrique



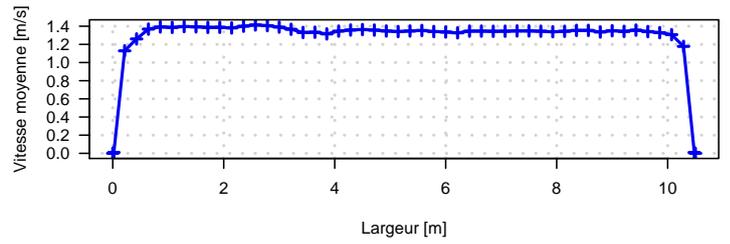
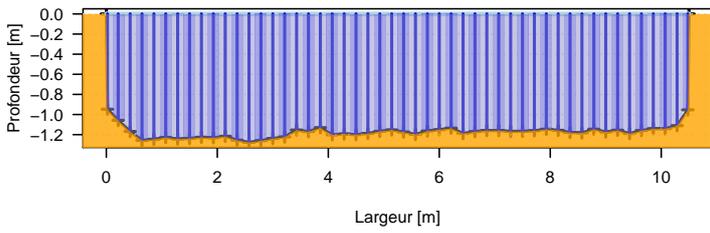
51 – Telemac @ Idem jaugeage 4



52 – Telemac @ Idem jaugeage 17



53 – Telemac @ Idem jaugeage 17



Confrontation des différentes méthodes de dégradation

En lien avec les différentes préconisations relatives au choix des verticales, exposées dans la section 5.2, différentes approches de sous-échantillonnage ont été implémentées et testées. Celles-ci sont exposées brièvement en section C.1 puis comparées à la méthode retenue (exposée au chapitre 8) dans la thèse en section C.2.

C.1 Présentation des différentes méthodes de dégradation

C.1.1 Tirage aléatoire

La méthode de sous-échantillonnage aléatoire est la plus simple à mettre en œuvre. Elle consiste à sélectionner de manière aléatoire les verticales parmi les m verticales disponibles (fonction *sample* sous R).

C.1.2 Équi-répartition des verticales sur la largeur de la section

Cette méthode vise à affecter une probabilité de tirage d'une verticale d'autant plus forte qu'elle se trouve loin d'une rive et loin d'une verticale déjà piochée. La méthode de sous-échantillonnage repose sur un tirage pseudo-aléatoire basé sur une distribution de probabilité imposée. Le principe étant de répartir les verticales de manière homogène sur toute la largeur de la rivière.

On assimile les rives et les verticales déjà sélectionnées à des "obstacles". Pour chaque verticale on calcule les distances d_i^j séparant la verticale i des j obstacles. On retient ensuite la distance minimale $d_i^{min, j} = \min(d_i^j)$. La probabilité de tirage pour la sélection de la verticale $j + 1$ est ensuite calculée comme :

$$P_{i,j+1} = \frac{d_i^{min, j}}{\sum_{i=1}^{m-j} d_i^{min, j}} \quad (C.1)$$

La somme des probabilités ainsi définies est égale à 1.

Un exemple de tirage est illustré à la figure C.1.

Cette méthode reste assez simpliste, elle ne dépend pas du jaugeage et ne prend pas en compte les caractéristiques de la section de mesure (asymétrie de l'écoulement, oscillations du fond, ...).

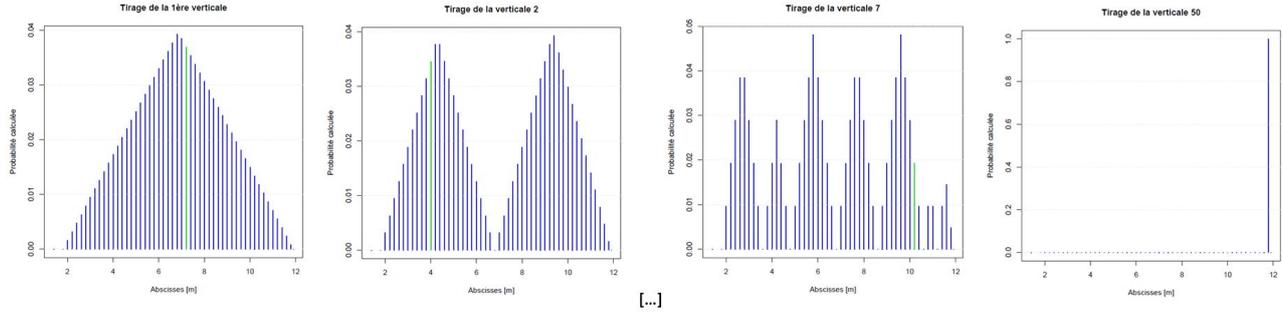


FIGURE C.1 – Illustration de la méthode de sous-échantillonnage selon une équi-répartition des verticales. Probabilité de tirage en fonction de l’abscisse des verticales pour la sélection de la première, deuxième, septième et dernière verticale ($j = 50$), respectivement de gauche à droite. Exemple pour le jaugeage de Villar Loubière (indice 17, comportant 50 verticales de mesure). Les verticales sélectionnées sont représentées en vert.

C.1.3 Selon les variations de la bathymétrie

Pour cette méthodes, la probabilité de tirage d’une verticale est d’autant plus forte que le gradient de la bathymétrie à son voisinage est fort. Cette méthode conduit à une sélection préférentielle des verticales dans les zones de fort gradient. La probabilité de tirage d’une verticale $i = 1, \dots, m - j$, où j désigne le nombre de verticales déjà sélectionnées, est calculée selon l’équation C.2.

$$P_i = \frac{\max\left(\frac{\Delta D_{i-1}}{\Delta x_{i-1}}, \frac{\Delta D_{i+1}}{\Delta x_{i+1}}\right)}{\sum_{i=1}^{m-j} \max\left(\frac{\Delta D_{i-1}}{\Delta x_{i-1}}, \frac{\Delta D_{i+1}}{\Delta x_{i+1}}\right)} \quad (\text{C.2})$$

où $\Delta D_{i-1} = |D_i - D_{i-1}|$, $\Delta D_{i+1} = |D_i - D_{i+1}|$, $\Delta x_{i-1} = |x_i - x_{i-1}|$ et $x_{i+1} = |x_i - x_{i+1}|$.

Cette méthode présente l’avantage de bien cerner les grandes variations du fond. Néanmoins, la convergence vers la valeur initiale du débit sera d’autant plus lente que le profil bathymétrique de la section de jaugeage est irrégulier. Cette méthode est inadaptée à la fois pour les jaugeages dont la forme géométrique est simple (canal type trapézoïdale avec un fond plat au centre de la section) et également pour les jaugeages dont le fond est très irrégulier. Cette méthode n’a pas été retenue.

C.1.4 Selon la distance et la bathymétrie

La probabilité de tirage d’une verticale est la combinaison de l’éloignement des verticales sélectionnées (section C.1.2) et du gradient local de la bathymétrie (section C.1.3). Cette méthode apporte un poids tout aussi important aux gradients de la bathymétrie qu’à l’équi-répartition des verticales sur la largeur. Ceci implique que si la bathymétrie est très irrégulière, les gradients de la bathymétrie auront toujours un poids très important alors qu’un hydromètre aurait d’abord cherché à bien répartir les verticales sur la largeur puis à bien cerner les ruptures de pente. Cette méthode n’a pas été retenue.

C.1.5 Selon le gradient des vitesses

La probabilité de tirage d'une verticale est d'autant plus forte que le gradient des vitesses est fort. Cette méthode est analogue à la méthode exposée à la section C.1.3. La probabilité de sélection d'une verticale étant calculée selon l'équation C.2 en remplaçant D par V . La convergence vers la valeur initiale du débit sera d'autant plus lente que le profil des vitesses de la section de jaugeage est irrégulier (même inconvénient qu'avec la bathymétrie). Le profil des vitesses est cependant plus lissé. Les zones prioritairement explorées seront celles où le gradient est fort donc pas nécessairement au centre de la section mais plutôt à proximité des berges. Cette méthode n'a pas été retenue.

C.1.6 Débits partiels homogènes

La méthode proposée se rapproche de celle présentée à la section C.1.2 en se basant uniquement sur les débits partiels. Elle consiste à équi-répartir les verticales de manière à obtenir des sous-sections de débit identique Q_i . La grandeur utilisée est le profil unitaire q .

Cette méthode correspond au calcul de la probabilité notée P_1 (traduisant une condition d'espacement des verticales) de la méthode retenue dans l'étude de sous-échantillonnage présentée à la section 8.2.2. Pour rappel, la probabilité de tirage d'une verticale sera maximisée lorsque les débits partiels ($Q_{j,k,i,\text{gauche}}$ et $Q_{j,k,i,\text{droite}}$) entre la verticale i et les verticales déjà sélectionnées les plus proches sont du même ordre. La probabilité de tirage $P_{1,j,k,i}$ se calcule comme suit :

$$P_{1,j,k,i} = \frac{\min(Q_{j,k,i,\text{gauche}}, Q_{j,k,i,\text{droite}})}{\sum_{i=1}^{m-j} \min(Q_{j,k,i,\text{gauche}}, Q_{j,k,i,\text{droite}})} \quad (\text{C.3})$$

$Q_{j,k,i,\text{gauche}}$ ($Q_{j,k,i,\text{droite}}$ respectivement) désigne l'intégration latérale des q entre la verticale i et la verticale la plus proche sur sa gauche (sur sa droite respectivement) comme illustré sur les figures 8.5a et 8.5c). L'indice j est le nombre de verticales déjà sélectionnées.

La somme des probabilités ainsi définies est égale à 1. Dans ce cas, les verticales proches des berges sont sélectionnées tardivement

C.1.7 Aires des sous-sections homogènes

On peut procéder à un raisonnement analogue, en remplaçant ci-dessus les q par la profondeur D . L'intégration des profondeurs donnant une aire, l'équation C.3 devient :

$$P_{1,j,k,i} = \frac{\min(A_{j,k,i,\text{gauche}}, A_{j,k,i,\text{droite}})}{\sum_{i=1}^{m-j} \min(A_{j,k,i,\text{gauche}}, A_{j,k,i,\text{droite}})} \quad (\text{C.4})$$

où $A_{j,k,i,\text{gauche}}$ et $A_{j,k,i,\text{droite}}$ désignent respectivement l'intégration latérale des profondeurs D entre la verticale i et la verticale la plus proche sur sa gauche et sur sa droite.

C.2 Confrontation des méthodes de sous-échantillonnage

Le jaugeage du Buech à Serres (jaugeage numéro 13 dans la base des jaugeages de référence) est utilisé pour illustrer la comparaison entre différentes méthodes de sous-échantillonnage. Les méthodes appliquées sont les suivantes :

- Tirage aléatoire,
- Selon la distance (équi-répartition sur la largeur de la section),
- Selon des débits partiels homogènes,
- Selon les q (méthode retenue pour l'étude).

La distribution cumulée des erreurs relatives (estimées selon l'équation 9.1) sur l'ensemble des jaugeages comportant 10 verticales (soit 1000 jaugeages pour chaque méthode) est représentée à la figure C.2, pour les quatre méthodes testées. Elles sont mises en relation avec la distribution des erreurs estimée à partir des valeurs de la norme ISO 748 (tableau 6.1). Pour 10 verticales, les erreurs relatives suivent une loi normale de moyenne nulle et d'écart-type 4,5%.

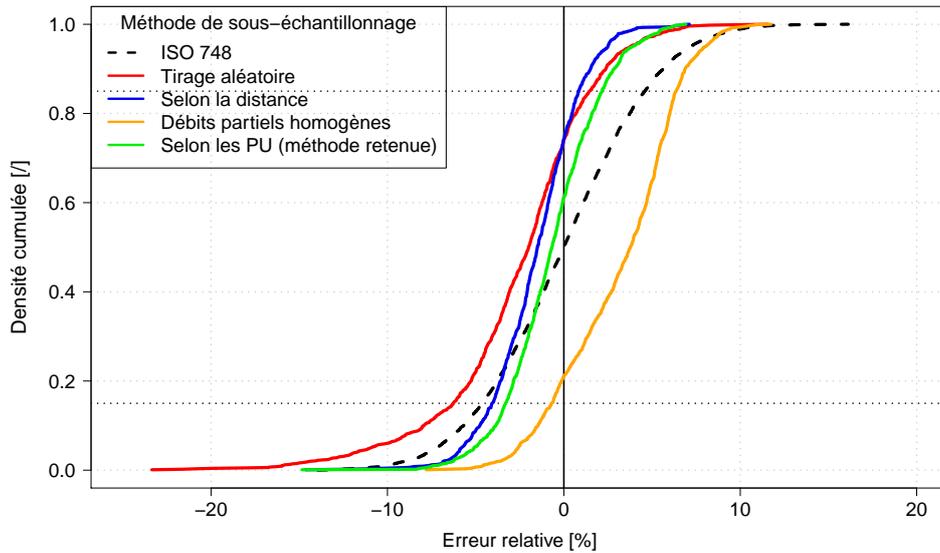


FIGURE C.2 – Distribution cumulée des erreurs relatives calculées sur les jaugeages sous-échantillonnés, possédant 15 verticales, issus du jaugeage de référence de Serres (indice 13) selon différentes méthodes (courbes colorées). La distribution des erreurs selon les valeurs proposées par la norme ISO 748 est représentée par une courbe en tirets.

On constate qu'un sous-échantillonnage par une méthode aléatoire conduit aux erreurs relatives les plus dispersées. La méthode selon des débits partiels homogènes donne des erreurs relatives positives. Cette méthode conduit donc à la génération de jaugeages surestimant le débit. Cela s'explique par le fait que les verticales situées proches des berges sont tardivement sélectionnées puisque leur contribution au débit finale est faible. L'information apportée par ces verticales est perdue. Le même constat a été observé pour la méthode selon des aires de sous-sections homogènes.

La distribution des erreurs pour la méthode de sous-échantillonnage selon la distance (section C.1.2) et celle selon les q sont similaires. On observe toutefois que la méthode selon la distance (équi-répartition latérale des verticales sur la largeur) conduit à une plus forte sous-estimation du débit. Cette méthode ne considère en effet pas l'information apportée par les ruptures de pente dans le profil latéral des q , conduisant à des valeurs de débit plus biaisées.

Pour un jaugeage plus asymétrique et irrégulier, tel que le jaugeage de la Séveraisse à Villar Loubière (jaugeage 17), la distribution des erreurs selon ces deux méthodes est plus différenciée, la comparaison des distributions des erreurs relatives selon les quatre méthodes étant tracée à

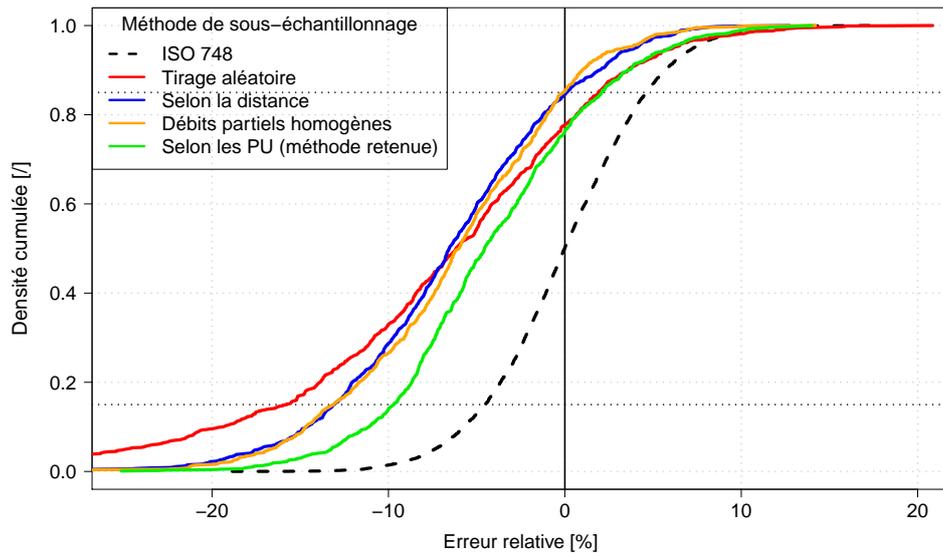


FIGURE C.3 – *Distribution cumulée des erreurs relatives calculées sur les jaugeages sous-échantillonnés, possédant 10 verticales, issus du jaugeage de référence de Villar Loubière (indice 17) selon différentes méthodes (courbes colorées). La distribution des erreurs selon les valeurs proposées par la norme ISO 748 est représentée par une courbe en tirets.*

la figure C.3. Cette figure illustre que la méthode selon les q produit les jaugeages les moins biaisés.

A titre d'illustration, les distributions cumulées obtenues à partir des jaugeages sous-échantillonnés possédant 15 verticales issus du jaugeage de référence de Villar Loubière (indice 17) sont représentées à la figure C.4. Par comparaison avec la figure C.3, on observe bien des erreurs moins dispersées puisque le nombre de verticales a augmenté.

La méthode qui produit des jaugeages peu biaisés et les moins dispersés est celle portant sur les q , décrite au chapitre 8. Elle est retenue pour l'étude du terme u'_m .

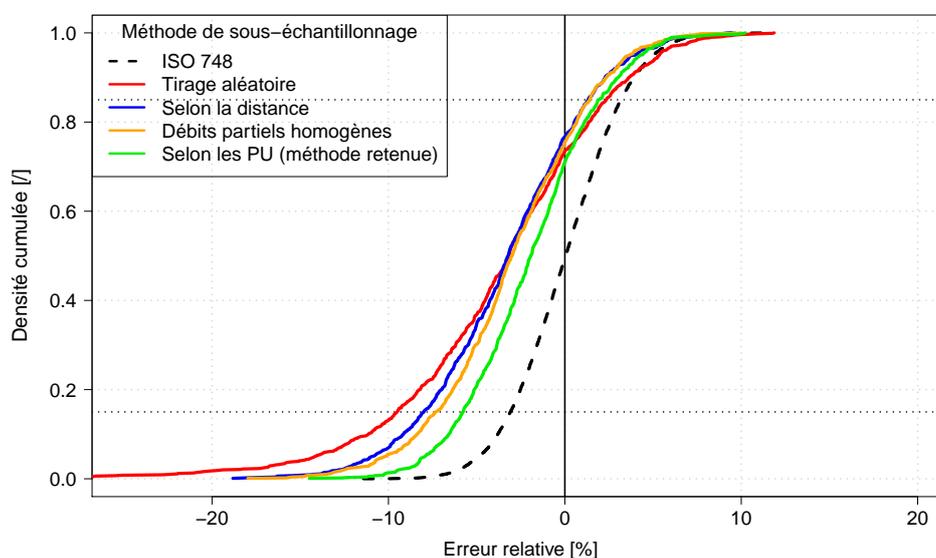


FIGURE C.4 – Distribution cumulée des erreurs relatives calculées sur les jaugeages sous-échantillonnés, possédant 15 verticales, issus du jaugeage de référence de Villar Loubière (indice 17) selon différentes méthodes (courbes colorées). La distribution des erreurs selon les valeurs proposées par la norme ISO 748 est représentée par une courbe en tirets.



Articles publiés

Un article portant sur la quantification du terme u'_m a été publié dans *Journal of Hydrology*. Les différences suivantes sont à remarquer :

- Le nombre de jaugeages de référence est de 18 (contre 53 dans la manuscrit),
- Le nombre de jaugeages de la base EDF-DTGest de 3185 (contre 3930).

Ces différences s'expliquent par l'enrichissement des deux bases de données après la publication de l'article.

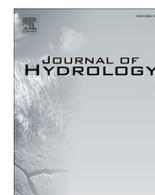
Un article pour la conférence *River Flow* qui a lieu en juillet 2016 à Saint-Louis (USA), portant sur la confrontation des méthodes analytiques à l'approche interlaboratoire est joint à la suite du premier article.



ELSEVIER

Contents lists available at ScienceDirect

Journal of Hydrology

journal homepage: www.elsevier.com/locate/jhydrol

Considering sampling strategy and cross-section complexity for estimating the uncertainty of discharge measurements using the velocity-area method



Aurélien Despax^{a,b,*}, Christian Perret^a, Rémy Garçon^a, Alexandre Hauet^a, Arnaud Belleville^a, Jérôme Le Coz^c, Anne-Catherine Favre^b

^a EDF-DTG, 21 Avenue de l'Europe, BP 41, F-38040 Grenoble, France

^b Univ. Grenoble Alpes, LTHE, F-38000 Grenoble, France

^c Irstea, UR HHLY, Hydrology-Hydraulics, 5 rue de la Doua, F-69626 Villeurbanne, France

ARTICLE INFO

Article history:

Received 23 July 2015

Received in revised form 25 November 2015

Accepted 28 November 2015

Available online 12 December 2015

This manuscript was handled by Konstantine P. Georgakakos, Editor-in-Chief, with the assistance of Ioannis K. Tsanis, Associate Editor

Keywords:

Discharge measurement

Uncertainty

Stream-gauging

Velocity-area method

Hydrometric data

River cross-section

SUMMARY

Streamflow time series provide baseline data for many hydrological investigations. Errors in the data mainly occur through uncertainty in gauging (measurement uncertainty) and uncertainty in the determination of the stage-discharge relationship based on gaugings (rating curve uncertainty). As the velocity-area method is the measurement technique typically used for gaugings, it is fundamental to estimate its level of uncertainty. Different methods are available in the literature (*ISO 748*, *Q+*, *IVE*), all with their own limitations and drawbacks. Among the terms forming the combined relative uncertainty in measured discharge, the uncertainty component relating to the limited number of verticals often includes a large part of the relative uncertainty. It should therefore be estimated carefully. In *ISO 748* standard, proposed values of this uncertainty component only depend on the number of verticals without considering their distribution with respect to the depth and velocity cross-sectional profiles. The *Q+* method is sensitive to a user-defined parameter while it is questionable whether the *IVE* method is applicable to stream-gaugings performed with a limited number of verticals. To address the limitations of existing methods, this paper presents a new methodology, called *Flow Analog Uncertainty Estimation (FLAURE)*, to estimate the uncertainty component relating to the limited number of verticals. High-resolution reference gaugings (with 31 and more verticals) are used to assess the uncertainty component through a statistical analysis. Instead of subsampling purely randomly the verticals of these reference stream-gaugings, a subsampling method is developed in a way that mimics the behavior of a hydrometric technician. A sampling quality index (*SQI*) is suggested and appears to be a more explanatory variable than the number of verticals. This index takes into account the spacing between verticals and the variation of unit flow between two verticals. To compute the uncertainty component for any routine gauging, the four most similar gaugings among the reference stream-gaugings dataset are selected using an analog approach, where analogy includes both riverbed shape and flow distribution complexity. This new method was applied to 3185 stream-gaugings with various flow conditions and compared with the other methods (*ISO 748*, *IVE*, *Q+* with a simple automated parametrization). Results show that *FLAURE* is overall consistent with the *Q+* method but not with *ISO 748* and *IVE* methods, which produce clearly overestimated uncertainties for discharge measurements with less than 15 verticals. The *FLAURE* approach therefore appears to be a consistent method. An advantage is the explicit link made between the estimation of cross-sectional interpolation errors and the study of high-resolution reference gaugings.

© 2015 Elsevier B.V. All rights reserved.

1. Introduction

Hydrometric data are essential for many hydrological issues such as calibration of hydrological models, flood forecasting and warning (using hydrological modeling), engineering design (of dam or dyke for example) and policy decisions related to water

* Corresponding author at: EDF-DTG, 21 Avenue de l'Europe, BP 41, F-38040 Grenoble, France. Tel.: +33 686 639 831.

E-mail address: aurelien.despax@ujf-grenoble.fr (A. Despax).

resource management. For day-to-day power production operations including safety issues and water resource management, the *Division Technique Générale* (DTG) of *Électricité de France* (EDF) operates a hydrometric network. It includes about 300 hydrometric stations mainly spread on the mountainous regions of France (Alps, Pyrénées and Massif Central).

With such important issues, data quality must be ensured and at least evaluated. Some authors have investigated the sources of errors in discharge river measurement (McMillan et al., 2012) but, to date, uncertainty estimation is rarely associated with streamflow data.

Commonly, the streamflow records are based on continuous water level measurements converted by a stage-discharge relationship (called rating curve). Stream-gaugings at many different levels of flow are needed to plot a rating curve and to check the stability of the channel controls. For instance, in case of erosion or deposition processes, the channel of the stream may induce a change and a new rating curve has to be developed.

Stream-gaugings have several functions such as the regulatory supervision (e.g. controlling minimum instream flow), the construction of the stage-discharge relationship and the rating curve validation (in case of geometric instability of the channel).

To meet all these functions, stream discharge measurements are not complete if the associated uncertainty is not provided. Uncertainties in stream-gaugings should then be propagated for estimating the uncertainty associated with stage discharge relationships (Petersen-Øverleir and Reitan, 2009; McMillan et al., 2010; Morlot et al., 2014; Le Coz et al., 2014). In hydrometry a confidence level of 95% for uncertainty intervals is typically used (assuming a normal distribution for uncertainty) (see the Hydrometric Uncertainty Guidance: ISO, 2007b). The main difficulty in estimating uncertainty lies in the lack of streamflow reference data and in the natural time and space variability of river flows and beds.

The two main gauging techniques are the exploration of the velocity field by Doppler profilers (ADCP) or by the velocity-area method using current-meters (WMO, 2010) and the tracer dilution (not discussed in the paper). The river discharge, Q , is estimated by integrating the normal flow velocities, v , and depths through the area A of a cross-section (Herschky, 1993) according to Eq. (1) as follows:

$$Q = \int_A v dA \quad (1)$$

Incomplete methods such as surface velocity measurement using hand-held Surface Velocity Radar (SVR) (Corato et al., 2011), Large-Scale Particle Image Velocimetry (LSPIV) (Hauet et al., 2008) or floats can also be applied to measure river discharge during floods. In such cases the field velocity is only explored in a partial way.

Although the ADCP technique is expanding rapidly, a significant proportion of the discharge measurements are still performed using the velocity-area method with a current-meter (in 2013, about 30% of EDF-DTG measurements).

The velocity field is sampled using a number m of verticals distributed across the river, where the vertical velocity profile is sampled by a current-meter at n_i different depths.

Velocity measurements are performed with mechanical, electromagnetic or acoustic Doppler current-meters. The mid-section method is often used by hydrological services to compute discharge Q as:

$$Q = \sum_{i=1}^m Q_i = Q_0 + Q_{m+1} + \sum_{i=1}^m B_i D_i V_i, \quad (2)$$

where Q_i , B_i and D_i denote the discharges, widths and depths of each subsection (or panel) i respectively. V_i are the mean normal-to-section velocities computed by integrating the vertical velocity profile. Q_0 and Q_{m+1} correspond to partial discharges near each bank where the subsection velocity is determined by extrapolation. The alternative mean-section approach is not discussed in this study, since it does not produce significant differences in discharge computations.

There are a lot of sources of uncertainties in gaugings (e.g. Carter and Anderson, 1963; Pelletier, 1988; Sauer and Meyer, 1992) but the uncertainty of the velocity-area method heavily depends on the strategy of point measurement sampling and especially on the number m and positions of verticals used to best describe the cross-section complexity.

Most of the computed uncertainty usually stems from the term u_m , due to the limited number of verticals (Le Coz et al., 2012). It must therefore be correctly computed. To address the limitations of existing uncertainty estimation methods (see Section 2), this paper presents a new methodology, called FLOW Analog Uncertainty Estimation (FLAURE), to estimate the u_m uncertainty component. A set of high-resolution gaugings (presented in Section 3.1) is subsampled (Section 3.2). Realistic stream-gaugings with any given number of verticals are produced (Section 3.2) and lead to a new estimation of u_m component depending on a sampling quality index (Section 3.4). In order to take into account cross-sectional complexity, the u_m component is estimated with the four most similar stream-gaugings selected among reference measurements (Section 3.5). To evaluate the new uncertainty methodology (FLAURE) and compare it with ISO 748, Q_+ and IVE methods, uncertainties are computed using a set of 3185 routine stream-gaugings (see Section 4.2). A focus on three test cases is also presented in Section 4.3. Section 5 summarizes the conclusions and perspectives of this work.

2. Overview of uncertainty estimation methods

2.1. General guidelines for sampling the cross-section

It is hard to establish universal rules concerning the spacing between verticals and between points along each vertical. In France, these choices are left to the hydrometric technician considering his expertise and regarding bed geometry and flow distribution. During flood conditions it is advisable to reduce the number of point measurements due to potential flow variations and particularly for safety reasons. In all possible measuring situations these choices should lead to the most accurate and the most cost-efficient representation of reality. Some hydrometric technicians recommend that verticals should be regularly spaced but their positions should preferably depend on the transverse variation in bed geometry and flow distribution. Their positions should minimize the partial discharge, which means that more verticals must be placed where flow is higher (recommends that each Q_i should not exceed 10% of the total discharge ISO, 2009). The more the space between verticals is, the more the relative importance of a vertical in total flow is increased.

It is also judicious to place verticals as close as possible to the edges in order to minimize extrapolation and riverbank coefficients effects.

Various requirements can be found in ISO 748 standard (ISO, 2009) or other guidelines (e.g. Herschky, 1993; Forray et al., 1998; WMO, 2010). These general rules are applied in internal operating procedures by EDF-DTG hydrometric service.

It is very important to notice here that all these requirements must be followed. The estimation of uncertainty does not take into

account error detection during measurement process. It is also assumed that all calibration corrections have been applied.

2.2. ISO 748 standard

To date, the method presented in the ISO 748 standard, which follows the Guide to the expression of Uncertainty in Measurement (GUM) (JCGM, 2008), is the framework for estimating uncertainty in velocity-area discharge measurements. Several assumptions are necessary for the implementation of these standards. For instance, it is assumed that the measurement errors follow a Gaussian (or at least unimodal) distribution.

The equation for the combined relative uncertainty in measured discharge $u(Q)$, at 68% level of confidence, proposed by the ISO 748 standard (ISO, 2009) is expressed as:

$$u^2(Q) = u_s^2 + u_m^2 + \frac{\sum_{i=1}^m Q_i^2 \left[u^2(B_i) + u^2(D_i) + u_p^2(V_i) + \frac{1}{n_i} \{ u_c^2(V_i) + u_e^2(V_i) \} \right]}{\left(\sum_{i=1}^m Q_i \right)^2} \quad (3)$$

The final expanded uncertainty U is the combined relative uncertainty multiplied by a coverage factor $k = 2$ to give the estimate for a 95% confidence interval as recommended by the Hydro-metric Uncertainty Guidance (ISO, 2007b). Thereafter U refers to the final expanded uncertainty while uncertainty components $u(X)$ indicate relative standard uncertainties (in % of measurand X) at 68% confidence level.

Uncertainty components $u(X)$ arise from several error sources due to:

- u_s : residual systematic error after calibration of velocity, width and depth measuring devices,
- u_m : limited number m of verticals (transverse integration of unit flow q_i),
- $u(B_i)$ and $u(D_i)$: random errors in width and depth measurements, respectively,
- $u_p(V_i)$: limited number n_i of point velocity measurements over vertical i ,
- $u_c(V_i)$: current-meter random errors,
- $u_e(V_i)$: limited time of exposure for averaging turbulent velocity fluctuations.

The u_m term accounts for on average 84% of the final expanded uncertainties computed on the EDF-DTG database. That is why particular attention should be paid to quantify this term. The major drawback of ISO 748 method is the estimation of the uncertainty component u_m related to the limited number m of verticals. This component is determined by a table shown in Appendix E of ISO 748 standard (ISO, 2009) and depends only on the number m of verticals. Their spatial distribution, the complexity of the riverbed shape and flow distribution are not taken into account. These empirical values are based on non-traceable experiments while most of the computed uncertainty stems from this component.

2.3. Q_+ method

The other limitations of ISO 748 method are well described by Le Coz et al. (2012, in press-b) who developed an alternative methodology (named Q_+ method) for computing the relative standard uncertainty terms $u_p(V_i)$ and u_m . The equation issued from the Q_+ method is expressed as:

$$u^2(Q) = u_s^2 + \frac{\sum_{i=0}^{m+1} Q_i^2 \left\{ u^2(B_i) + u^2(D_i) + u_p^2(V_i) + u_m^2(D_i) + u_m^2(V_i) + \frac{u_{ce}^2(V_i)}{n_i} \right\}}{\left(\sum_{i=1}^m Q_i \right)^2} \quad (4)$$

The $u_p(V_i)$ term, linked to the vertical integration of velocities, takes into account spacing between velocity points and discharge extrapolations in the top and bottom layers. Le Coz et al. (2012, in press-b) suggested dividing u_m into uncertainties due to transverse integration of depths $u_m(D_i)$ and averaged velocities $u_m(V_i)$ while including discharge extrapolations to the edges. To compute these terms, the authors defined an angle α as the maximum transverse slope in order to quantify riverbed irregularity. This method improves ISO 748 method but is limited by the difficulty of choosing the value of α which has a large influence on the final uncertainty. A specific value of α should be used for each single gauging but this value is difficult to choose in practice. Instead of setting an arbitrary value of α , for the study shown in this paper we compute this value for each stream-gauging as follows:

$$\alpha = \frac{\sum_{i=1}^m Q_i |\alpha_i|}{Q} \quad (5)$$

where α_i is the mean slope (expressed in degrees) of each subsection:

$$\alpha_i = \frac{180}{2\pi} \left\{ \arctan \left| \frac{H_i - H_{i-1}}{x_i - x_{i-1}} \right| + \arctan \left| \frac{H_i - H_{i+1}}{x_i - x_{i+1}} \right| \right\} \quad (6)$$

where H_i and x_i denote the elevation and the position of each vertical i , respectively.

2.4. Interpolation Variance Estimator (IVE) method

Another approach called Interpolated Variance Estimator (IVE) was developed and investigated by Kiang et al. (2009) and Cohn et al. (2013). The combined relative uncertainty is expressed as:

$$u^2(Q) = u_s^2 + \frac{\sum_{i=1}^m Q_i^2 \left\{ u^2(B_i) + u_{IVE}^2(D_i) + u_{IVE}^2(V_i) \right\}}{\left(\sum_{i=1}^m Q_i \right)^2} \quad (7)$$

where

$$u_{IVE}(D_i) = \frac{\sqrt{\frac{1}{m-5} \sum_{i=3}^{m-2} \frac{\Delta_{i,D}^2}{2(1-\omega_i+\omega_i^2)}}}{\frac{1}{m-4} \sum_{i=3}^{m-2} D_i} \quad (8)$$

$$\Delta_{i,D} = D_i - D_{i,est} \quad (9)$$

$$D_{i,est} = \omega_i D_{i-1} + (1 - \omega_i) D_{i+1} \quad (10)$$

$$\omega_i = \frac{x_{i+1} - x_i}{x_{i+1} - x_{i-1}} \quad (11)$$

Eq. (8) is based on statistical considerations. Larger departures from linearity in the measured profiles, expressed by Eq. (9), reflect larger uncertainties. The IVE method estimates separately the deviation of depth and velocity measurements from the linear interpolation of adjacent measurements according to Eq. (10). For $u_{IVE}(V_i)$ term, the same calculation is made by replacing D_i with V_i in Eq. (8)–(10). However, it is unclear how departure from linearity can capture all the sources of error on depth or velocity ($u_p(V_i)$, $u_c(V_i)$ and $u_e(V_i)$ for instance). Moreover, this assumption may be false when few verticals are made.

According to Eq. (7), the components of uncertainty $u_p(V_i)$, $u_c(V_i)$, $u_e(V_i)$ and $u(D_i)$ are supposed to be included in $u_{IVE}(V_i)$ and $u_{IVE}(D_i)$. Consequently the IVE method does not allow the computation of the contribution of each error source and does not provide insight into strategies that might be applied to reduce the final uncertainty. Furthermore, errors due to extrapolation are not taken into account since the index varies between $i = 3$ and $i = m - 2$.

2.5. Towards a new approach

The ISO 748, Q_+ and IVE methods presented above must be improved due to their limitations. They are not able to evaluate both the sampling strategy and the complexity of the cross-section. Therefore, we propose a new methodology to objectively estimate u_m , on the basis of the sampling strategy, the riverbed shape and the flow distribution complexity altogether.

3. Methodology: Flow Analog Uncertainty Estimation (FLAURE)

The developed method, called FLOW Analog Uncertainty Estimation (FLAURE), proposes a new methodology to estimate the u_m term which is the dominant term in the combined uncertainty. Other uncertainty components in Q_+ method are considered satisfying.

The Buech stream-gauging at Serres hydrometric station is used here as an example.

The method presented below is based on 18 high-resolution stream-gaugings (named reference stream-gaugings) specifically performed for this study (Section 3.1). It proceeds as follows:

1. The high-resolution measurements are subsampled by reducing the number of verticals to produce a sample of realistic stream-gaugings (Section 3.2).
2. For each reference stream-gauging, the u_m component is estimated through the comparison between subsampled gaugings and the initial reference gauging (Section 3.3).
3. A sampling quality index is introduced and computed for each subsampled gauging (Section 3.4).
These three steps lead to curves of u_m component as a function of the sampling quality index, for each reference stream-gauging. The position of each curve depends on the complexity of the stream-gauging cross-section and flow. The following step allows the computation of the u_m component of any routine stream-gauging.
4. The u_m component of any routine stream-gauging is based on uncertainty estimates provided by the four most similar stream-gaugings, named analogs, selected among the reference stream-gaugings (Section 3.5). Finally, the u_m term of any routine gauging is computed as a weighted sum including the four analogs and depends on the sampling quality index.

3.1. Reference stream-gaugings dataset

A set of 18 high-resolution gaugings (each based on a number of verticals between 31 and 83) with various site and flow conditions is used as reference gaugings. Characteristics of these gaugings are summarized in Table 1. We call these measurements “reference stream-gaugings” and assume that they encompass all possible cases such as rectangular man-made channel, small complex stream or wide river. 11 stream-gaugings were operated using 31–53 verticals. This type of measurement is very time-consuming so additional reference gaugings were derived from acoustic Doppler current profiler measurements.

Measurements were operated as follows:

- 11 stream-gaugings applying velocity-area method with mechanical and electromagnetic current-meters on a wading rod. At least 3 points by vertical and more than 30 verticals were used. Time of exposure for velocity-point measurement was set to 30 s.
- 7 stream-gaugings using acoustic Doppler current profiler (ADCP) converted into equivalent stream-gaugings made with a current-meter. To get one equivalent stream-gauging, several

successive transects (at least 6) measuring the same cross-section with an ADCP are used. Velocities are projected and averaged on a grid representing every point measurement. At each point, a velocity-point measurement is computed only if more than 30 ADCP velocity measurements are observed at the vicinity of each point of the grid. The average corresponds to an exposure time of 30 s, which is typical of our current-meter stream-gaugings.

We verified that no significant flow variation was observed during all those measurements.

3.2. Subsampling method

As previously stated, the major limitation of ISO 748 method lies in the estimation of the uncertainty component u_m . The ISO 1088 standard (ISO, 2007a) recommends: “To determine the influence of the distribution of horizontal velocity and depth between the verticals on the total uncertainty in discharge, it is necessary to make a detailed measurement of the cross-section [...]” Obviously, such measurements are not possible in practice because they are time-consuming. Moreover, the increase in the duration of measurement results in a higher risk of streamflow variation. Carter and Anderson (1963) and Herschy (1975) conducted this kind of approach by reducing the number of verticals (taking only a proportion of 1/2, 1/4 or 1/5 for instance) but without taking into account the behavior of the hydrometric technician. Results of these studies were probably at the origin of mean values presented in ISO 748 standard. Accordingly, these results do not take into account the complexity of the cross-section and this method is not recommended given the diversity of river cross-sections (Forray et al., 1998; Le Coz et al., 2012, in press-b).

The subsampling method consists in generating several stream-gaugings with diverse spatial distribution of verticals while trying to simulate as well as possible the behavior of a hydrometric technician. For each number of verticals, 1000 stream-gaugings are generated and associated discharges are calculated.

Each high-resolution gauging of our reference dataset is subsampled by reducing the number of verticals. The subsampling method simulates the behavior of stream gaugers by a pseudo-random sampling procedure. It generates subsampled stream-gaugings with at least 5 verticals since the majority of EDF-DTG stream-gaugings are performed with 5 verticals or more (5 verticals correspond to the 1% percentile). Following general guidelines described in Section 2.1, a probability is affected to vertical selection depending on:

- The proximity with a vertical already selected,
- the vicinity with the shore,
- the gain of information provided by the vertical.

According to internal operating procedures, in the first subsampling step the first and last verticals ($i = 1$ and $i = m$) are consistently chosen as close as possible to the limits of the section so as to minimize the influence of extrapolations. These $j = 2$ first verticals are the same for all the subsampled gaugings.

Probabilities of sampling verticals are then computed using the unit flow of initial stream-gauging (noted q) defined as:

$$q_i = D_i V_i, \quad (12)$$

where i varies between 2 and $m - 1$.

In case of a gauging using a few number of verticals, a hydrometric technician would select a vertical in the middle of the cross-section, where the velocity is higher and where the flow is the same on either side of the vertical. Thus, to choose a vertical distant to a vertical already selected and at the “center of gravity”

Table 1

Characteristics of the reference stream-gaugings used for this study. m^* is the number of verticals. MCM* indicates mechanical current-meter measurement.

Number	Location	River	Type	Date	Width (m)	Depth (m)	Discharge (m ³ /s)	m^*
1	Allasac	Vézère	ADCP	2009/02/05	36.7	2.90	29.9	54
2	Chavanay	Rhône	ADCP	2008/12/18	342	15.4	1010	83
3	Chavanay	Rhône	ADCP	2014/08/06	343	14.1	1332	79
4	Miramont Comminges	Gentille	ADCP	2011/09/13	17.2	3.43	15.8	56
5	Rocherousse	Durance	ADCP	2013/10/09	23.8	0.91	11.6	46
6	Tricastin	Rhône	ADCP	2013/09/18	152	14.1	1009	80
7	Tricastin	Rhône	ADCP	2014/03/04	146	13.3	1664	61
8	Les Chambons	Buech	MCM*	2014/07/22	18.1	0.85	2.98	47
9	Nant 1	Durzon	MCM*	2013/10/16	5.70	0.41	1.05	35
10	Nant 2	Durzon	MCM*	2013/10/17	5.90	0.52	0.93	31
11	Pont-En-Royans	Vernaison	MCM*	2001/01/27	10.4	0.26	0.81	34
12	Sassenage	Furon	MCM*	2013/07/10	6.80	0.67	0.18	35
13	Serres	Buech	MCM*	2014/07/22	16.2	0.79	2.81	53
14	Seuil de Premont	Arc	MCM*	2014/07/23	3.50	0.81	1.80	46
15	Seuil de Premont Canal	Arc	MCM*	2014/07/23	9.00	0.86	1.75	47
16	St Georges de Luzencon	Cernon	MCM*	2013/10/16	13.8	0.63	0.79	40
17	Villar Loubière	Séveraisse	MCM*	2010/01/28	10.5	0.33	1.34	50
18	Voiron	Morge	MCM*	2013/07/10	7.00	0.45	0.66	47
			Minimum		3.50	0.33	0.18	31
			Maximum		343	15.4	1664	83

of the flow distribution, a probability $P_{1,i}$ is affected depending on partial flows to the left ($Q_{i,left}$) and to the right ($Q_{i,right}$) (see Fig. 1a) between vertical i and closest verticals already selected as:

$$P_{1,i} = \frac{\min(Q_{i,left}, Q_{i,right})}{\sum_{i=1}^{m-j} \min(Q_{i,left}, Q_{i,right})} \quad (13)$$

$Q_{i,left}$ (respectively $Q_{i,right}$) denotes the integral of unit flow (q) between vertical i and its closest vertical on the left (respectively on the right). The index j denotes the number of verticals already selected.

The probability will be maximized if partial flow on either side is the same (see Fig. 1c). We notice that as required the sum of the probabilities is equal to 1.

In computing a discharge measurement, the depth and the velocity are assumed to vary linearly with the distance between verticals. Consequently, an operator tends to select verticals where the changes of slope are high. Thus, another probability $P_{2,i}$ is computed to select a vertical for which the unit flow is very different to a linear interpolation between the verticals already selected (Eq. (14)). The difference between the unit flow at vertical i and the interpolation between verticals selected, separated by a distance of $L_{i,sep}$, is noted Δq_i (see Fig. 1b).

$$P_{2,i} = \frac{\Delta q_i L_{i,sep}}{\sum_{i=1}^{m-j} (\Delta q_i L_{i,sep})} \quad (14)$$

The probability $P_{2,i}$ allows to sample a vertical where the q curve is very uneven while maintaining the separation distance in a homogeneous way (see Fig. 1d).

In order to give equal importance to both probabilities, the final probability P_i for selecting a vertical i is computed as:

$$P_i = \frac{P_{1,i} + P_{2,i}}{2} \quad (15)$$

A vertical numbered j is sampled randomly according to the probability distribution computed above (see Fig. 1e). Probabilities are computed again and verticals are selected one by one while $m - j$ verticals are still available. When the number of sampled verticals j is equal to the initial number of the reference stream-gauging m , the sampling process is completed. To produce various stream-gaugings, this process is iterated $k = 1000$ times. For instance, 1000 different gaugings with 10 verticals are generated.

3.3. Uncertainty related to the number of verticals

It is assumed that the true value of the discharge occurs when all the m verticals of the reference stream-gauging are used (Q_m). In practice, the true discharge is unknown but only the influence of the number of verticals has been taken into consideration in this study. Thus, the relative errors can be computed for each subsampled gaugings (stream-gauging number k where $k = 1, \dots, 1000$ with j verticals) as:

$$E_{j,k} = \frac{Q_{j,k} - Q_m}{Q_m} \quad (16)$$

Fig. 2 shows the relative error depending on the number of verticals for the Buech river stream-gauging at Serres. As expected, the relative error is larger when the number of vertical decreases.

This figure highlights also a bias since the error distribution is not centered around 0 (for 10 verticals, the median value is -0.62%). The same analysis performed on the other reference stream-gaugings shows that the bias depends on the shape of the cross-section. It is observed that the bias is larger for the most complex cross-section. In practice the hydrometric technician chooses obviously a higher number of vertical to best describe such a complex cross-section. It is difficult to determine if the origin of the bias is the subsampling method (by construction) or the lack of verticals. In most cases, the bias is low (less than 1% in absolute value) and we assume that the operator is able to limit the bias while following all the requirements, *i.e.* by selecting point measurements as close as possible to the edges and by best describing lateral velocity and depth progressive gradient.

In Fig. 2, the 15% and 85% empirical percentiles can be compared with u_m computed following ISO 748 standard since the distance between these two percentiles can be seen as a 70% empirical confidence interval. These percentiles show a slight asymmetry around the median value. The skewness can be estimated by the quartile skewness coefficient, also known as Bowley skewness (Bowley, 1920) defined by:

$$S_q = \frac{(Q_3 - Q_2) - (Q_2 - Q_1)}{Q_3 - Q_1} \quad (17)$$

where Q_1 , Q_2 and Q_3 denote the first, second and third quartiles, respectively.

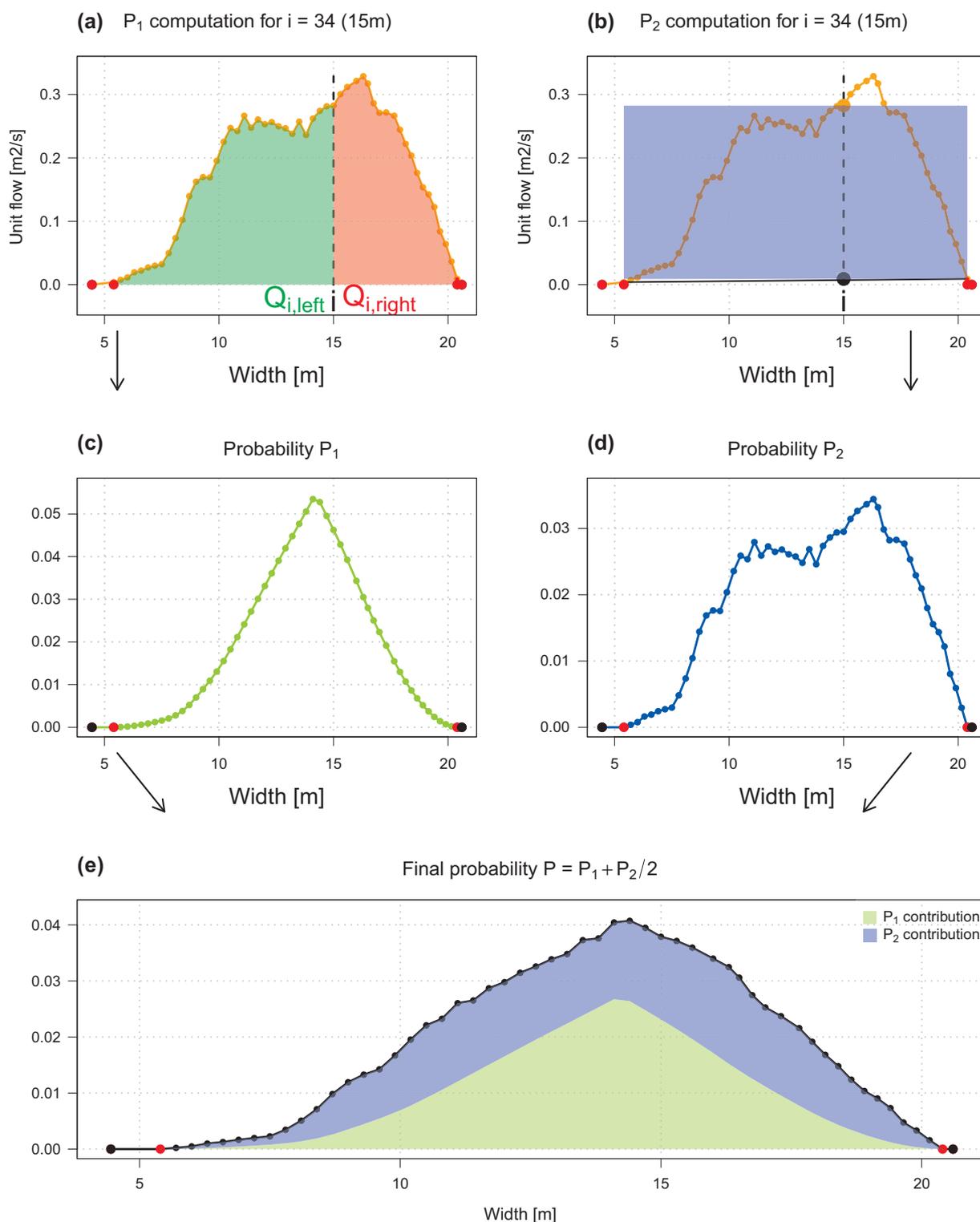


Fig. 1. Probability computation procedure for the Buech river gauging at Serres. The black vertical dashed line represents vertical i . Red points correspond to verticals already sampled. (a) P_1 computation. In green, partial flow to the left and in red, partial flow to the right. $P_{1,i}$ is proportional to the minimum value between $Q_{i,right}$ and $Q_{i,left}$; (b) P_2 computation. Oblique solid line is the interpolation between the closest sampled verticals of vertical i . The area in blue is proportional to $P_{2,i}$; (c) P_1 probability distribution; (d) P_2 probability distribution; and (e) final probability distribution. (For interpretation of the references to color in this figure legend, the reader is referred to the web version of this article.)

If this coefficient is positive, the data are positively skewed or skewed right, implying that the discharge is more often overestimated. In most cases skewness is negative meaning that

the discharge is often underestimated. As an example, S_q is equal to -0.03 for 1000 subsampled stream-gaugings with 10 verticals from the Buech at Serres gauging and shows a slightly skewed left

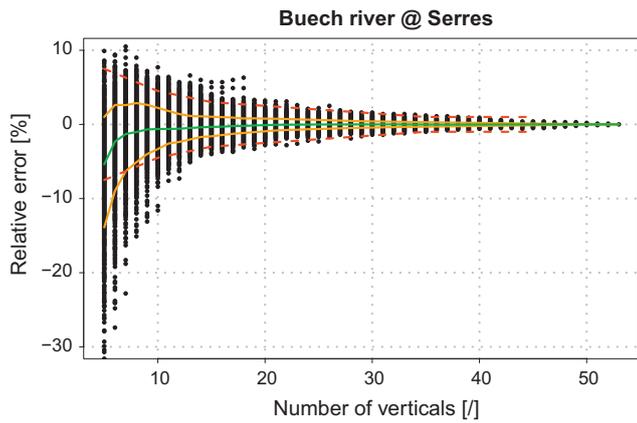


Fig. 2. Relative error depending on the number of verticals for the Buech river gauging at Serres. Red dashed line represent ISO 748 estimation of u_m while orange solid lines are 15% and 85% empirical percentiles. The green solid lines is the median. (For interpretation of the references to color in this figure legend, the reader is referred to the web version of this article.)

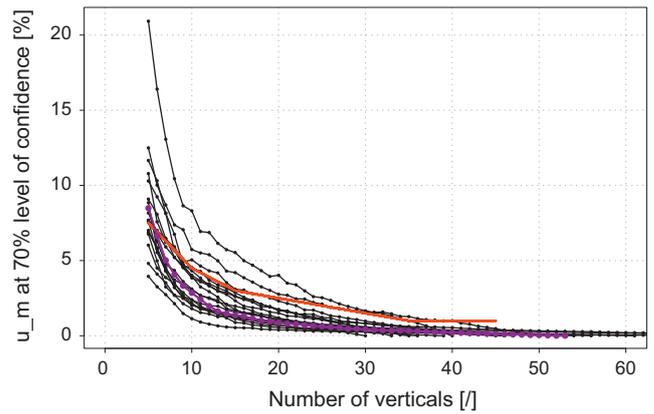


Fig. 3. u_m estimation for each reference stream-gauging depending on the number of verticals according to the introduced subsampling method. The Buech at Serres gauging station is plotted in purple. The red line represents values given in ISO 748. (For interpretation of the references to color in this figure legend, the reader is referred to the web version of this article.)

distribution. It can be explained by the global concave shape of the river cross-section. The depth and the velocity are assumed to vary linearly with distance between verticals in computing a discharge measurement which often leads to an underestimation of the true discharge (Eq. (1)).

A distribution-free test (or nonparametric test) of symmetry has been performed using a bootstrap method (Davison and Hinkley, 1997) with 1000 replicates. For each number of verticals an empirical confidence interval of skewness (at a confidence level of $1 - \alpha = 95\%$) is computed using the 2.5% and 97.5% empirical percentiles. When $S_q = 0$ is included in the interval, the null hypothesis of the symmetry of the relative error distribution cannot be rejected (with $\alpha = 5\%$). In the majority of cases we observe that the confidence interval includes $S_q = 0$. It can be thus deduced that the relative error distribution is not significantly skewed. However in order to take into account the small skewness, the estimation of the u_m term is taken as the maximum between the 85% percentile minus the 50% percentile and the 50% percentile minus the 15% percentile:

$$u_m = \max \{ p_{85\%}(m) - p_{50\%}(m), p_{50\%}(m) - p_{15\%}(m) \} \quad (18)$$

For each reference stream-gauging, u_m is estimated and represented depending on the number of verticals in Fig. 3. Since each reference stream-gauging is distinctive, the number of verticals m is not satisfactory enough to be explanatory. For 11 verticals which correspond to an usual gauging (see Table 2), u_m ranges from 2% to 7.5%. This figure illustrates that the use of the number of verticals in ISO 748 method for estimating the uncertainty is not appropriate considering the diversity of cross-sections in natural rivers. The relative error should depend both on the strategy adopted to select verticals and on the cross-section complexity.

3.4. New computation of u_m depending on a sampling quality index

According to general guidelines, a good sampling can be obtained when spacing between verticals is quite homogeneous, variations between adjacent measurements are as minimal as possible and of the same order of magnitude. In this way and in order to evaluate the strategy for selecting verticals of each gauging, we define a sampling quality index (SQI) as:

$$SQI = \frac{\sigma(\Delta q)}{\sigma(q)} \frac{\sum_{i=1}^m (\Delta x_i \Delta q_i)}{Q} \quad (19)$$

Table 2

Statistical characteristics of the 3185 stream-gaugings from EDF-DTG database.

	Discharge (m^3/s)	Width (m)	Depth (m)	Mean velocity (m/s)	Number of verticals
Minimum	0.01	0.49	0.10	0.03	3
First quartile	0.60	6.60	0.40	0.27	10
Median	1.43	10.1	0.55	0.43	11
Mean	7.98	13.2	0.65	0.52	11
Third quartile	3.55	16.6	0.75	0.63	13
Maximum	863	90.3	7.40	3.60	32

This dimensionless criterion has the advantage to take into account:

- The spacing between verticals (Δx_i) which will increase SQI if they are widely spaced,
- the variation of unit flow between two adjacent verticals (Δq_i) which will also increase SQI if changes in flow distribution are not enough sampled,
- a ratio between the standard deviation of adjacent measurement ($\sigma(\Delta q)$) and the standard deviation of unit flow ($\sigma(q)$). The denominator of the ratio is quite stable (intrinsic variability of the cross-section) while the numerator must reduce when the number of verticals increases and variations between adjacent verticals are low.

A theoretical value of $SQI = 0$ means that the spacing between verticals is infinitesimally small. It implies that discharge is integrated according to Eq. (1). On the other hand, SQI shall reasonably not exceed a value of 1. Although high differences between adjacent measurements and inappropriate spacing among verticals can be highlighted by SQI, it does not allow error detection.

Fig. 4 shows the relative error depending on the sampling quality index for the Buech stream-gauging at Serres. As mentioned above, the difference between the empirical 85% and 50% percentiles or the difference between the 50% and 15% percentiles is computed to estimate the u_m term (see Eq. (18)) depending on SQI (instead of m). A threshold of 100 values is required for estimating empirical percentiles. Then the u_m term is smoothed using a local regression function and plotted for each reference stream-gauging depending on SQI in Fig. 5. We set a minimum value of 1% for the u_m term which is the same threshold of u_m found in ISO 748 standard (ISO, 2009).

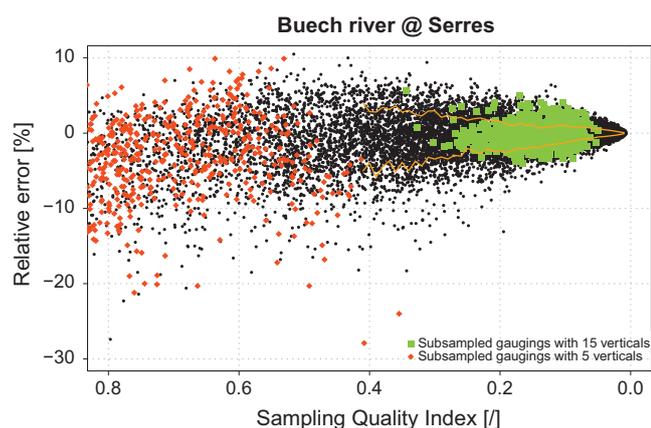
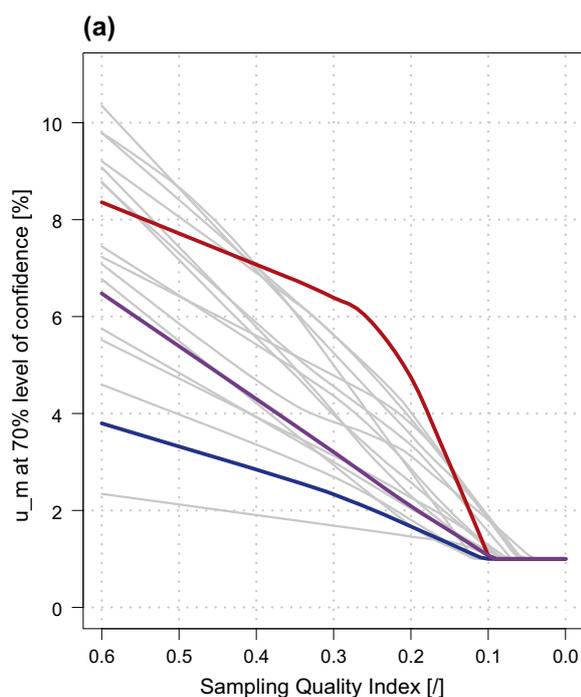


Fig. 4. Relative error depending on sampling quality index and computation of u_m for the Buech river at Serres. Black dots represent all the subsampled gaugings. Red diamonds (respectively green squares) show all 1000 subsampled stream-gaugings with 5 (respectively 15) verticals. Note that x -axis is decreasing. (For interpretation of the references to color in this figure legend, the reader is referred to the web version of this article.)

Fig. 5a shows u_m depending on the sampling quality index. In Fig. 5b, three bathymetric profiles illustrate the level of complexity of the riverbed. We observe that all the curves converge. While the number m of verticals does not take into account their spatial distribution, the SQI criterion allows to compare various stream-gaugings using the same consistent scale.

This figure shows that the position of curves depends only on the configuration of the bathymetric profile of the riverbed and also on the flow distribution. For instance, stream-gauging with a very uneven bathymetric profile and a complex flow distribution has a higher uncertainty compared to a rectangular open-channel.



3.5. Selecting analog hydraulic conditions

As mentioned above, the u_m estimation depends on the complexity of the stream-gauging. Due to the natural space variability of river flows and beds, riverbed shape and flow distribution complexity altogether have to be taken into account for estimating the uncertainty related to any stream-gauging. Curves presented in Section 3.4 are based on reference stream-gaugings. The uncertainty component u_m of any routine stream-gauging should indeed be computed following results of gaugings with similar hydraulic conditions. For that purpose, cross-sectional complexity is considered by selecting analogs in the reference stream-gauging dataset.

This analogy is based on dimensionless lateral velocity distribution and dimensionless bathymetric profile which are concatenated to produce a signal. This signal is then compared with all reference stream-gaugings signals using the Nash (or NSE) criterion (Nash and Sutcliffe, 1970). Each stream-gauging is unique. Thus, it cannot be assumed that a stream-gauging is exactly the same as a reference stream-gauging. The four most similar stream-gaugings are thus selected.

Several similarity criteria such as KGE (Gupta et al., 2009), VE (Volumetric Efficiency) and Pearson correlation coefficient have been tried and tested. Nash criterion is both simple and robust to select adequate analogs. Only criteria with a value greater than 0 are considered to be relevant.

The u_m term of any routine gauging is computed as a weighted sum including the four analogs, the weights being the corresponding Nash criterion as follows:

$$u_m = \frac{\sum_{i=1}^4 \text{Nash}_i u_{m,i}}{\sum_{i=1}^4 \text{Nash}_i} \quad (20)$$

A sensitivity analysis about the number of analogs shows that the computed uncertainty exhibits a small sensitivity. When more than 10 analogs are retained, results are too smoothed and

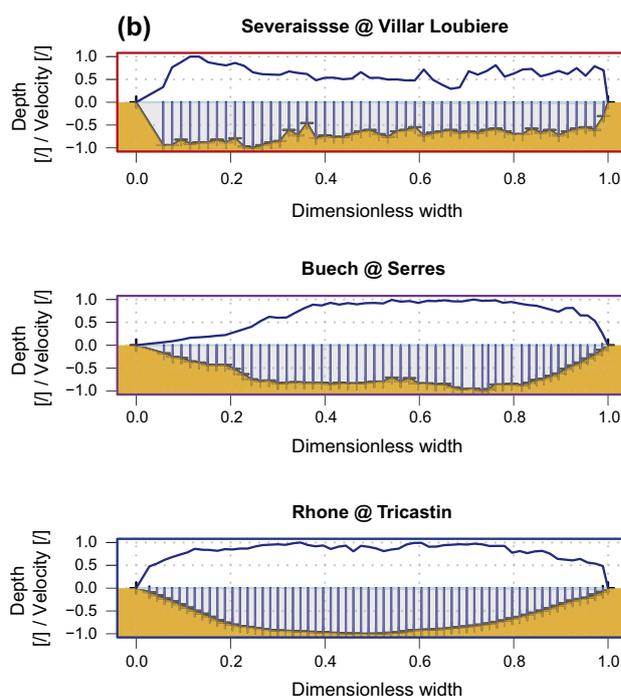


Fig. 5. (a) u_m estimation for each reference stream-gauging depending on the sampling quality index. Séveraisse @ Villar stream-gauging is plotted in red, Buech @ Serres stream-gauging in purple and Rhône @ Tricastin stream-gauging in blue. Note that x -axis is decreasing. (b) Lateral velocity distributions and bathymetric dimensionless profiles of the three stream-gauging examples. (For interpretation of the references to color in this figure legend, the reader is referred to the web version of this article.)

information coming from the stream-gauging complexity is lost. Furthermore, the four most similar stream-gaugings present a good score and are more relevant compared with the others.

4. Application of the new methodology

ISO 748, *Q+*, *IVE* and the *FLAURE* methods are applied to the EDF-DTG dataset and three test cases are presented to compare the four methods. We stress that the final expanded uncertainties are expressed at the 95% confidence level.

4.1. EDF-DTG database

3185 gaugings ranging from 0.01 to 864 m³/s are used to compare *ISO 748*, *IVE* and *Q+* methods with the new methodology. These gaugings were extracted from EDF-DTG database and respect requirements found in *ISO 748* standard and internal operating procedures. Statistical characteristics summarizing these gaugings are presented in Table 2. Measurements were made at 300 locations of EDF-DTG hydrometric network in France. The majority of stream-gaugings were operated in small mountain river (the order of magnitude of the width is on average 10 m). On average, the number of verticals is around 10. Thus, discharges of each subsection can exceed 10% of the total flow which slightly deviates from the *ISO 748* standard.

4.2. Uncertainty computation to the database

The four methods are applied to 3185 stream-gaugings (EDF-DTG database). The *FLAURE* method follows the procedure below:

1. Computation of the sampling quality index (*SQI*) according to Eq. (19),
2. Analog selection (see Section 3.5) and estimation of u_m using Eq. (20) depending on *SQI* computed,
3. Replacing the u_m term into Eq. (4) (*Q+* method) to deduce the final expanded uncertainty.

The vast majority of *SQI* values computed on EDF-DTG database ranges from 0.02 to 0.4 with a more frequent value equal to 0.1 as shown in Fig. 6. Values of *SQI* over 0.5 reveals very complex cross-section and could sometimes highlight mistakes in data entry.

Less than 1% of the stream-gaugings have less than four selected analogs. It means that these stream-gaugings are distinctive. It also indicates that the 18 chosen reference stream-gaugings represent all the different types of cross-section in the dataset. In the case where no analogs can be found (the cross-section is very uncommon and uneven), the u_m term is estimated using the maximum value of uncertainty associated to the sampling quality index computed (*i.e.* the worst case).

Fig. 7 illustrates the final expanded uncertainty $U(Q)$ (%) computed with the four methods. While *ISO 748* standard strongly depends on the number of verticals, the three other methods produce more nuanced results. In terms of range of results, maximum values are obtained with the *IVE* method when the number of verticals is small. According to Eq. (8) and (9), the uncertainty is very sensitive when the variability of the riverbed is high (*i.e.* when $\Delta_{i,D}$ are high) which is often the case for small streams or mountainous rivers. On the other hand, for very smooth channels, when measured depths (respectively velocities) show almost linear or constant evolution, the method may underestimate the uncertainty. The *IVE* method leads to very high uncertainties. Thus, the method seems not suitable for discharge measurements made with a few number of verticals.

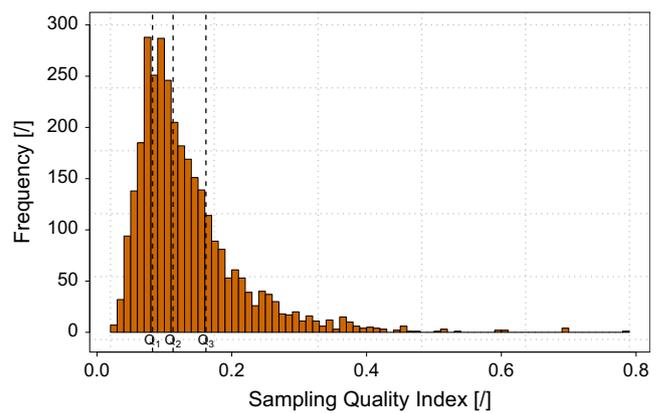


Fig. 6. Distribution of sampling quality index values computed over the whole EDF-DTG database (3185 stream-gaugings). Q_1 , Q_2 and Q_3 denote the first, second and third quartiles, respectively, and are represented by the vertical dashed lines.

The new method produces more subtle results which are consistent with values expected by experts (Forray et al., 1998). A value of 15% is assigned for uneven gaugings while smoothed cross-sections could take a minimum value of around 3%. Mean and median values are both equal to 5% and correspond to recommended value of uncertainty for good condition measurement.

Fig. 8 illustrates the distribution of the final expanded uncertainty obtained with the four methods as histograms. The *Q+* and *FLAURE* methods present similar histograms whereas *IVE* values are larger and exhibit more wider span. The median value of the *IVE* approach is very high (more than 11%) which highlights that the method seems not to be applicable to our dataset due to a relatively small number of verticals which is common practice at EDF-DTG. The method has indeed been developed for stream-gaugings with a number of verticals equal or greater than 20, which corresponds to requirements in the U.S. (Rantz et al., 1982).

Fig. 9 confirms that *ISO* and *IVE* methods overestimate the uncertainty compared to the *FLAURE* approach. The computation of α proposed in Eq. (5) leads to similar uncertainties between *Q+* and *FLAURE* methods (see Fig. 9c). Once again, Fig. 9d illustrates the sensitivity of the *Q+* method to the value of α . The results are very different with an arbitrary value of $\alpha = 10^\circ$. This underlines the need to objectify the angle α while the *FLAURE* method does not require any subjective parameter to compute the uncertainty.

4.3. Test cases

Three different gaugings are selected to deeply discuss the results of the new method in comparison with the results of *ISO 748*, *Q+* and *IVE* methods: the Romanche at Champeau, the Souloise at Infernet and a subsampled gauging from the Buech at Serres. Fig. 10 shows the lateral velocity distribution and the bathymetric profile of each gauging. The first case illustrates a very smooth cross-section while the second case has a uneven velocity distribution which should induce a high level of uncertainty. The third case demonstrates the robustness of the analogs selection method. Values of the final expanded uncertainty are shown in Table 3.

Case 1: the Romanche river discharge measurement at Champeau in 2010 with 8 verticals (see Fig. 10a). This cross-section is quite wide with a width-to-depth ratio $\frac{b}{D} \approx 25$. The smooth and trapezoid cross-section is well represented by the selected analogs (Gaugings 1, 5, 4 and 9). Due to a smooth section only 8 verticals were used. As a consequence, most subdischarges are greater than

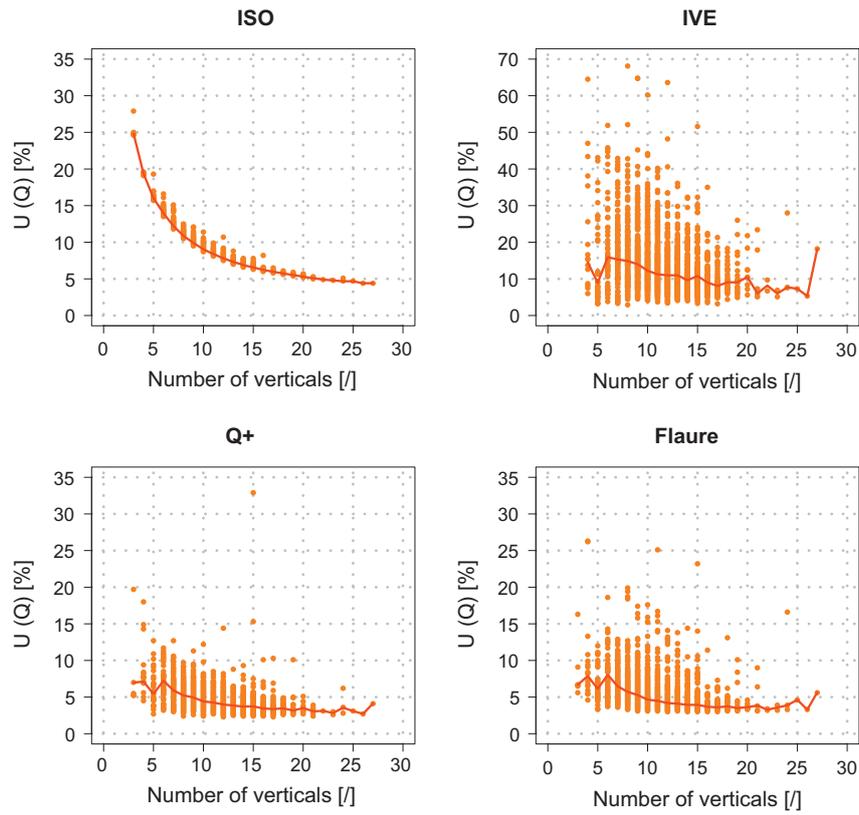


Fig. 7. Uncertainties depending on the number of verticals (at 95% confidence level) computed with ISO, Q+, IVE and FLAURE methods using EDF-DTG dataset. The solid red line represents the median. (For interpretation of the references to color in this figure legend, the reader is referred to the web version of this article.)

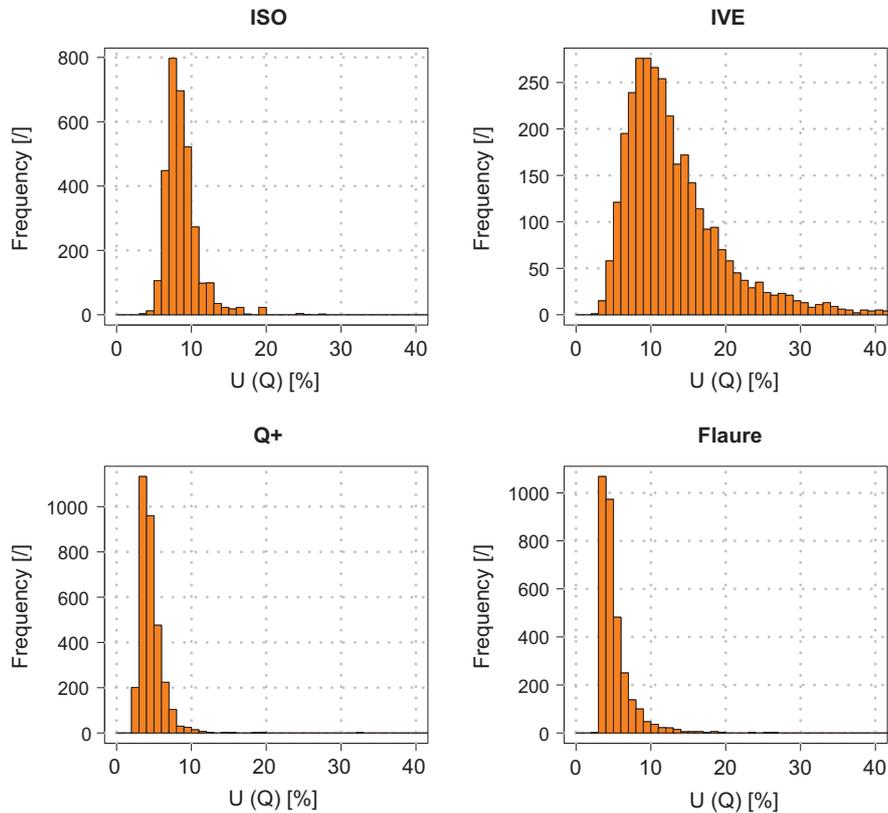


Fig. 8. Distribution of uncertainties computed with ISO, Q+, IVE and FLAURE methods using EDF-DTG dataset (at 95% confidence level).

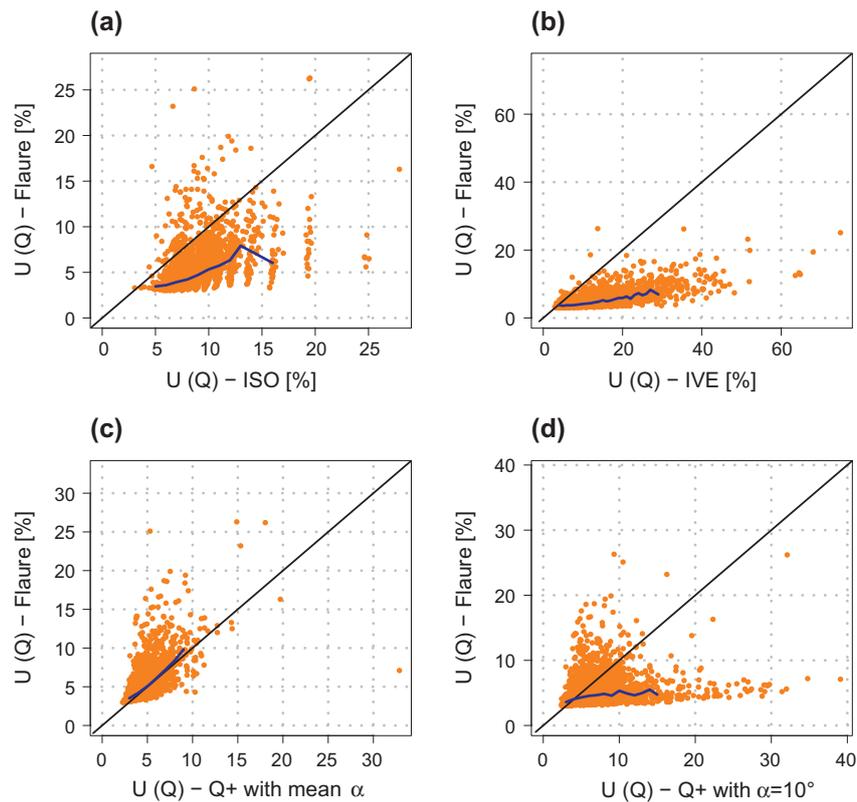


Fig. 9. Comparison of the FLAURE approach with other methods in terms of uncertainties (at 95% confidence level). Blue line is the median. Oblique black line is the first bisector. (For interpretation of the references to color in this figure legend, the reader is referred to the web version of this article.)

15% of total discharge but extrapolated edge discharges are negligible compared to total discharge. According to the limited number of verticals, this example measurement is not qualified as standard with respect to the ISO 748 requirements. The uncertainty computed with ISO 748 standard leads to a high value of 11% since the number of vertical is low. Due to the large spacing between verticals number 2 and 3, the IVE method leads to a value of 14% although lateral gradients of depth and velocity are small. Following Eq. (5), $\alpha = 3^\circ$ and the final uncertainty computed with the Q_+ method is 4.6%. In the case of the FLAURE approach the variability of the unit flow is very low which leads to a small value of SQI and an expanded uncertainty of 4% which correspond to an usual value of uncertainty given the smooth cross-section and velocity profiles. FLAURE and Q_+ methods produce the similar results but the Q_+ method is sensitive to angle α . For instance, a value of $\alpha = 10^\circ$ leads to a value of 12.5% given the spacing between verticals number 2 and 3.

Case 2: The Souloise river at Infernet gauging station in 2011 with 14 verticals (see Fig. 10b). This gauging is typical of low flow conditions in a small mountainous river with a width-to-depth ratio $\frac{b}{d} \approx 13$. 14 verticals were distributed throughout the cross-section to better capture lateral velocity variability. Since the bathymetric profile is quite smooth, a value of $\alpha = 8^\circ$ is computed for Q_+ . The relatively high number of verticals leads to moderate values of uncertainty for ISO 748 and Q_+ methods (with 7% and 4% respectively) despite of the fact that lateral velocity profile is uneven. On the other hand, the IVE method is too sensitive to the high variability of velocity profile with an expanded uncertainty of more than 30%. The FLAURE method leads to a reasonable value of 10%. Selected analogs correspond to uneven and shallow river cross-sections.

Case 3: This gauging ($Q = 2.75 \text{ m}^3/\text{s}$, see Fig. 10c) is a subsampled gauging from the Buech river at Serres reference stream-

gauging with initial discharge of $2.81 \text{ m}^3/\text{s}$ considered here as the true value. The subsampled gauging can be seen as a typical measurement while the original one gives the best estimation of the discharge. The relative error between these gaugings is equal to 2%. An uncertainty of around 4% is obtained using Q_+ method (with a value of $\alpha = 3^\circ$) and 5% for the FLAURE method. We notice here that the Q_+ method is very sensitive to the angle α : expanded uncertainties fluctuate between 5% and 16% for values of α ranging from 5° to 20° . ISO 748 computation leads to a value of around 9% while IVE method gives 11%.

The best selected analog is as expected the initial Serres gauging with a Nash criterion of 0.97 while the second analog is Voiron (Morge river) with a Nash criterion of 0.62. This example shows that the Nash criterion used for selecting analogs is quite robust.

5. Conclusions

An alternative method to estimate the cross-sectional interpolation errors is proposed in this paper. It improves the estimation of u_m and leads to consistent values of uncertainty with Q_+ method. It seems to be adequate for various cross-sectional configurations including complex cross-sections and smooth man-made channels. The approach makes it possible to better take into account both the sampling strategy quality and the complexity of the cross-section. Uncertainty, especially the u_m term, is estimated using only data belonging to the stream discharge measurement. No subjective parameter or additional measurement are needed. Thus, the approach is suitable for any historical or future stream-gauging. It has also been demonstrated that the simple computation of α in the Q_+ method proposed in this study leads to similar results than the FLAURE method. Although the Q_+ method is simpler, the FLAURE approach refers to explicit reference gaugings taken

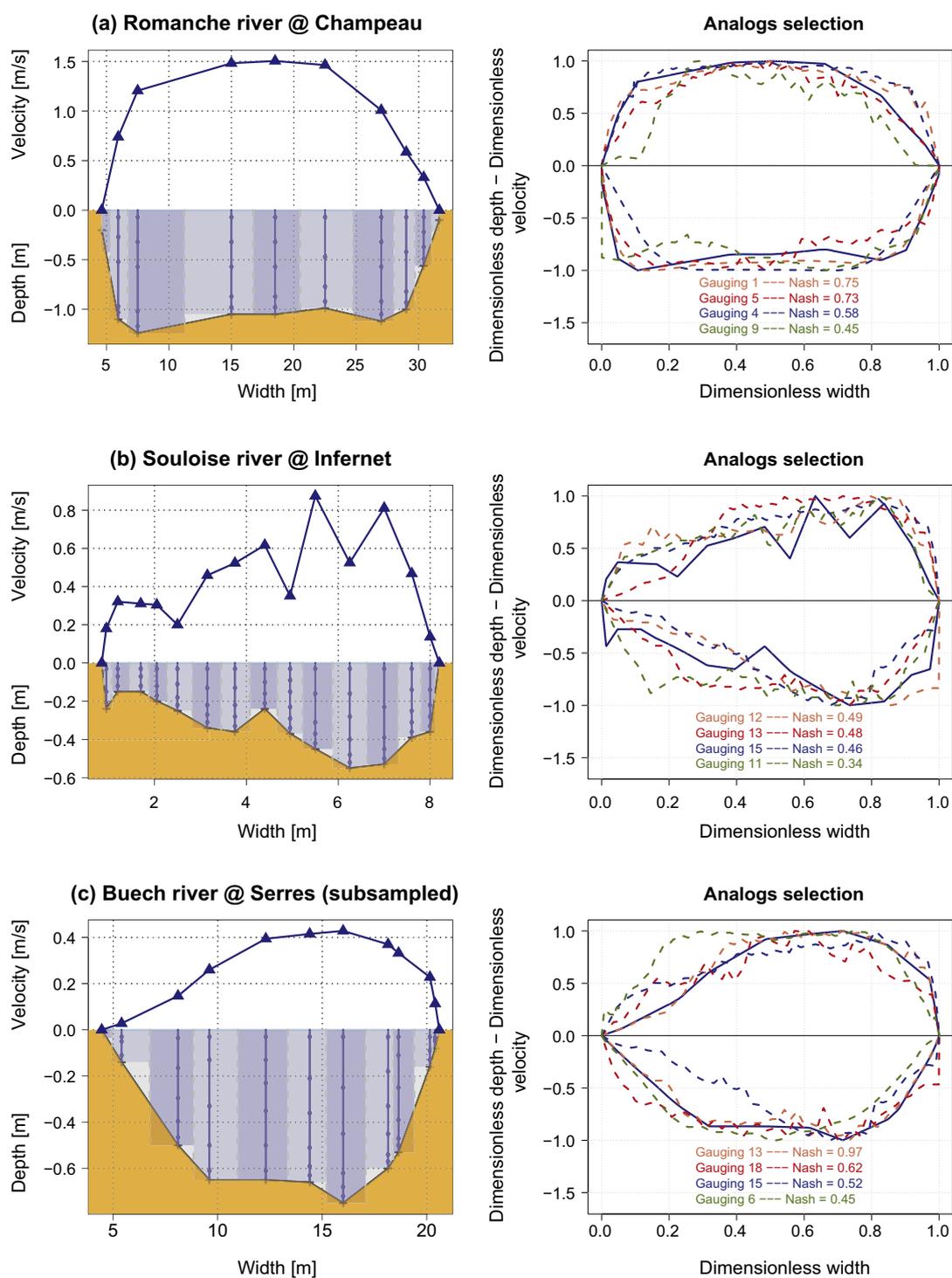


Fig. 10. Illustration of the analogs selection for the three test cases. (a) The Romanche river stream-gauging at Chapeau station (case 1). (b) The Souloise river stream-gauging at Infernet station (case 2). (c) Subsamped stream-gauging from Buech river at Serres station (case 3). For each case, scores printed on right hand graphs correspond to Nash values of the four best analogs. Gauging numbers refer to Table 1.

Table 3
Results of the uncertainty analysis of the stream-gauging test cases. m^* is the number of verticals.

Name	Width (m)	Depth (m)	Discharge (m ³ /s)	m^*	ISO U(Q) (%)	IVE U(Q) (%)	α (°)	Q+ U(Q) (%)	FLAURE U(Q) (%)
Romanche@Champeau	27.0	1.24	33.7	8	10.7	13.8	3	4.6	4.0
Souloise@Infernet	7.35	0.55	1.34	14	7.0	32	8	4.0	10.0
Buech@Serres	16.2	0.75	2.75	10	9.0	11.3	3	4.2	5.2

as analog cases. Using an analog approach, values of the u_m term are based on 18 very detailed measurements made in the field. These measurements were conducted in various flow conditions and from cross-sections with different morphologies. This database seems to be sufficient for assessing the uncertainty of most common gaugings operated by EDF-DTG in France (quite small rivers). For very unusual cross-sections (less than 1% of EDF-DTG dataset), no analogs are found. In such cases the maximum value of the u_m term is affected according to its sampling quality index. The weak point of this part of the approach may be the diversity of reference stream-gaugings. However, we think that the maximum value can reasonably be used when no analog is found since the cross-section is probably very uneven or the lateral distribution of flow is unusual. It is therefore of interest to complete the reference database with unusual stream-gauging and gaugings operated by other organizations throughout the world. Such a database could also be interesting for estimating uncertainty in streamflow measurements using acoustic profilers (ADCP).

In addition, the original subsampling method produces realistic stream-gaugings and is in line with the behavior of a hydrometric technician. Consequently, the estimation of u_m is consistent.

Another limitation is that the systematic errors remains difficult to estimate. The bias of the stream-gauging technique is hard to quantify since river discharge references are rarely available and usually themselves too uncertain. Other factors influencing the operators, such as stress, lack of time and weather conditions are not taken into account although it could include a significant part of the uncertainty. The uncertainty related to operator skill is not quantified. Although the sampling quality index (SQI) is easy to compute and could be used in the field as an indicator to improve the strategy of selecting point measurements while the operator is gauging; we remind that all the requirements in ISO 748 standard (ISO, 2009) or other guidelines (Forray et al., 1998; WMO, 2010) must be followed in order to avoid errors.

Further research is needed to validate the method. For instance, sensitivity tests would provide information on the robustness of the results with respect to the number of reference stream-gaugings. It would also be interesting to apply the four methods to a stream-gauging dataset coming from other hydrometric services with other procedures, other types of sites and different flow conditions. It could be interesting to compare methods based on the GUM framework with methods based on other mathematical tools such as grey numbers (Alvisi et al., 2014) and fuzzy logic (Shrestha and Simonovic, 2010) for assessing the uncertainty in discharge measurement. Comparison between field interlaboratory experiments (Blanquart, 2013; Le Coz et al., in press-a) and uncertainty propagation methods which are based on the GUM approach (i.e. ISO 748 standard; IVE, $Q+$ and FLAURE methods) will also make it possible to highlight the best approach and improve them.

Acknowledgments

The authors are grateful to J. Kiang for sharing her codes and for her active collaboration. EDF-DTG which supports this study is gratefully acknowledged, especially the whole hydrometric team, D. Sevez, F. Gottardi, T. Mathevet, J. Gailhard, T. Morlot, P. Vignon and J.P. Escallon. We also thank the two reviewers and the editor for their helpful comments on the manuscript.

References

- Alvisi, S., Barbetta, S., Franchini, M., Melone, F., Moramarco, T., 2014. Comparing grey formulations of the velocity-area method and entropy method for discharge estimation with uncertainty. *J. Hydroinformatics* 16 (4), 797–811.
- Blanquart, B., 2013. Panorama des méthodes d'estimation des incertitudes de mesure. [Overview of the methods for estimating measurement uncertainties]. *La Houille Blanche* 6, 9–15 (In French).
- Bowley, A.L., 1920. *Elements of Statistics*, vol. 2. PS King.
- Carter, R.W., Anderson, I.E., 1963. Accuracy of current meter measurements. *J. Hydraul. Div.* 4 (1), 105–115.
- Cohn, T., Kiang, J., Mason, R., 2013. Estimating discharge measurement uncertainty using the interpolated variance estimator. *J. Hydraulic Eng.* 139 (5), 502–510.
- Corato, G., Moramarco, T., Tucciarelli, T., 2011. Discharge estimation combining flow routing and occasional measurements of velocity. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 15 (9), 2979–2994.
- Davison, A.C., Hinkley, D.V., 1997. *Bootstrap Methods and their Application*, vol. 1. Cambridge University Press.
- Forray, N., Auer, J.C., Brochet, J.F., Eraud, Y., Favriau, A., Ghio, M., Lallement, C., Lang, M., Odier, M., Scherer, C., 1998. Charte qualité de l'hydrométrie. Code de bonnes pratiques. (In French) [Quality charter for hydrometry].
- Gupta, H.V., Kling, H., Yilmaz, K.K., Martinez, G.F., 2009. Decomposition of the mean squared error and NSE performance criteria: Implications for improving hydrological modelling. *J. Hydrol.* 377 (1–2), 80–91.
- Hauet, A., Kruger, A., Krajewski, W., Bradley, A., Muste, M., Creutin, J.D., Wilson, M., 2008. Experimental system for real-time discharge estimation using an image-based method. *J. Hydrol. Eng.* 13 (2), 105–110.
- Hersch, R.W., 1975. *The Accuracy of Existing and New Methods of River Gauging*, PhD Thesis. University of Reading.
- Hersch, R.W., 1993. The velocity-area method. *Flow Meas. Instrum.* 4 (1), 7–10.
- ISO, 2007a. ISO 1088:2007 – Hydrometry – Velocity-Area Methods Using Current-Meters Collection and Processing of Data for Determination of Uncertainties in Flow Measurement.
- ISO, 2007b. ISO/TS 25377:2007 – Hydrometry – Hydrometric Uncertainty Guidance (HUG).
- ISO, 2009. ISO 748:2009 – Hydrometry – Measurement of Liquid Flow in Open Channels Using Current-Meters or Floats.
- JCGM, 2008. Evaluation of Measurement Data – Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement. Guide 100, BIPM.
- Kiang, J., Cohn, T., Mason, R., 2009. Quantifying uncertainty in discharge measurements: a new approach. In: *World Environmental and Water Resources Congress 2009. American Society of Civil Engineers*, pp. 1–8.
- Le Coz, J., Blanquart, B., Pobanz, K., Dramais, G., Pierrefeu, G., Hauet, A., Despax, A., 2015. Estimating the uncertainty of streamgauging techniques using field interlaboratory experiments. *J. Hydraulic Eng.* (in press-a).
- Le Coz, J., Camenen, B., Peyrard, X., Dramais, G., 2012. Uncertainty in open-channel discharges measured with the velocity-area method. *Flow Meas. Instrum.* 26, 18–29.
- Le Coz, J., Camenen, B., Peyrard, X., Dramais, G., in press-b. Erratum to Uncertainty in open-channel discharges measured with the velocity-area method [Flow Measurement and Instrumentation 26 (2012) 18–29]. *Flow Meas. Instrum.*
- Le Coz, J., Renard, B., Bonnifant, L., Branger, F., Le Boursicaud, R., 2014. Combining hydraulic knowledge and uncertain gaugings in the estimation of hydrometric rating curves: a Bayesian approach. *J. Hydrol.* 509, 573–587.
- McMillan, H., Freer, J., Pappenberger, F., Krueger, T., Clark, M., 2010. Impacts of uncertain river flow data on rainfall-runoff model calibration and discharge predictions. *Hydrol. Process.* 24 (10), 1270–1284.
- McMillan, H., Krueger, T., Freer, J., 2012. Benchmarking observational uncertainties for hydrology: rainfall, river discharge and water quality. *Hydrol. Process.* 26 (26), 4078–4111.
- Morlot, T., Perret, C., Favre, A.-C., Jalbert, J., 2014. Dynamic rating curve assessment for hydrometric stations and computation of the associated uncertainties: quality and station management indicators. *J. Hydrol.* 517, 173–186.
- Nash, J.E., Sutcliffe, J.V., 1970. River flow forecasting through conceptual models part I: a discussion of principles. *J. Hydrol.* 10 (3), 282–290.
- Pelletier, P.M., 1988. Uncertainties in the single determination of river discharge: a literature review. *Can. J. Civ. Eng.* 15 (5), 834–850.
- Petersen-Overleir, A., Reitan, T., 2009. Accounting for rating curve imprecision in flood frequency analysis using likelihood-based methods. *J. Hydrol.* 366 (1–4), 89–100.
- Rantz, S. et al., 1982. Measurement and computation of stream flow. Volume 1: measurement of stage and discharge; volume 2: computation of discharge. *US Geol. Surv. Water-Supply Paper* 2175, 631.
- Sauer, V.B., Meyer, R.W., 1992. *Determination of Error in Individual Discharge Measurements*.
- Shrestha, R.R., Simonovic, S.P., 2010. Fuzzy set theory based methodology for the analysis of measurement uncertainties in river discharge and stage. *Can. J. Civ. Eng.* 37 (3), 429–440.
- WMO, 2010. *Manual on stream gauging – Vol I*. World Meteorological Organization, Geneva.

Field inter-laboratory experiments versus propagation methods for quantifying uncertainty in discharge measurements using the velocity-area method.

A. Despax & A.-C. Favre

Université de Grenoble Alpes (UGA),

Laboratoire d'Etude des Transferts en Hydrologie et Environnement (LTHE), Grenoble, France

A. Belleville & A. Hauet

Electricité de France, Division Technique Générale (EDF-DTG), Grenoble, France

J. Le Coz & G. Dramais

Irstea, UR HHLY, Villeurbanne, France

B. Blanquart

Conseil et formation en métrologie, Villers les Nancy, France

ABSTRACT: Quantifying the quality of discharge measurements by uncertainty analysis is a challenge in the hydrometric community. Several methods for quantifying uncertainty in discharge measurements using the velocity-area method were recently developed to address the limitations of ISO 748 standard. These analytical methods follow the guide to the expression of uncertainty in measurement (JCGM 2008), but it is a challenging task to assess which method provides the best uncertainty estimation due to the lack of streamflow measurement reference standards in natural streams. A useful tool to empirically estimate the uncertainty of a gauging method is the field inter-laboratory experiments. This study presents a comparison between both approaches based on two field inter-laboratory experiments conducted in 2011 and 2013 in four small rivers in France with current-meters on wading rods. Beyond the implementation of both approaches, this paper proposes a discussion to explain observed differences between the two methods.

1 INTRODUCTION

Hydrometric data are essential for many hydrological issues such as flood forecasting and warning, engineering design and policy decisions related to water resource management as well as calibration of hydrological models. Discharge measurements are the first step to produce such data and associated uncertainty has to be estimated. However, quantifying the quality of discharge measurements by uncertainty analysis still remains a challenge in the hydrometric community.

To harmonize the different practices for estimating and reporting uncertainty of measurement, a conventional uncertainty analysis method, based on analytical propagation methods, was introduced in 1995 in the Guide to the expression of Uncertainty in Measurement (GUM) revised in 2008 (JCGM). Before its publication, in 1979, the first version of the *ISO 748* standard (ISO 2009), proposed a method for computing uncertainty to measurements performed using the velocity-area method with a current-meter. Since that time, there has been no change in computation but the terminology has been standardized with the GUM. Thus, a substantial difference exists with respect to the mathematical concepts.

The *ISO 748* standard method is based on observations that did not include all kinds and sizes of rivers. Values given in its Appendix E are often used whereas they should be assessed for each measurement condition (ISO 2007).

To address the limitations of this method, three alternative methods - the Q+ method (Le Coz et al. 2012), the Interpolation Variance Estimator approach (Cohn et al. 2013) and the Flaure method (Despax et al. 2015, 2016) - were recently developed but they also present some limitations (Despax et al. 2016).

Due to the lack of streamflow measurement reference standards in natural streams, it is a challenging task to assess which method provides the best uncertainty estimation. In addition, the uncertainty propagation method requires the estimation of the separate effect of each input quantity on the final result through a sensitivity analysis, which is often difficult to conduct in a context of natural time and space variability of river flows and beds.

On the other hand, the inter-laboratory comparison method was recently applied and investigated in hydrometry especially with ADCP or current-meters on wading rods (e.g. Le Coz et al. 2015). The methodology used follows ISO standards (ISO 1994a, 1994b). Field inter-laboratory experiments are a useful tool to empirically estimate the uncertainty of a gauging method in given measurement conditions. It allows the quantification of uncertainty due to errors covered through repeated simultaneous gauging operations.

To improve the reliability of measurement uncertainty estimates, the two methods are confronted in this study, as done by many testing or calibrations laboratories. This study aims to document and compare both approaches applied to streamflow meas-

urements. The two methods are detailed in section 2. Uncertainties computed according to analytical propagation and inter-laboratory methods are presented in section 3 based on two field inter-laboratory experiments conducted in 2011 and 2013 in four small rivers. Then, a discussion gives some suggestions that would explain observed differences. Section 4 summarizes the conclusions and perspectives of this work.

2 METHODS

2.1 GUM framework

The GUM (JCGM 2008) framework follows four steps:

- a) Define the measurement process. A mathematical relationship of the measurement relates the measurand Y and input quantities X_i .

$$Y = f(X_1, X_2, \dots, X_i, \dots, X_N) \quad (1)$$

An estimate of the measurand Y , denoted y , is obtained from Equation (1) using input estimates $\{x_1, x_2, \dots, x_N\}$ for the values of the N quantities $\{X_1, X_2, \dots, X_N\}$. Thus the output estimate y is given by:

$$y = f(x_1, x_2, \dots, x_i, \dots, x_N) \quad (2)$$

- b) Evaluate the standard uncertainty $u(x_i)$ of each input quantity. Each input estimate x_i and its associated standard uncertainty $u(x_i)$ are obtained from a distribution of possible values of the input quantity X_i . This probability distribution may be experimentally determined or may be a prior distribution.
- c) Determine the combined standard uncertainty $u_c(y)$. The combined standard uncertainty uses the law of propagation of uncertainty based on a first-order Taylor series expansion as:

$$u_c^2(y) = \sum_{i=1}^N \left(\frac{\partial f}{\partial x_i} \right)^2 u^2(x_i) + 2 \sum_{i=1}^{N-1} \sum_{j=i+1}^N \frac{\partial f}{\partial x_i} \frac{\partial f}{\partial x_j} u(x_i, x_j) \quad (3)$$

where $u(x_i, x_j)$ is the estimated covariance associated with x_i and x_j .

- d) Determine the expanded uncertainty, using

$$U = k \times u_c(y) \quad (4)$$

where k is the coverage factor. A typical coverage factor of $k = 2$ will ensure a confidence level close to 95% (assuming a normal distribution of the measurand Y).

2.2 Analytical method applied to measurements performed using the velocity-area

The velocity-area method using current-meters (WMO, 2010) consists of integrating normal flow velocities and depths through the area A of a cross-section (Herschy, 1993) according to Equation (5) as follows:

$$Q = \int_A v dA \quad (5)$$

In practice, the velocity field is sampled using a limited number m of verticals distributed across the river, where the vertical velocity profile is sampled using a current-meter at n_i distinct depths. Velocity measurements are performed with mechanical, electromagnetic or acoustic Doppler current-meters. The mid-section method is often used by hydrological services to estimate discharge Q as:

$$Q = \sum_{i=0}^{m+1} Q_i = Q_0 + Q_{m+1} + \sum_{i=1}^m B_i D_i v_i \quad (6)$$

where Q_i , B_i and D_i denote the discharges, widths and depths of each sub-section (or panel) i respectively. V_i are the mean normal-to-section velocities computed by integrating the vertical velocity profile. Q_0 and Q_{m+1} correspond to partial discharges near each bank where the subsection velocity is determined by extrapolation.

The uncertainty computation for measurements performed using the velocity-area method with a current-meter is presented in the *ISO 748* standard and expressed as:

$$u_c^2(Q) = u_s^2 + u_m^2 + \frac{\sum_{i=0}^{m+1} Q_i^2 \left[u^2(B_i) + u^2(D_i) + u_p^2(V_i) + \frac{1}{n_i} \left\{ u_c^2(V_i) + u_e^2(V_i) \right\} \right]}{\left(\sum_{i=0}^{m+1} Q_i \right)^2} \quad (7)$$

where uncertainty components $u(x_i)$ arise from error sources due to:

- u_s : residual systematic error after calibration of velocity, width and depth measuring devices,
- u_m : transverse integration of unit flow q_i (limited number m of verticals),
- $u(B_i)$ and $u(D_i)$: random errors in width and depth measurements, respectively,
- $u_p(V_i)$: limited number n_i of point velocity measurements over vertical i ,
- $u_c(V_i)$: current-meter random errors,

- $u_e(V_i)$: limited time of exposure for averaging turbulent velocity fluctuations.

To facilitate the computation, it is often assumed that uncertainty components are roughly equal over the verticals.

For ease of use, Appendix E of the *ISO 748* standard (ISO, 2009) provides informative values of uncertainty components. In many studies, these values are used although it is recommended that the user should independently determine the values of the uncertainties that will apply in a particular case (ISO 2007).

The major drawback of *ISO 748* stems from the use of these informative values. In particular, values of the uncertainty component u_m shown in Appendix E depend only on the number m of verticals without taking into account the spatial distribution of verticals, the complexity of the riverbed shape and the flow distribution. These empirical values are based on non-referenced experiments while most of the computed uncertainty stems from this component. Thus, the use of these values is not recommended.

To address this limitation, three alternative methods were recently developed. The principal difference between these methods lies in the estimation of transverse integration errors (*i.e.* the uncertainty component u_m). The $Q+$ method (Le Coz et al. 2012) proposes to set an angle (parameter estimated by the operator) that defines the maximum transverse slope in order to quantify riverbed variability. That way, errors in the transverse integration of areas and velocities, respectively, can be computed separately. Despax et al. (2016) proposed an objective method for setting the transverse slope angle as follows:

$$\alpha = \frac{\sum Q_i |\alpha_i|}{Q} \quad (8)$$

where α_i is the mean slope (expressed in degrees) of each sub-section:

$$\alpha_i = \frac{180}{2\pi} \left\{ \arctan \left| \frac{D_i - D_{i-1}}{x_i - x_{i-1}} \right| + \arctan \left| \frac{D_i - D_{i+1}}{x_i - x_{i+1}} \right| \right\} \quad (9)$$

where D_i and x_i denote respectively the depth and the position of each vertical i .

The Interpolation Variance Estimator approach (Cohn et al. 2013) estimates both the deviation of depth and velocity measurements from the linear interpolation of adjacent measurements since larger departures from linearity in the measured profiles reflect larger uncertainties.

The *Flaure* method (Despax et al. 2015, 2016) allows the estimation of the cross-sectional interpolation errors based on an analogy analysis using high-resolution reference gaugings. The uncertainty component u_m depends on the riverbed shape and flow distribution complexity and also on a sampling qual-

ity index (*SQI*) that evaluates the quality of the measurement sampling.

The four analytical methods (*ISO 748*, $Q+$, *IVE* and *Flaure*) have in common not to consider the possible correlations between the measurement process errors (as expressed in Equation (3)) although it can be included in the u_s catch-all term. A direct application of the GUM is proposed by Muste et al. (2012) but the correlated terms were also neglected.

2.3 Field inter-laboratory experiments

In situ collaborative inter-laboratory experiments are a valuable tool for empirically estimating the uncertainty of streamgauging techniques in given measurement conditions. It consists of repeated measurements of the same measurand by several participants (or laboratories) using the same procedure. We notice that a laboratory is the combination of one or several operator(s), their equipment and their measurement location.

The error model is:

$$Q_{i,k} = Q_{true} + \delta + B_i + e_{i,k} + \sum_j c_j x_j \quad (10)$$

where $Q_{i,k}$ is the k^{th} instantaneous discharge measurement performed by the i^{th} laboratory, Q_{true} is the true discharge value (unknown), δ the bias associated with the measurement technique (the same for all the laboratories), B_i and $e_{i,k}$ the systematic (bias) and random errors related to the i^{th} laboratory and its k^{th} measurement. The last term is the summation of all the effects subject to deviations that are not covered by the experiment.

It is assumed that the systematic and random errors (B_i and $e_{i,k}$) follow a Gaussian distribution of mean zero and standard deviation σ_L and σ_r , respectively. Then, ISO 5725-2 (1994) standard provides procedures for computing the variance estimators s_L (inter-laboratory standard deviation) and s_r (repeatability standard deviation). It is important to notice that inter-laboratory experiments provide an estimation of the repeatability and reproducibility of a measurement technique, not of the uncertainty of a measurement result (cf. ISO 5725-1, 1994).

Assuming that all the non-negligible error sources were covered through the inter-laboratory experiments, ISO 21748 (2010) establishes the link between the combined standard uncertainty of the discharge $u_c(Q)$ and the standard-deviation estimators s_L and s_r and leads to the following Equation (11):

$$u_c^2(Q) = s_r^2 + s_L^2 + u^2(\hat{\delta}) = s_R^2 + u^2(\hat{\delta}) \quad (11)$$

where $u(\hat{\delta})$ is the standard uncertainty related to the estimation of the stream-gauging technique bias and s_R is the reproducibility standard deviation.

The limited numbers, p and n , of participants and repeated measurements, respectively, imply some uncertainty in the estimates of standard deviations and in the results of the inter-laboratory experiments. The ISO 5725-1 (1994) standard introduces the following approximate equation for assessing the relative uncertainty of s_R estimate with a probability level of 95%:

$$A_R = 1.96 \sqrt{\frac{p \left[1 + n(\gamma^2 - 1) \right]^2}{2\gamma^4 n^2 (p-1)p} + (n-1)(p-1)} \quad (12)$$

where $\gamma = \sigma_R / \sigma_{R'} \approx s_R / s_{r'}$.

Neglecting the stream-gauging technique bias $u(\hat{\delta})$ in Equation 11, the uncertainty interval around the “true” discharge uncertainty (at 95% level of confidence) can be expressed as:

$$\frac{2s_R}{1 + A_R} < U(Q) < \frac{2s_R}{1 - A_R} \quad (13)$$

2.4 Overview of the methods

As mentioned, the ISO 21748 (2010) allows to link the standard-deviation estimators s_L and s_r computed during a field experiments and the combined standard uncertainty of the discharge $u_c(Q)$. Both methods can be confronted and summarized within the same synoptic chart (Figure 1) as suggested by Blanquart (2013).

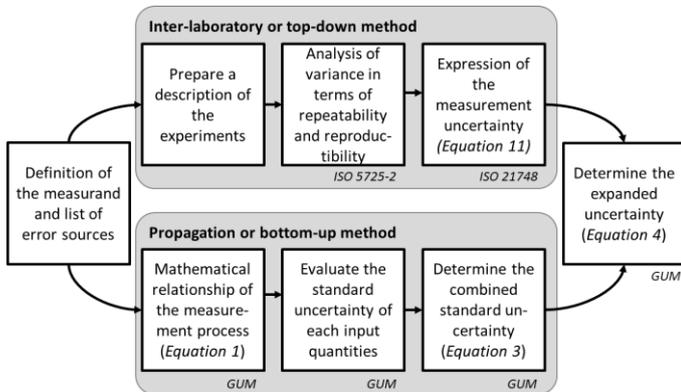


Figure 1. Synoptic chart of inter-laboratory comparisons and propagation methods (adapted from Blanquart 2013).

3 RESULTS

Two field inter-laboratory experiments were conducted in 2011 (Ouvèze and Toulourenc rivers) and 2013 (Cernon and Durzon rivers) in four small rivers (see Figures 2 and 3) in south-east of France with current-meters on wading rods.

Table 1 presents the characteristics of the four sites during the study.



Figure 2. Participants of the 2011 inter-laboratory experiments at Entreachaux site (Ouvèze river).



Figure 3. Participants of the 2013 inter-laboratory experiments at Nant site (Durzon river).

Table 1. Characteristics of the four sites used for the two field inter-laboratory experiments.

River (Gauging station)	Mean Dis. [m ³ /s]	Width [m]	Area [m ²]	Mean Vel. [m/s]
Ouvèze (Entreachaux)	1.14	8.9-11.8	2.2-3.0	0.39-0.55
Toulourenc (Malaucène)	0.35	3.9-6.9	0.9-1.2	0.28-0.50
Cernon (St Georges de Luzençon)	0.75	8.4-15.7	2.8-5.0	0.15-0.33
Durzon (Nant)	0.92	4.7-7.0	1.8-3.0	0.29-0.56

* min-max.

Dis.: discharge / Vel.: velocity

For each river, two repeated measurements were made excepted for the Durzon site where two runs of two were performed. For each gauging site, the same protocol was used (*i.e.* 3 points per vertical, 15 or 20 verticals and a sampling time set to 30 seconds at each point). The distance between each operator varied from 5 m to 15 m for all sites. Each downstream operator started the measurement from the opposite bank of the upstream operator in order to reduce flow disturbance.

Figure 4 shows the distribution of measured discharge during the four inter-laboratory experiments.

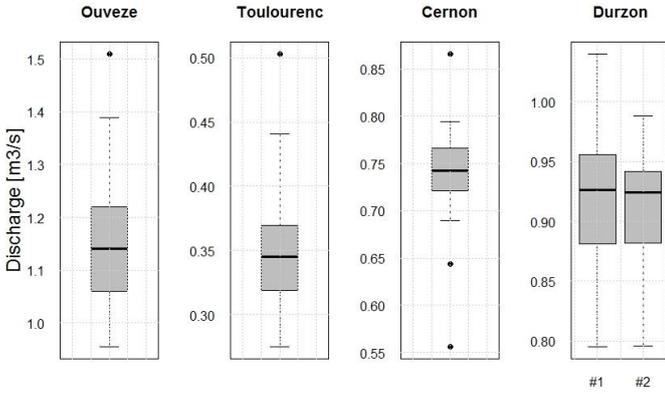


Figure 4. Boxplot of discharge estimates at the four sites.

Both approaches (*i.e.* analytical and empirical estimation of the uncertainty through collaborative inter-laboratory experiments) have been applied and results are confronted in this study.

The empirical estimation of the uncertainty has yielded results summarized in Table 2.

Table 2. Expanded uncertainties (with a probability level of 95%) obtained from the inter-laboratory comparisons.

River	Dis. [m ³ /s]	U(Q) [CI] (k=2)	Number of	
			Lab.	Ver.
Ouvèze	1.14	15% [11-24%]	11	15
Toulourenc	0.35	16% [12-25%]	11	15
Cernon	0.75	11% [8-17%]	12	20
Durzon (#1)	0.92	10% [8-16%]	13	15
Durzon (#2)	0.92	9% [6-15%]	11	15

Dis.: discharge

CI: confidence interval computed following Equation 13.

Lab.: laboratories

Ver.: verticals.

The analytical estimates of uncertainty are presented in the Figure 5.

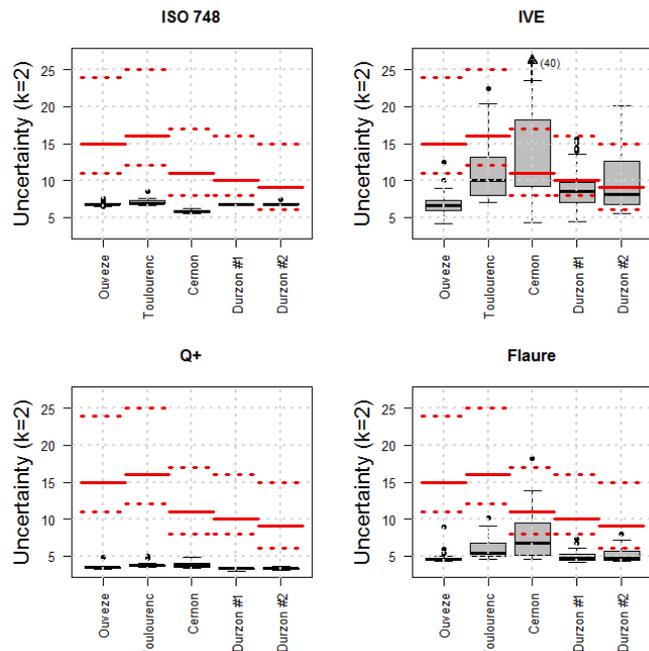


Figure 5. Boxplot of uncertainties using the four analytical methods in relation to the empirical estimation of uncertainty (red solid lines) with its interval of confidence (red dotted

lines) computed following Equations 12 and 13. Note that the maximum value of uncertainty is 40% for the *IVE* method.

The empirical estimation of uncertainty, at 95% level of confidence, ranges from 10% (2013 experiments) to 15% (2011 experiments) while the four analytical methods give lower uncertainties (on average between 3.5% and 7% for *ISO 748*, *Q+* and *Flaure* methods) except for *IVE* method which is ranging from 7% to 14%.

The results show that *ISO 748* standard depends only on the number of vertical without considering the lateral distribution of depths and velocities as already highlighted by other studies (Le Coz et al. 2012, Despax 2016). In both experiments, the value of uncertainty is quite constant around 7% for gaugings performed with 15 verticals. On the other side, the *IVE* method is very sensitive to the lateral gradients of depth and velocity. It explains the observed variability of uncertainties computed.

The *Flaure* and the *IVE* methods seem to catch properly the lateral distribution of depths and velocities, especially for the Cernon stream-gaugings. In terms of medians *Q+* and *Flaure* methods are consistent together but the *Q+* method shows a low variability and computed uncertainties are about half of the empirical estimation of uncertainty.

4 DISCUSSIONS

The foregoing discussion describes two apparently different approaches to the evaluation of uncertainty. The four analytical methods estimate the uncertainty in the form of a variance on the basis of variances associated with inputs to a mathematical model. On the other hand, the inter-laboratory method uses the fact that, if those same influences vary representatively during the course of a reproducibility study, the observed variance is a direct estimate of the same uncertainty.

In practice, it has been observed that analytical uncertainties are about half of the empirical estimation of uncertainty except for the *IVE* method. It seems that the analytical methods could underestimate the uncertainty and/or the empirical method could overestimate the uncertainty. Some reasons that could explain these differences are presented below.

4.1 Limitations of inter-laboratory method

During field inter-laboratory experiments, discharge and hydraulic conditions should be steady. In natural conditions, it is difficult to guarantee a constant discharge. In 2011, the discharge decreased by around 8% and increased by 15% for the Ouveze and the Toulourenc rivers respectively while the observed

discharge was quite stable in 2013. It could lead to an overestimation of the uncertainty.

It appears that using the same measurement procedure may be a limitation. For instance, the specified number of verticals was not necessarily suitable to all types of cross-sections. Given the variability of all cross-sections (see Table 2), the sampling strategy was not the same for each gauging. In the same way, the required sampling time (for averaging turbulent velocity fluctuations) set at 30 seconds may be unsuitable for measuring low velocities especially when using a mechanical current-meter. It is a specific problem in the field of hydrometry. The experimental design should be the same for all the participants although the velocity-field and the cross-section are different for each participant.

During field experiments, specific attention on reducing flow disturbance and interferences by operators and instruments was paid but it probably led to disturbance on velocity profiles. It could thus induce a higher variability in observed variance and hence in the empirical uncertainty estimate.

On the other hand, all the effects subject to deviations were not necessarily covered by the experiment. The lack of discharge reference (or at least its estimation) may also underestimate the uncertainty since the standard uncertainty related to the estimation of the stream-gauging technique bias $u(\hat{\delta})$ was neglected.

Other assumptions such as equally skilled operators, equally performant instruments, and equally favorable cross-sections may have not been fully met and those influences are difficult to estimate.

From a mathematical point of view, the observed variance is a good estimate of the uncertainty when the sample is large. However the number of repeated discharge measurements and the number of participants are limited. In particular, for long-lasting stream-gauging techniques, such as current-meters on wading rods in natural streams, it is difficult to repeat the measurement more than 2 times while maintaining steady flow conditions. It has been demonstrated that it leads to large uncertainties in the uncertainty estimates (Despax et al., 2014). For the Cernon river field experiment, the uncertainty estimate is between 8% and 17%, at 95% level of confidence (see Figure 5). However, this interval does not explain the gap between both approaches.

4.2 Limitations of analytical methods

The GUM framework is based on two main assumptions:

- Linearity of the function f (the uncertainty propagation method uses a Taylor first-order expansion),
- Normality assumption of the output probability density function,

The numerical approximation error (*i.e.* neglecting the higher-order terms in the Taylor series expansion in GUM) or nonlinearity of the measurement model could increase or even decrease the uncertainty estimate. Monte Carlo simulation method is a useful tool to address these limitations.

The validity of these assumptions can be discussed longer but the main limitations of this method lie in the simplifications made in the implementation of this methodology. Three main limitations must be highlighted. First, the mathematical model used (Equation 2) may be incomplete due to the presence of unknown effects. Some important error sources cannot be put into equations such as operator skills (in particular the position of the rod, verticality, alignment of the instruments perpendicular to the tagline, etc.) and operational conditions.

While implementing analytical methods (*ISO 748*, *IVE*, *Q+* and *Flaure* methods), uncertainty components available in previous studies or assessed by expert knowledge are too often taken as facts. Typical values are suggested in the literature. For instance, the *ISO 748* proposes $u(B_i)=0.5\%$ (*ISO*, 2009) whereas it should be assessed for each measurement condition. For small rivers, this component is probably underestimated. A higher value will automatically increase the final computed uncertainty. All other provided estimates of uncertainty component have to be deeply analyzed before using.

The four analytical methods do not account for the correlated terms (see Equation 3) since the assessment of covariance terms is quite problematic and there is no information available for their estimates. These additional terms are needed as the total discharge is based on a summation of partial flows (denoted Q_i) of the cross-section measured successively with the same instruments (in terms of depths, widths and velocities). Correlations can arise when the same instrument is used to make several measurements. In particular, the use of the same current-meter for a stream-gauging results in systematic errors for all velocity measurements. To avoid the correlated terms, a different current-meter should be used for each point velocity measurement! The correlation can be either positive or negative and can be either a partial or a complete correlation. By taking into account these additional terms and assuming a positive correlation, the final computed uncertainty could increase.

5 CONCLUSIONS

The uncertainty propagation method requires the modeling of the measurement process but it is a practical method for any routine gauging. On the other hand, the inter-laboratory method is based on simple formulae taking the observed repeatability and inter-laboratory variances as inputs in given

conditions. This empirical method is difficult to implement due to costs and difficulties related to their organization. Moreover, results are specific to the site conditions.

Concepts and mathematical tools are not similar amongst the concurrent methods. Differences can be explained by the statistical limitations of the inter-laboratory experiments (limited number of participants and repetitions). Furthermore, some error sources such as the operator skills and flow disturbance by other participants are ignored. It probably results in an overestimation of the uncertainty. Further inter-laboratory experiments will have to take care of these aspects. Reciprocally, some assumptions of the propagation methods are questionable and may not reflect all the active error sources, depending on site and operator conditions.

Both methods have in common not to estimate the stream-gauging technique bias in the absence of accurate enough discharge references in rivers although it should be included in u_s and $u(\hat{\delta})$ terms respectively. Thus, elementary measurements (width, depth, velocity) have to be calibrated against measurement standards. In addition, further research is needed to estimate these terms such as getting accurate discharge reference or numerical flow simulations and numerical measurement simulations together.

This study demonstrates the benefits of comparing both top-down (analytical method) and bottom-up (inter-laboratory method) evaluations of uncertainty. To improve the reliability of discharge uncertainty estimates, the two methods must be alternatively used for further research and applied to other stream-gauging techniques (acoustic Doppler current profiler or surface velocity radar for instance).

In parallel with a best estimation of each uncertainty component, further inter-laboratory experiments with different site conditions could be interesting to better take into account omitted effects such as operator skills. Equally performant instruments, equally favorable cross-sections and a large number of participants could also be preferable.

ACKNOWLEDGMENTS

The authors are grateful to J. Kiang for sharing *IVE* codes and for her collaboration. EDF-DTG which supports this study is gratefully acknowledged, as well as Irstea (Réseau Mesure) for the organization of the inter-laboratory comparisons.

REFERENCES

Blanquart, B. 2013. Panorama des méthodes d'estimation des incertitudes de mesure [Overview of the methods for esti-

- mating measurement uncertainties (in French)]. *La Houille Blanche*, 6:9–15
- Cohn, T., Kiang, J., & Mason, R. 2013. Estimating discharge measurement uncertainty using the interpolated variance estimator. *Journal of Hydraulic Engineering*, 139(5):502–510.
- Despax, A., Dramais, G., and Hauet, A. 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 [Comparison of flow measurements with current meters on wading rods. Intercomparison Days 15, 16 and 17 October 2013. (in French)]. Groupe Doppler Hydrométrie, technical report, 54 p.
- Despax, A., Belleville, A. & Favre, A.-C. 2015. Adaptive method for quantifying uncertainty in discharge measurements using velocity-area method. *Geophysical Research Abstracts*. Vol. 17, EGU2015.
- Despax, A., Perret, C., Garçon, R., Hauet, A., Belleville, A., Le Coz, J., & Favre, A. C. (2016). Considering sampling strategy and cross-section complexity for estimating the uncertainty of discharge measurements using the velocity-area method. *Journal of Hydrology*, 533, 128–140.
- Herschy, R. W. 1993. The velocity-area method. *Flow Measurement and Instrumentation*, 4(1):7–10.
- ISO 1994a. ISO 5725-1 Accuracy (trueness and precision) of measurement methods and results. Part 1: General principles and definitions. International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland, 17 p.
- ISO 1994b. ISO 5725-2 Accuracy (trueness and precision) of measurement methods and results. Part 2: Basic method for the determination of repeatability and reproducibility of a standard measurement method. International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland, 42 p.
- ISO 2007. ISO 1088:2007 - Hydrometry - Velocity-area methods using current-meters. Collection and processing of data for determination of uncertainties in flow measurement.
- ISO 2009. ISO 748:2009 - Hydrometry - measurement of liquid flow in open channels using current-meters or floats. International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland, 47 p.
- ISO 2010. ISO 21748:2010 - Guidance for the use of repeatability, reproducibility and trueness estimates in measurement uncertainty estimation. International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland, 38 p.
- JCGM 2008. Evaluation of measurement data - Guide to the expression of 681 uncertainty in measurement. Guide 100, BIPM.
- Le Coz, J., Camenen, B., Peyrard, X., & Dramais, G. 2012. Uncertainty in open-channel discharges measured with the velocity-area method. *Flow Measurement and Instrumentation*, 26:18–29.
- Le Coz, J., Blanquart, B., Pobanz, K., Dramais, G., Pierrefeu, G., Hauet, A., and Despax, A. 2015. Estimating the uncertainty of streamgauging techniques using in-situ collaborative interlaboratory experiments. *Journal of Hydraulic Engineering* (in press).
- Muste, M., Lee, K., & Bertrand-Krajewski, J. L. 2012. Standardized uncertainty analysis for hydrometry: a review of relevant approaches and implementation examples. *Hydrological Sciences Journal*, 57(4), 643–667.
- WMO 2010. Manual on stream gauging - Vol I. World Meteorological Organization, Geneva, 252 p.

Valorisation des données de jaugeage

Outre l'utilisation des valeurs de débit estimée par les jaugeages pour la construction de la courbe de tarage, les données brutes issues de ces derniers peuvent être utilisées pour conduire des études.

E.1 Analyse de risque en rivière

Une analyse de risque a été conduite sur l'ensemble des stations hydrométriques du réseau EDF-DTG. Celle-ci consiste à tracer les couples profondeur (D_i) - vitesse maximale ($v_{i,j,max}$) mesurés au cours d'un jaugeage au courantomètre sur perche, comme illustré à la figure E.1. Le niveau de risque de chute dans l'eau s'évalue en fonction de la position du couple ($D_i - v_{i,j,max}$) par rapport à des courbes de stabilité et en fonction des gammes de débit mesuré. Les courbes de stabilité dans l'eau, représentées à la figure E.1, ont été définies par une étude interne EDF-DTG (Belleville et Blanchard, 2016; Perret *et al.*, 2017). Ce type d'étude est rare, on peut consulter l'étude de Yobbi *et al.* (1996) pour obtenir d'autres courbes de stabilité. La figure E.1 montre ainsi l'exposition des hydromètres aux risques de chute dans l'eau, classée en cinq niveaux de risque à savoir faible, modéré, fort, très fort et inconsidéré.

E.2 Autres utilisations

Les données issues de jaugeage permettent d'obtenir des profils verticaux de vitesse. Ces profils sont très utiles pour transformer la vitesse de surface mesurée par exemple par un radar (SVR, voir la section 3.1.3) en vitesse moyenne, ou encore afin de caler le coefficient permettant de relier la vitesse mesurée à une station hydrométrique à vitesse témoin à la vitesse débitante (voir section 3.2.3).

Ce type de données peut aussi être valorisé pour l'estimation de la rugosité du lit de la rivière pour les retours d'expérience hydrologiques post-crue, dont la méthodologie est présentée par (Gaume et Borga, 2008). Cette méthode consiste à approximer le débit par application d'une loi de Manning-Strickler (avec comme hypothèse forte un régime permanent uniforme, voir section 1.2.3) grâce à l'estimation de la rugosité du lit K_s ainsi qu'à un relevé topographique des laisses de crue (pour estimer la pente i de l'écoulement) et d'une section en travers (donnant l'aire A et le rayon hydraulique R_h), comme illustré à la figure E.2.

Les jaugeages fournissent également des données utiles pour le calage de modèles hydrauliques.

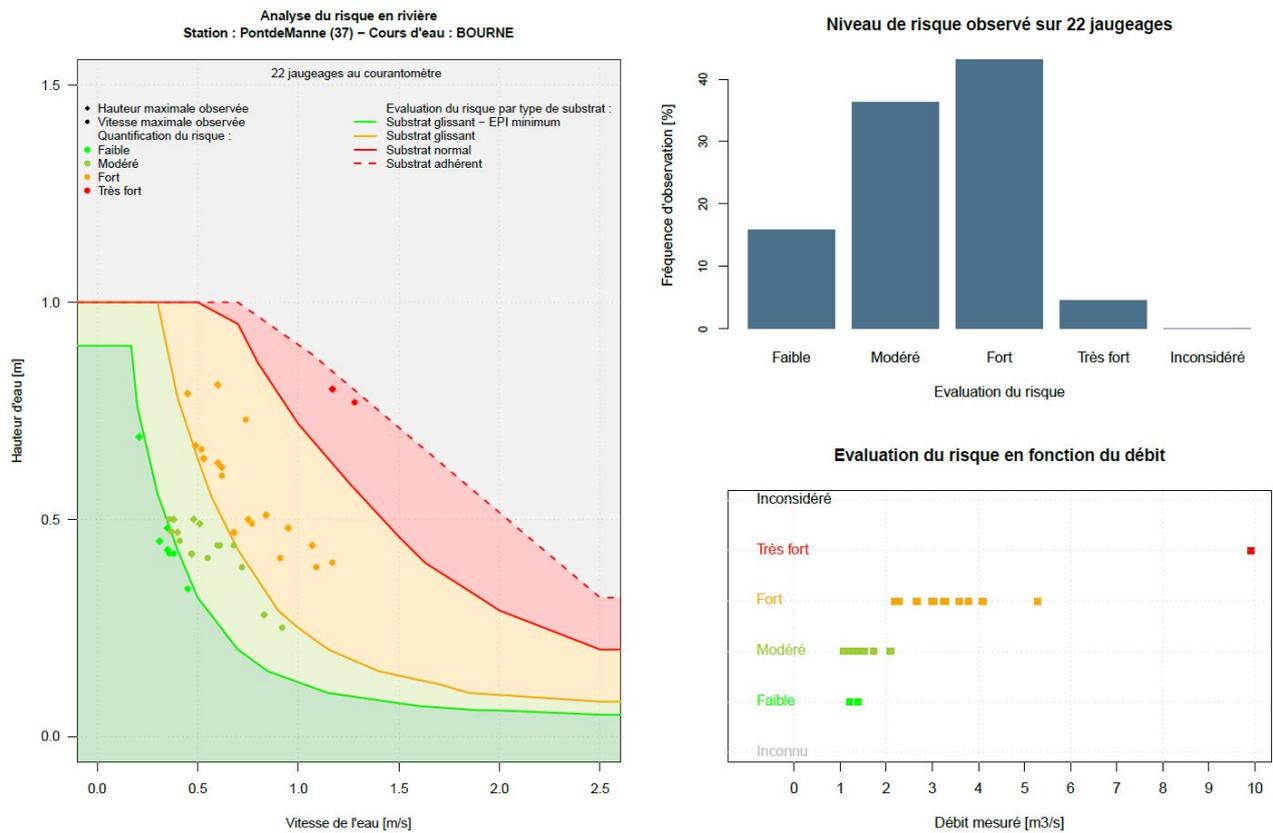


FIGURE E.1 – Analyse de risque conduite sur la station de Pont de Manne. A gauche : position des jaugeages par rapport à des courbes de stabilité pour la classification des niveaux de risque. A droite : répartition du nombre de jaugeages en fonction du niveau de risque.

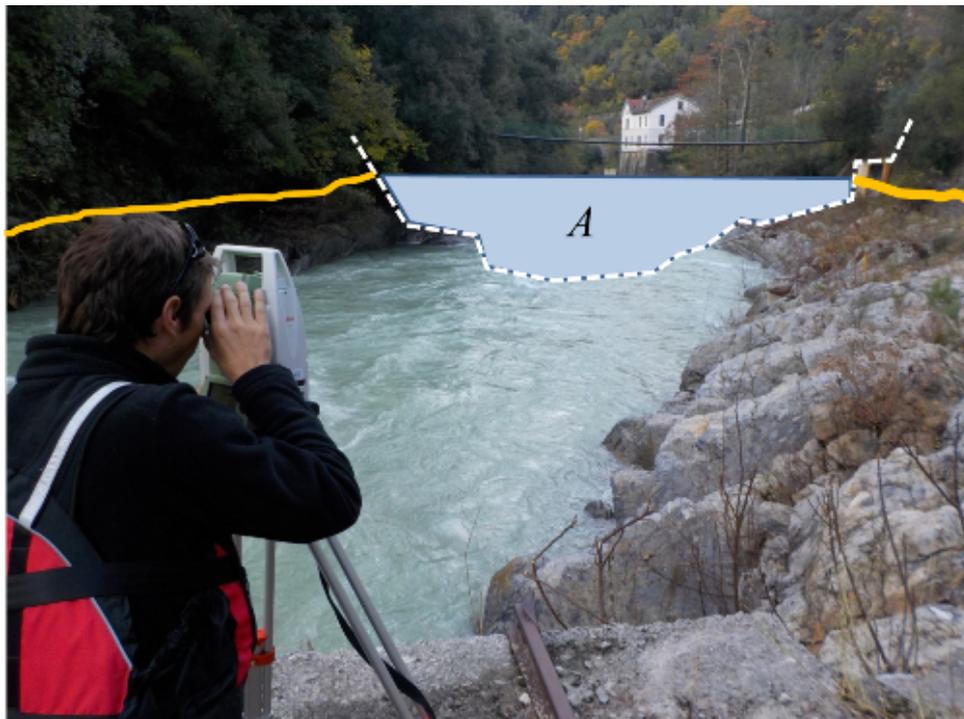


FIGURE E.2 – Relevé topographique de laisses de crue sur la Roya, en aval de l'usine hydro-électrique de Breil-sur-Roya (Alpes-Maritimes), suite à la crue du 05/11/2014. La zone bleue correspond à la section mouillée et les lignes orange aux laisses de crue. Source : A. Despaix (photo) et D. Sevrez (schéma).

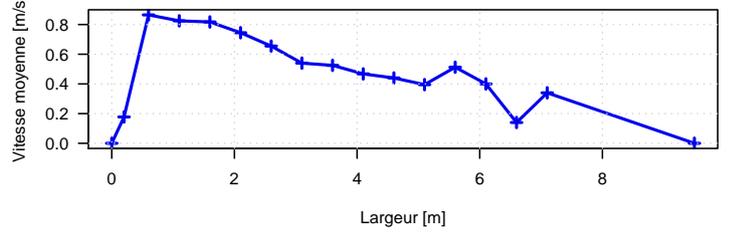
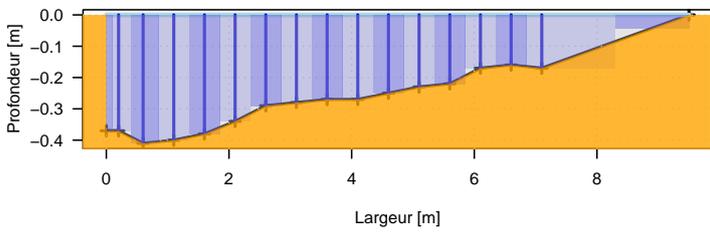
Jaugeages des essais interlaboratoires

Les figures suivantes représentent les profils bathymétriques et de vitesses moyennes mesurés lors des deux campagnes d'essais interlaboratoires. La première lettre des titres représente le cours d'eau :

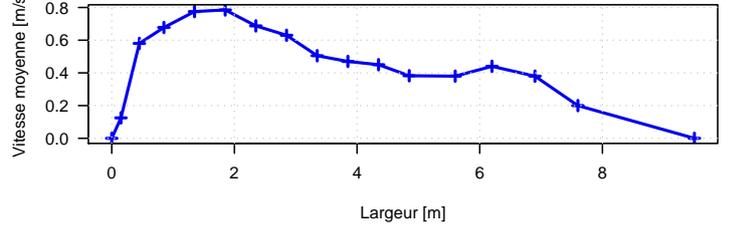
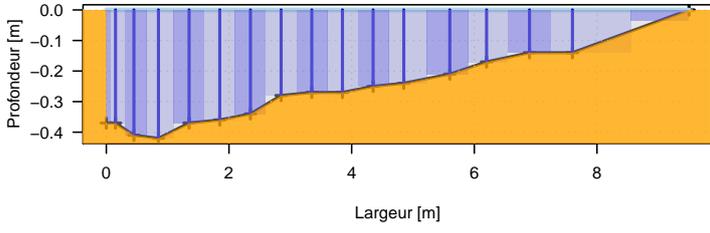
- O : Ouvèze,
- T : Toulourenc,
- C : Cernon,
- D : Durzon.

Les chiffres correspondent au numéro de la section. La section 1 désignant la section la plus en amont. Le type d'appareil est représenté par la séquence de 3 lettres.

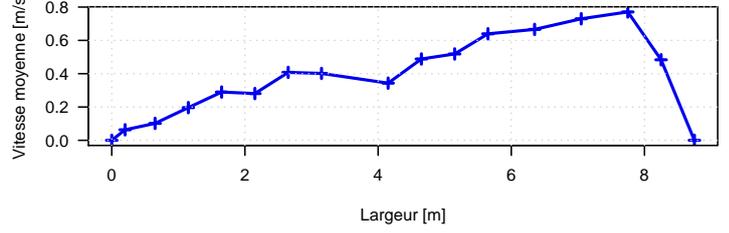
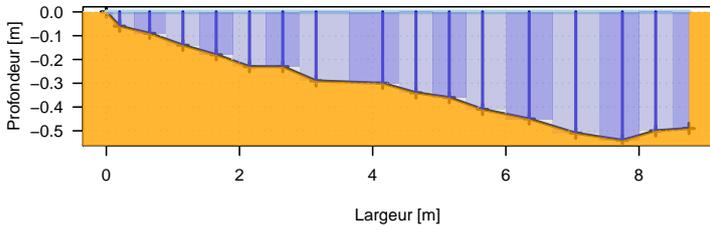
O_01_MOU_1_SPC_a.dat.rda



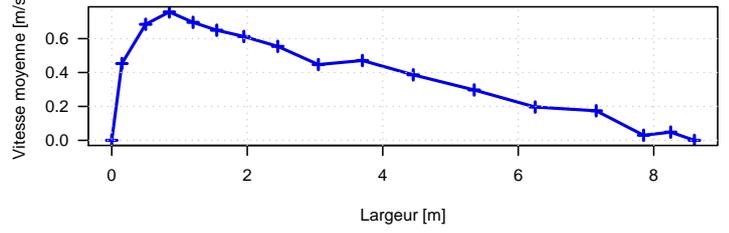
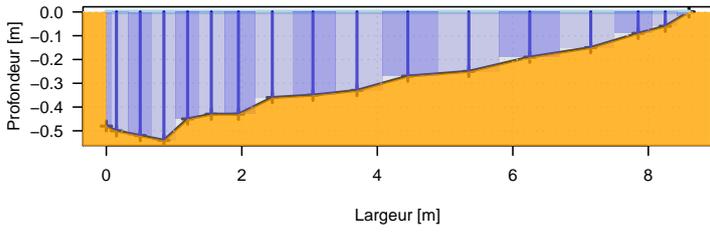
O_01_MOU_1_SPC_b.dat.rda



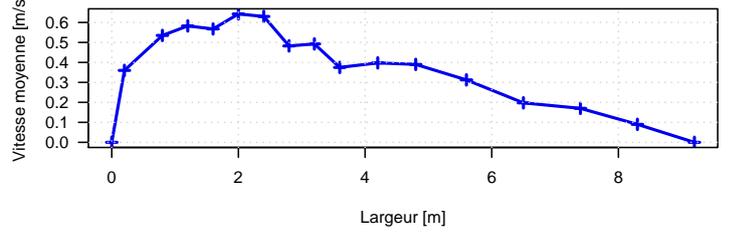
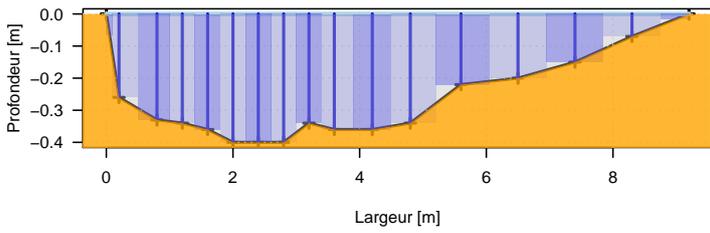
O_02_ADV_1_CLY_a.dat.rda



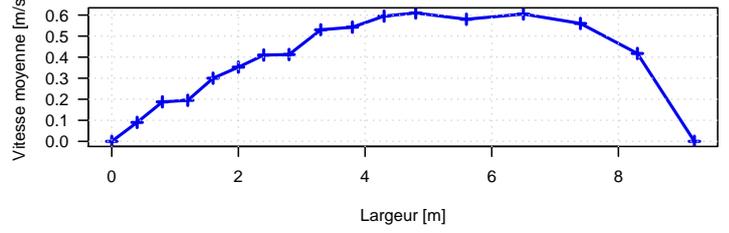
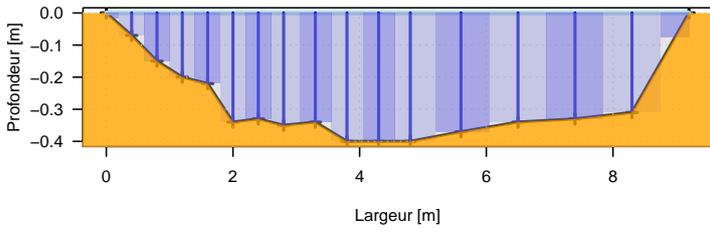
O_02_ADV_1_CLY_b.dat.rda



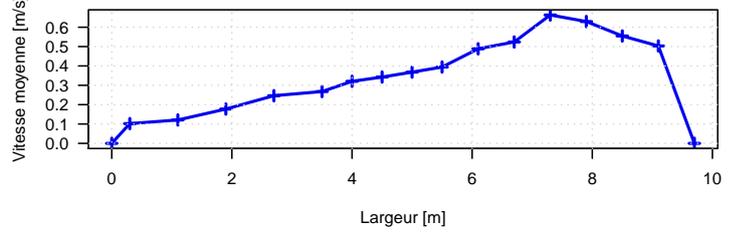
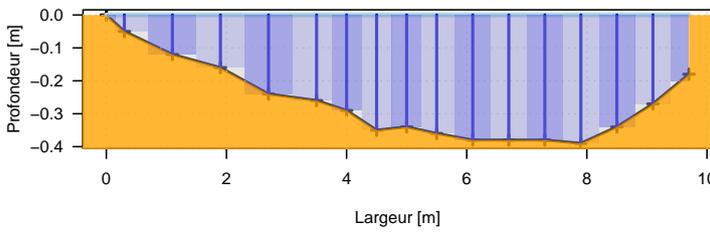
O_03_FLO_1_CAX_a.dat.rda



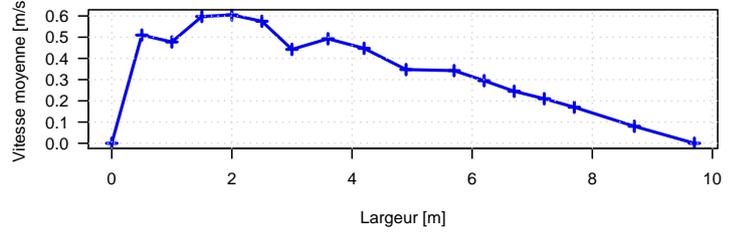
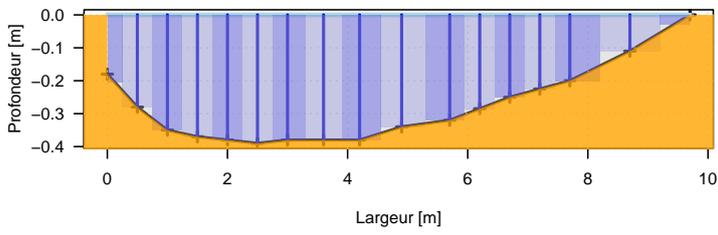
O_03_FLO_1_CAX_b.dat.rda



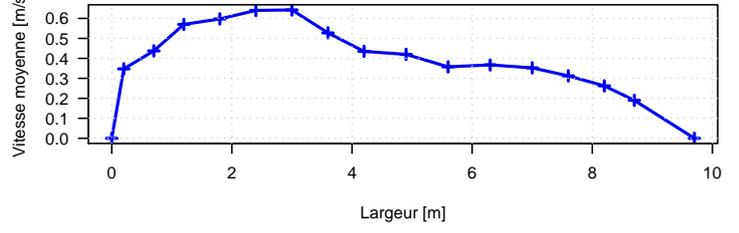
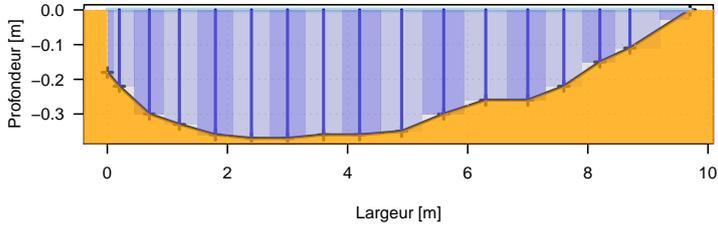
O_04_FLO_1_CBX_a.dat.rda



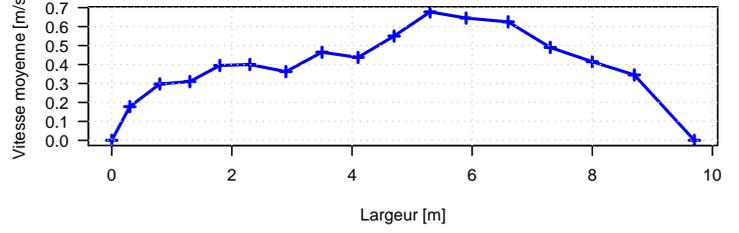
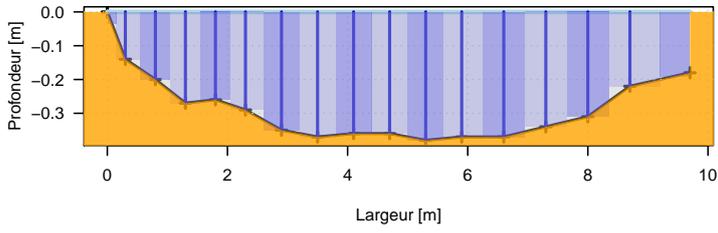
O_04_FLO_1_CBX_b.dat.rda



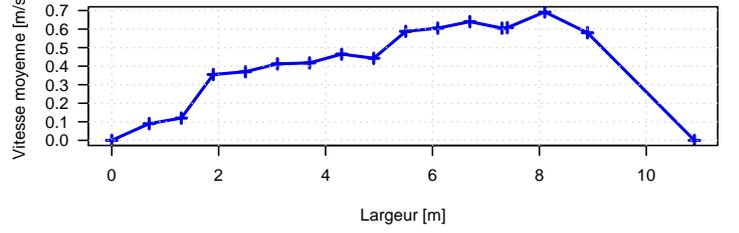
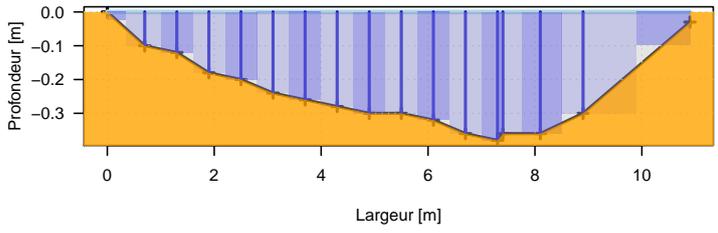
O_05_NAU_1_DRE_a.dat.rda



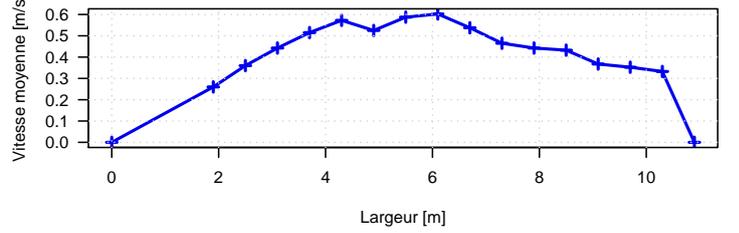
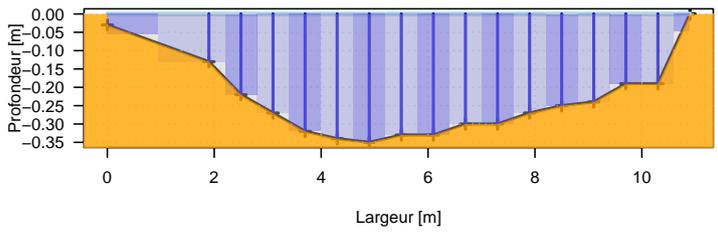
O_05_NAU_1_DRE_b.dat.rda



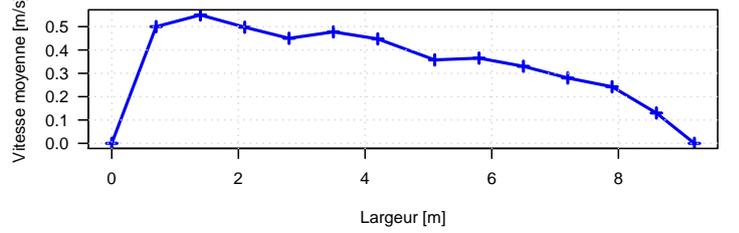
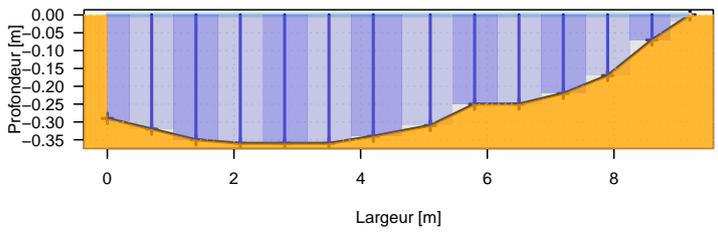
O_06_ADV_1_CMO_a.dat.rda



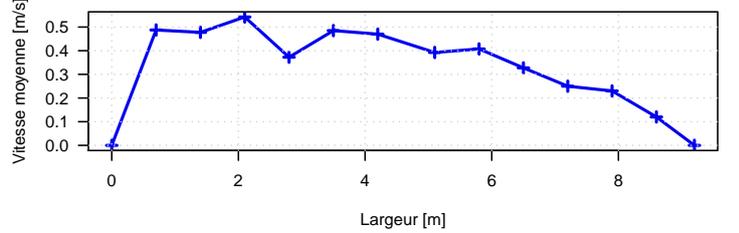
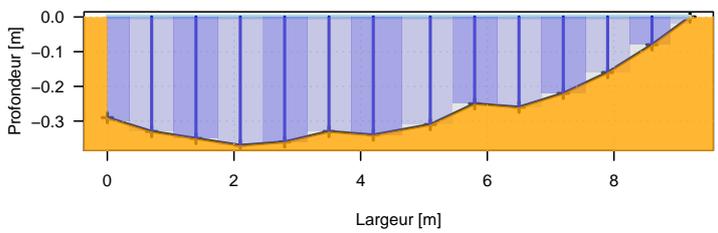
O_06_ADV_1_CMO_b.dat.rda



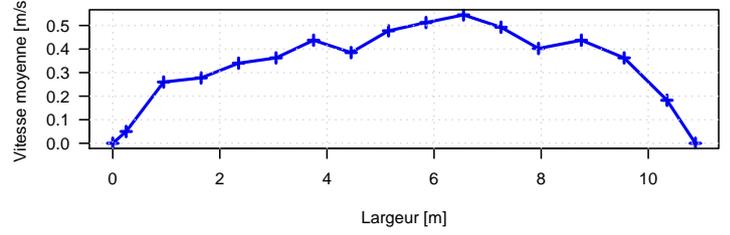
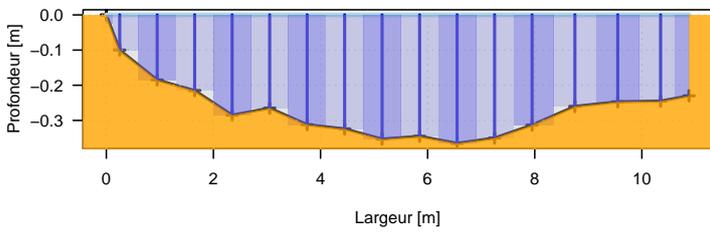
O_07_MOU_1_DRE_a.dat.rda



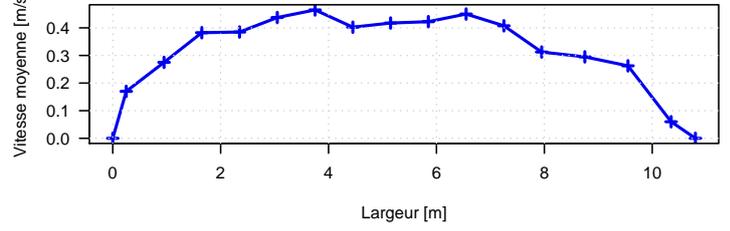
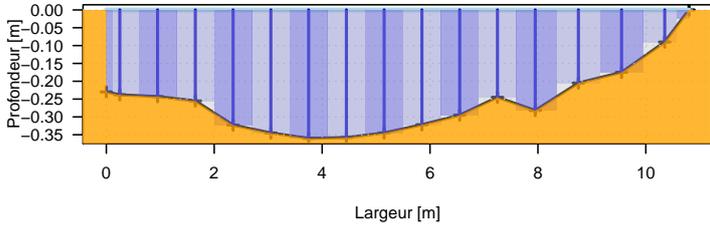
O_07_MOU_1_DRE_b.dat.rda



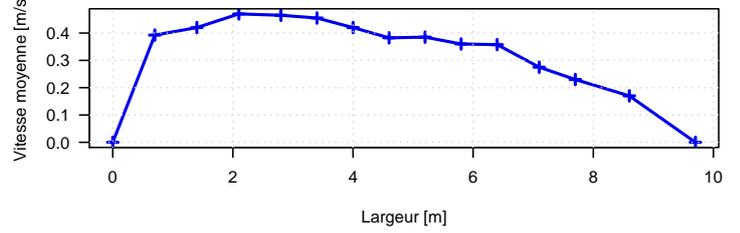
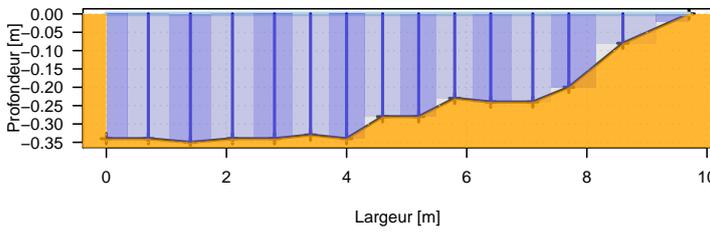
O_08_FLO_2_CAN_a.dat.rda



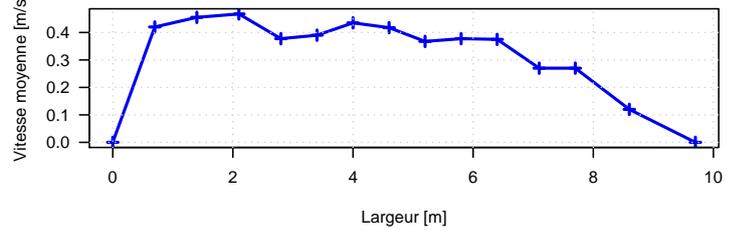
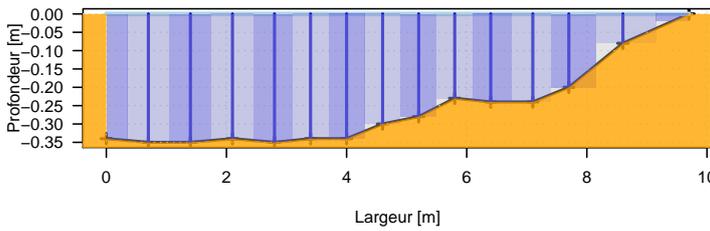
O_08_FLO_2_CAN_b.dat.rda



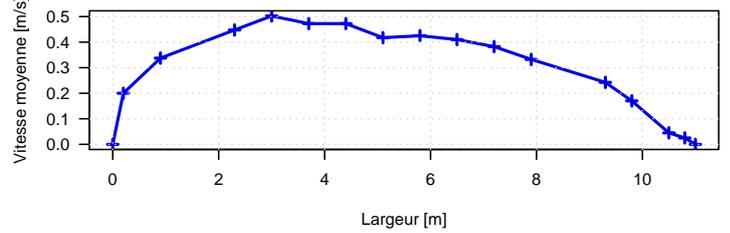
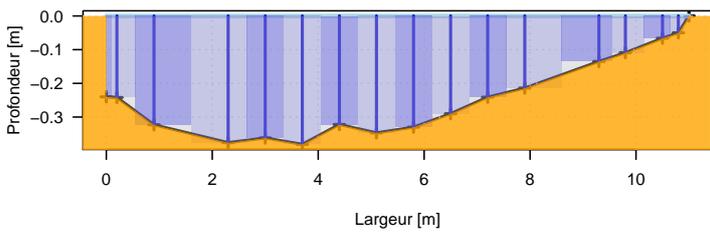
O_09_FLO_1_CAN_a.dat.rda



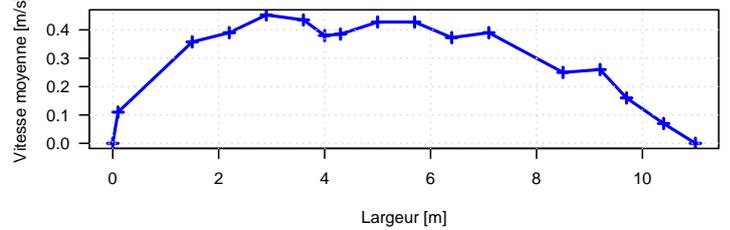
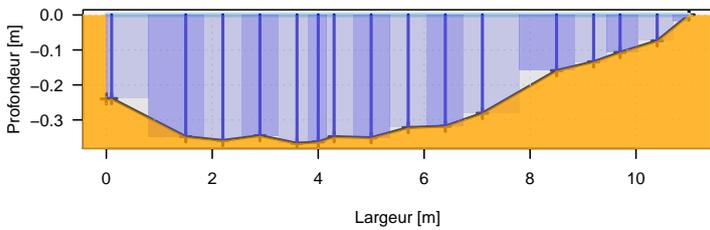
O_09_FLO_1_CAN_b.dat.rda



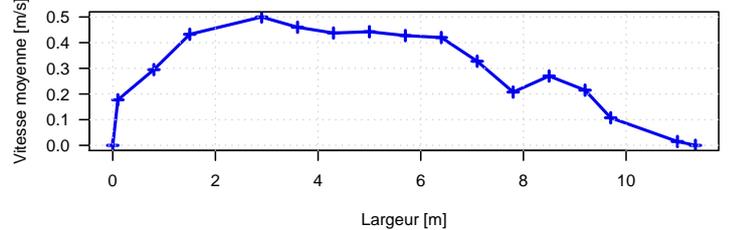
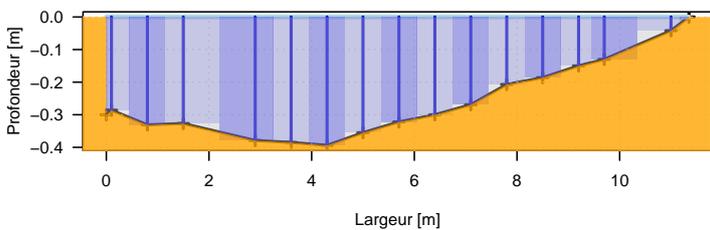
O_10_ADC_2_SCP_a.dat.rda



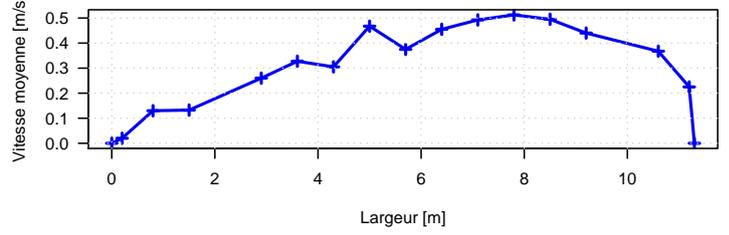
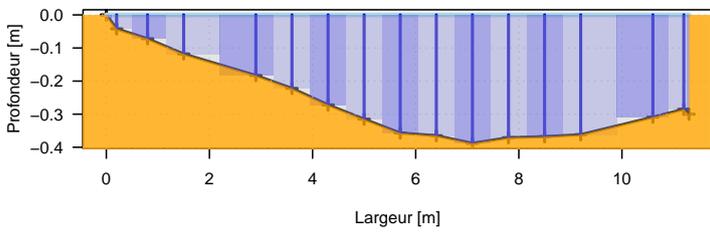
O_10_ADC_2_SCP_b.dat.rda



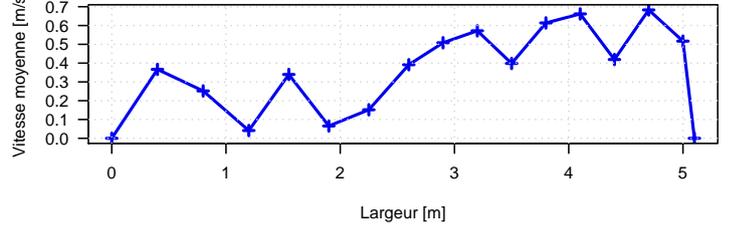
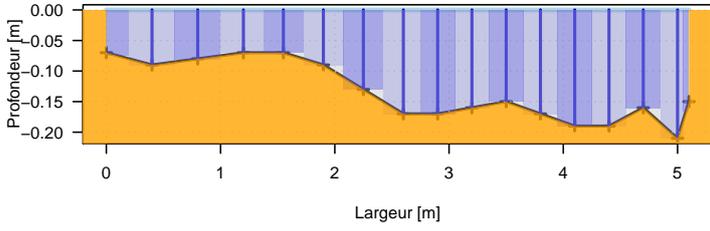
O_11_ADC_1_SCP_a.dat.rda



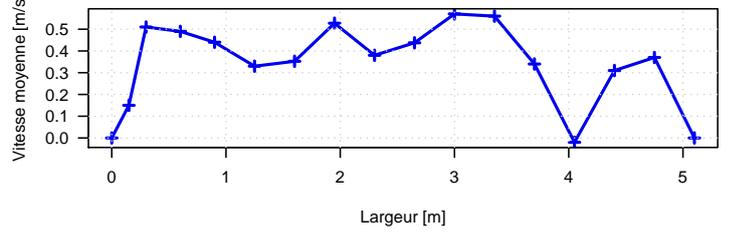
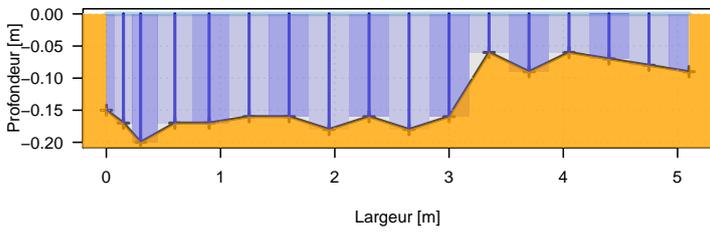
O_11_ADC_1_SCP_b.dat.rda



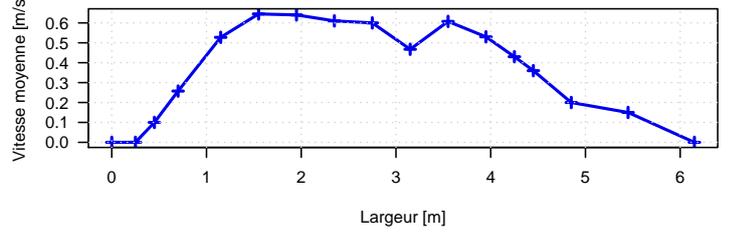
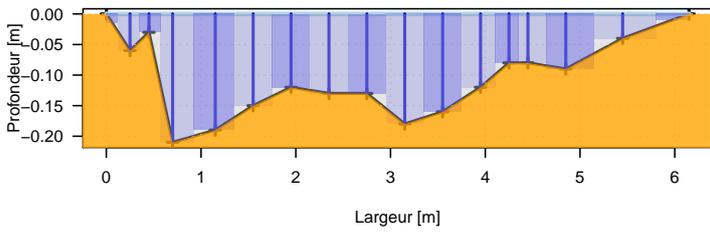
T_02_ADV_1_CLY_a.dat.rda



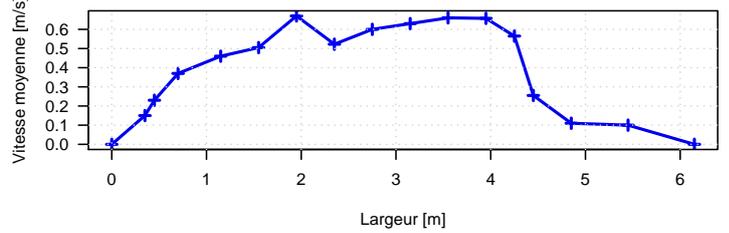
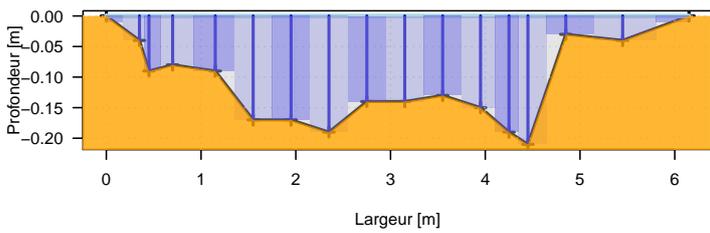
T_02_ADV_1_CLY_b.dat.rda



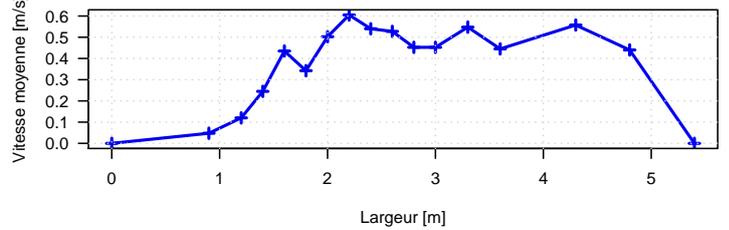
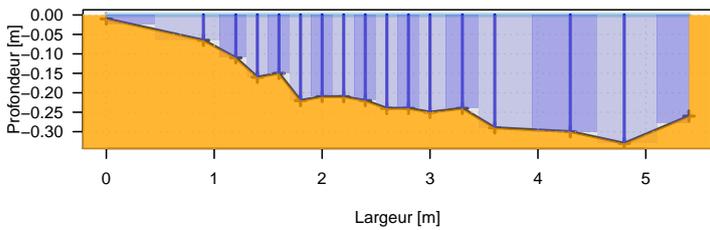
T_03_FLO_1_CAX_a.dat.rda



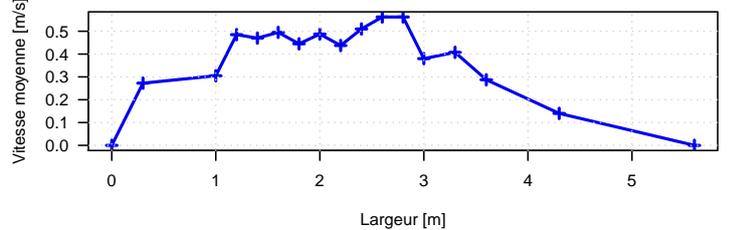
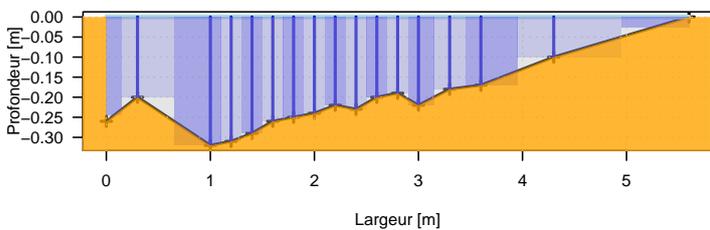
T_03_FLO_1_CAX_b.dat.rda



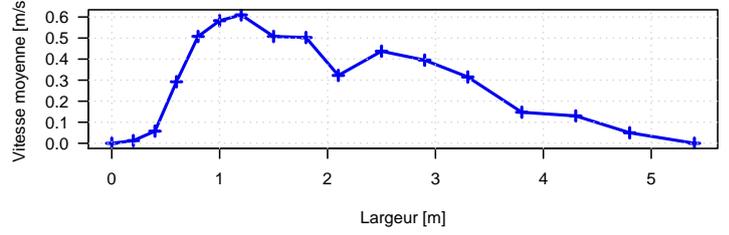
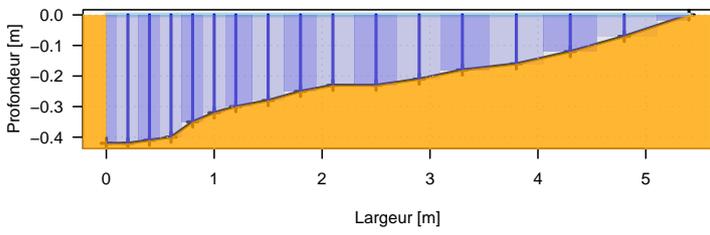
T_04_FLO_1_CBX_a.dat.rda



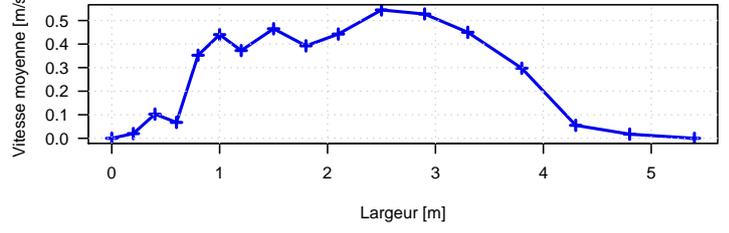
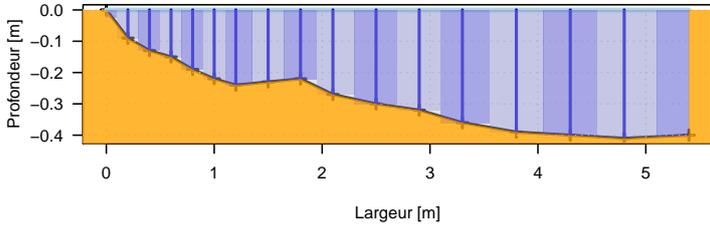
T_04_FLO_1_CBX_b.dat.rda



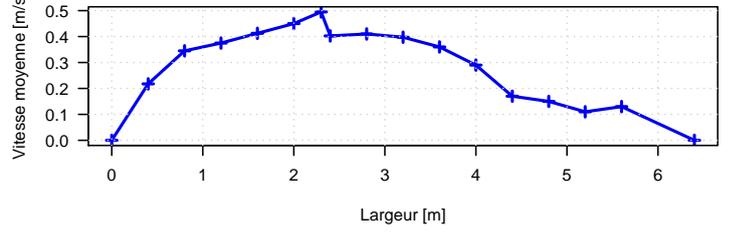
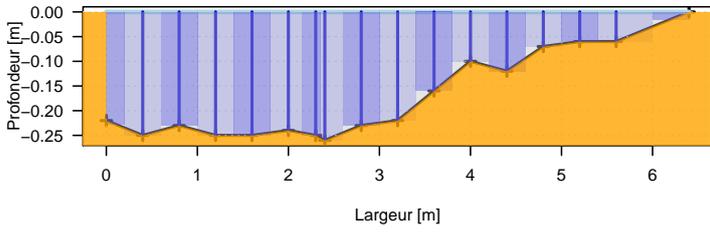
T_05_NAU_1_DRE_a.dat.rda



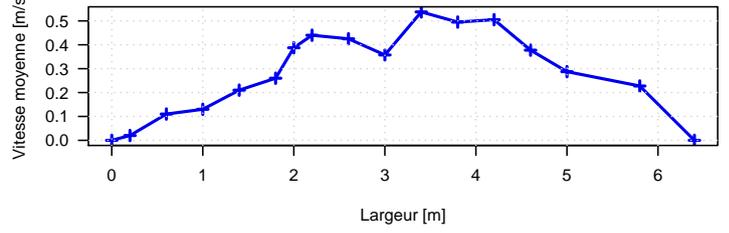
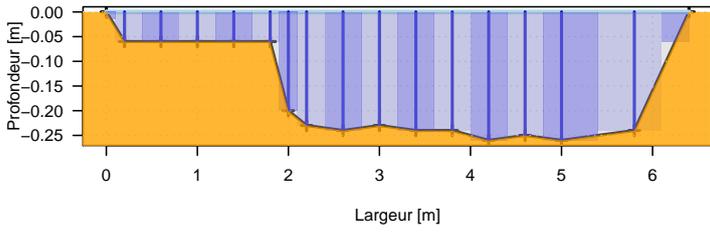
T_05_NAU_1_DRE_b.dat.rda



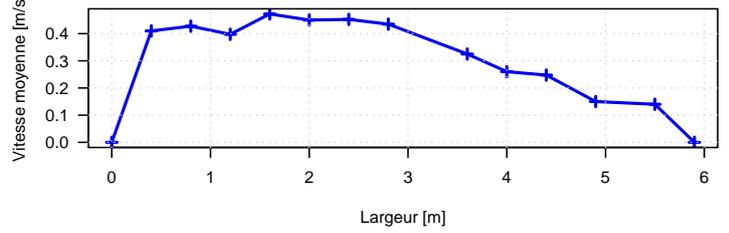
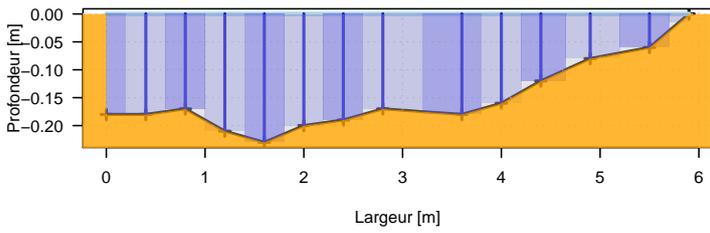
T_06_ADV_1_CMO_a.dat.rda



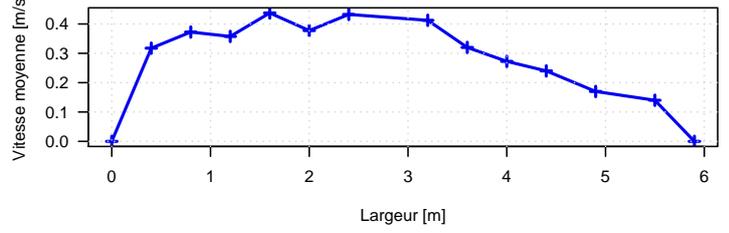
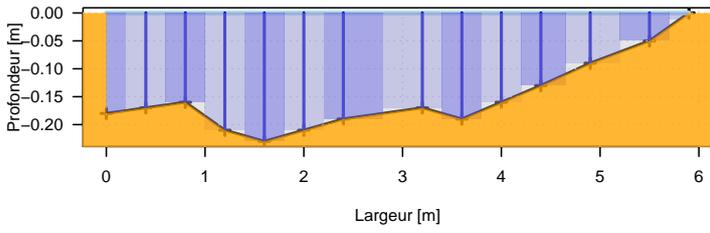
T_06_ADV_1_CMO_b.dat.rda



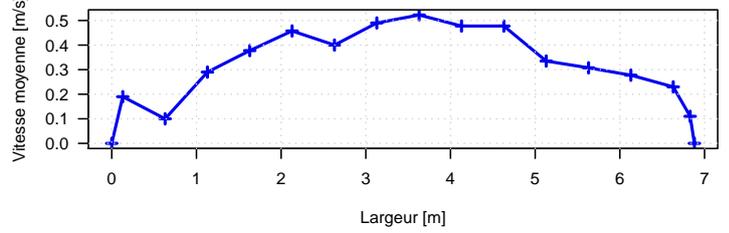
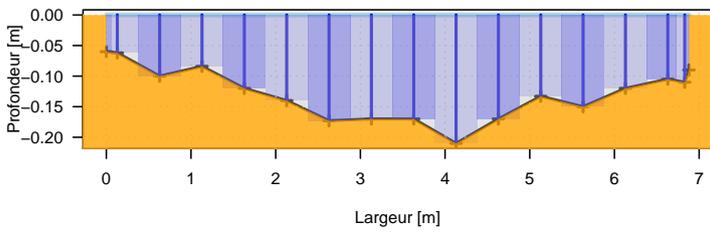
T_07_MOU_1_DRE_a.dat.rda



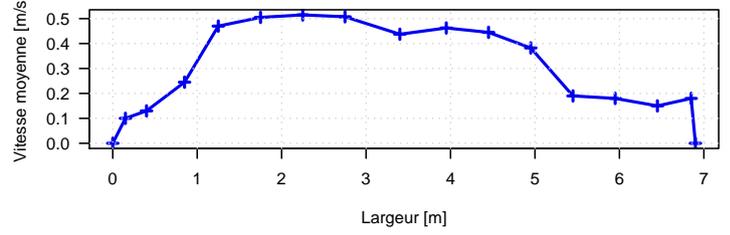
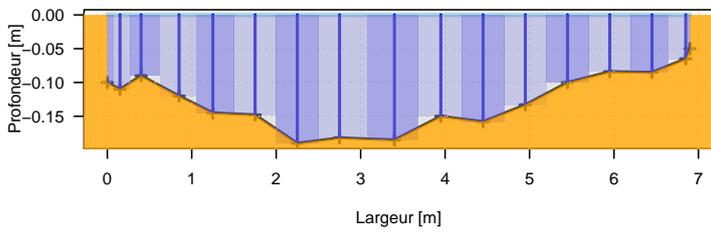
T_07_MOU_1_DRE_b.dat.rda



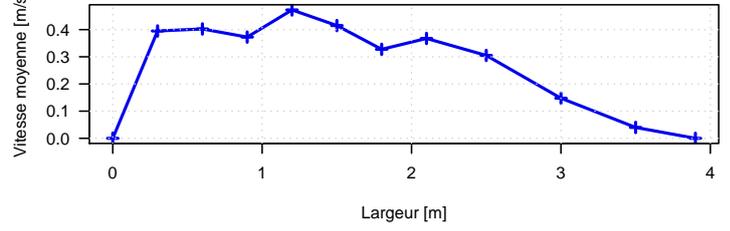
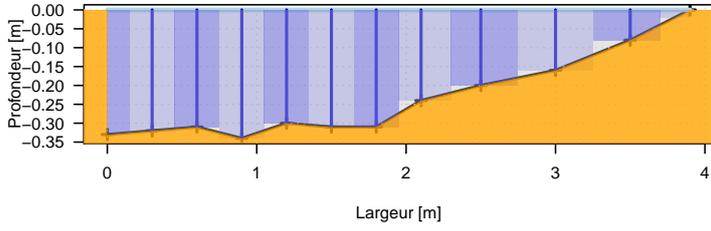
T_08_FLO_2_CAN_a.dat.rda



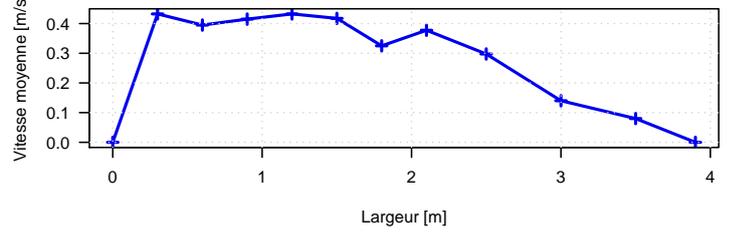
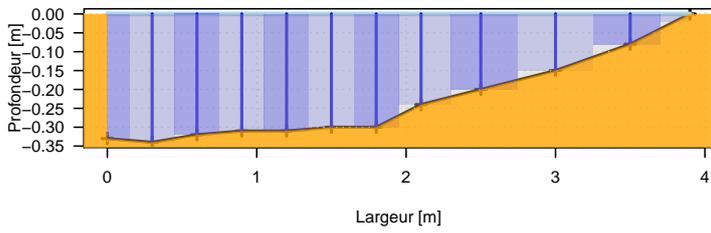
T_08_FLO_2_CAN_b.dat.rda



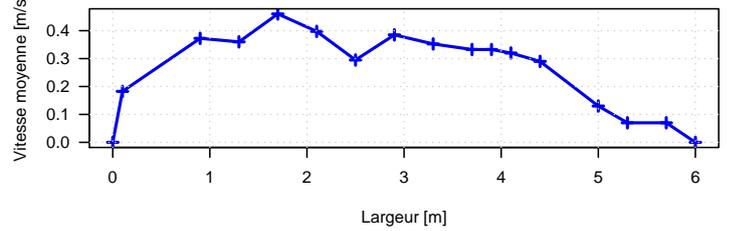
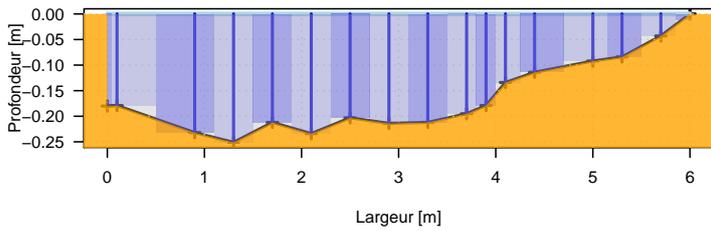
T_09_FLO_1_CAN_a.dat.rda



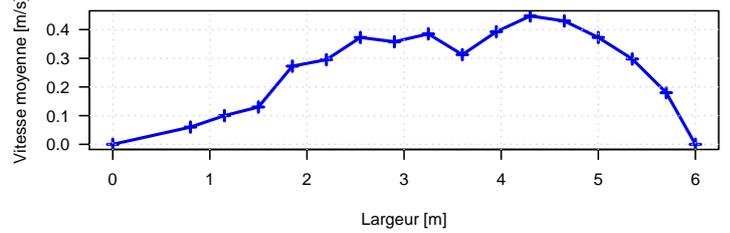
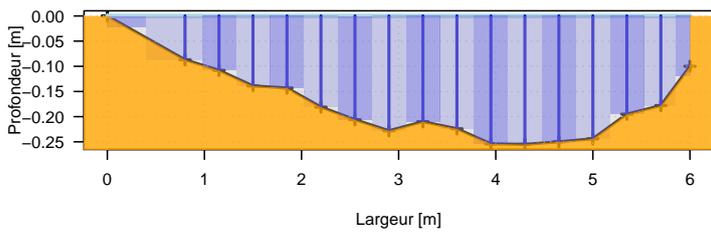
T_09_FLO_1_CAN_b.dat.rda



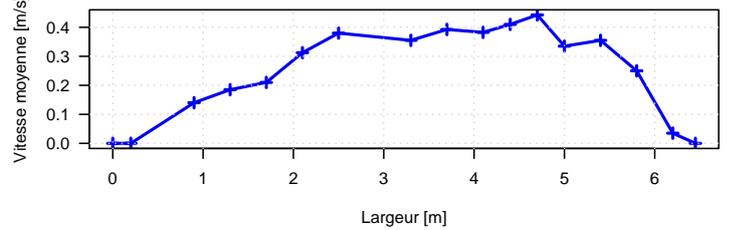
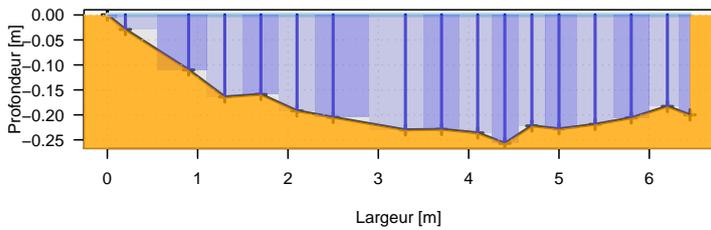
T_10_ADC_2_SCP_a.dat.rda



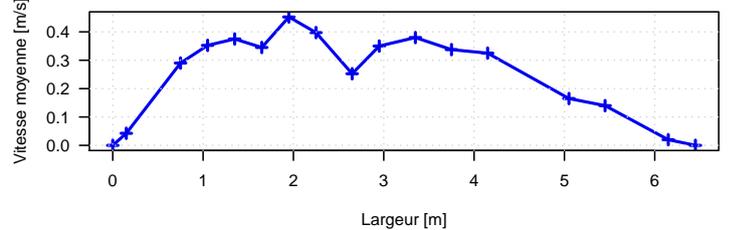
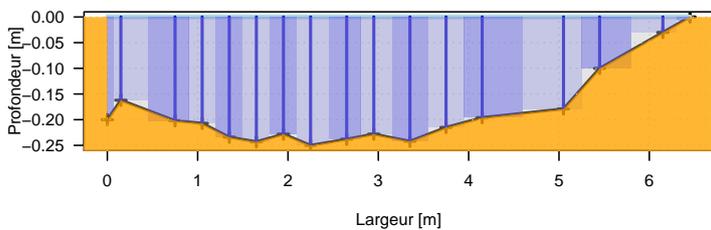
T_10_ADC_2_SCP_b.dat.rda



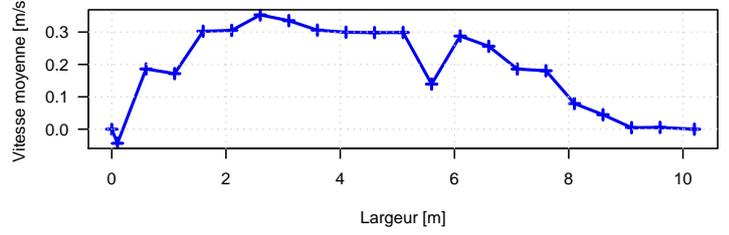
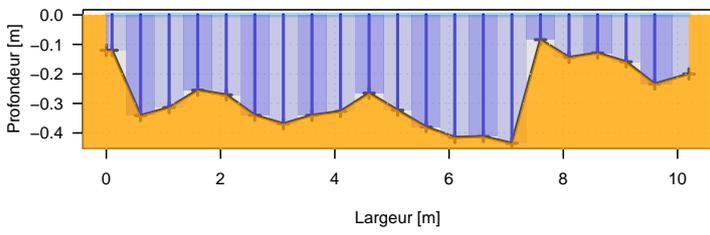
T_11_ADC_1_SCP_a.dat.rda



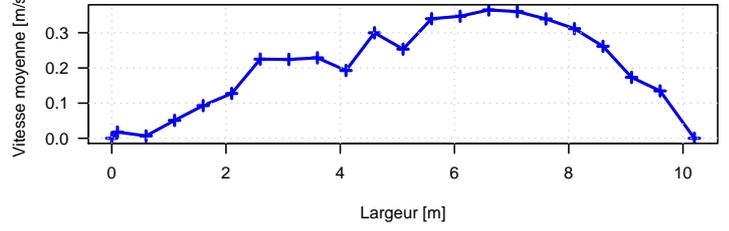
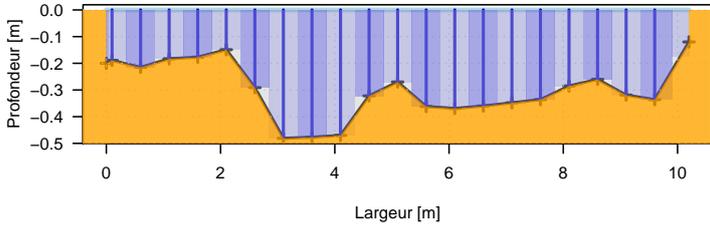
T_11_ADC_1_SCP_b.dat.rda



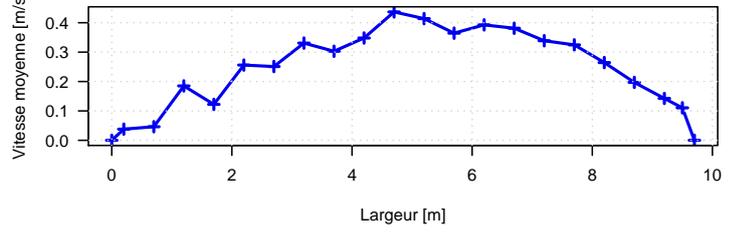
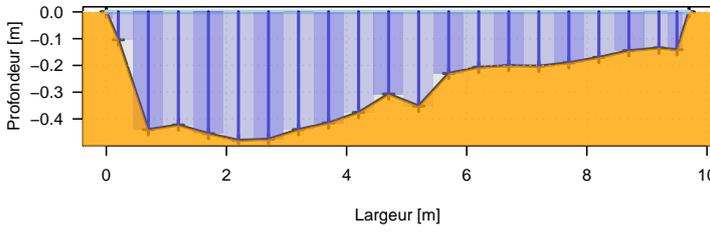
C_01_ADC_2_SCP_a_G.txt.rda



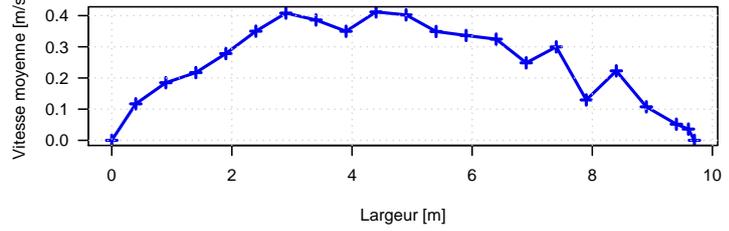
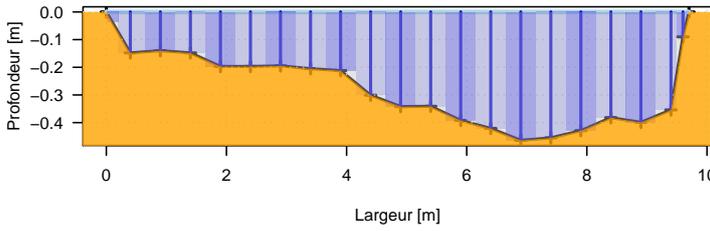
C_01_ADC_2_SCP_b_D.txt.rda



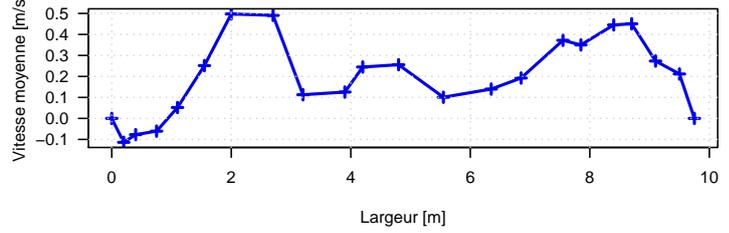
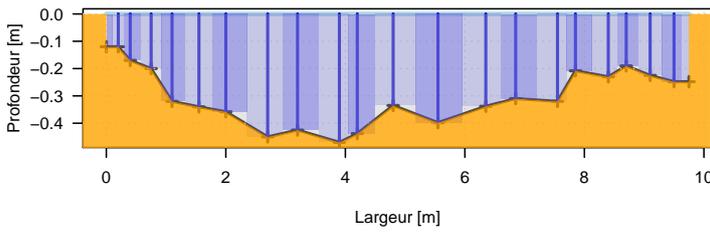
C_02_ADC_1_SCP_a_D.txt.rda



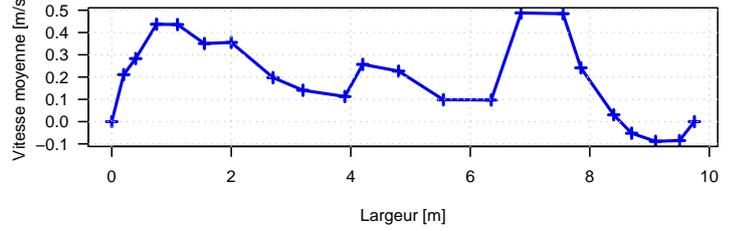
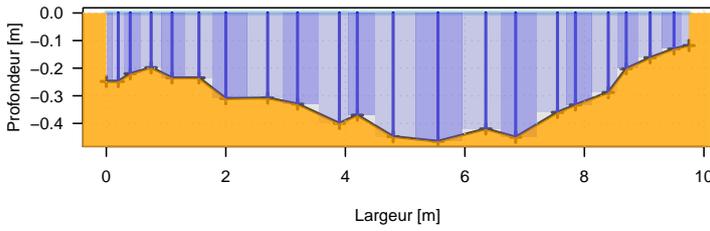
C_02_ADC_1_SCP_b_G.txt.rda



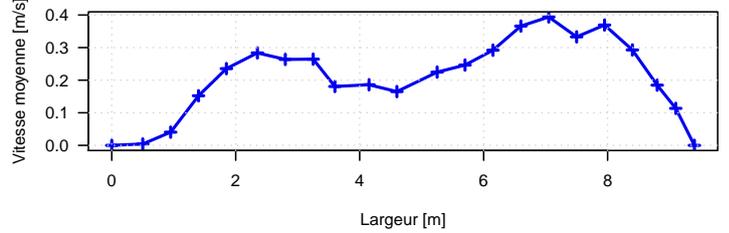
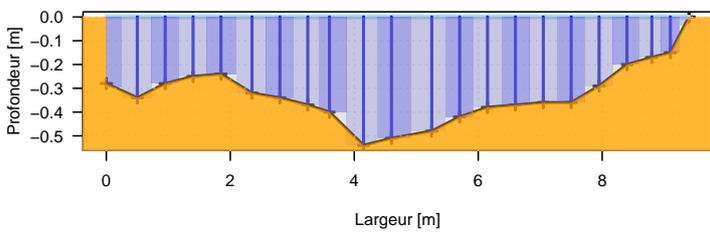
C_03_FLO_1_IAN_a_D.txt.rda



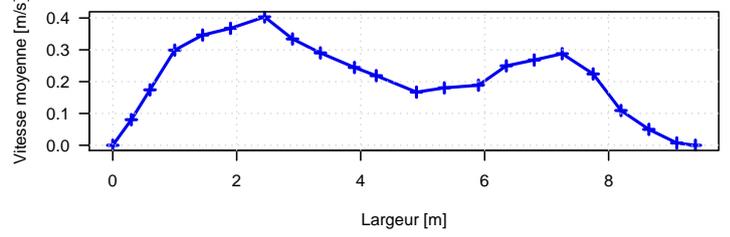
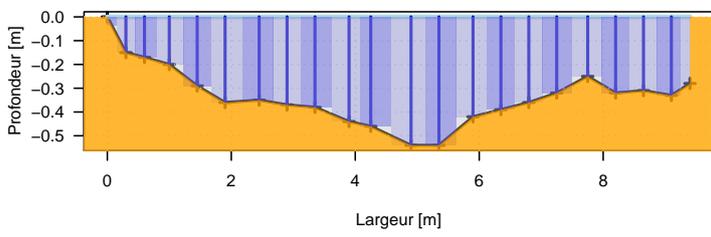
C_03_FLO_1_IAN_b_G.txt.rda



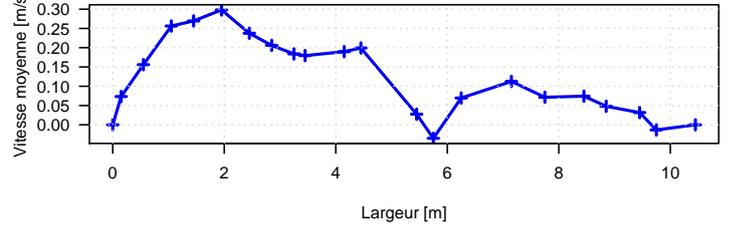
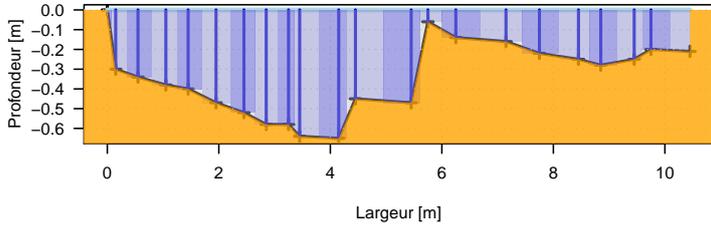
C_04_FLS_1_DRE_a_G.txt.rda



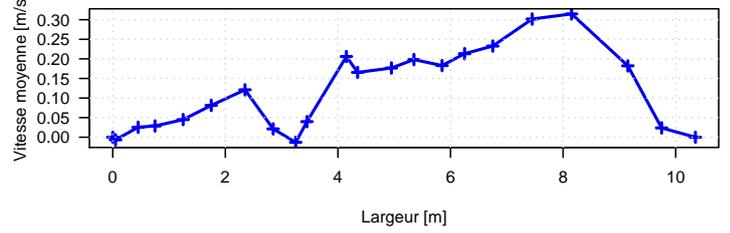
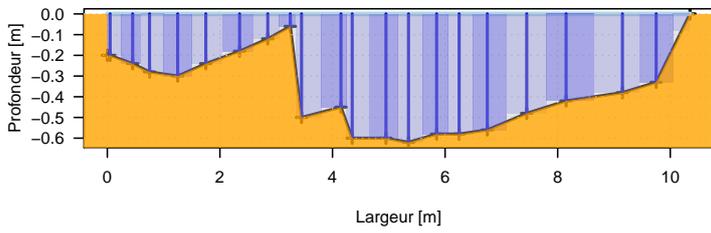
C_04_FLS_1_DRE_b_D.txt.rda



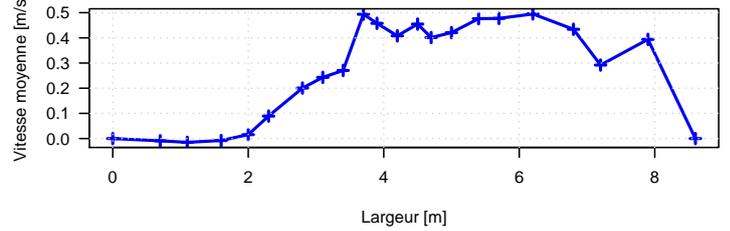
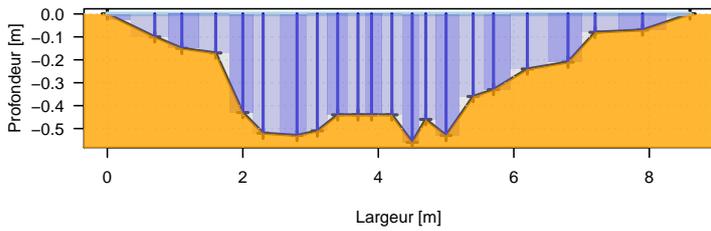
C_05_FLO_1_IBX_a_D.txt.rda



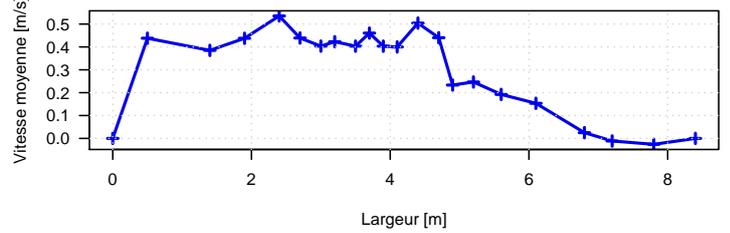
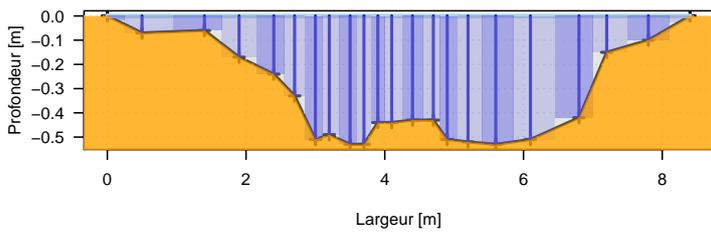
C_05_FLO_1_IBX_b_G.txt.rda



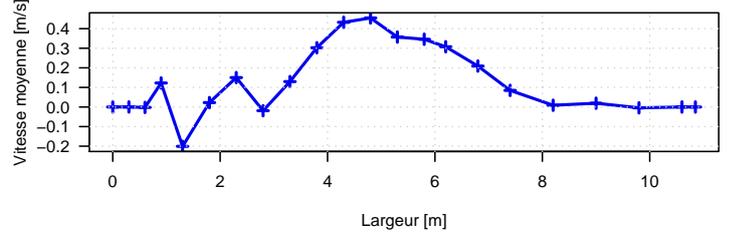
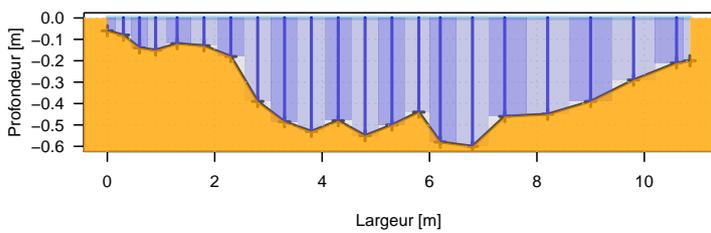
C_06_FLO_1_ILY_a_G.txt.rda



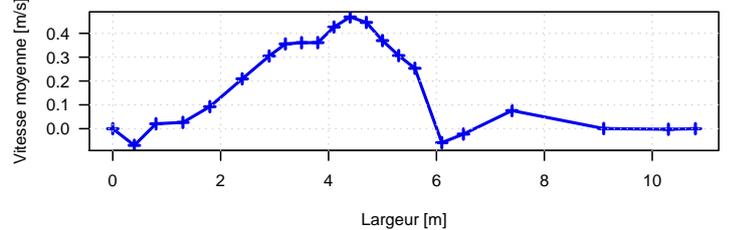
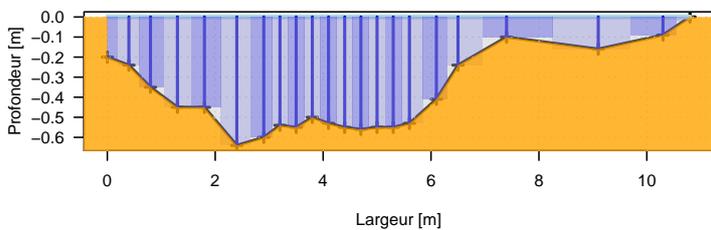
C_06_FLO_1_ILY_b_D.txt.rda



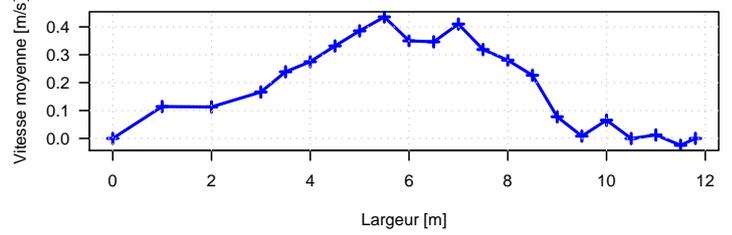
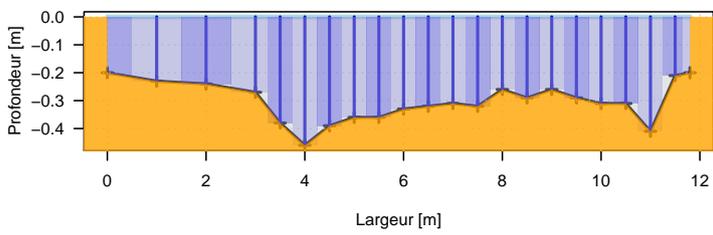
C_07_ADV_1_ILY_a_D.txt.rda



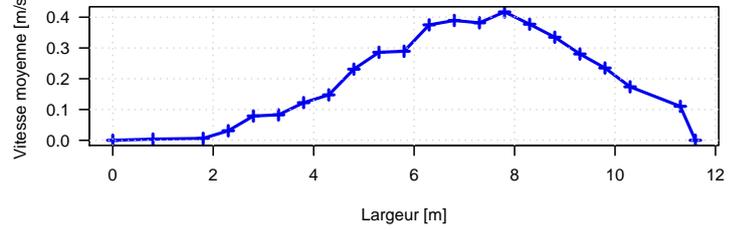
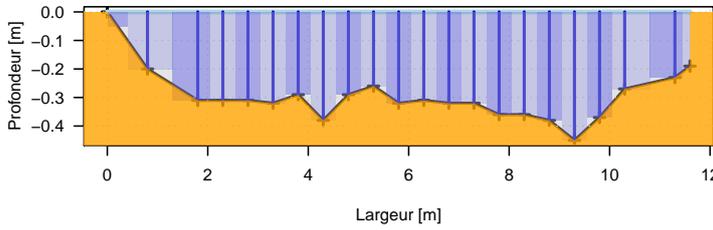
C_07_ADV_1_ILY_b_g.txt.rda



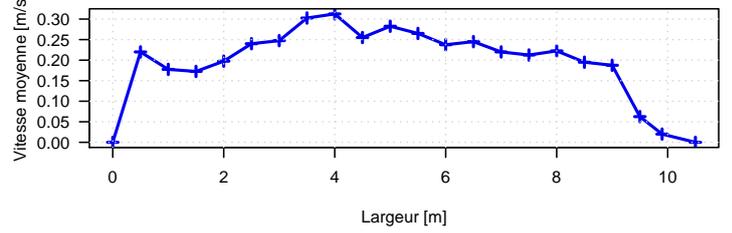
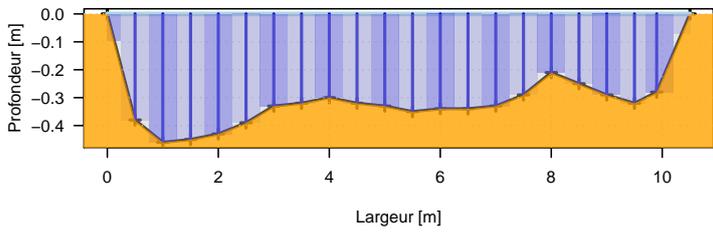
C_08_ADV_1_IMO_a_G.txt.rda



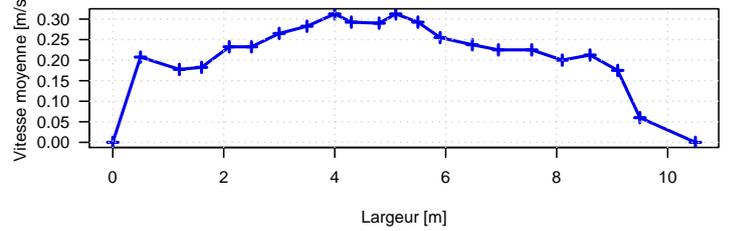
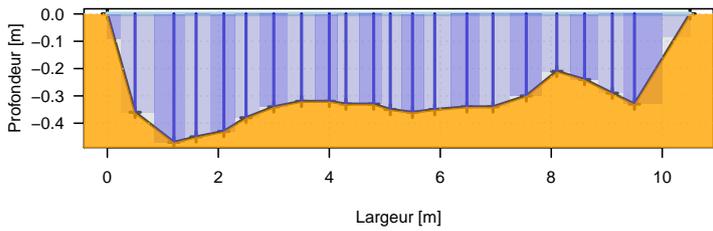
C_08_ADV_1_IMO_b_D.txt.rda



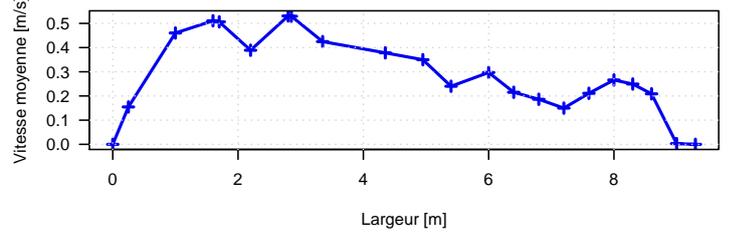
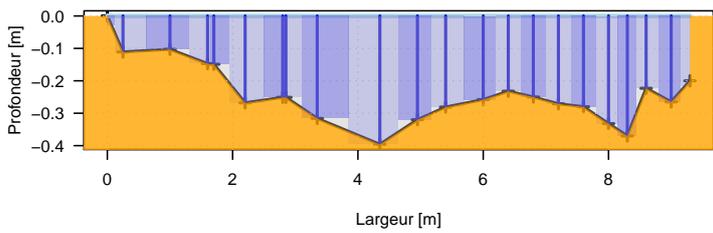
C_09_MOU_1_EDF_a_D.JAU.rda



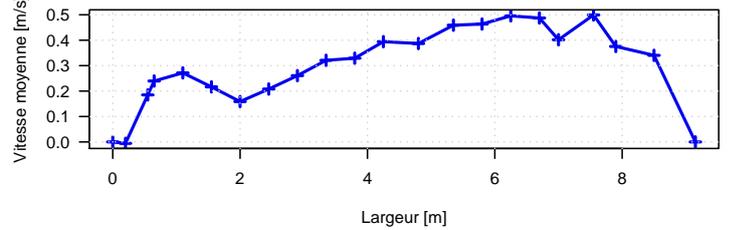
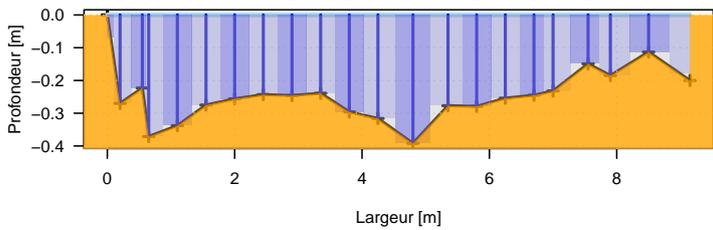
C_09_MOU_1_EDF_b_G.JAU.rda



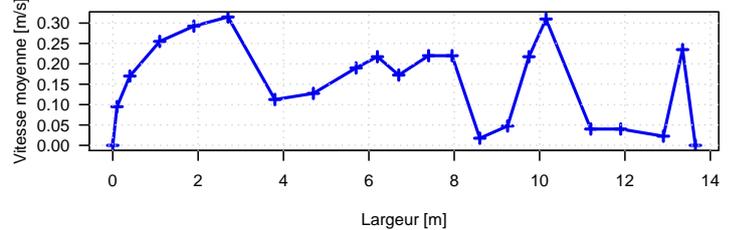
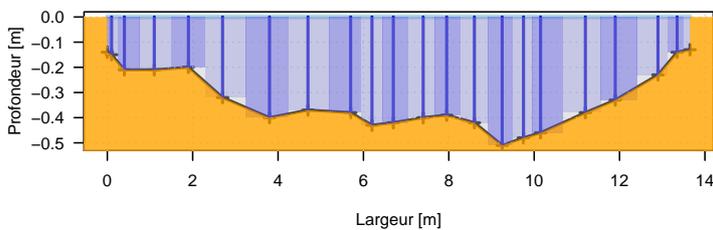
C_10_ADC_1_EDF_a_G.txt.rda



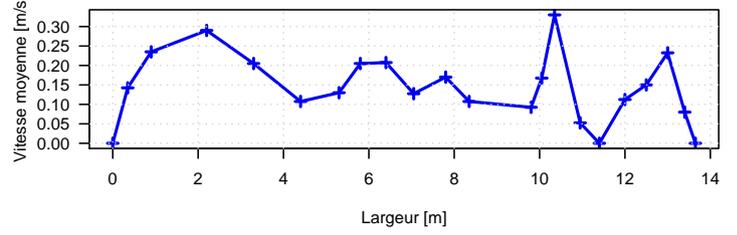
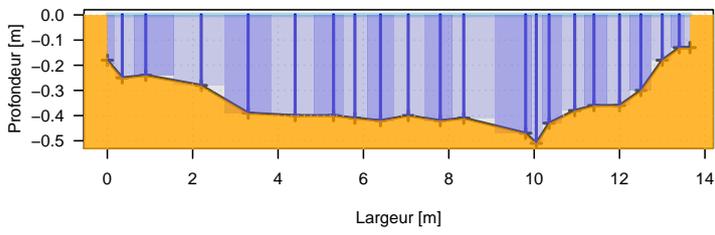
C_10_ADC_1_EDF_b_D.txt.rda



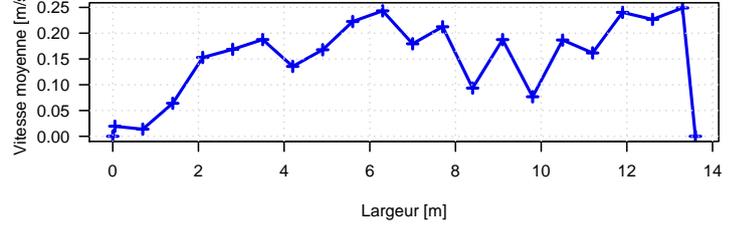
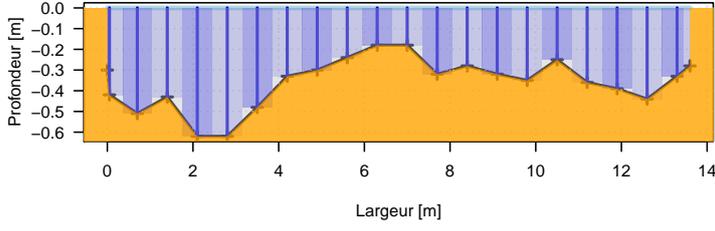
C_11_NAU_1_EDF_a_D.JAU.rda



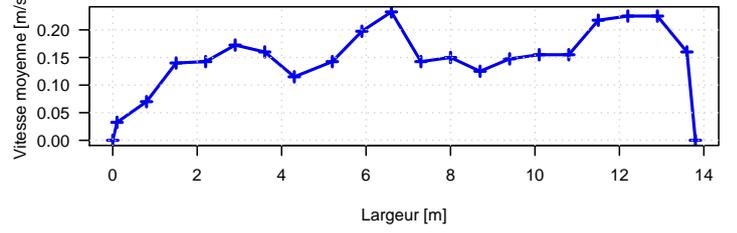
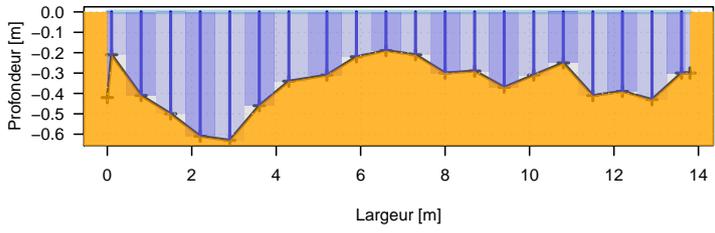
C_11_NAU_1_EDF_b_G.JAU.rda



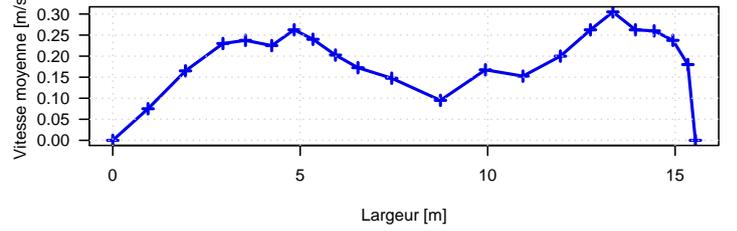
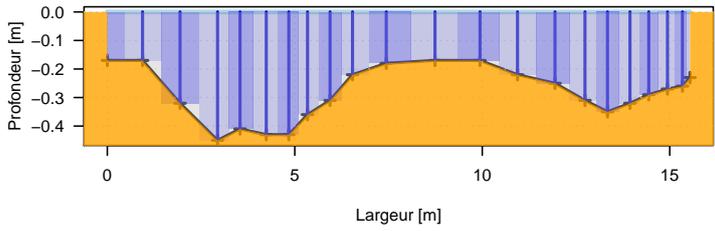
C_12_MOU_2_EDF_a_G.JAU.rda



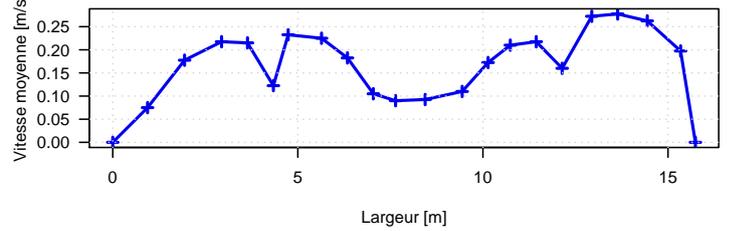
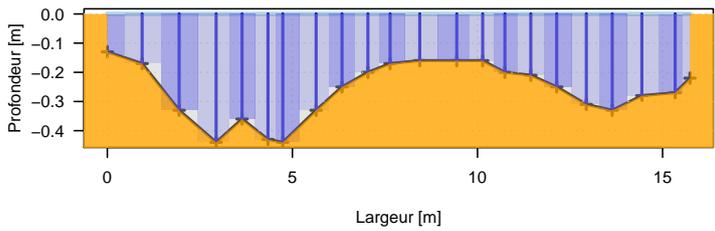
C_12_MOU_2_EDF_b_D.JAU.rda



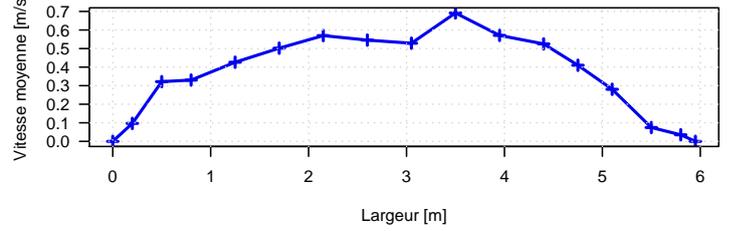
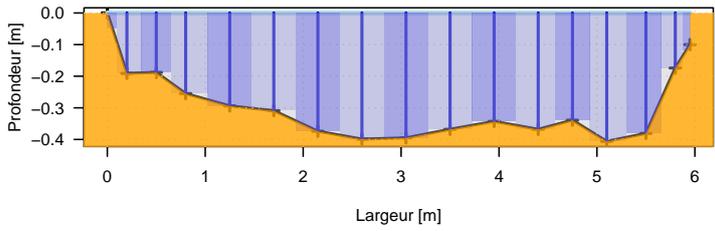
C_13_MOU_3_EDF_a_D.JAU.rda



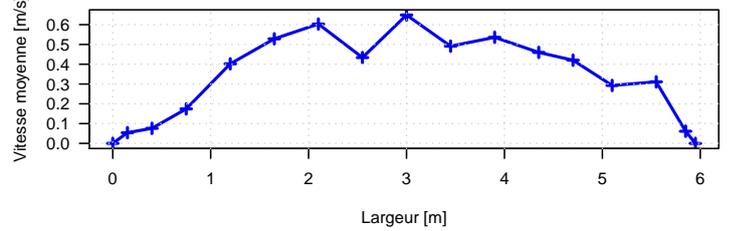
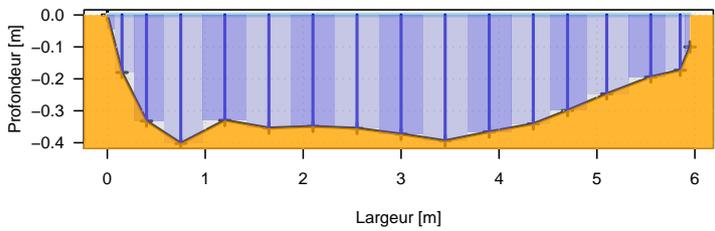
C_13_MOU_3_EDF_b_G.JAU.rda



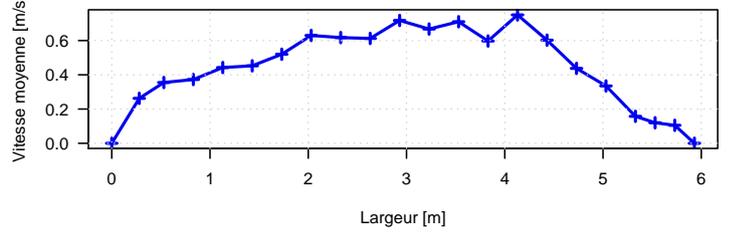
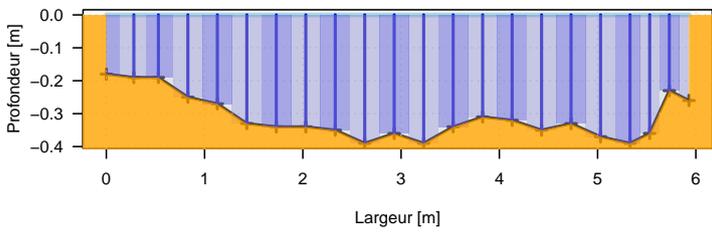
D_01_ADC_1_EDF_g_G.txt.rda



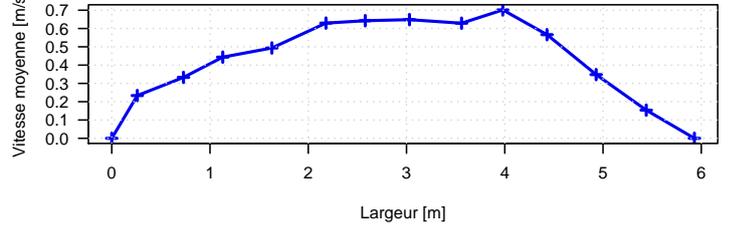
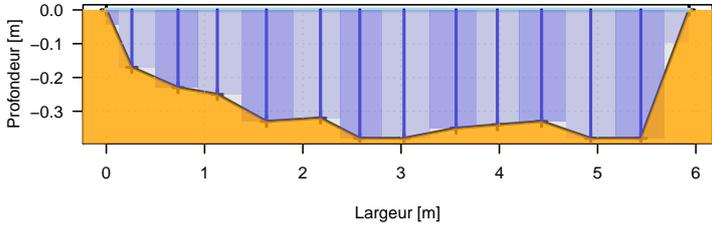
D_01_ADC_1_EDF_h_D.txt.rda



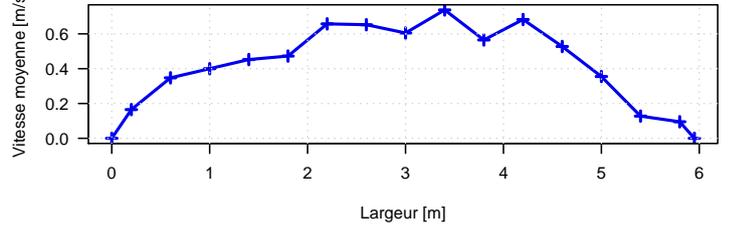
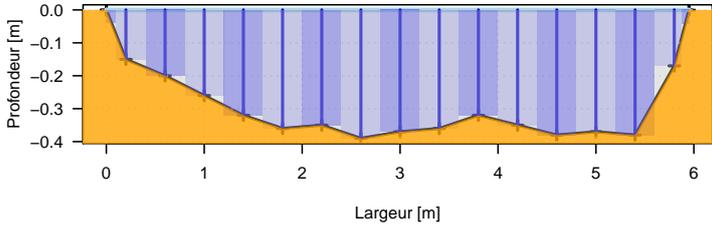
D_01_MOU_1_EDF_c_G.JAU.rda



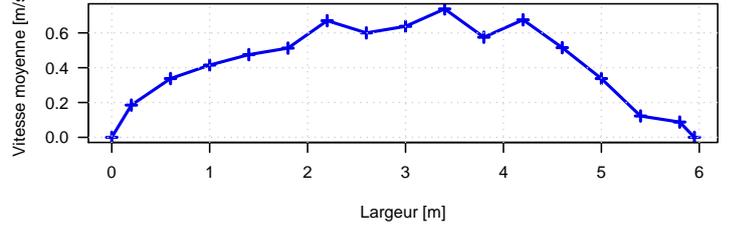
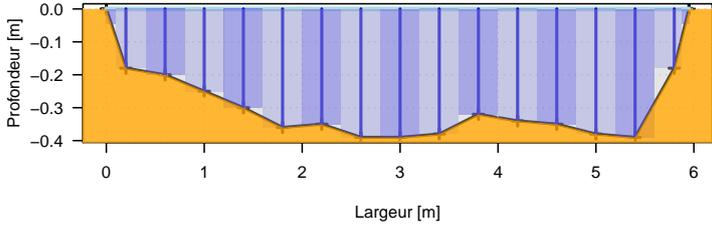
D_01_MOU_1_EDF_d_D.JAU.rda



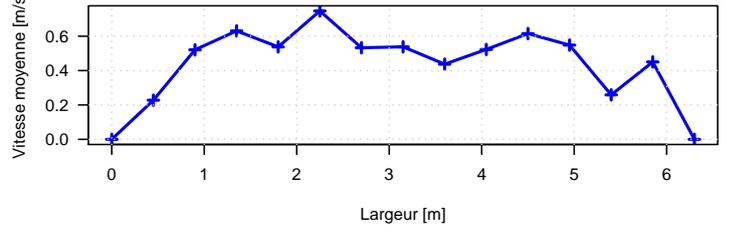
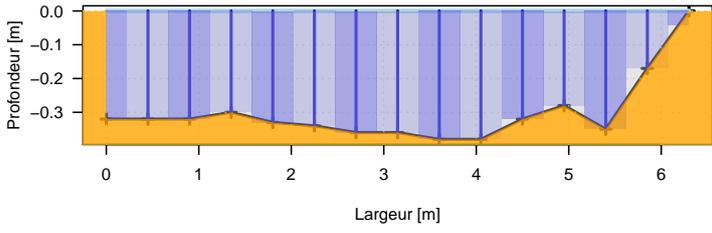
D_01_MOU_1_EDF_e_G.JAU.rda



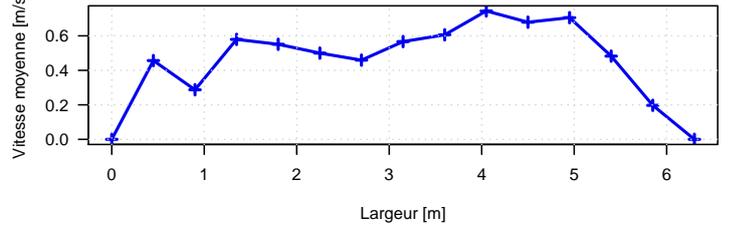
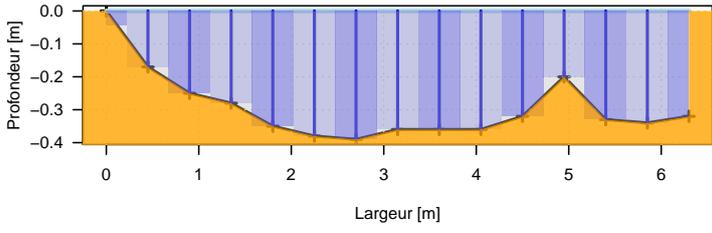
D_01_MOU_1_EDF_f_D.JAU.rda



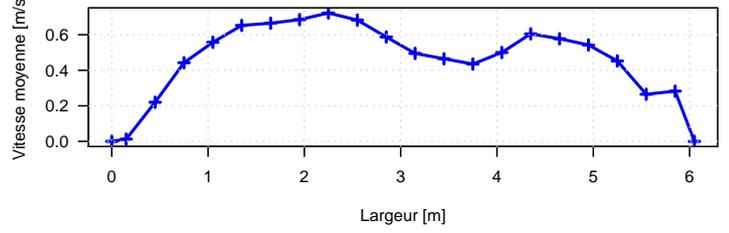
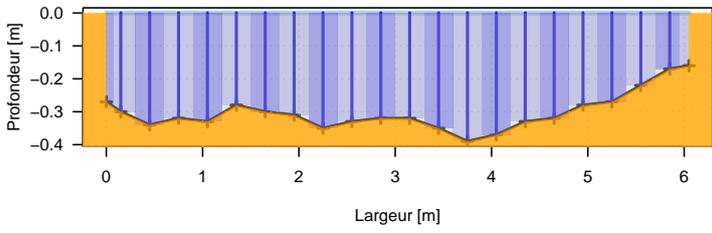
D_02_ADV_1_IMO_g_D.txt.rda



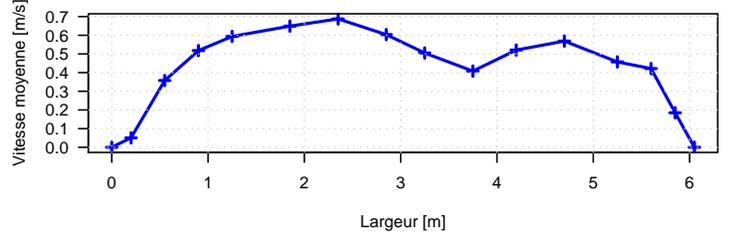
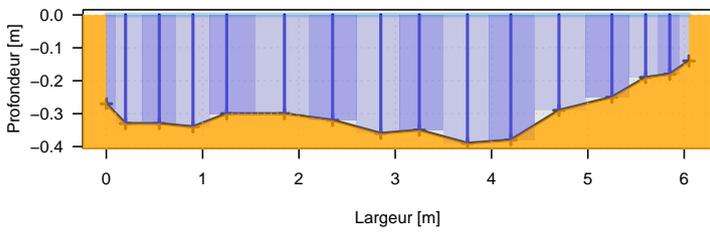
D_02_ADV_1_IMO_h_G.txt.rda



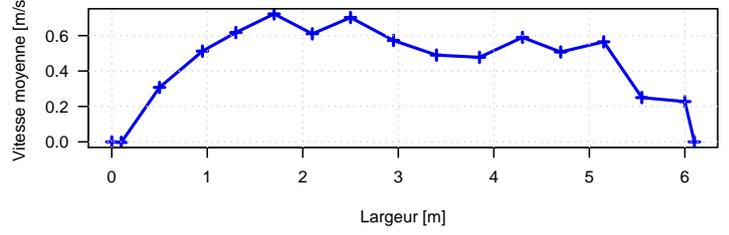
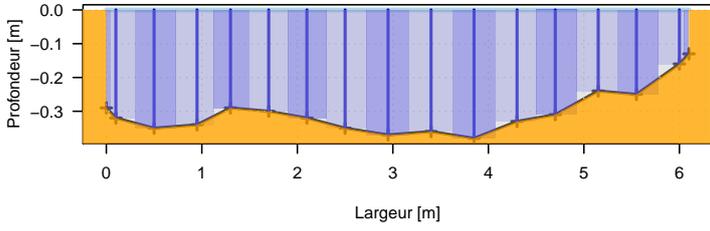
D_02_NAU_1_EDF_c_D.JAU.rda



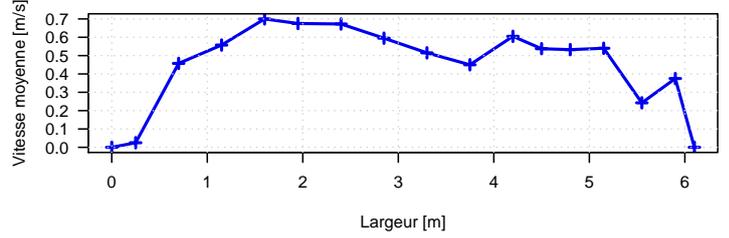
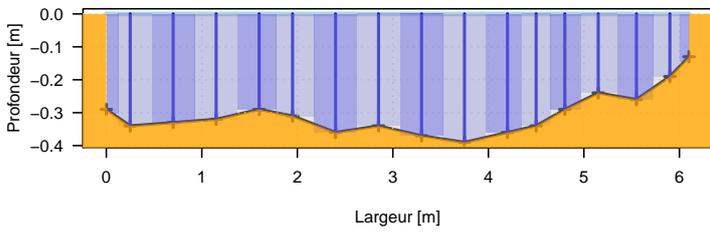
D_02_NAU_1_EDF_d_G.JAU.rda



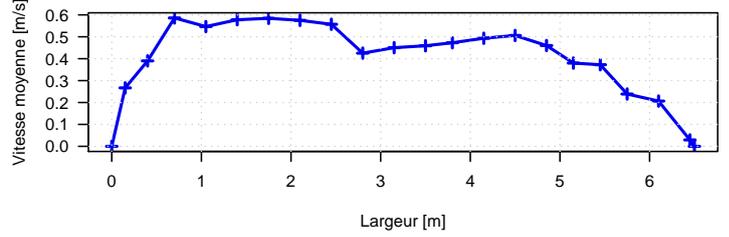
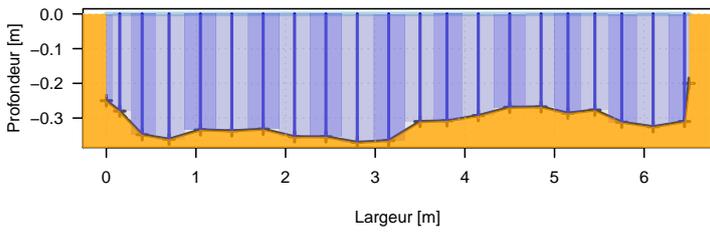
D_02_NAU_1_EDF_e_D.JAU.rda



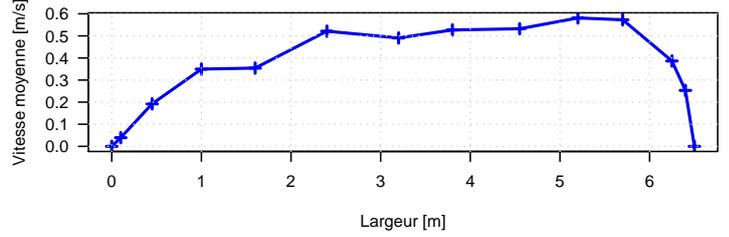
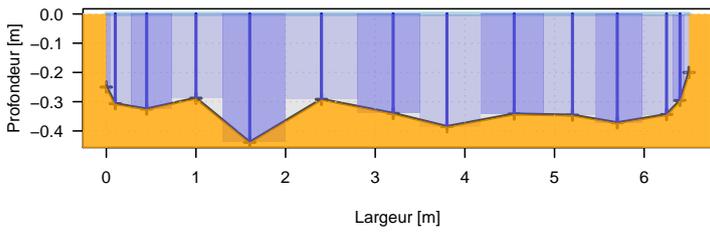
D_02_NAU_1_EDF_f_G.JAU.rda



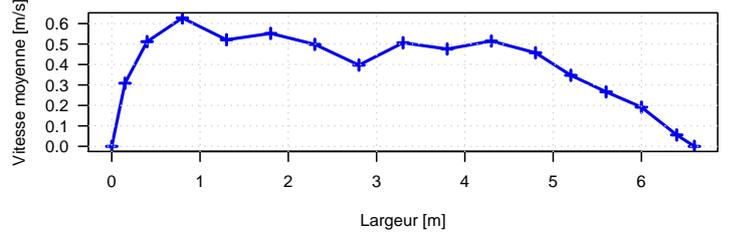
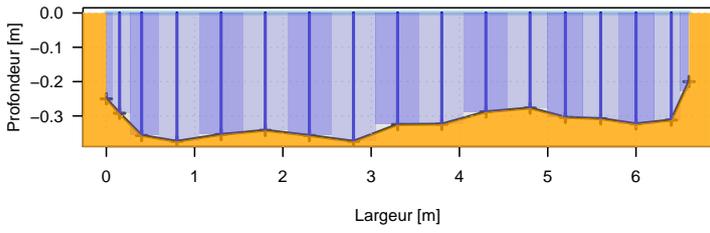
D_03_ADC_1_EDF_c_G.txt.rda



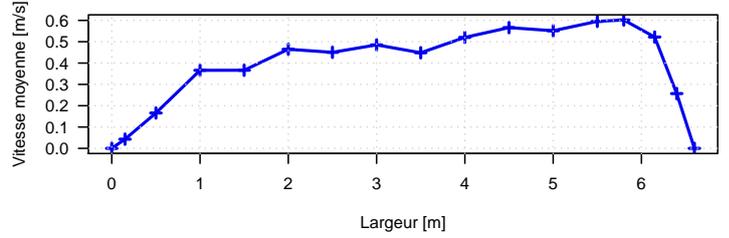
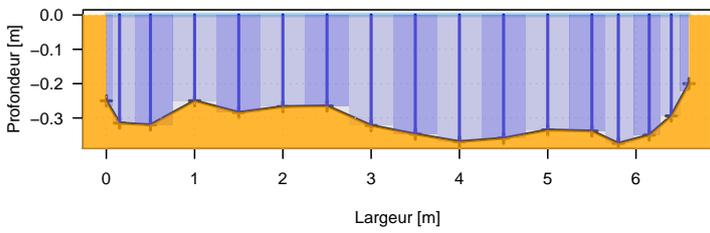
D_03_ADC_1_EDF_d_D.txt.rda



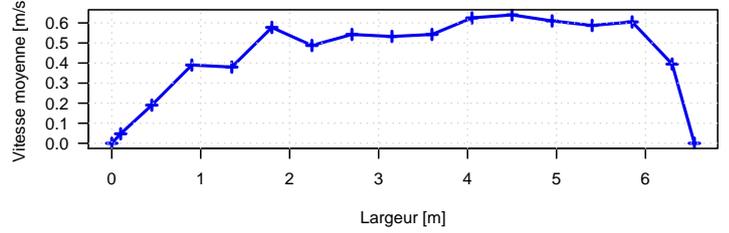
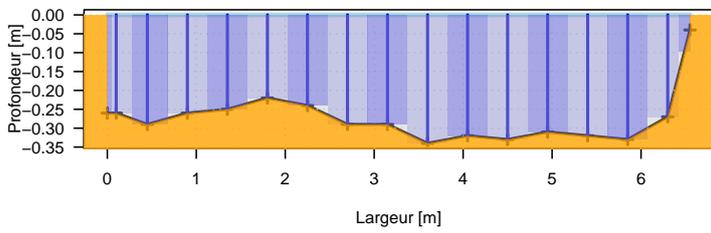
D_03_ADC_1_EDF_e_G.txt.rda



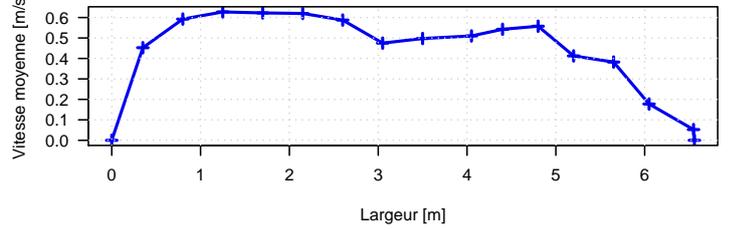
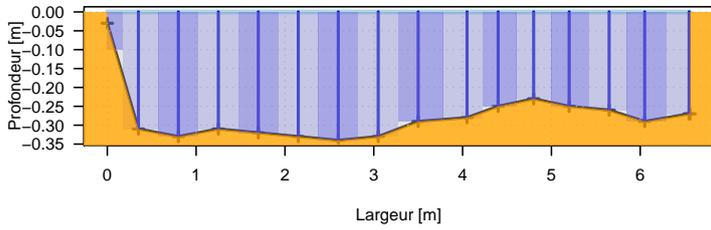
D_03_ADC_1_EDF_f_D.txt.rda



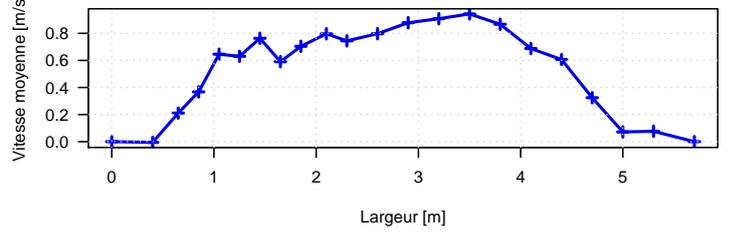
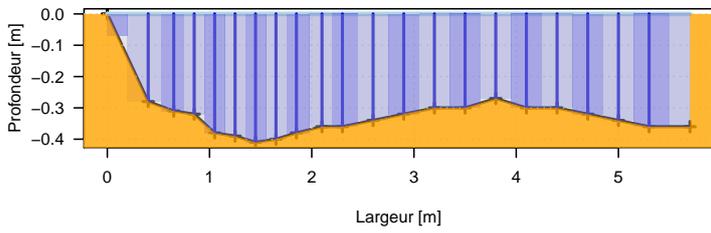
D_03_NAU_1_EDF_g_D.JAU.rda



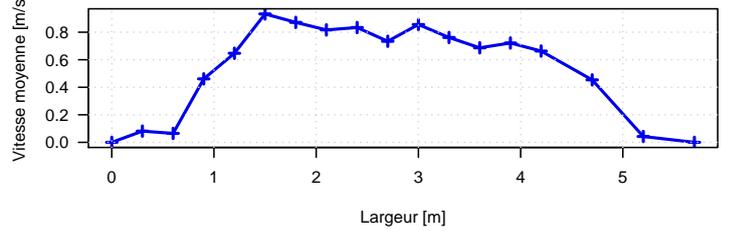
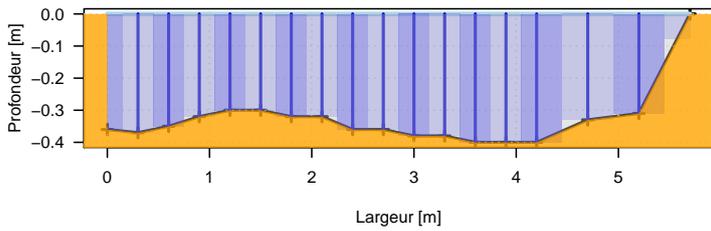
D_03_NAU_1_EDF_h_G.JAU.rda



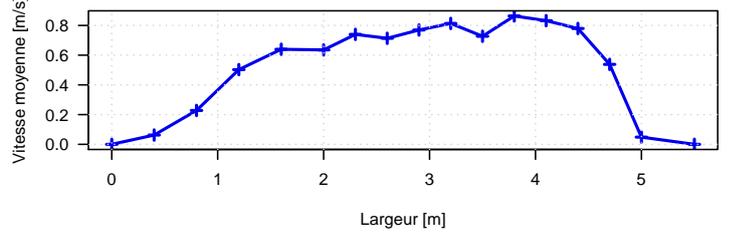
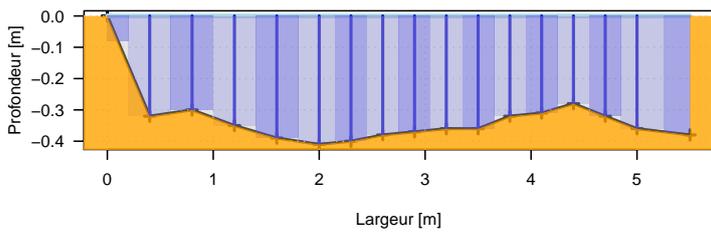
D_04_ADV_1_IMO_c_D.txt.rda



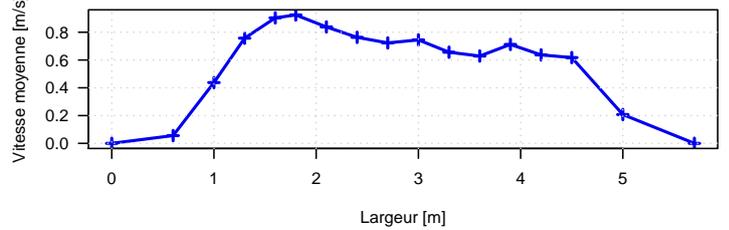
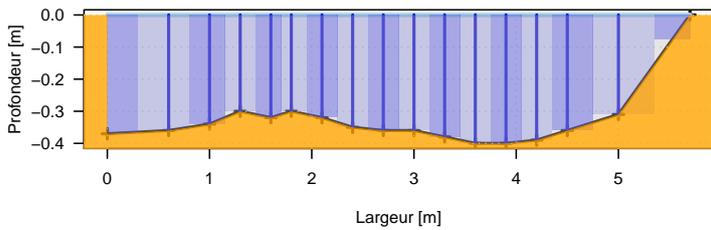
D_04_ADV_1_IMO_d_G.txt.rda



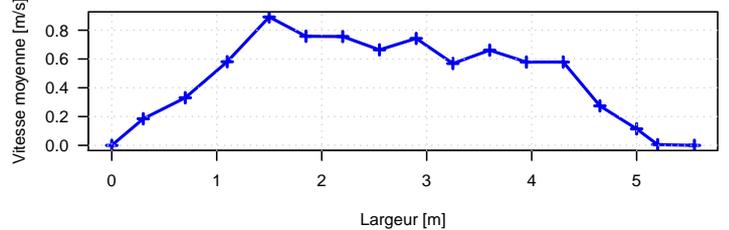
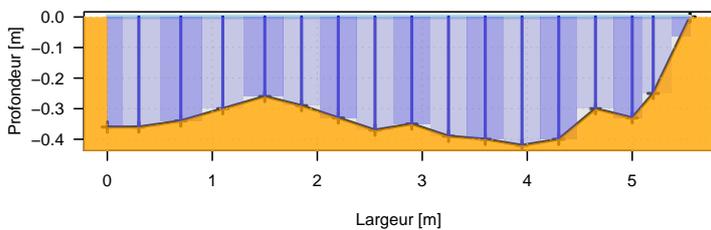
D_04_ADV_1_IMO_e_D.txt.rda



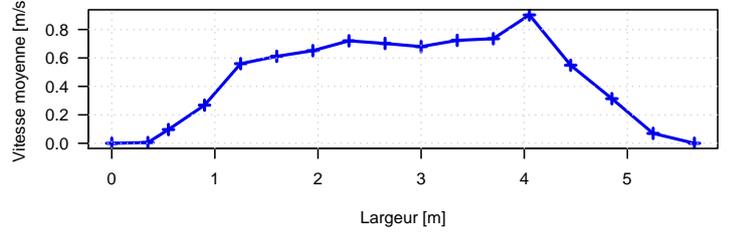
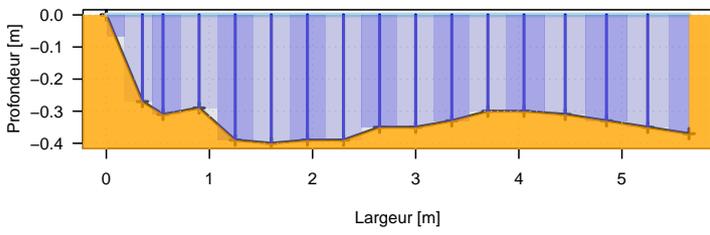
D_04_ADV_1_IMO_f_G.txt.rda



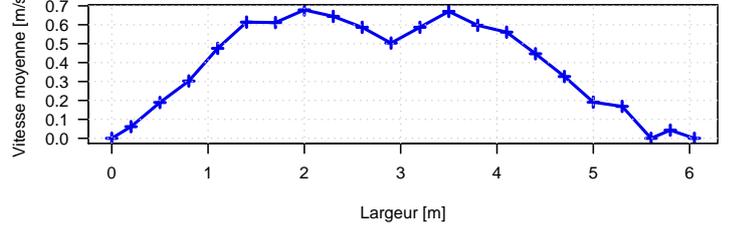
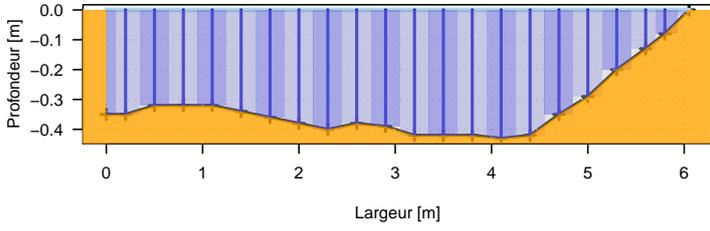
D_04_FLS_1_DRE_g_G.txt.rda



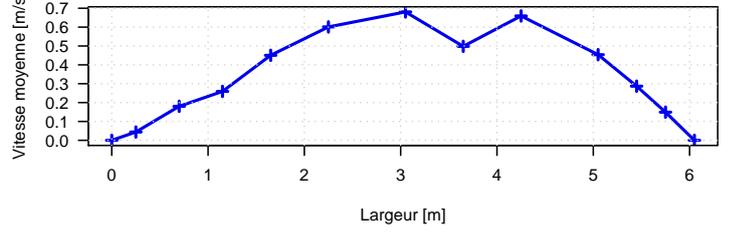
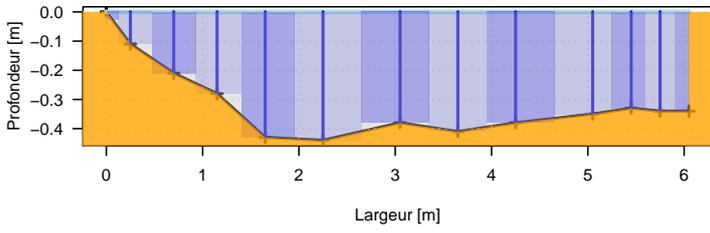
D_04_FLS_1_DRE_h_D.txt.rda



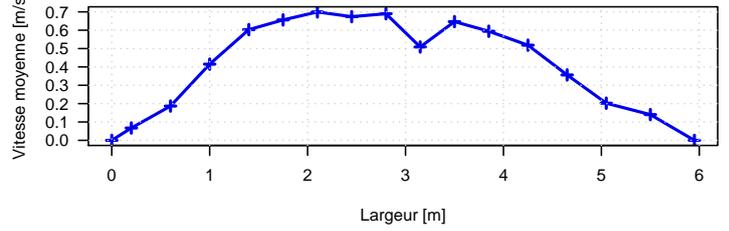
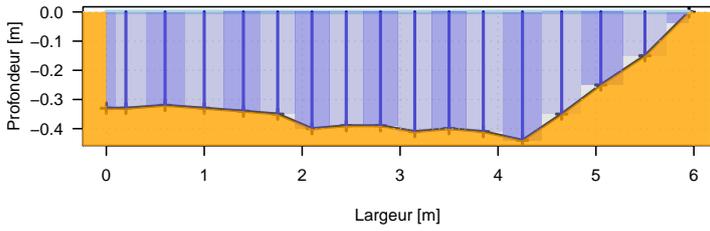
D_05_FLS_1_DRE_c_D.txt.rda



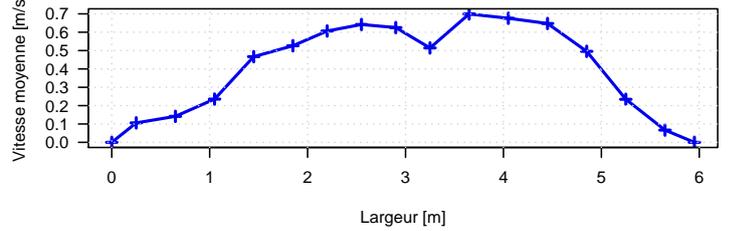
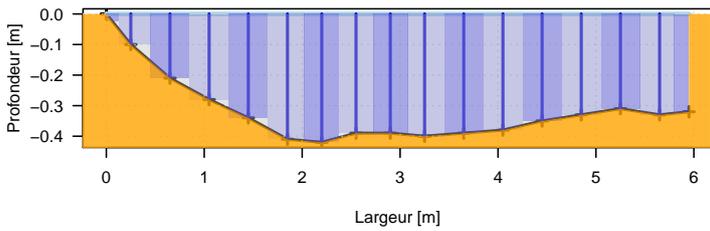
D_05_FLS_1_DRE_d_G.txt.rda



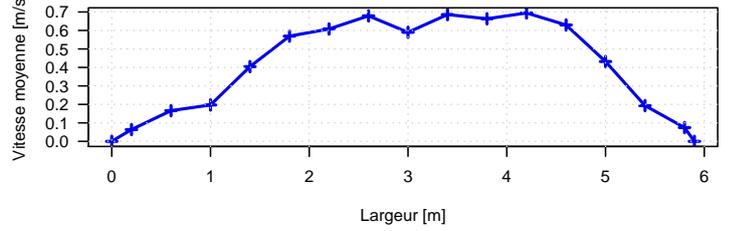
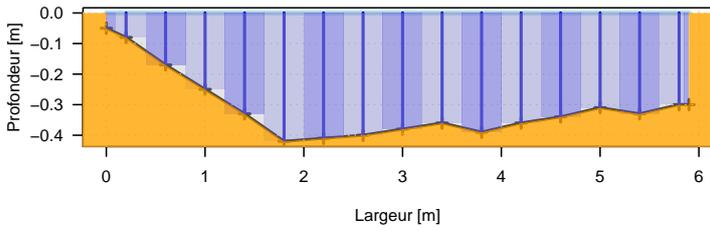
D_05_FLS_1_DRE_e_D.txt.rda



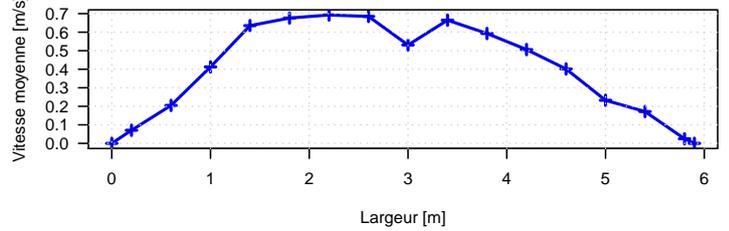
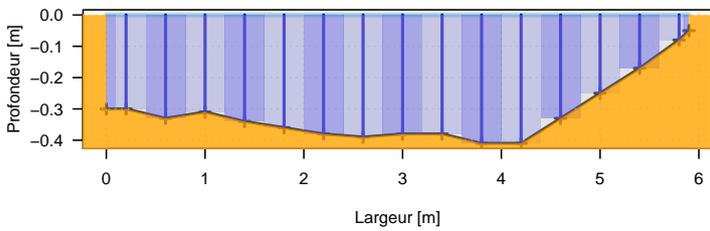
D_05_FLS_1_DRE_f_G.txt.rda



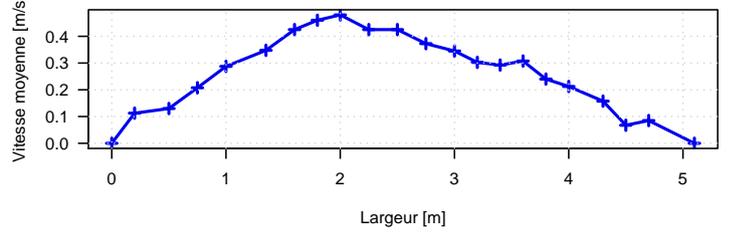
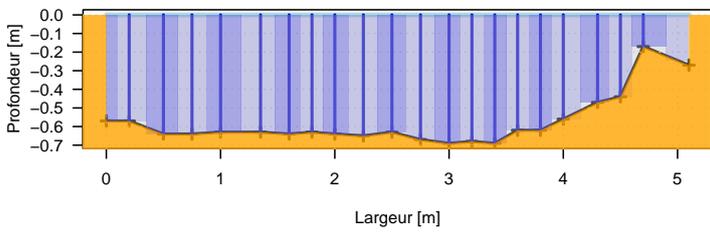
D_05_MOU_3_EDF_g_D.txt.rda



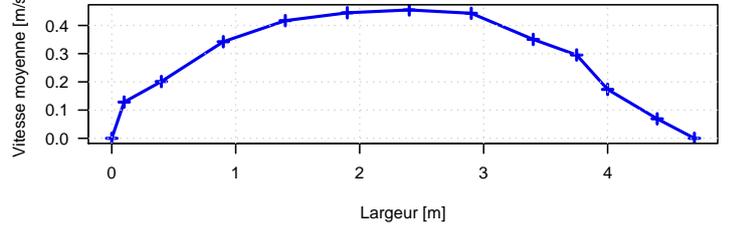
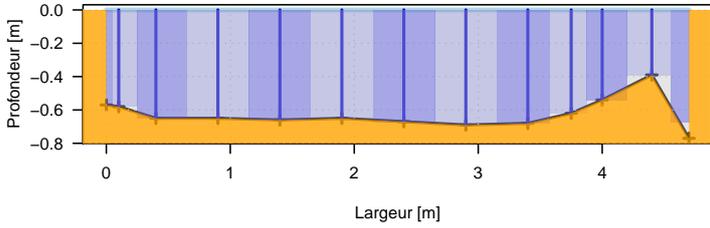
D_05_MOU_3_EDF_h_G.txt.rda



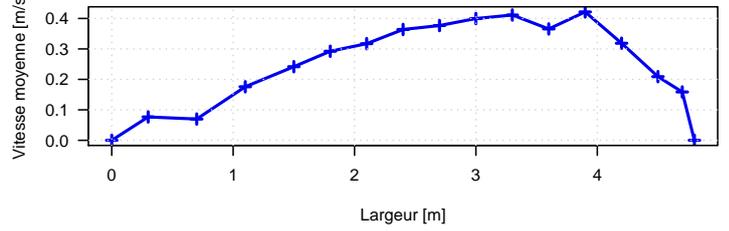
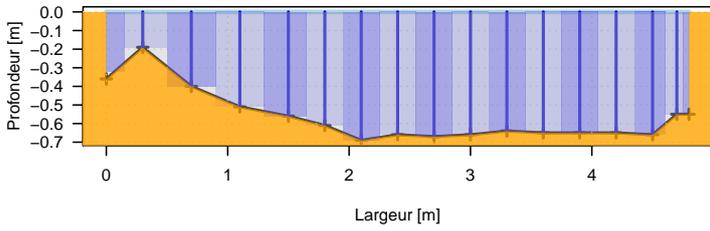
D_06_MOU_3_EDF_c_D.JAU.rda



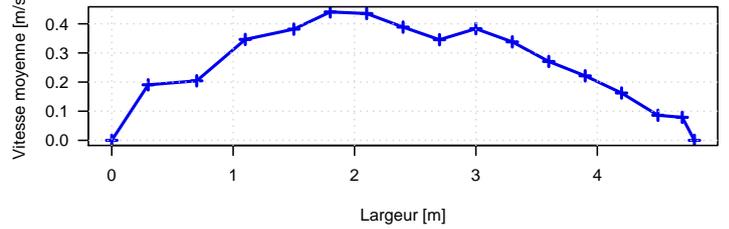
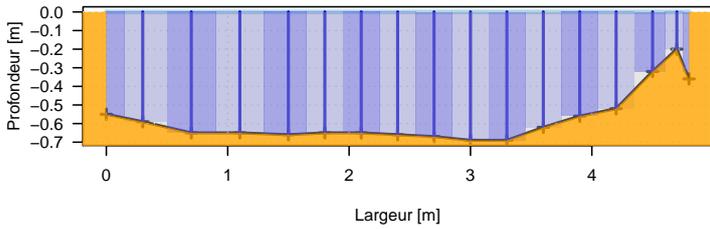
D_06_MOU_3_EDF_d_G.JAU.rda



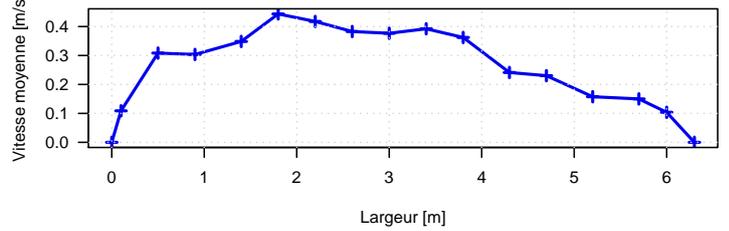
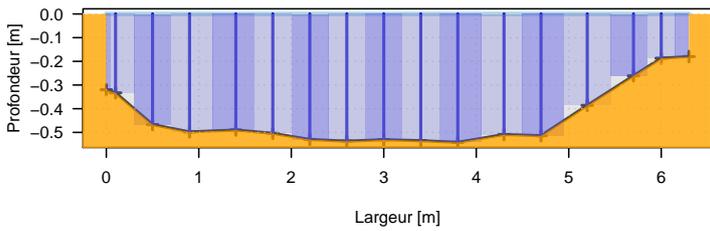
D_06_MOU_3_EDF_e_D.txt.rda



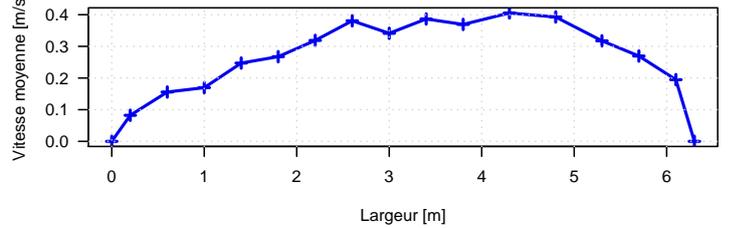
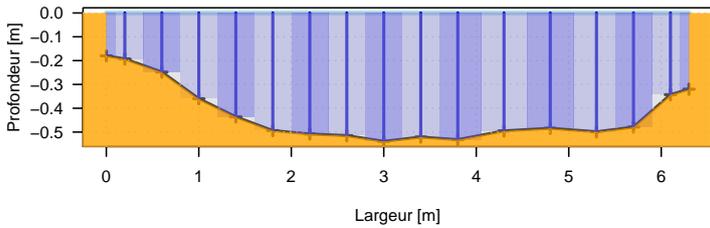
D_06_MOU_3_EDF_f_G.txt.rda



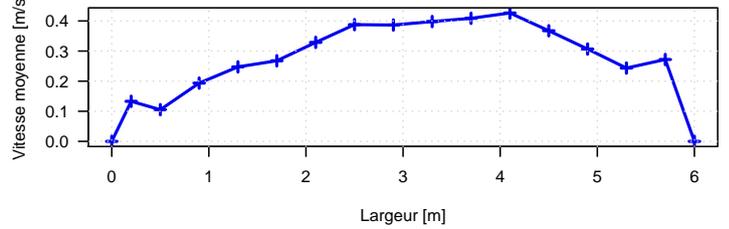
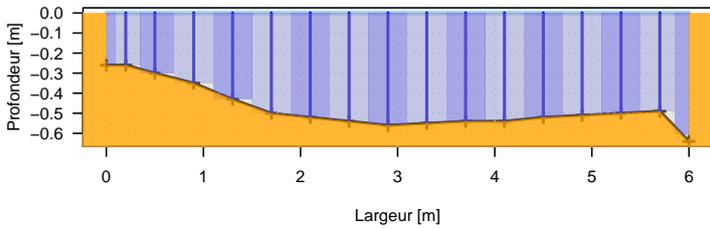
D_07_ADC_1_SCP_g_D.txt.rda



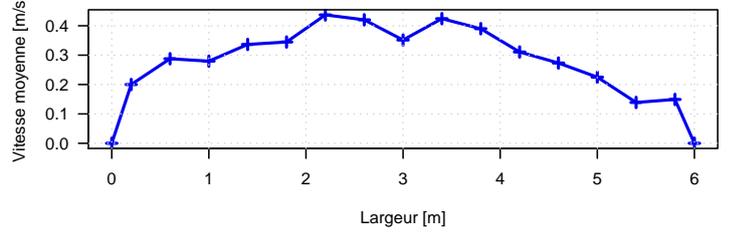
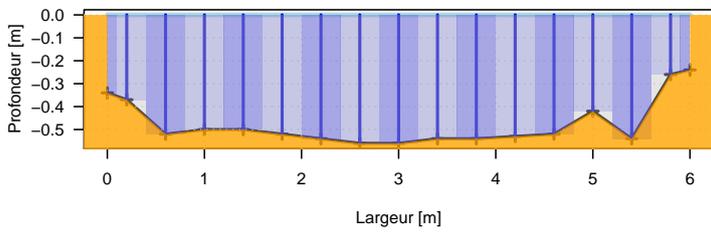
D_07_ADC_1_SCP_h_G.txt.rda



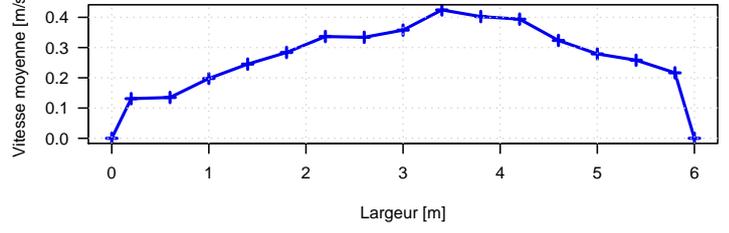
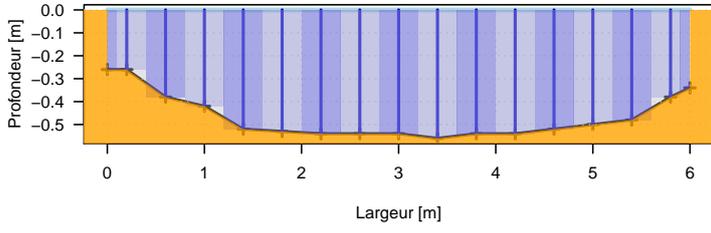
D_07_MOU_1_SCP_d_D.txt.rda



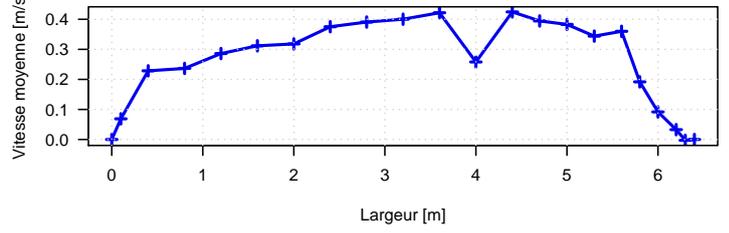
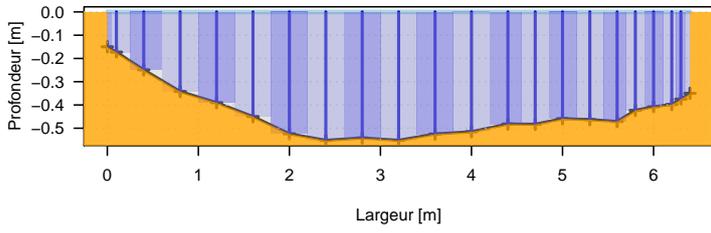
D_07_MOU_1_SCP_e_G.txt.rda



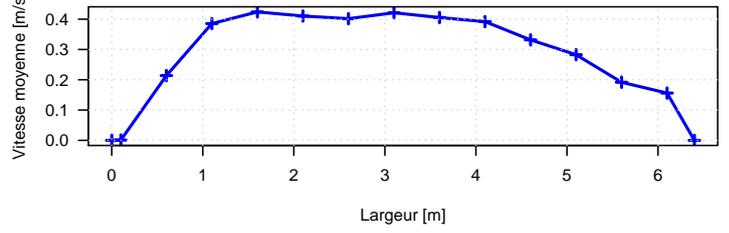
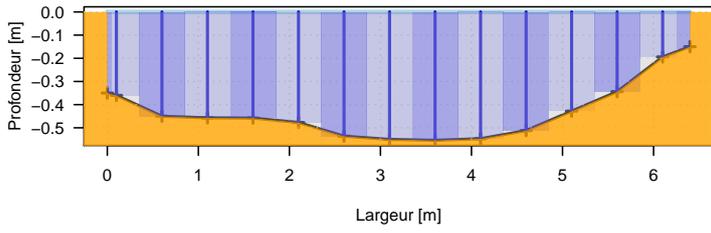
D_07_MOU_1_SCP_f_D.txt.rda



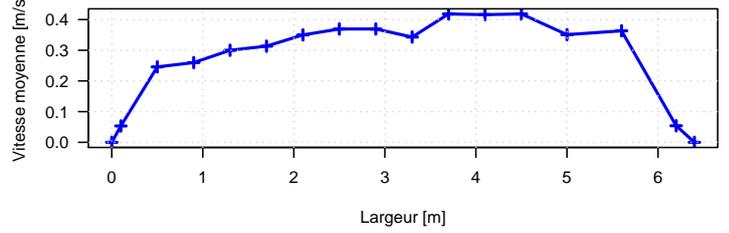
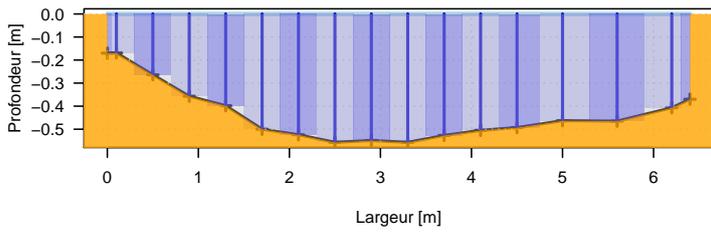
D_08_ADC_1_SCP_c_D.txt.rda



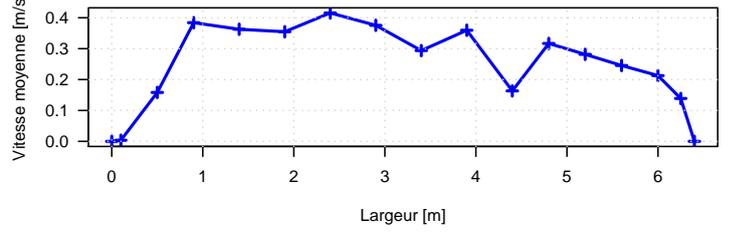
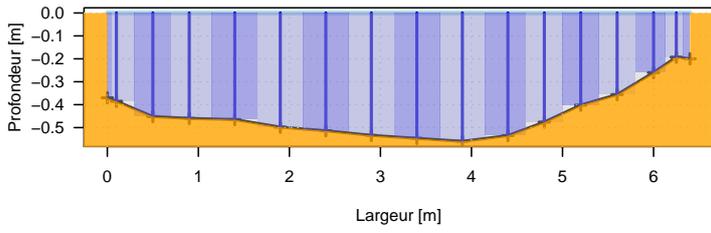
D_08_ADC_1_SCP_d_G.txt.rda



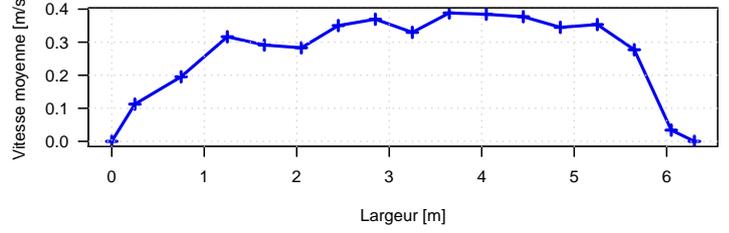
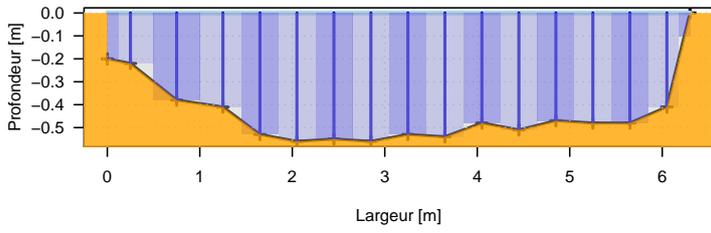
D_08_ADC_1_SCP_e_D.txt.rda



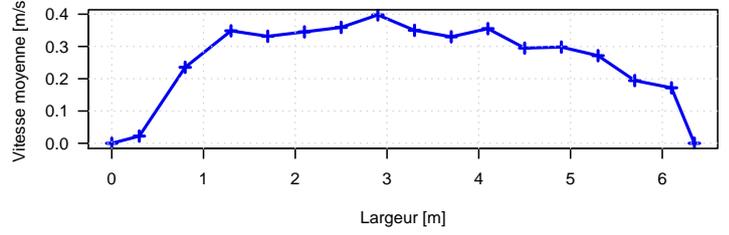
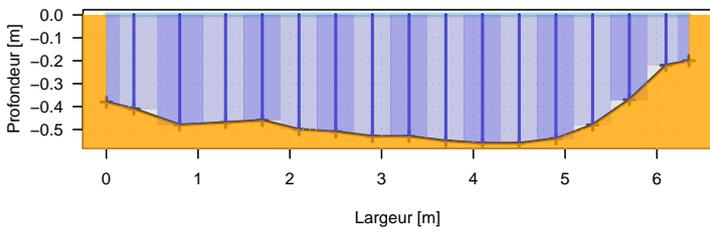
D_08_ADC_1_SCP_f_G.txt.rda



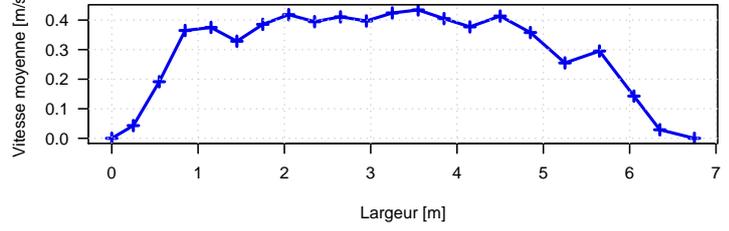
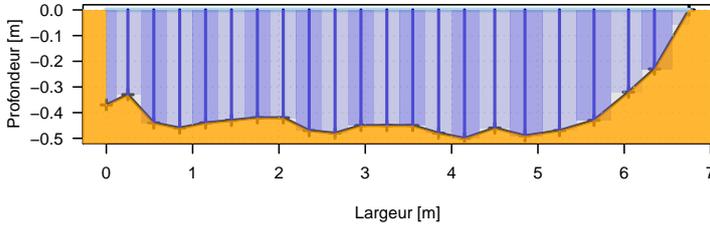
D_08_ADV_1_ILY_g_G.txt.rda



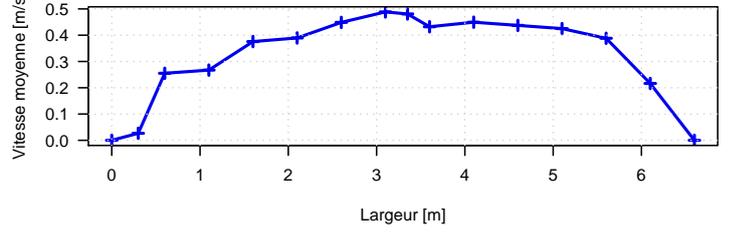
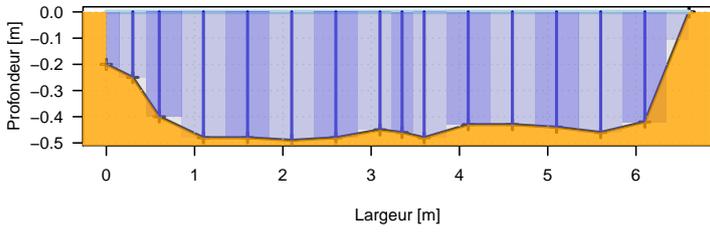
D_08_ADV_1_ILY_h_D.txt.rda



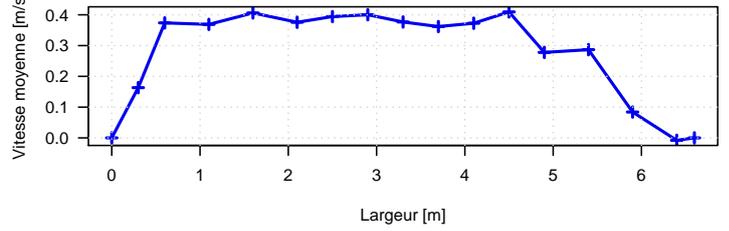
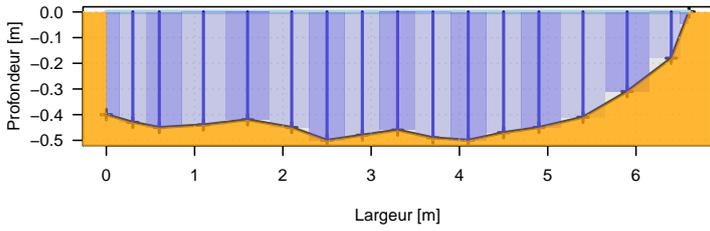
D_09_ADV_1_ILY_c_G.txt.rda



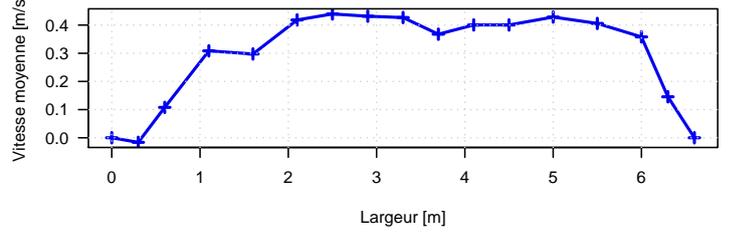
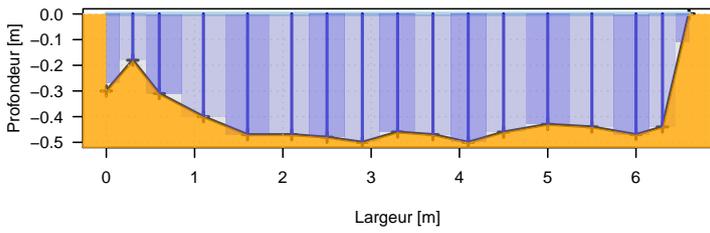
D_09_ADV_1_ILY_d_D.txt.rda



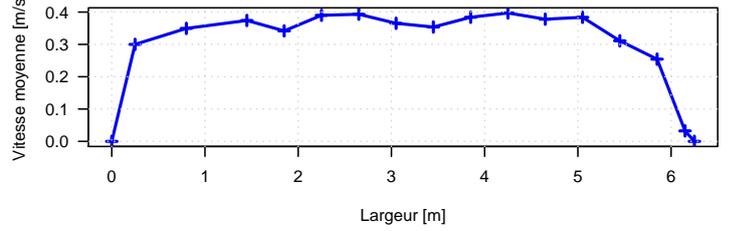
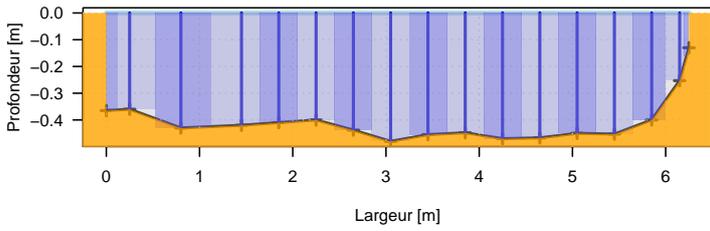
D_09_ADV_1_ILY_e_G.txt.rda



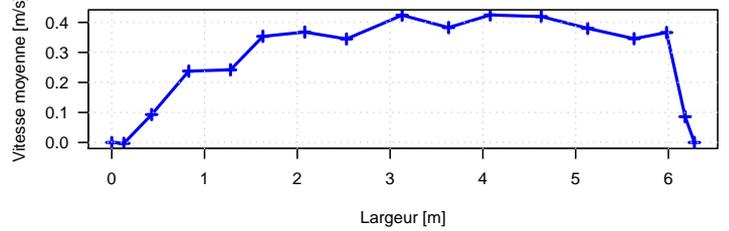
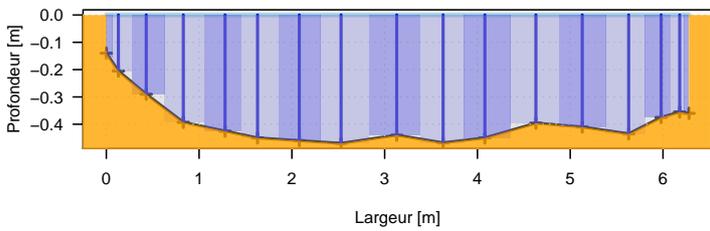
D_09_ADV_1_ILY_f_D.txt.rda



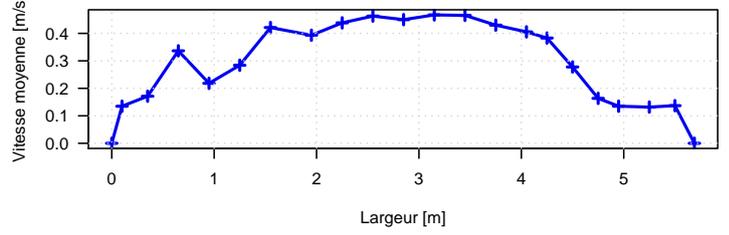
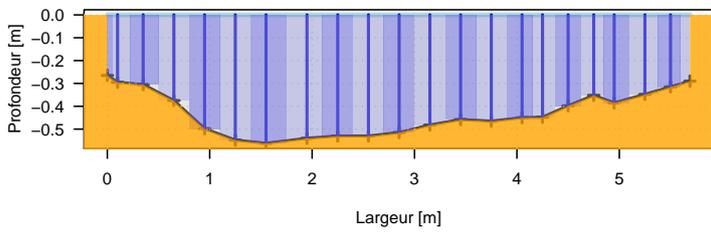
D_09_FLO_1_IAN_g_G.txt.rda



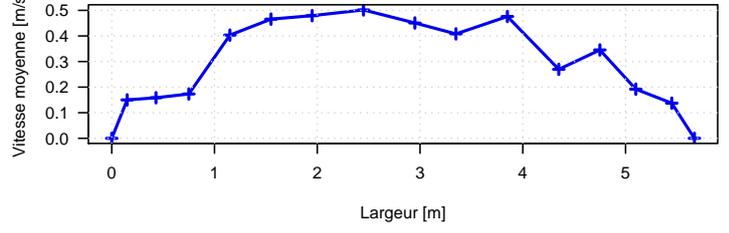
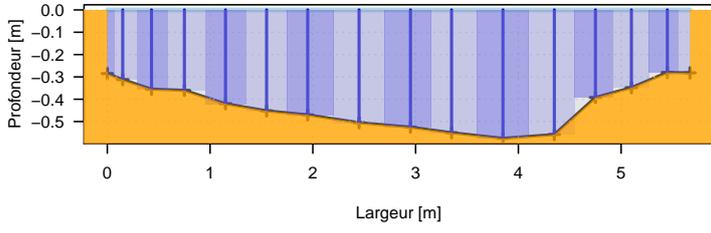
D_09_FLO_1_IAN_h_D.txt.rda



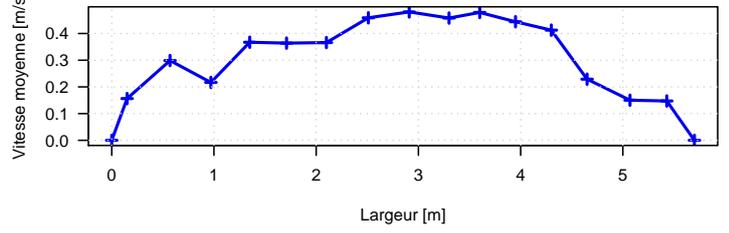
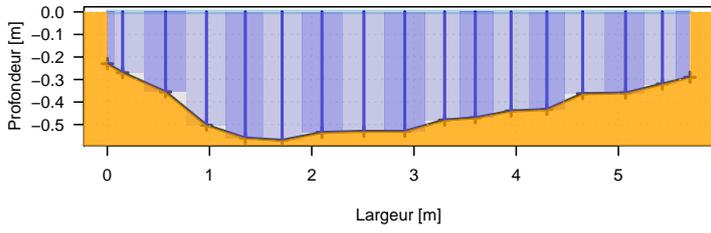
D_10_FLO_1_IAN_c_D.txt.rda



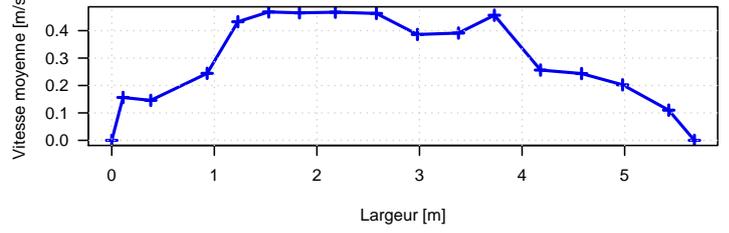
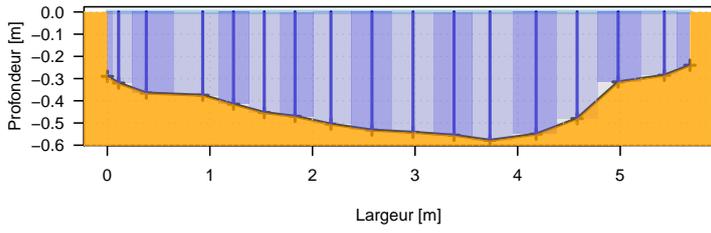
D_10_FLO_1_IAN_d_G.txt.rda



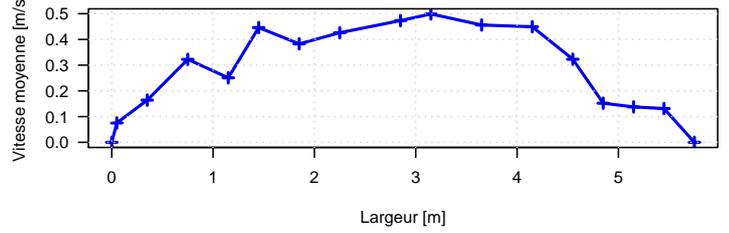
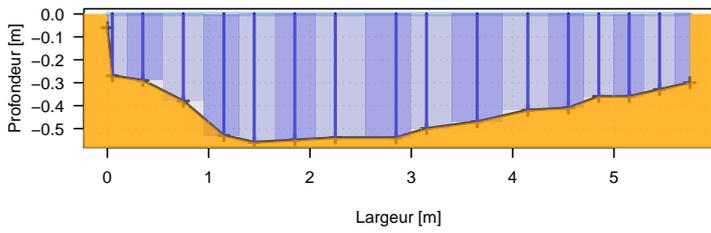
D_10_FLO_1_IAN_e_D.txt.rda



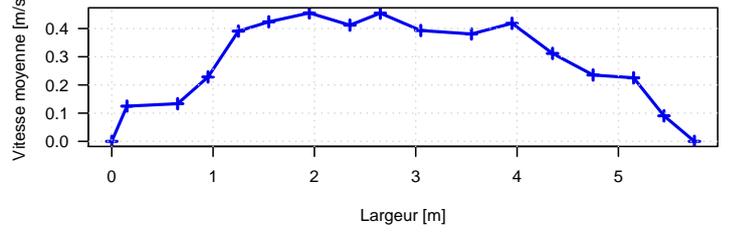
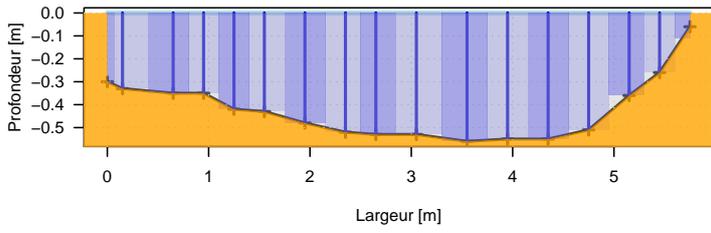
D_10_FLO_1_IAN_f_G.txt.rda



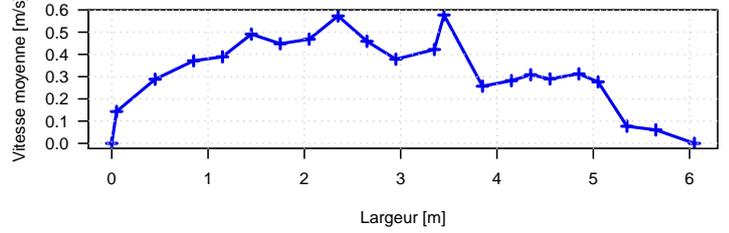
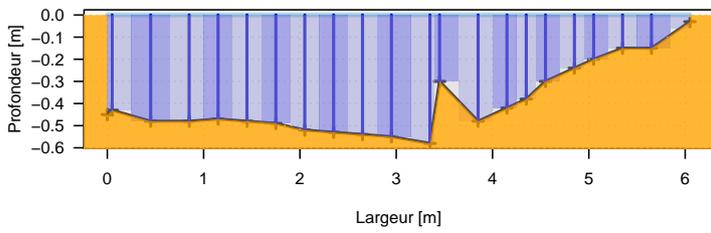
D_10_FLO_1_IBX_g_D.txt.rda



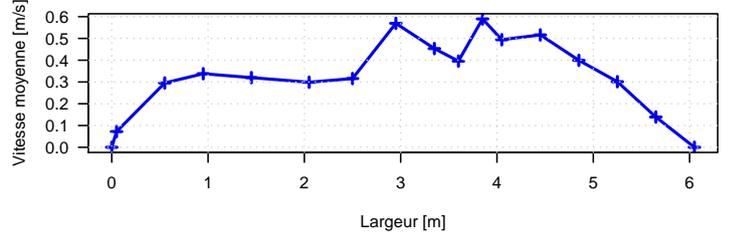
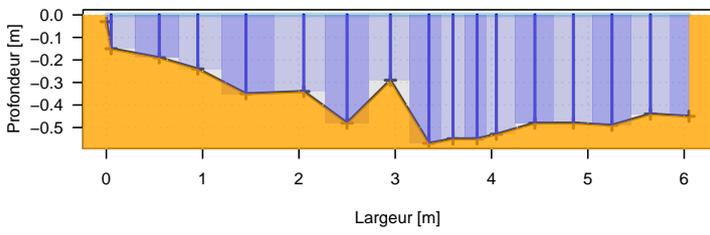
D_10_FLO_1_IBX_h_G.txt.rda



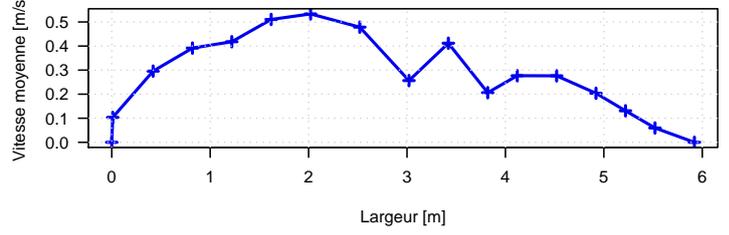
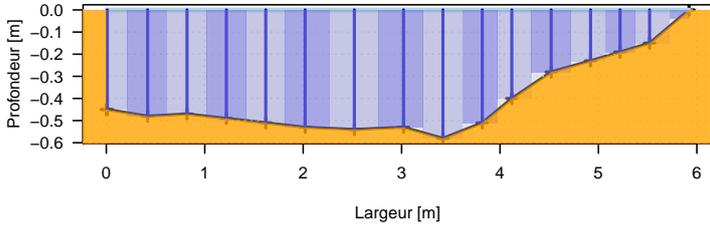
D_11_FLO_1_IBX_c_G.txt.rda



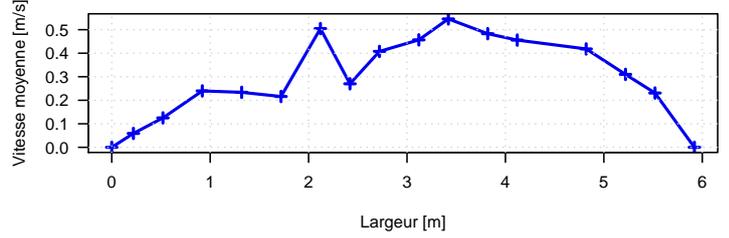
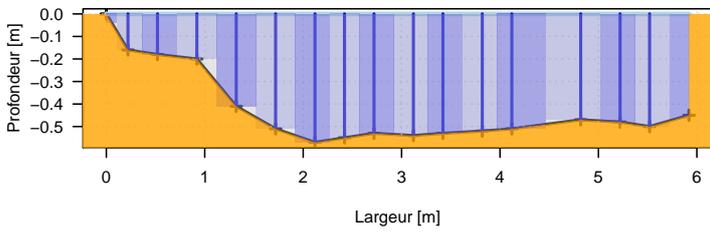
D_11_FLO_1_IBX_d_D.txt.rda



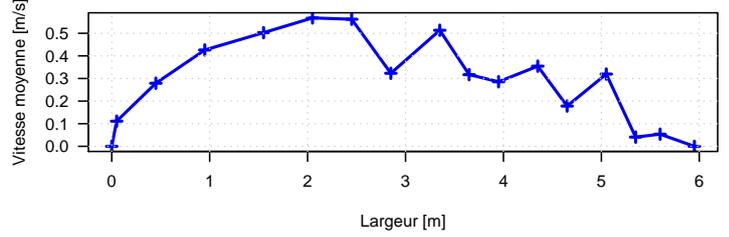
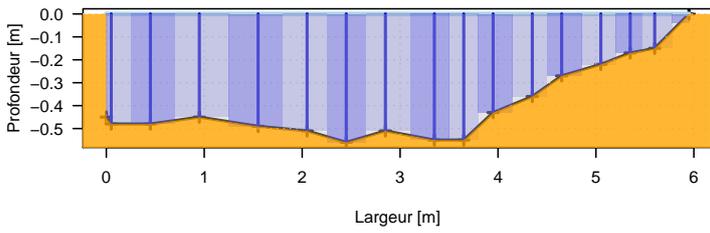
D_11_FLO_1_IBX_e_G.txt.rda



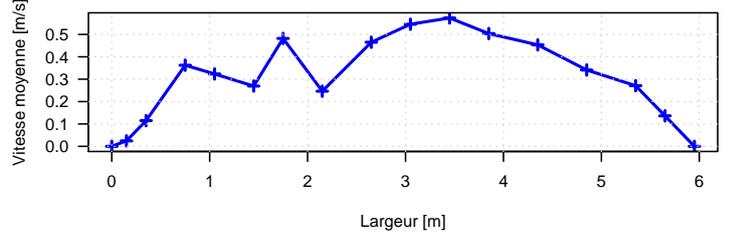
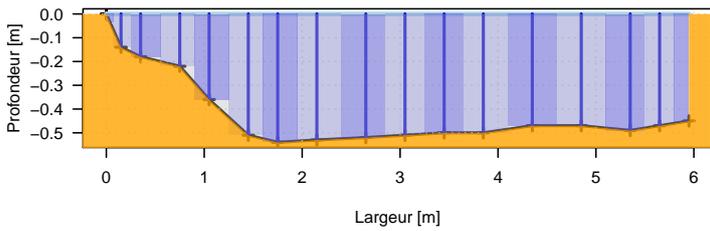
D_11_FLO_1_IBX_f_D.txt.rda



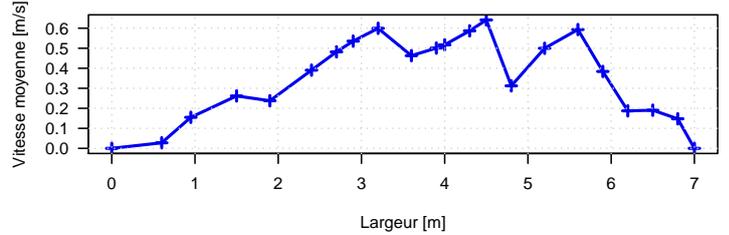
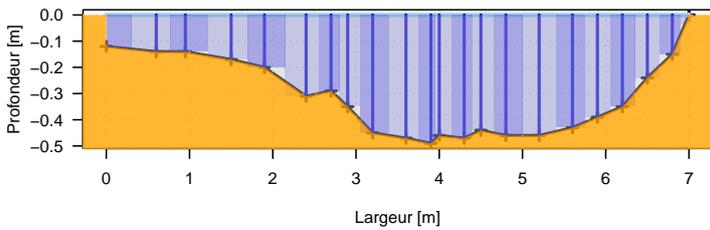
D_11_FLO_1_ILY_g_G.txt.rda



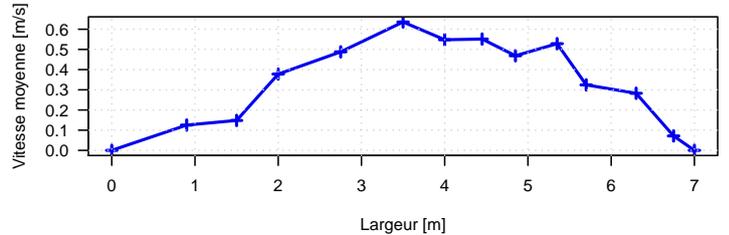
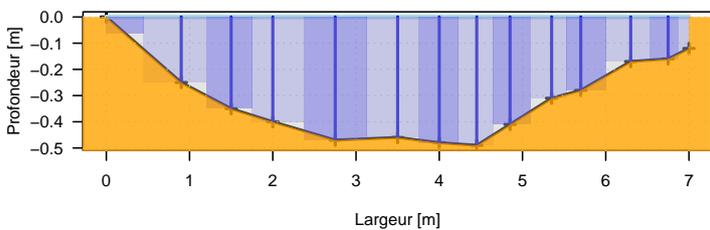
D_11_FLO_1_ILY_h_D.txt.rda



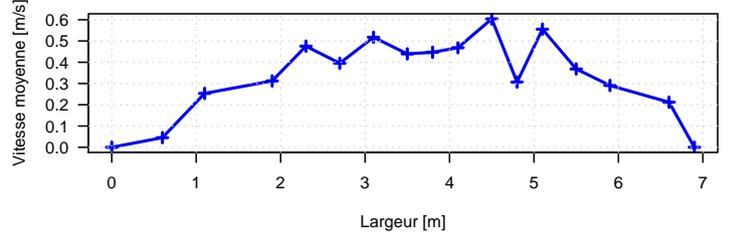
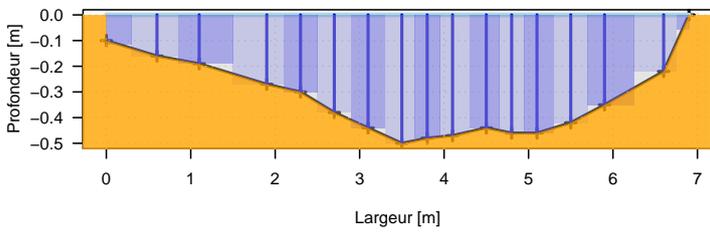
D_12_FLO_1_ILY_c_D.txt.rda



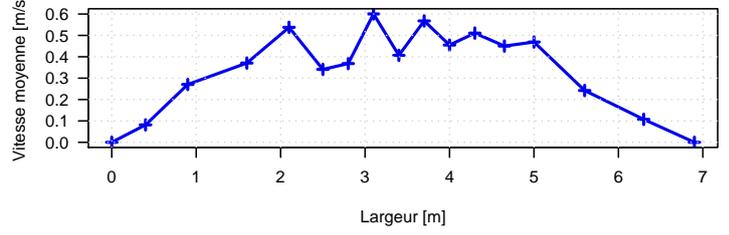
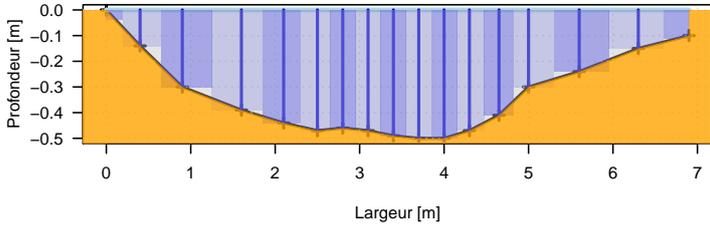
D_12_FLO_1_ILY_d_G.txt.rda



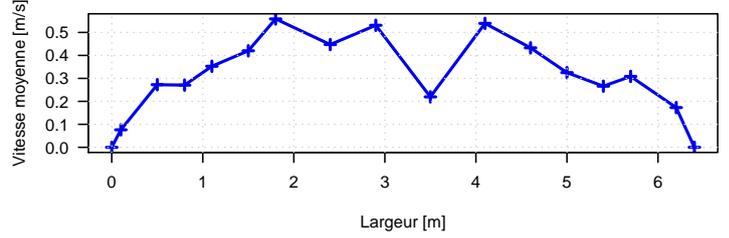
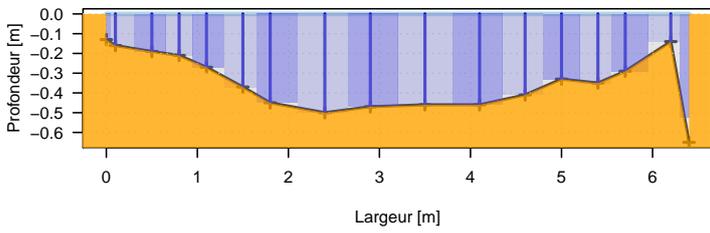
D_12_FLO_1_ILY_e_D.txt.rda



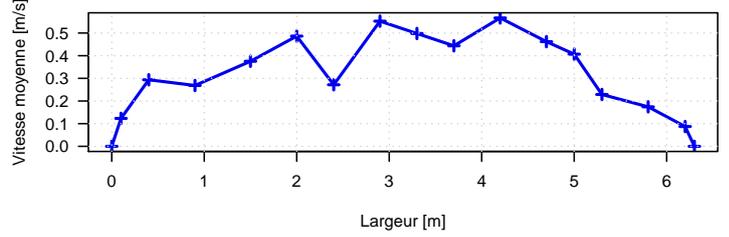
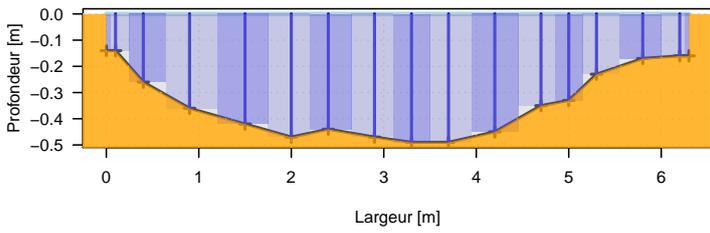
D_12_FLO_1_ILY_f_G.txt.rda



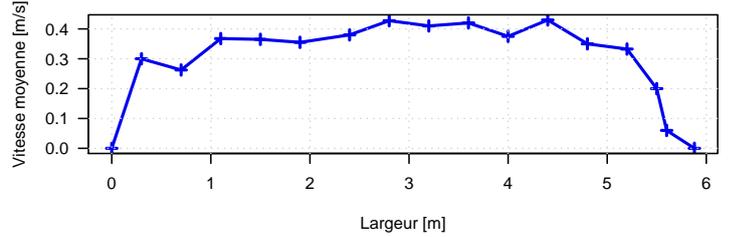
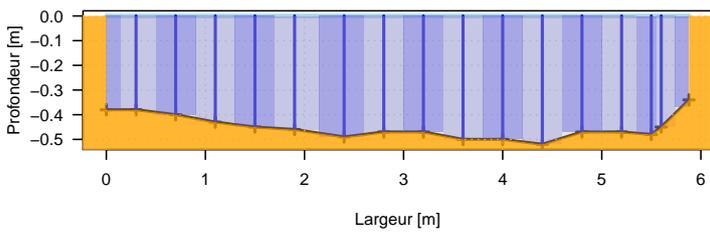
D_12_MOU_2_EDF_g_D.txt.rda



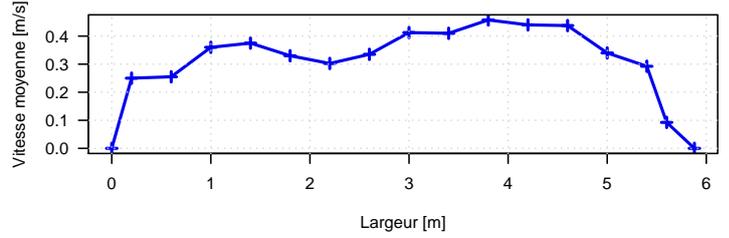
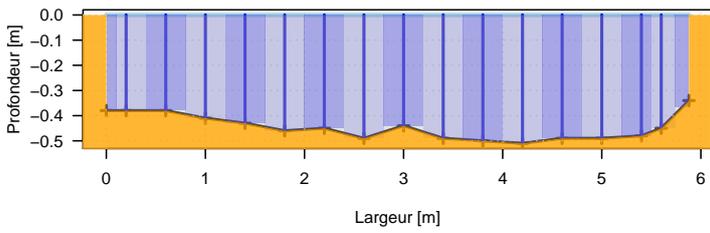
D_12_MOU_2_EDF_h_G.txt.rda



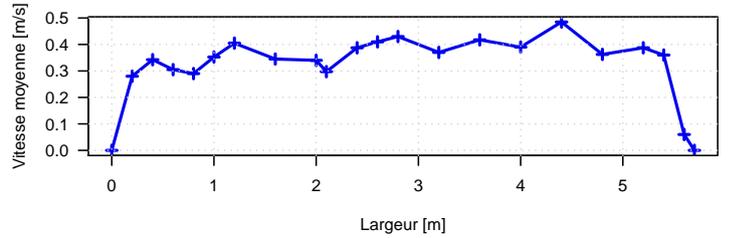
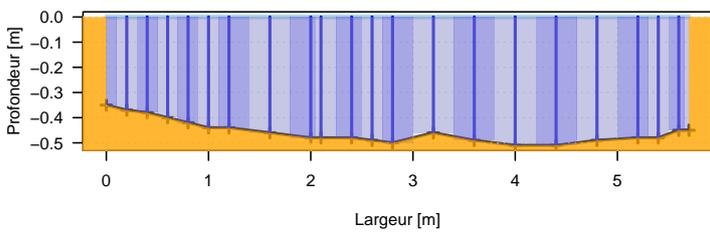
D_13_MOU_1_EDF_g_G.JAU.rda



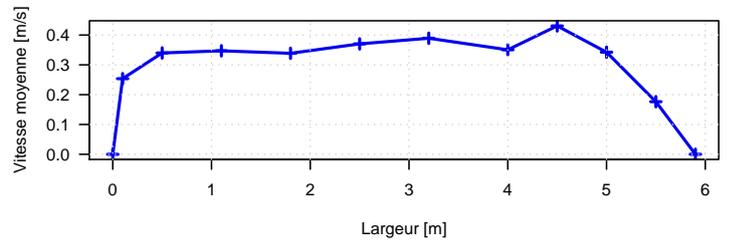
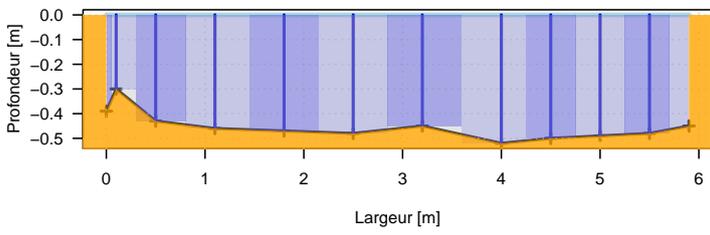
D_13_MOU_1_EDF_h_D.JAU.rda



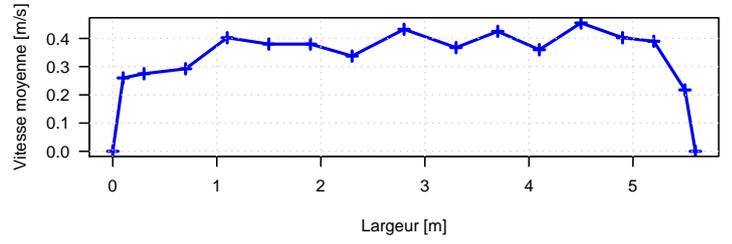
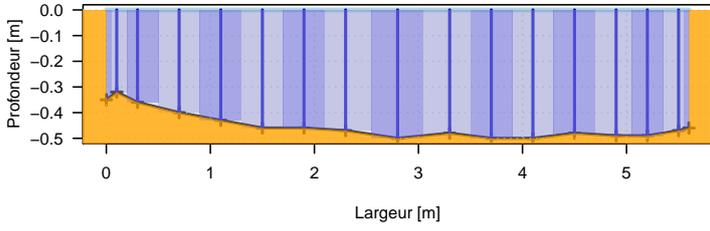
D_13_MOU_2_EDF_c_G.JAU.rda



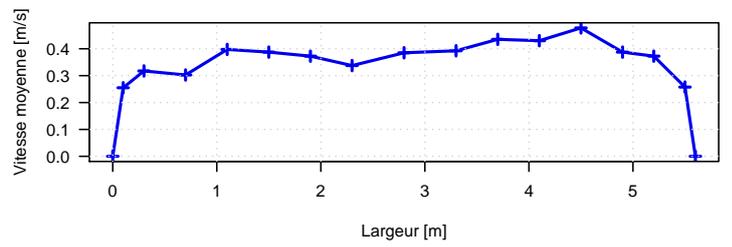
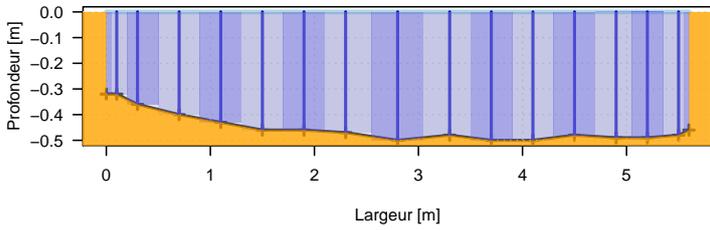
D_13_MOU_2_EDF_d_D.JAU.rda



D_13_MOU_2_EDF_e_G.JAU.rda



D_13_MOU_2_EDF_f_D.JAU.rda



Comparaison protocole anglo-saxon - protocole français

La note suivante propose une comparaison entre deux protocoles des mesures : le protocole anglo-saxon (1 à 2 points de mesure de vitesse par verticale, à des profondeurs normalisées) face au protocole français (plusieurs points de mesure par verticale). La note présente le protocole mis en œuvre ainsi que un résumé des résultats préliminaires. Cette étude a été réalisée suite à des discussions avec l'USGS afin d'apporter des éléments objectifs pour confronter les deux approches.

Cette comparaison mériterait une étude plus approfondie (notamment sur l'effet de site sur l'application de formules algébriques pouvant engendrer des erreurs systématiques) mais montre l'intérêt, pour une durée de mesure identique, d'augmenter le nombre de verticales de mesure et de réduire le nombre de points de mesure de vitesse par verticale pour réduire l'incertitude de la mesure et augmenter la précision de la valeur de débit. L'adoption d'un protocole de mesure à nombre de points limités peut engendrer des erreurs systématiques non négligeables qu'il conviendrait d'estimer pour chaque site de mesure.

Sampling strategy for discharge measurement using the velocity area method

Aurélien DESPAX (aurelien.despax@ujf-grenoble.fr) – 2016/07/29 - Preliminary results

Context:

There are two different approaches to sample the velocity field of a cross-section:

- 1) “French measurement protocol”: variable number of verticals (around 12) depending on the cross-sectional complexity and at least 5 points per vertical (or less if shallow water depth – relative difference between 2 adjacent velocity points should not exceed 20%).

Note: A new measurement protocol that consists in additional depth measurements (Fulford et Sauer, 1986; ISO, 1990; Boiten, 2000; Le Coz et al., 2012, Despax 2016b) has been recently applied at EDF-DTG. First, a “traditional” measurement (verticals with velocity measurements) is performed. Then, depth measurements are added between each couple of verticals with velocity measurements. The velocity is estimated by the linear interpolation of the Froude number between adjacent measurements. **This new protocol is not addressed in the following study.**

- 2) “Anglo-saxon measurement protocol”: 2 points per vertical (or 1 if shallow water depth) and at least 20 verticals ($\approx 5\% Q$).

Under normal conditions, both protocols lead to measurement duration of about 45 minutes.

Aim of the study:

Find the most efficient approach to reduce the uncertainty (random error and systematic error) for a given measurement duration.

Method:

Summary:

- 1) High detailed gaugings (here a set of 10 currentmeter gaugings)
- 2) Comparison of lateral depth-averaged velocity using:
 - a. 1 point method,
 - b. 2 points method,
 - c. 3 points method,
 - d. French protocol.
- 3) Application of a subsampling method (the method, that simulates the operator behavior, consists in a reduction of the number of verticals reduction): see Despax (2016b).
- 4) Computation of relative error (the high detailed measurement is taken as the discharge value reference)
- 5) Computation of the standard deviation and the median as a function of the number of verticals for each method (a., b., c. & d.).
- 6) For equal measurement duration, find the best approach to reduce the uncertainty and the bias.

Test case:

The method is applied to the Buech river streamgauging at *Les Chambons* hydrometric station (2014/07/22) as an example.

- 1) **Characteristics of the high detailed measurement**

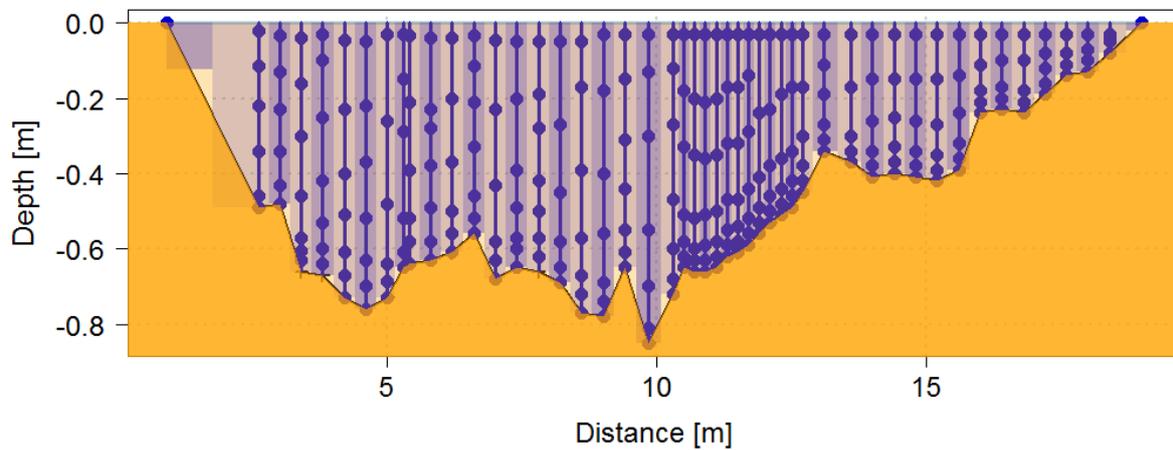


Fig. 1: Bathymetric profile of the Buech river streamgauging.

$Q = 2.98 \text{ [m}^3\text{/s]}$

$m = 47$ verticals

2) Lateral depth-averaged velocity

For each vertical, velocities are **interpolated** to apply the 3 points method (20, 40 and 80% of the depth):

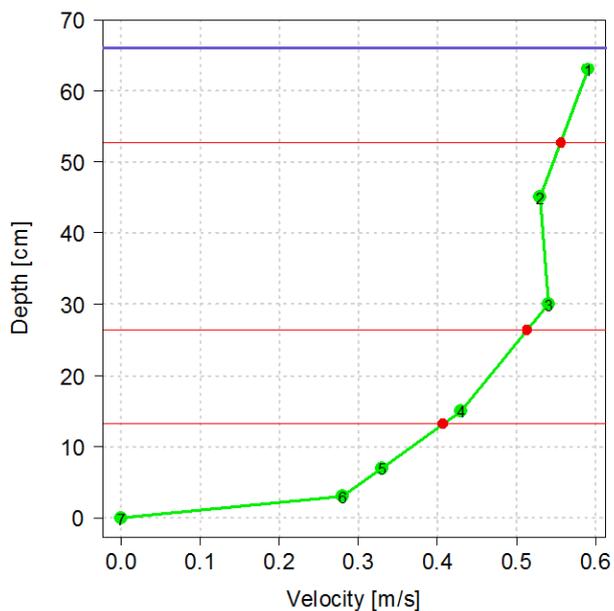


Fig. 2: Vertical velocity profile at $x = 10.9 \text{ [m]}$

Fig. 3 shows the lateral depth-averaged velocity distribution for each methods (French protocol (multipoints) in black, 1, 2 and 3 points).

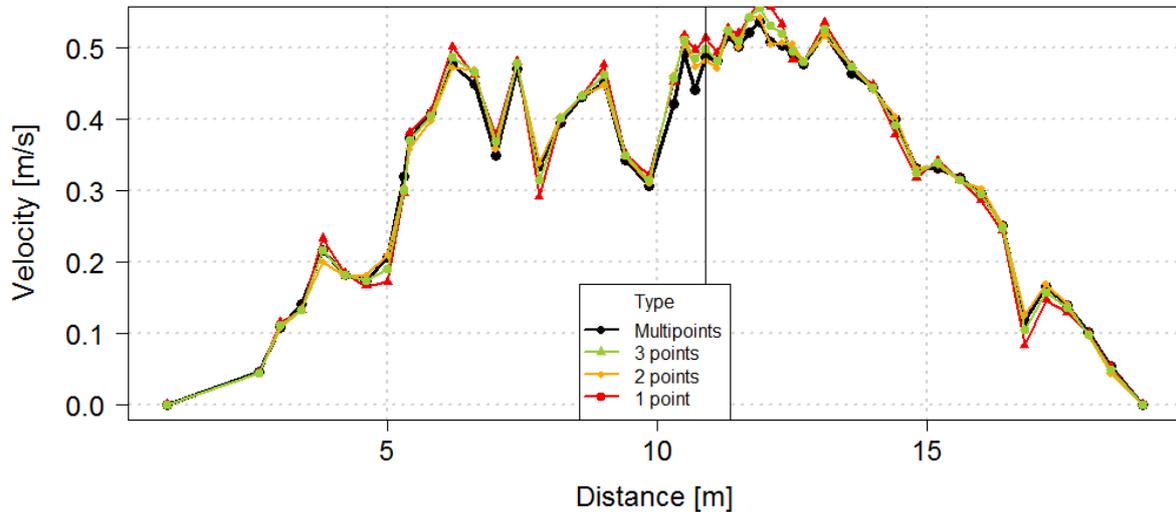


Fig. 3: Lateral depth-averaged velocity distribution

There are very few differences between each method.

3) Application of a subsampling method

A subsampling method is applied (see Despax *et al.* 2016a). The high-resolution gauging is subsampled by reducing the number of verticals. The subsampling method simulates the behavior of stream gaugers by a pseudorandom sampling procedure. It generates subsampled streamgaugings with at least 5 verticals. A probability is affected to vertical selection depending on:

- The proximity with a vertical already selected,
- The vicinity with the shore,
- The gain of information provided by the vertical (for instance a break of slope on the bathymetric profile or on the lateral depth-averaged velocity distribution).

In the first subsampling step the first and last verticals are consistently chosen as close as possible to the limits of the section so as to minimize the influence of extrapolations.

4) Computation of relative error

For each subsampled gauging, the relative error ($E_{sub}[\%]$) is computed considering the high detailed reference measurement (with at least 5 points per vertical) as the true discharge value (Q_{ref}).

$$E_{sub}[\%] = \frac{Q_{sub} - Q_{ref}}{Q_{ref}}$$

With Q_{sub} , the discharge computed for the subsampled streamgauging.

Fig. 4 shows the distribution of relative error for each method.

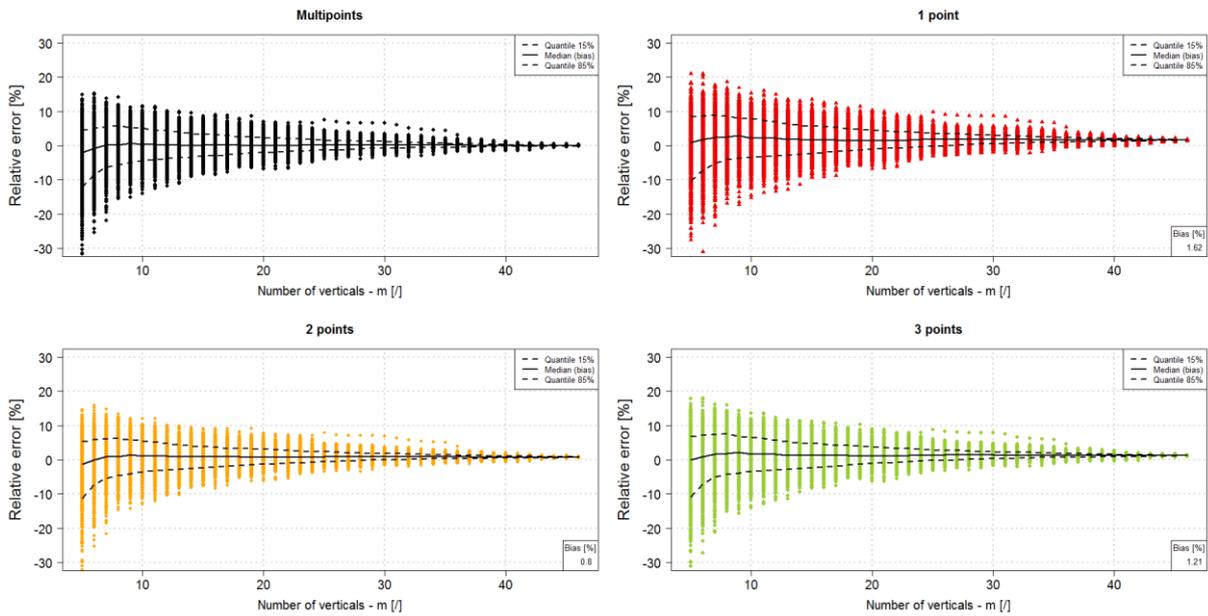


Fig. 4: Relative error depending on the number of verticals for each method.

5) Random and systematic errors

The computation of the standard deviation of relative errors as a function of the number of verticals for each method (a., b., c. & d.) gives an estimate of the uncertainty (random error, at 68% level of confidence) due to the limited number of verticals and the limited number of points per vertical (Fig. 5).

The bias is estimated by the median for each number of vertical (dashed lines on Fig. 5).

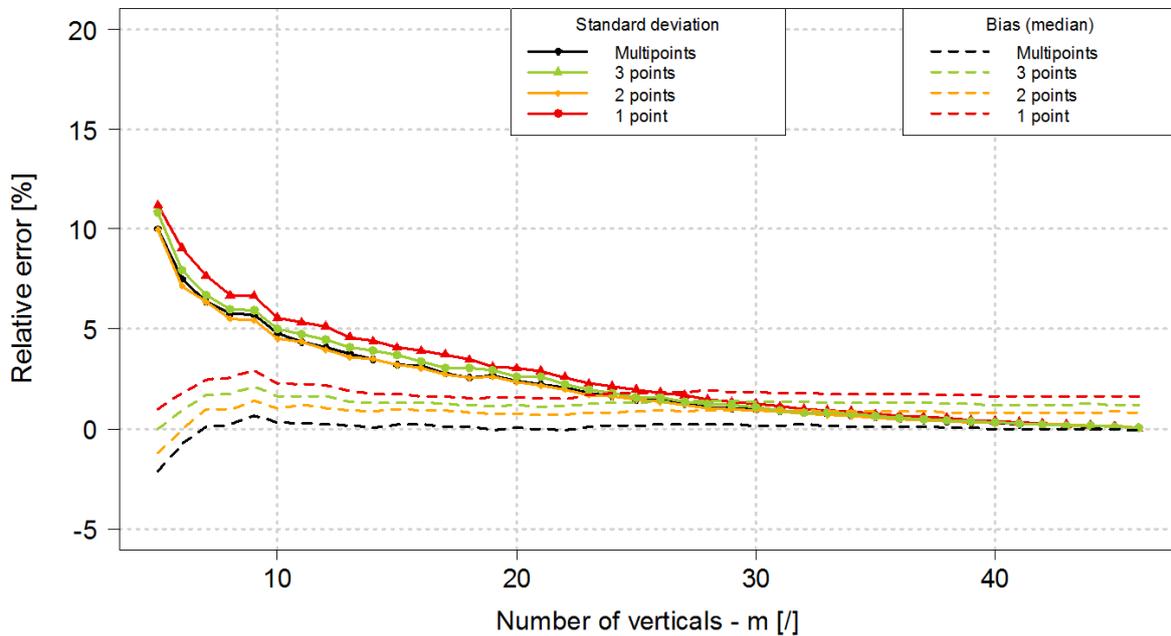


Fig. 5: Uncertainty and systematic error due to the reduction of number of verticals for each vertical velocity integration method

For this case, the bias is reduced by applying the 2 points method compare to the 1 point method or the 3 points method.

6) Optimization of the sampling strategy

For equal measurement duration, the aim of the study is to find the best approach to reduce the uncertainty (both random error and systematic error).

The measurement duration (noted $t_{meas.}$) can roughly be estimated as follow:

$$t_{meas.} = m(n_i(t_{exp} + t_{point\ chgt}) + t_{depth\ meas} + t_{vert\ chgt})$$

The number of verticals for a given measurement duration is:

$$m = \frac{t_{meas.}}{(n_i(t_{exp} + t_{point\ chgt}) + t_{depth\ meas} + t_{vert\ chgt})}$$

Table 1: Definition and value associated to each notation

Notation	Explanation	Value
$t_{meas.}$	Measurement duration	-
m	Number of verticals	-
n_i	Number of points per vertical	1, 2, 3 or 5
t_{exp}	Time of exposure	30 seconds
$t_{point\ chgt}$	Time between two adjacent velocity points	5 seconds
$t_{depth\ meas}$	Duration of a depth measurement	10 seconds
$t_{vert\ chgt}$	Time between two adjacent verticals	20 seconds

For a fixed measurement duration and with values selected in Table 1:, it leads to the following values of number of verticals.

Table 2: Number of verticals depending on the method applied and on the measurement duration.

Measurement duration	Method (number of points per vertical)			
	1	2	3	5
30 minutes (1800 sec)	26	17	13	9
45 minutes (2700 sec)	38	25	20	13
1 hour (3600 sec)	51	34	26	17

Uncertainty and bias estimates are represented on Fig. 6, Fig. 7 and Fig. 8 respectively for 30 minutes, 45 minutes and 60 minutes of measurement.

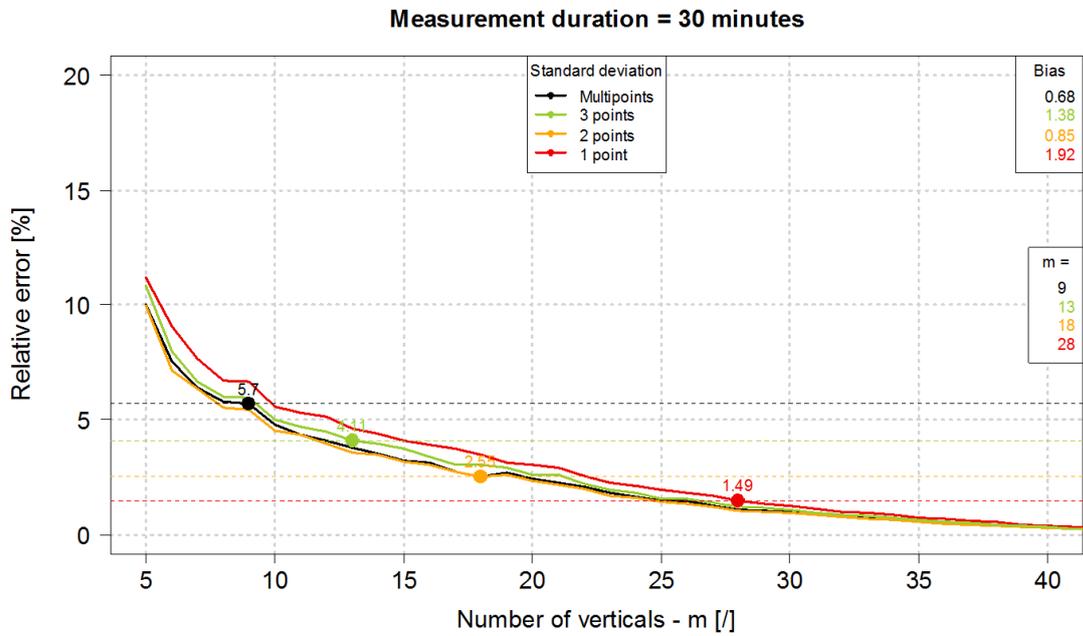


Fig. 6: Uncertainty and bias for each method considering measurement duration equal to 30 minutes

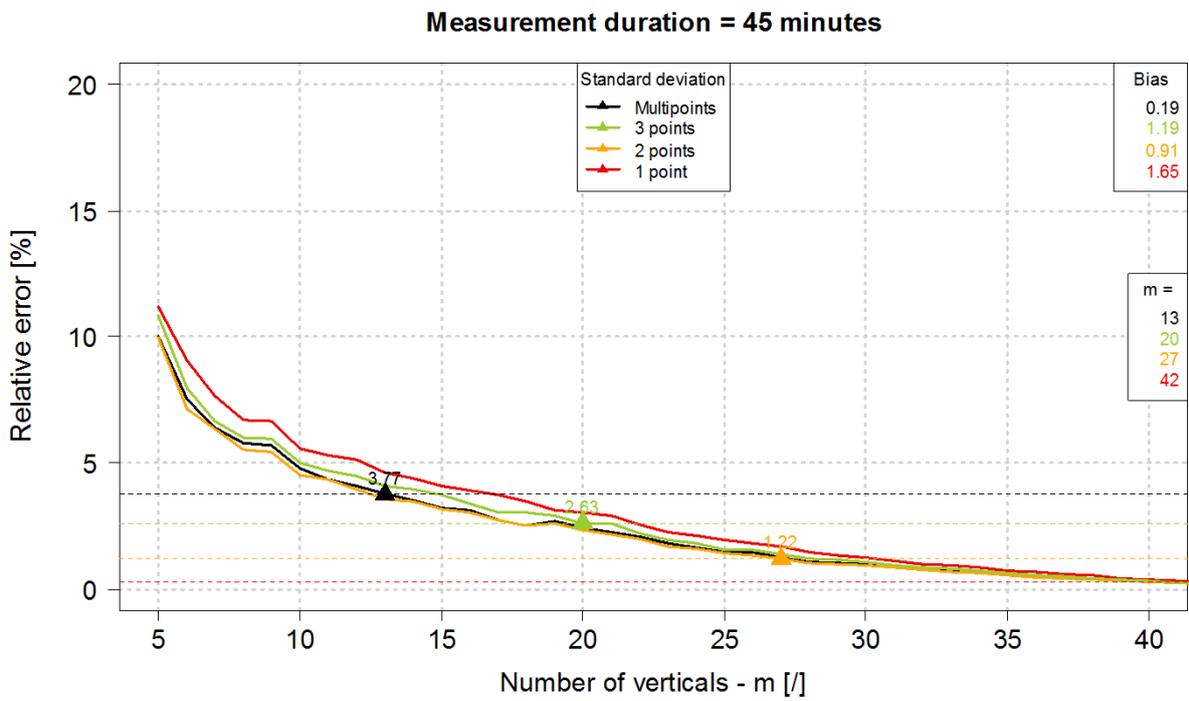


Fig. 7: Uncertainty and bias for each method considering measurement duration equal to 45 minutes

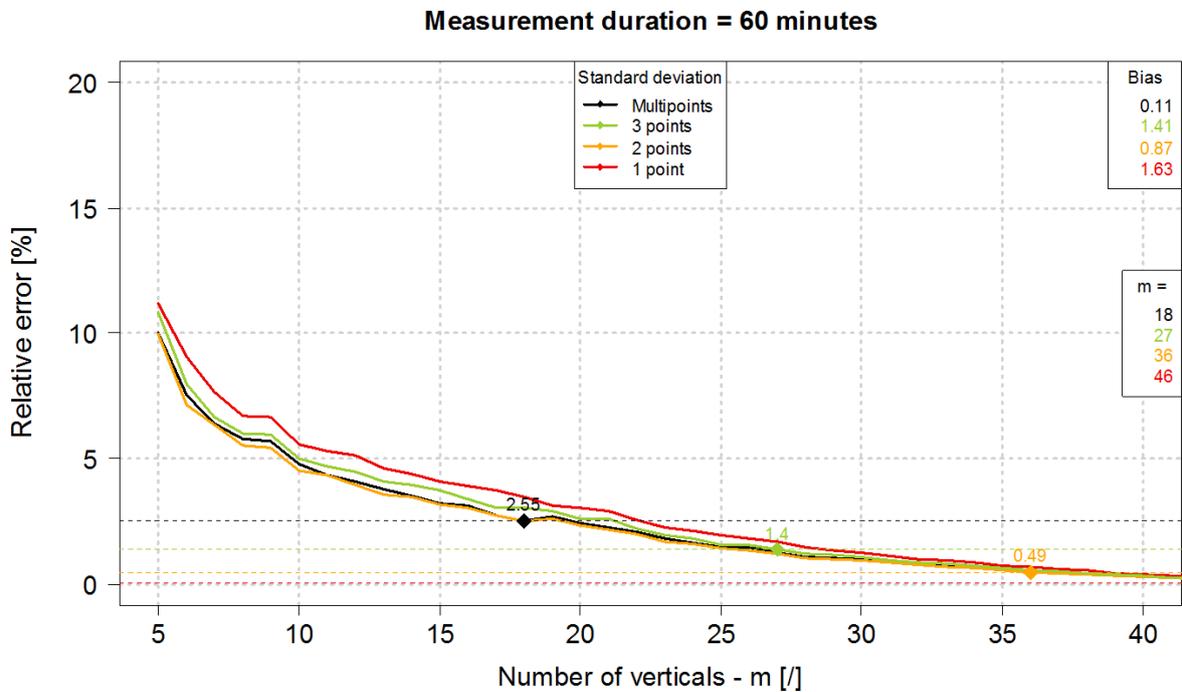


Fig. 8: Uncertainty and bias for each method considering measurement duration equal to 60 minutes

For a typical discharge measurement (45 minutes, see Fig. 7), the uncertainty (at 68% level of confidence) is reduced between the French protocol (13 verticals, uncertainty of 3.7%) and the 2 points method (27 verticals, uncertainty of 1.22%). However, the bias increases but is lower compare to the 3 points method or the 1 point method.

Results for 10 high-detailed measurements:

The method has been applied to 10 various currentmeter measurements (see the Resu_optimum_time_final2.pdf file attached).

The following table shows the comparison between French protocol and the 2 points method (Table 3) for a 45-minutes measurement.

For all measurements, the uncertainty decreases when applying the 2 points method (and increasing the number of verticals).

The average bias is slightly higher compare to the french protocol but minimum and maximum values of bias are lower.

Same results are observed for 30-minutes and 60-minutes measurements (see all data in Sampling_Strategy.xls attached).

Table 3: Comparison of uncertainty and bias between french protocol and 2 points method for a 45-minutes measurement

High-detailed measurements	Number of verticals	2 points method		French protocol		French - 2 points		2 points method		French protocol	
		Uncertainty associated with measurement duration of ...	Tps = 2700s	Uncertainty associated with measurement duration of ...	Tps = 2700s	Difference in uncertainty associated with measurement duration of ...	Tps = 2700s	Bias associated with measurement duration of ...	Tps = 2700s	Bias associated with measurement duration of ...	Tps = 2700s
MOUL LesChambons 201407222	47	1.224	3.774	2.550	2.228	0.909	0.189				
MOUL PontenRoyans 20010127	36	0.889	3.117	2.228	1.580	-0.669	-1.336				
MOUL Sassenge 20130710	33	0.472	2.052	1.580	1.168	-0.295	0.268				
MOUL Serres 201407222	53	0.564	1.732	1.168	1.043	0.674	-0.513				
MOUL SeuilPremont-2- 201407223	39	0.429	1.471	1.043	2.550	0.800	-0.344				
MOUL LesChambons 201407222	47	1.224	3.774	2.550	2.228	0.909	0.189				
MOUL PontenRoyans 20010127	36	0.889	3.117	2.228	1.580	-0.669	-1.336				
MOUL Sassenge 20130710	33	0.472	2.052	1.580	1.168	-0.295	0.268				
MOUL Serres 201407222	53	0.564	1.732	1.168	1.043	0.674	-0.513				
MOUL SeuilPremont-2- 201407223	39	0.429	1.471	1.043	2.221	0.800	-0.344				
MOUL SeuilPremont 201407223	46	0.659	1.596	0.937	2.470	1.229	0.381				
MOUL VillarLoubiere 20100128	50	2.015	4.485	2.470	2.221	0.517	-2.492				
MOUL Voiron 20130710	45	1.131	3.352	2.221	3.866	0.096	0.554				
U001 Pontdeabeaume 20150605	39	1.083	4.949	3.866	5.106	-1.097	0.731				
U005 infernet 20150730	95	2.049	7.154	5.106	-1.4	0.973	3.835				
	Number of vertical :	27	13								
	Mean :	0.939	3.055	2.116	0.304		-0.031				
	Minimum :	0.429	1.471	0.937	-1.097		-2.492				
	Maximum :	2.049	7.154	5.106	1.229		3.835				

Limitations:

To apply algebraic methods (1, 2 or 3 points), velocities are interpolated.

Conclusions:

Bias is reduced by applying the 2-points method compare to other methods (1 or 3 points).

As already demonstrated (Barrows et Horton, 1907 ; Despax, 2016b), there is no substantial gain to apply the 3 points method compare to the 2 point method.

For a given measurement duration, increasing the number of verticals reduces the uncertainty more efficiently than an increase of the number of points per vertical.

Uncertainty and bias (systematic error due to the uses of limited number of points) are site-specific.

To do:

Same plots with uncertainties (IVE and Flaure) instead of relative error.

Same study considering the “new French” protocol (with additional depth measurements).

References:

Boiten, W. (2000). Hydrometry. Balkema. 246 p.

Barrows, H. K. et Horton, R. E. (1907). Determination of stream flow during the frozen season. Technical report 187, US Geological Survey. 100 p.

Despax, A., Perret, C., Garçon, R., Hauet, A., Belleville, A., Le Coz, J. et Favre, A.-C. (2016a). Considering sampling strategy and cross-section complexity for estimating the uncertainty of discharge measurements using the velocity-area method. *Journal of Hydrology*, 533:128–140.

Despax (2016b). Incertitude des mesures de débit des cours d'eau au courantomètre. Amélioration des méthodes analytiques et apports des essais interlaboratoires.[Uncertainty in discharge measurements using the velocity-area method. Improvement of analytical methods and contribution of field inter-laboratory experiments.(in French)]. PhD dissertation. 273p.

Fulford, J. et Sauer, V. B. (1986). Comparison of velocity interpolation methods for computing open-channel discharge. U.S. Geological Survey Water-supply Paper, pages 139–144.

ISO (1990). ISO 9823 :1990 - Hydrometry ☐ Velocity-area method using a restricted number of verticals. 17 p.

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

INCERTITUDE DES MESURES DE DÉBIT DES COURS D'EAU AU COURANTOMÈTRE. AMÉLIORATION DES MÉTHODES ANALYTIQUES ET APPORTS DES ESSAIS INTERLABORATOIRES.

Lors des crises (sécheresses ou crues) les données hydrométriques participent directement aux processus de décision pour la gestion en temps réel de la ressource en eau mais également à l'analyse a posteriori pour le règlement des litiges. Pour pouvoir prendre des décisions cohérentes, il est alors essentiel de connaître l'incertitude associée aux données de débit. Si les techniques hydrométriques se sont nettement améliorées au cours des dernières décennies, l'estimation des incertitudes reste un défi pour la communauté de l'hydrométrie.

Cette étude, portant sur la quantification des incertitudes des jaugeages au courantomètre, s'inscrit dans une suite de travaux récents dont la perspective vise la mise à jour potentielle de la norme ISO 748. Une méthode de propagation analytique des incertitudes, nommée FLAURE, est exposée dans ce manuscrit. Elle permet de pallier les inconvénients des méthodes existantes et vise l'objectivation des différentes sources d'incertitude. Une attention particulière est portée au terme prépondérant d'incertitude dû à l'intégration latérale des profils de vitesse et de bathymétrie (u'_m). Pour cela un lien a été établi entre un indice de qualité d'échantillonnage et les erreurs d'interpolation latérale des profils grâce à l'étude de jaugeages à haute résolution latérale de mesure.

En l'absence d'étalon de référence en termes de débit d'un cours d'eau, l'apport des essais interlaboratoires, permettant d'obtenir une estimation de l'incertitude dans les conditions des essais, est discuté. La confrontation des approches analytiques à deux campagnes d'essais interlaboratoires a montré les limites de ces deux approches et n'a pas permis de mettre en évidence une méthode analytique fiable. Néanmoins, la multiplication des campagnes d'essais de ce type dans des conditions variées permettra, à terme, d'aboutir à un calcul d'incertitude plus fiable grâce notamment à l'estimation de composants d'incertitude jusqu'alors omis.

UNCERTAINTY IN DISCHARGE MEASUREMENTS USING THE VELOCITY-AREA METHOD. IMPROVEMENT OF ANALYTICAL METHODS AND CONTRIBUTION OF FIELD INTER-LABORATORY EXPERIMENTS.

During crisis (droughts or floods) hydrometric data are essential for decisions, in real-time, related to water resource management but also afterwards in cases of disagreement. Discharge measurements are the first step to produce such data and associated uncertainty has to be estimated in order to make coherent decisions. Although discharge measurements techniques have improved in recent years, uncertainty analysis is still a challenge in hydrometry.

This study aims to estimate uncertainty in discharge measurements using the velocity-area method with potential perspective of ISO 748 standard updating. Different analytical methods, that follow the guide to the expression of uncertainty in measurement, are available in the literature, all with their own limitations and drawbacks. To address the limitations of existing methods, this study presents a new methodology, called FLAURE, to estimate the uncertainty components. Among the terms forming the combined relative uncertainty in measured discharge, the uncertainty component relating to the limited number of verticals often includes a large part of the relative uncertainty (u'_m). Special attention is given to the estimation of u'_m component related to cross-sectional interpolation errors. High-resolution reference gaugings are used to assess the uncertainty component through a statistical analysis. The method then establishes an explicit link between the estimation of cross-sectional interpolation errors and a sampling quality index.

It is a challenging task to assess which analytical method provides the best uncertainty estimation due to the lack of streamflow measurement reference standards in natural streams. A useful tool to empirically estimate the uncertainty of a gauging method is the field inter-laboratory experiments. This study presents a comparison between analytical methods and two field inter-laboratory experiments. The comparison has shown the limits of these two approaches and has not highlighted the best analytical method. However, further comparisons, with various site conditions, between the two approaches will probably consolidate analytical methods and improve the reliability of discharge uncertainty estimates.