

Débitmétrie et mécanique des fluides numérique : contribution à l'évaluation et à la réduction des incertitudes des mesures de vitesse moyenne

Frédérique LARRARTE¹, Matthieu DUFRESNE², Emmanuel MIGNOT³, Gislain LIPEME KOUYI⁴,
Nicolas RIVIERE³, José VAZQUEZ⁵, Claude JOANNIS¹

¹ LUNAM, IFSTTAR, GERS-LEE, CS 4, F-44344 Bouguenais cedex - frederique.larrarte@ifsttar.fr; claude.joannis@ifsttar.fr

² 3D EAU, 21 rue Jacobi-Netter, F-67200 Strasbourg - matthieu.dufresne@engees.unistra.fr

³ Université de Lyon, INSA Lyon, CNRS, LMFA UMR5509, F-69621 Villeurbanne - emmanuel.mignot@insa-lyon.fr; nicolas.riviere@insa-lyon.fr

⁴ Université de Lyon - INSA Lyon, Laboratoire Déchets Eaux Environnement Pollutions, adresse : 34 avenue des Arts, F-69621 Villeurbanne cedex - gislain.lipeme-kouyi@insa-lyon.fr

⁵ Ecole Nationale du Génie de l'Eau et de l'Environnement de Strasbourg, Laboratoire ICube, 1 quai Koch, F - 67000 Strasbourg - jose.vazquez@engees.unistra.fr

RÉSUMÉ. – Les gestionnaires de réseau d'assainissement urbain sont amenés à équiper leurs réseaux à l'aide de débitmètres. Lorsqu'il n'existe pas une relation permanente permettant de relier localement la hauteur d'eau et le débit, on recourt fréquemment à la mise en place de capteurs de vitesse. Le passage de la vitesse mesurée par ces capteurs vers la vitesse moyenne dans la section implique des incertitudes difficiles à évaluer. La modélisation 3D des écoulements permet de simuler la réponse des capteurs pour évaluer ces incertitudes, et, le cas échéant, de les réduire par étalonnage numérique. Après une présentation de la démarche générale, nous l'illustrerons par un cas générique d'un site à l'aval d'un coude et par le cas spécifique d'une section complexe.

Mots-clés : débitmétrie, capteur de vitesse, incertitude, étalonnage, mécanique des fluides numérique.

Flow measurement and computational fluid dynamics: contribution to the assessment and control of uncertainties on mean velocity measurement

ABSTRACT. – Sewer network managers are more and more implementing discharge sensors within sewer networks. When no permanent relation exists between the local water depth and discharge, velocity sensors are usually installed. In such case, the velocity values measured by these sensors must be extrapolated to reach the averaged velocity across the flow section. This extrapolation implies uncertainties which are difficult to assess. 3D modelling of the velocity field allows to simulate the response of sensors for assessing these uncertainties, and reduce them by numerical calibration. In the following text, the general methodology is first introduced and then applied to two case studies, including a bend flow and a complex section configuration.

Key-words: discharge, velocity sensor, uncertainty, calibration, computational fluid dynamics,

I. INTRODUCTION

Selon la norme 772 (ISO, 2011), l'hydrométrie est une science ayant pour objet le mesurage de l'eau et qui comprend méthodes, techniques et instruments associés. Cette définition, communément acceptée en rivière, est également utilisée dans le domaine de l'hydraulique urbaine dans un contexte où la réglementation nationale (arrêtés interministériels du 22 décembre 1994, du 22 juin 2007 puis du 21 juillet 2015) demande aux gestionnaires de surveiller les réseaux, d'évaluer leurs performances, d'intervenir rapidement en cas de dysfonctionnements ponctuels, d'informer le maître d'ouvrage sur les aménagements souhaitables pour améliorer les performances et augmenter la fiabilité de la collecte. La mise en place de réseaux de mesures est donc aussi une composante importante d'une politique de gestion des systèmes d'assainissement (Bertrand-Krajewski *et al.*, 2000 et 2001).

Pour des raisons de simplicité d'installation, de fiabilité de la mesure et de facilité de maintenance, les installations ne mettant en œuvre que des mesures de hauteurs d'eau afin d'estimer les débits sont à privilégier. Cependant, elles impliquent l'existence d'une relation univoque localement entre la hauteur d'eau et le débit. Dès que cette dernière n'est pas assurée, il devient nécessaire d'associer une valeur de vitesse longitudinale moyenne (aussi appelée vitesse débitante, notée \bar{U}) à la mesure de hauteur d'eau pour évaluer le débit liquide Q tel que $Q = \bar{U}S$ avec S la section de l'écoulement. De plus, même si la mise en place de capteurs est une pratique qui se généralise, elle est confrontée au manque de sites répondant aux règles de l'art telles qu'un tronçon rectiligne, sans dépôt, permettant le respect des conditions de sécurité pour le personnel et le matériel...

Mais comme le fait remarquer la charte hydrométrie (Banque hydro, 1998), l'hydrométrie ne doit pas être une

routine, mais un métier ouvert aux technologies, à l'intelligence, à la remise en cause. C'est le même état d'esprit qui a incité Larrarte *et al.* (2010) à ébaucher une méthodologie de qualification de sites de mesures en réseau d'assainissement. Cette démarche s'est affinée dans le cadre du projet MENTOR (acronyme de MEasurement sites conception method for sewer NeTwORks pour Méthodologie et outils opérationnels de conception et de qualification de sites de mesures en réseau d'assainissement) et nous amène à présenter en quoi la modélisation numérique peut contribuer à l'hydrométrie. Après une présentation de la démarche générale, nous l'illustrerons par un cas générique d'un site à l'aval d'un coude et par le cas spécifique d'une section complexe.

II. MÉTHODOLOGIE

Les stations débitmétriques hauteur-vitesse couramment installées dans les réseaux d'assainissement mesurent conjointement la hauteur et la vitesse de l'écoulement dans l'objectif d'évaluer le débit. Citons par exemple les capteurs dits Doppler, les profilomètres, les cordes de vitesse (temps de transit), etc. Une difficulté importante de ce type de mesure provient de la possible différence entre la vitesse mesurée par le capteur (qui correspond généralement à une zone restreinte de l'écoulement) et la vitesse moyenne permettant le calcul du débit. En effet, le domaine de mesure pris en compte par le capteur ne couvre pas en général l'ensemble de la section d'écoulement. Il faut donc réaliser une extrapolation de la valeur mesurée pour calculer une valeur moyenne (Larrarte *et al.*, 2016), ce qui nécessite une connaissance du champ de vitesse. Cette extrapolation est relativement facile lorsque la forme de la section est simple et le champ de vitesse développé. Malheureusement, les sites répondant à ces deux critères n'existent pas toujours dans le secteur d'intérêt (Larrarte *et al.*, 2016) et il faut alors envisager d'instrumenter dans des sections complexes et/ou des profils de vitesses influencés par une singularité. Deux stratégies peuvent alors être mises en œuvre, préconisées notamment par les normes ISO 6416 et 15769 :

- La première stratégie consiste à placer la station de mesure dans un canal dénué de singularités (coudes, confluences, etc.) sur une longueur droite suffisamment importante pour s'affranchir de leurs influences. Cette stratégie est rarement directement applicable à une station de mesure en réseau d'assainissement où les singularités sont très nombreuses. On peut néanmoins chercher à définir des conditions pour que l'influence des singularités soit compatible avec l'incertitude acceptée sur les résultats de mesure (Agence de l'eau Rhin Meuse, 2016).
- La seconde stratégie consiste à procéder à une calibration de la station de mesure, c'est-à-dire à établir un lien entre la vitesse mesurée et la vitesse moyenne. Cette stratégie peut être menée au moyen d'un jaugeage de la section en travers par exploration des champs de vitesse à l'aide d'un courantomètre ou par dilution. Ces opérations sont cependant délicates en réseau d'assainissement, voire impossibles pour les plus forts débits (pour des raisons de sécurité).

La mécanique des fluides numérique (CFD) permet la simulation des écoulements sur un site de mesure potentiel décrit par sa géométrie, par la gamme des débits à mesurer et par les gammes de variations des différentes conditions aux limites (autres que le débit à mesurer, et se résumant souvent à des hauteurs d'eau). Pour évaluer une incertitude sur le mesurage d'un débit, cette modélisation hydraulique doit être combinée à une simulation du mesurage de la

vitesse selon la technologie et l'emplacement choisis pour les capteurs. Pour cela il faut en chaque point du domaine de mesure du capteur, projeter chaque composante de la vitesse sur la direction prise en compte par le capteur (corde pour un capteur à temps de transit, radiale pour un capteur Doppler), et intégrer les modules de ces projections selon les modalités mises en œuvre par le capteur. A noter que nous ne prenons pas en compte l'incertitude liée à la charge en suspension car Larrarte et François (2008) a montré que l'atténuation était négligeable dans le contexte usuel des collecteurs d'assainissement urbain.

Cette approche peut être mise en œuvre de différentes manières pour résoudre les difficultés évoquées plus haut. Dans cette communication deux approches sont présentées. La première est une approche générique permettant d'étudier la sensibilité de la valeur mesurée (et de l'erreur associée) aux conditions de mesure. La deuxième approche est une modélisation spécifique de l'ensemble « écoulements + capteurs » propre à un site de mesure donné. On peut alors réaliser un « étalonnage numérique », c'est-à-dire déterminer une relation entre les grandeurs mesurées (hauteur et vitesse[s]) et le débit que l'on veut connaître. Cette relation ne sera en général qu'une approximation, car une même valeur de vitesse moyenne peut conduire à différentes valeurs de vitesse mesurées pour différentes conditions d'écoulement.

Les deux approches s'intègrent dans la démarche générale détaillée dans la figure 1 qui distingue les étapes qui sont propres à la simulation du comportement hydraulique d'un site (en bleu) et celles qui sont relatives aux interactions entre un capteur donné et les divers contextes hydrauliques susceptibles d'apparaître sur le site considéré (en jaune).

Cet organigramme comporte une itération sur les conditions aux limites, qui porte sur les hauteurs et sur le(s) débit(s). Cette itération est essentielle, que ce soit dans une démarche générique ou spécifique. Elle permet d'évaluer l'influence de variations de conditions aux limites sur les mesures réalisées pour une même vitesse moyenne, et le cas échéant d'étalonner (numériquement) la mesure de vitesse moyenne. A noter que l'effort porte sur cette grandeur qui est la plus délicate à mesurer en collecteur comme le rappelle Larrarte *et al.* (2016), le débit étant, lui, le résultat d'un calcul.

Une itération optionnelle permet d'étudier l'influence de la position de la section de mesure (ou plus simplement des capteurs) sur les résultats et correspond plutôt à une démarche générique.

Les données utilisées dans cet article sont majoritairement des résultats numériques issus de simulations d'écoulement obtenues avec des codes de calcul qui résolvent les équations de Navier-Stokes moyennées par décomposition de Reynolds (RANS). Celles-ci expriment la conservation de la masse ainsi que la conservation de la quantité de mouvement dans le domaine de calcul.

Les travaux antérieurs ont montré que les écoulements en réseau d'assainissement sont tridimensionnels. Ainsi, même si la composante de la vitesse parallèle à l'axe de la conduite est prépondérante, les composantes transversales et verticales sont présentes sous l'effet de courants secondaires avec un caractère anisotrope de la turbulence (grandeurs caractéristiques différentes dans les trois directions de l'espace). Les travaux de Stovin *et al.* (2002), de Larrarte *et al.* (2007) et de Bonakdari *et al.* (2008) ont montré l'influence du modèle de turbulence sur la représentation de la physique de l'écoulement et en particulier des dits courants secondaires. Afin de bien reproduire la physique de l'écoulement, un schéma de fermeture de second ordre de type Reynolds Stress Model (RSM) est nécessaire : le schéma SSG proposé par Speziale *et al.* (1991) a été retenu ici.

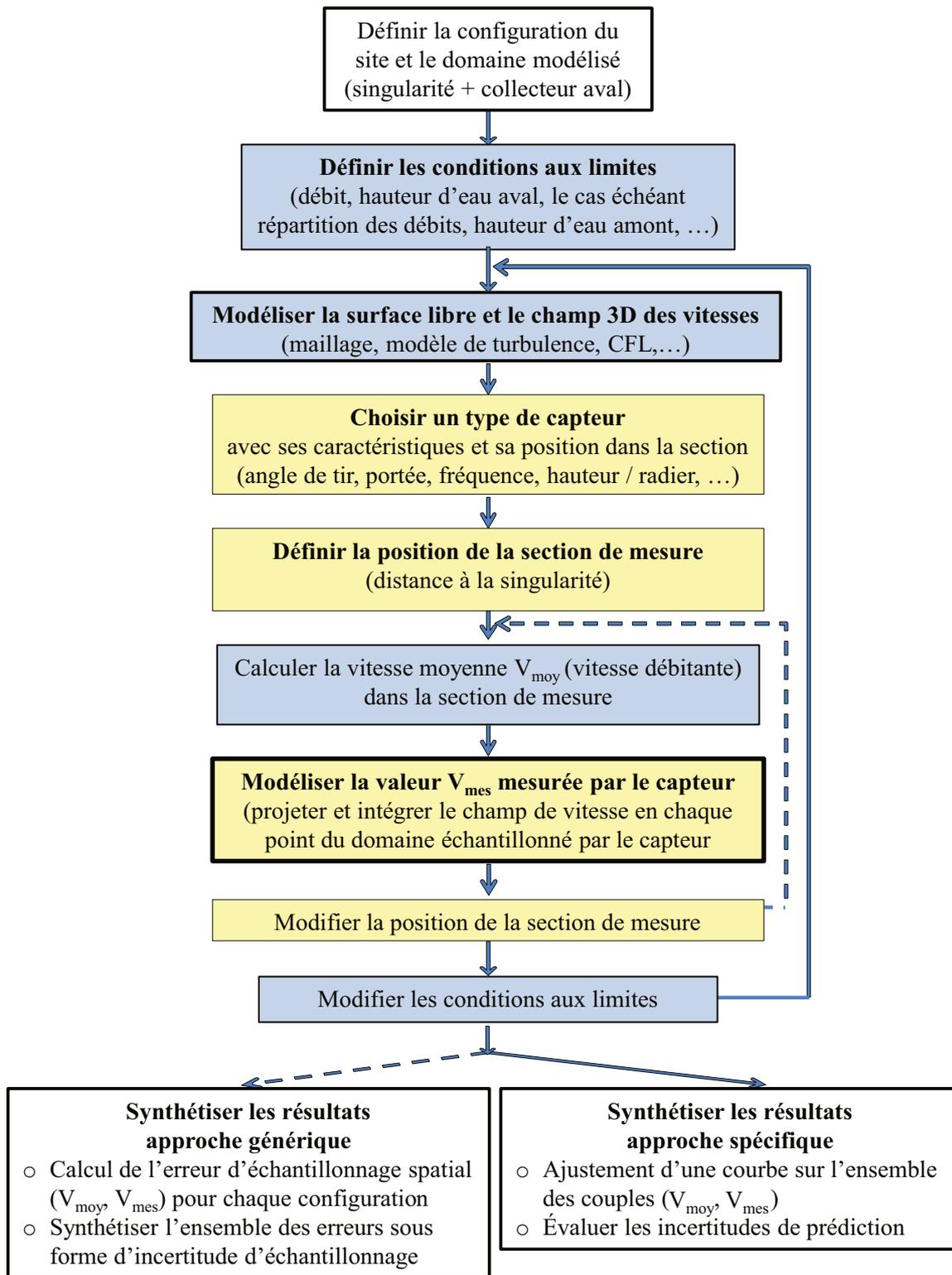


Figure 1 : Démarche générale applicable pour une approche générique ou spécifique des interactions entre un capteur de vitesse et les conditions d'écoulement au voisinage d'une singularité

III. EXEMPLES D'APPLICATION

Nous présentons ci-après deux exemples d'application de la méthode présentée ci avant.

III.1. APPROCHE GÉNÉRIQUE : COUDE

Nous avons mené une analyse statistique des réseaux d'assainissement urbains de trois des plus grandes villes de

France, cela a montré que plus de 50% des collecteurs sont de sections circulaires. Cette partie de l'étude se centre donc sur cette géométrie. Larrarte *et al.* (2010) ont étudié l'influence du rayon de courbure d'une conduite courbée sur le champ de vitesse et ont conclu que ce paramètre n'a qu'une influence négligeable sur l'écoulement en aval d'un coude. Dans cette étude, un diamètre de 1,5 m et un rayon de courbure de $R=9$ m ont été considérés. Cette même étude a montré qu'une longueur de 50 m est nécessaire en amont du coude pour

permettre que le champ de vitesse calculé soit pleinement développé à l'entrée du coude. Cette étude a enfin montré que la rugosité des parois du collecteur a une influence très limitée, elle a été prise égale à 2 mm dans cette étude pour représenter du béton de bonne qualité. A l'amont du domaine de calcul, la vitesse a une valeur uniforme V sur toute la section, la hauteur d'eau h est spécifiée. A l'extrémité aval, une condition de pression hydrostatique est appliquée. L'interface eau-air est représentée par une approche diphasique qui fait appel à la méthode « volume of fluid » (VOF ; Hirt and Nichols, 1981).

Le maillage utilisé est de type polyédrique. En effet, selon la société qui commercialise le code, ces formes permettent de minimiser la diffusion numérique par une meilleure représentation des gradients. La zone de proche paroi est traitée avec un maillage local dit *prism layer model* qui est constitué de prismes orthogonaux placés tout le long des parois. La géométrie de ces cellules permet à l'écoulement de rester aligné avec le maillage et donc de minimiser les erreurs de diffusion numérique.

Les mesures de vitesses ou autres variables en réseaux d'assainissement se font par des capteurs dont le positionnement requiert une attention particulière. Notamment, l'utilisateur doit veiller dans la mesure du possible à s'écarter des singularités hydrauliques susceptibles de perturber le profil de vitesses tels que l'aval d'un coude, les apports latéraux, une chute, etc.. Il est utile de vérifier au préalable les spécifications annoncées par les fabricants de capteurs car elles sont parfois optimistes par rapport aux conditions d'emploi *in situ* (Bertrand-Krajeswski *et al.*, 2000). Ainsi, le fabricant du capteur Hach (2008) recommande de placer le débitmètre à une distance d'au moins $10B$ en aval du coude, où B est la largeur à la surface de l'écoulement. Quant au fabricant NIVUS (1999), il indique que pour assurer une mesure optimale, le capteur doit être installé à une distance minimale par rapport à la sortie d'une déviation en fonction de son l'angle.

Le Tableau 1 présente les résultats obtenus à partir des simulations pour une canalisation circulaire. Les mesures effectuées par les cordes sont peu influencées par le coude. En effet celui-ci a surtout pour effet de modifier les profils transversaux de vitesse, en déportant la zone de vitesse maximum vers l'extrados en sortie de courbe. Or les cordes appréhendent de manière très correcte la vitesse moyenne sur une transversale. Les erreurs de débit calculées à une distance $5B$ du coude sont en effet limités à moins de 15% quel que soit le taux de remplissage de la conduite. Par ailleurs, pour une position donnée du capteur cet effet dépend du contexte hydraulique : l'augmentation du taux de remplissage semble tendre à réduire les erreurs d'estimation du débit à la position $5B$. Il est à noter que dans ces simulations, les variations de taux de remplissage pour une vitesse donnée sont obtenues en faisant varier la pente du radier.

Les variations de pente de la ligne d'eau induites par une influence aval n'ont pas été étudiées.

Pour ce qui concerne l'estimation de débit à l'aval du coude dans cette canalisation à l'aide d'un capteur à effet Doppler, nous présentons le cas du capteur Isco 4250 dont les caractéristiques ont été déterminées par Larrarte *et al.* (2008), sachant que la zone morte est égale à 2 cm (Neotek, 2008).

Le Tableau 1 montre que dans toutes les configurations, la perturbation du champ de vitesses par le coude a un effet sensible sur le débit estimé et d'autant plus marqué que le point de mesure est proche de la singularité et cela quelle que soit la vitesse de l'écoulement dans la gamme considérée : on peut atteindre un écart de 25 à 30% pour un capteur situé à $5B$ à l'aval du coude, alors qu'on ne dépasse pas 20% pour un capteur situé à $20B$. On note que le taux de remplissage le plus pénalisant est celui qui correspond à la plus faible hauteur d'eau.

En résumé, l'erreur d'estimation de débit est plus faible avec les cordes qu'avec le débitmètre à effet Doppler. Ceci est lié au fait que la technologie des cordes permet une mesure moyenne sur une transversale, et intègre donc la dissymétrie du champ de vitesse engendrée par le coude.

III.2. APPROCHE SPÉCIFIQUE : CALIBRATION DE STATIONS DE MESURE ATYPIQUES

Il est extrêmement difficile de trouver, en réseau d'assainissement, une station de mesure présentant les conditions recommandées par la mesure du débit. La station de mesure illustrée par la figure 2 est ainsi un bon exemple de station de mesure non standard. Mise en place dans un collecteur de section « fer-à-cheval » de hauteur environ 2,2 m (en haut à droite de la figure 2), elle présente une banquette au milieu de la section qui sépare le débit de temps sec en deux canaux. En temps de pluie, l'eau submerge la banquette et atteint un niveau plus ou moins important selon l'intensité pluvieuse. 4 cordes de vitesse ont été installées afin de mesurer la vitesse dans chacun des deux canaux mais aussi à deux altitudes au-dessus de la banquette lorsqu'il pleut. A 15 mètres en aval de cette station de mesure (soit environ 5 fois la largeur du collecteur), un déversoir d'orage écrête les débits de pluie (en haut à gauche de la figure). 20 mètres en amont (soit 7 fois la largeur), c'est un coude qui est susceptible de perturber l'écoulement. Par ailleurs, la banquette médiane débute environ 650 mètres en amont de cette station de mesure au niveau d'un coude illustré sur les deux photographies du bas. Cette singularité, pourtant située à une distance amont égale à 230 fois la hauteur, impacte la station de mesure puisque les mesures des deux premières cordes indiquent que la vitesse de l'écoulement est environ deux fois plus rapide dans le canal de droite (celui situé à l'extérieur du coude) que dans celui de gauche en conditions de temps sec.

Tableau 1. Erreur d'estimation de débit obtenu à l'aval d'un coude

	Remplissage 25%	Remplissage 50%	Remplissage 75%
Erreur à $5B$	12% (1 corde)	7% (2 cordes)	5% (3 cordes)
Erreur à $5B$ pour $V = 0,5$ m/s	26% (Doppler)	8% (Doppler)	13% (Doppler)
Erreur à $5B$ pour $V = 2$ m/s	30% (Doppler)	21% (Doppler)	17% (Doppler)
Erreur à $20B$ pour $V = 0,5$ m/s	17% (Doppler)	5% (Doppler)	5% (Doppler)
Erreur à $20B$ pour $V = 2$ m/s	19% (Doppler)	17% (Doppler)	3% (Doppler)

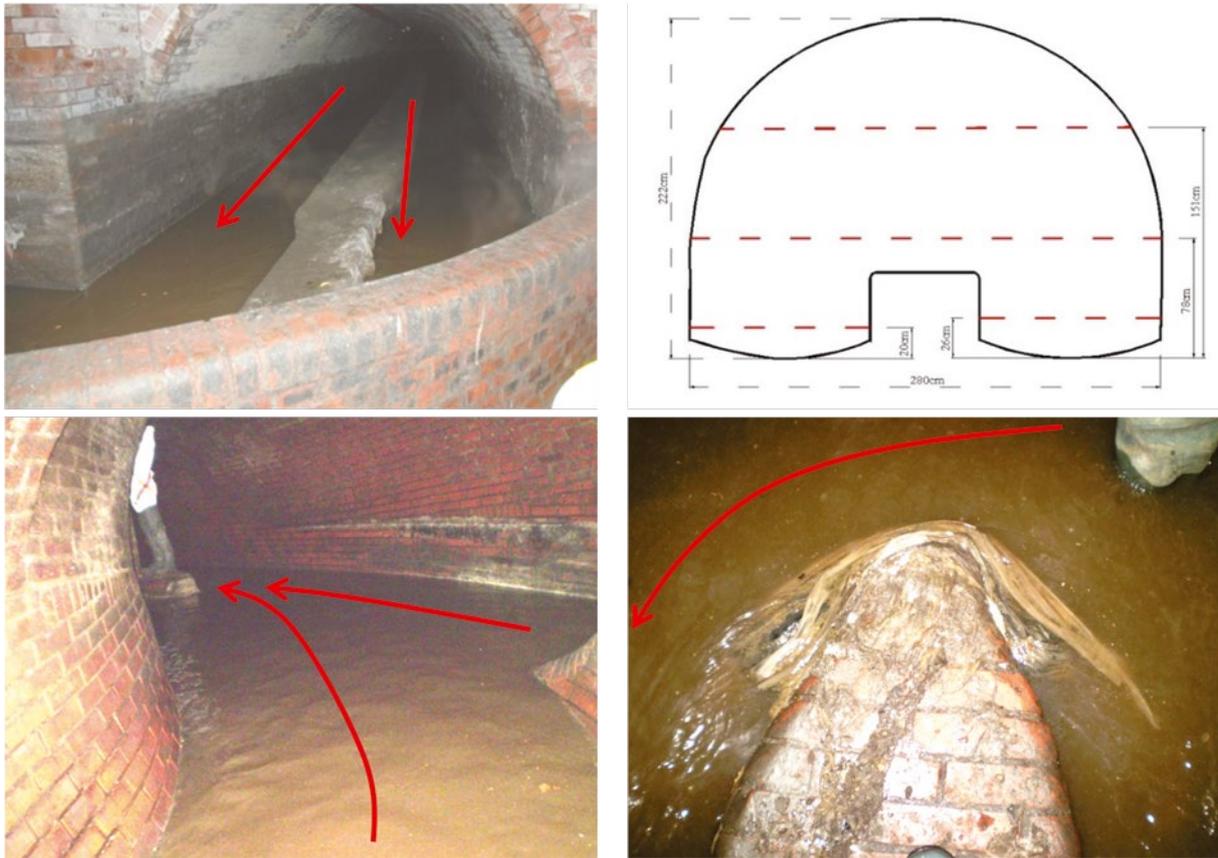


Figure 2 : Exemple d'une station de mesure atypique (comme beaucoup des stations de mesure en réseau d'assainissement...).

L'enjeu de cette station de mesure étant important, une modélisation numérique spécifique a été mise en œuvre afin d'obtenir une relation fiable entre les vitesses mesurées par les cordes, la hauteur d'eau (mesurée par un capteur ultrasonore) et le débit au niveau de la station. L'ensemble des conditions hydrauliques rencontrées au niveau de cette station de mesure ont été simulées de façon à ce que les simulations soient représentatives du fonctionnement hydraulique de la station de mesure (du temps sec au temps de pluie de période de retour importante). Une fois traitées, ces simulations numériques ont permis d'établir des relations permettant de passer des grandeurs mesurées (hauteur et vitesses) à la grandeur débit. Ces relations peuvent s'écrire sous la forme suivante, où S_i est la section de passage affectée à la corde n°i ; V_i la vitesse mesurée par la corde n°i ; et α_i , un coefficient de pondération.

$$Q = \sum_{i=1}^n \alpha_i V_i S_i \tag{1}$$

Le tableau 2 fournit les valeurs de ces coefficients pondérateurs en fonction du nombre de cordes immergées. Précisons que la norme ISO 6416 recommande des valeurs égales à 1 (à l'exception de la 1^{ère} corde et parfois de la corde la plus haute pour laquelle des coefficients de pondération sont proposés). Ici, la calibration numérique met en évidence des valeurs significativement différentes de 1 (entre 0,91 et 1,14). Ces différences sont probablement dues à l'hétérogénéité du champ de vitesse dans la section de mesure.

Le débit a été calculé selon les résultats de cette approche spécifique pour plusieurs mois de données. Les débits obtenus ont ensuite été comparés à ceux calculés selon la méthode recommandée par la norme ISO 6416. Même si les conditions d'application de cette dernière ne sont pas respectées,

Tableau 2 : Valeurs des coefficients pondérateurs α obtenus par modélisation numérique en fonction du nombre de cordes immergées.

Nombre de cordes immergées	V_1	V_2	V_3	V_4
2	1,05	1,05	-	-
3	0,91	0,91	1,14	-
4	0,91	0,91	1,06	1,10

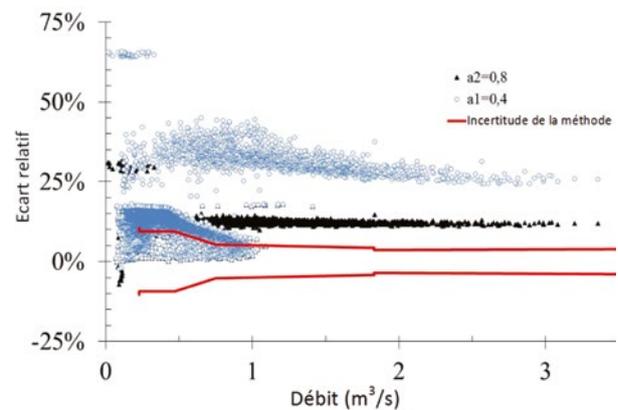


Figure 3 : Comparaison entre la calibration numérique et la norme ISO 6416 – a_1 et a_2 représentent un paramètre de la norme ISO 6416 dont la valeur peut varier entre 0,4 et 0,8 ; les deux valeurs extrêmes ont été testées afin d'apprécier la sensibilité à ce paramètre – Les lignes rouges représentent la gamme d'incertitude de la calibration numérique (incertitude du modèle numérique).

cette comparaison permet d'évaluer le gain de la calibration numérique d'une station de mesure. La figure 3 illustre cette comparaison : elle présente en abscisse le débit et en ordonné l'écart relatif entre le débit calculé selon la relation calibrée numériquement et le débit calculé selon la norme ISO 6416. On peut constater que l'application de la norme ISO 6416 à l'aveugle, pour cette station de mesure atypique, conduirait à des erreurs pouvant atteindre plus de 50%. La calibration numérique permet donc un gain significatif en termes de précision dans le cas de cette station de mesure singulière.

IV. CONCLUSIONS

L'hydrométrie en réseau d'assainissement répond à de nombreuses contraintes similaires à celles rencontrées par les hydromètres travaillant en rivière. Aussi, les équipes impliquées dans les travaux d'hydrauliques réalisés dans le cadre du projet MENTOR présentent dans cette communication une méthode qui commence à être connue et qui consiste à utiliser les potentialités d'un outil non instrumental pour améliorer la détermination des débits. Cet outil repose sur des modélisations du champ de vitesse au moyen de codes de calcul de mécanique des fluides numériques et surtout sur la réponse qu'en donne un capteur donné dans une section donnée. Après avoir présenté la méthode, nous l'avons illustrée par deux exemples qui montrent à chaque fois que la conjugaison des outils peut permettre d'améliorer substantiellement la détermination des débits sur un site donnée.

V. REMERCIEMENTS

Le projet MENTOR (acronyme de MEasurement sites conception method for sewer NeTwORks pour Méthodologie et outils opérationnels de conception et de qualification de sites de mesures en réseau d'assainissement) a bénéficié du soutien financier de l'Agence Nationale de la Recherche, « Notification de décision d'aide n°ANR 11 ECOT 007 01 du 13 décembre 2011 ».

VI. RÉFÉRENCES

AGENCE DE L'EAU RHIN MEUSE (2016) – *Guide pratique : mise en place de l'autosurveillance des réseaux d'assainissement, document à l'attention des acteurs de l'assainissement*, 164 p. - <http://cdi.eau-rhin-meuse.fr/Record.htm?idlist=4&record=19319019124911372919>.

- BANQUE HYDRO (1998) – *Charte qualité de l'hydrométrie.- Code de bonnes pratiques. Ministère de l'environnement*, 58 pages.
- BERTRAND-KRAJEWSKY J.-L., LAPLACE D., JOANNIS C., CHEBBO G. (2000) – *Mesures en hydrologie urbaine et assainissement. Tech. and Doc., Paris*.
- BERTRAND-KRAJEWSKI J. L., LAPLACE D., JOANNIS C., CHEBBO G (2001) – Quelles mesures pour quels objectifs. *TSM*, **2**, 45-56.
- BONAKDARI H., LARRARTE F. AND JOANNIS C., (2008) – Study of the shear stress in narrow channels: application to sewers. *Urban Water Journal*, **5(1)**, 15-20.
- HACH (2008) – *Sigma 950 Flow meter: instrument manual, HACH Company*.
- ISO (2011) – *ISO 772 :2011, Hydrométrie — Vocabulaire et symboles*, 162 p.
- ISO (2010) – *ISO 15769:2010, Hydrométrie - Lignes directrices pour l'application des compteurs acoustiques de vitesse utilisant l'effet Doppler et la corrélation d'échos*.
- LARRARTE F., BARDIAUX J.-B., BATTAGLIA P., JOANNIS C (2008) – Acoustic Doppler flow-meters: a proposal to characterize their technical parameters. *Flow Measurement and Instrumentation*, **19**, 261-267.
- LARRARTE F., BONAKDARI H., JOANNIS C. (2010) – Qualification et conception de sites de mesures débitométriques en réseaux d'assainissement. *Bulletin des Laboratoires des Ponts et Chaussées*, **277**, 31-41.
- LARRARTE F., FRANÇOIS P (2012) – Attenuation of an ultrasonic beam by suspended particles and range of acoustic flow meters in sewer networks. *Water Science & Technology*, **65(3)**, 478-483.
- LARRARTE F., JOANNIS C., MIGNOT E., RIVIÈRE N., LIPEME KOUYI G (2016) – *Guide Technique - Fiabiliser les mesures de vitesse Représentativité spatiale des mesures en continu de vitesse et incertitudes sur les mesures de débit, guides techniques du projet MENTOR*, <http://www.gemcea.org/projets/mentor/publications>, 28 p.
- NEOTEK (2008) – *ISCO 4250 User guide, sur CD*.
- NF EN ISO (2005) – *NF EN ISO 6416 :2005, Hydrométrie Mesure du débit à l'aide de la méthode ultrasonique (acoustique)*, 62 p.
- NIVUS (1999) – *Instructions pour le montage de capteurs de vitesse d'écoulement, sur CD*.
- SPEZIALE C.G., SARKAR S. AND GATSKI T.B. (1991) – Modeling the pressure-strain correlation of turbulence: an invariant dynamical systems approach. *Journal of Fluid Mechanics*, **227**, 245-272.
- STOVIN V.R., GRIMM J. P., BUXTON A.P. AND TAIT S.J. (2002) – Parametric studies on CFD models of sewerage structures. *9th Int. Conf. on Urban Drainage. Portland, OR, United States*.