

Qualification et conception de sites de mesures débitmétriques en réseaux d'assainissement

Frédérique LARRARTE*
Claude JOANNIS

*Laboratoire central des Ponts et Chaussées,
Bouguenais, France*

Hossein BONAKDARI

*Département de Génie Civil, Université de
Razi, Kermanshah, Iran*

*Groupement pour l'évaluation des mesures et
des composants en eaux et assainissement*

RÉSUMÉ

Afin de répondre à des objectifs aussi bien techniques que réglementaires ou financiers, les besoins en instrumentation des réseaux d'assainissement sont en constante progression. Mais le choix des sites adaptés à l'implantation du matériel de mesures peut s'avérer délicat car les performances de ces matériels sont très tributaires des conditions d'écoulement. Les recherches en cours au GEMCEA combinent des études numériques et expérimentales afin de mieux décrire et prévoir les conditions hydrauliques dans les collecteurs. L'objectif à terme est de disposer d'une méthodologie d'aide à l'instrumentation, incluant la qualification des sites, l'implantation des capteurs et le post-traitement des mesures. Cet article présente d'abord les différentes étapes de la méthodologie. Celle-ci est ensuite illustrée par son application à l'influence d'un coude à 90° sur la répartition des vitesses, et ses implications sur une mesure de débit.

Qualification and design of flow meter measurement sites within sewer networks

ABSTRACT

Measurement devices are more readily being implemented in sewer networks for a variety of purposes. Selecting the specific sites for conducting these measurements may prove difficult since the efficiency of available devices is heavily dependent on hydraulic conditions. Our research project makes use of numerical and experimental investigations in order to improve the representativeness of measurements performed in sewer networks, by taking into account the specificities of each particular site. The aim here is to develop a methodology for designing the instrumentation of a sewer section, including site qualification, sensor placement and post-processing of measurement results. This paper presents the framework of such a methodology, along with an application for assessing the influence of a 90° bend on velocity fields and the implications identified on flow measurements.

*** AUTEUR À CONTACTER**

Frédérique LARRARTE
frederique.larrarte@lpcpc.fr

INTRODUCTION

Les réseaux d'assainissement constituent un patrimoine considérable. D'après les données de l'IFEN (Institut Français de l'Environnement) [1], en France en 2004, 24,8 millions de logements étaient raccordés à des réseaux de collecte des eaux usées dont le linéaire total dépassait 280 000 km. Par ailleurs, les estimations financières des besoins en réhabilitation en France [2] sont voisines de 7 milliards d'euros à court terme et 1 milliard d'euros par an en régime de croisière.

Ces chiffres donnent une idée des enjeux d'une gestion efficace des réseaux d'assainissement qui constitue l'une des composantes principales de la gestion de l'eau dans les villes d'aujourd'hui et de demain [3]. Or, le fonctionnement des systèmes est souvent assez éloigné des hypothèses retenues lors de leur conception, en particulier pour ce qui concerne les débits réellement transités. La mise

en place de réseaux de mesures s'avère donc une composante importante d'une politique de gestion des systèmes d'assainissement [4]. Exploités en temps différé, les résultats permettent d'avoir une connaissance précise des performances du réseau à l'échelle de l'année et de définir des indicateurs relatifs aux rejets, à la qualité des effluents admis en station et à l'état des ouvrages [2]. De plus, certains capteurs peuvent être raccordés en entrée de systèmes de gestion en temps réel, permettant une utilisation optimale de la capacité des ouvrages en fonction des circonstances, en particulier lors des événements pluvieux.

Cette évolution technique est soutenue par un contexte réglementaire (arrêtés interministériel du 22 décembre 1994 et du 22 juin 2007) et normatif (EN 752 -2 & 7, NF P 15-900-2) de plus en plus précis, qui 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. Mais 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... Elle se heurte également à la question de la représentativité spatiale des mesures fournies par les capteurs, en particulier les mesures de vitesse effectuées avec des capteurs à effet Doppler dans le domaine ultrasonore [4, 5].

Un programme de recherche a été mis en place pour développer une méthodologie de qualification des sites et de conception des équipements de mesures qui doit permettre de :

- Préqualifier un site potentiel, en distinguant les cas où il est a priori favorable, a priori défavorable, ou potentiellement favorable sous réserve d'investigations complémentaires ;
- qualifier le site dans le dernier cas de figure défini ci-dessus ;
- définir les modalités d'implantation d'un capteur donné ;
- préciser les modalités d'exploitation des résultats issus des capteurs, permettant de passer des valeurs mesurées aux grandeurs physiques recherchées ;
- Evaluer les incertitudes des données obtenues.

Cet article présente cette méthodologie, puis montre sur un exemple la faisabilité de son élément clé, qui est l'utilisation de modélisations génériques. On entend par là des modélisations dont les résultats ne sont pas spécifiques à un site de mesure mais pourront être utilisés pour déterminer les champs de vitesses dans des collecteurs circulaires quel qu'en soit le diamètre, des déviations quel qu'en soit l'angle.

MÉTHODOLOGIE DE QUALIFICATION DES SITES

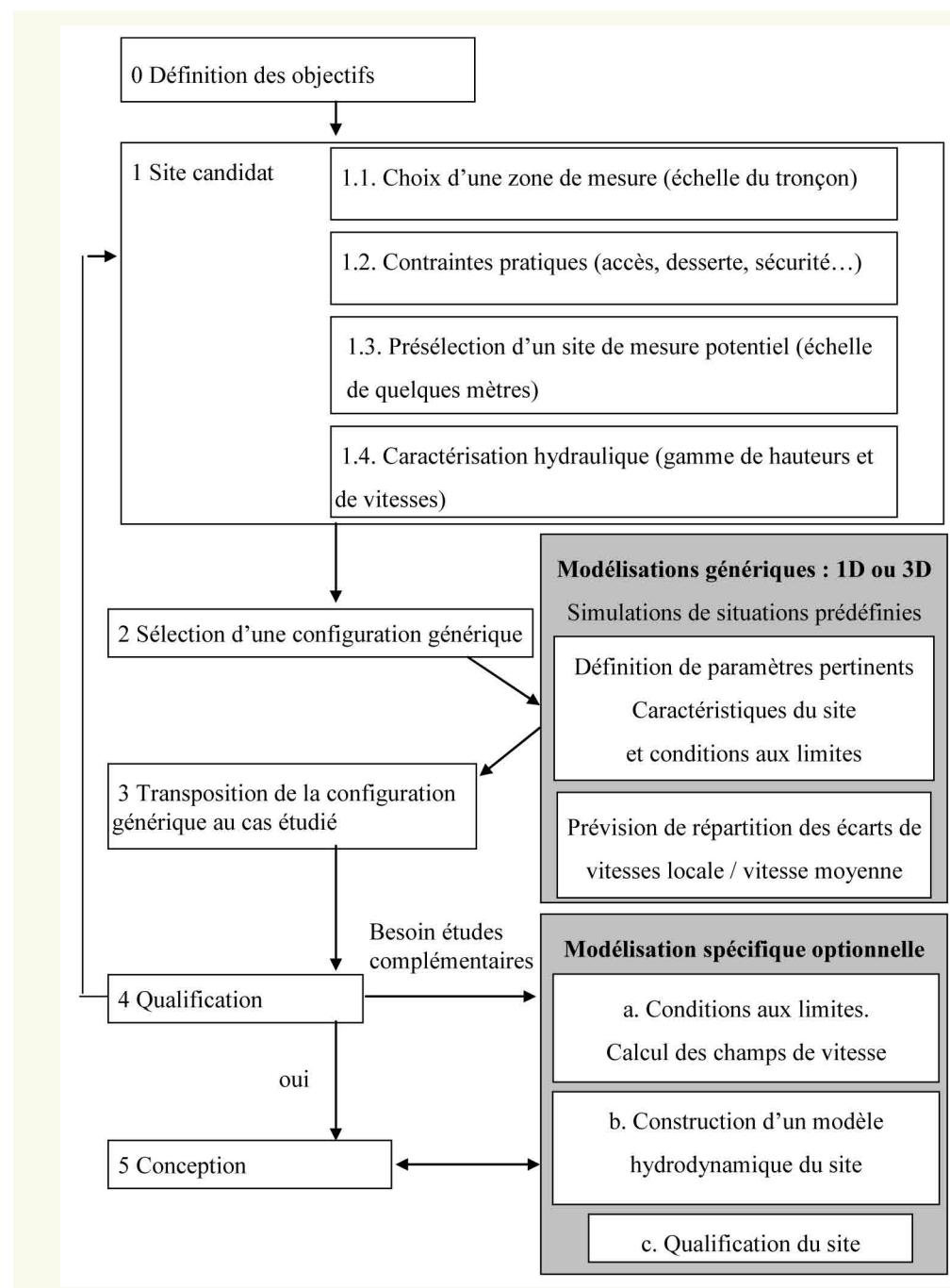
Les paramètres mesurés utilisables pour la gestion d'un système d'assainissement sont multiples, mais les débits constituent un paramètre clé, intervenant aussi bien dans le fonctionnement des ouvrages que dans l'évaluation des flux polluants.

Par ailleurs le choix d'une section de mesure doit prendre en compte des contraintes telles que les possibilités d'accès depuis la surface, les problèmes de sécurité, la desserte par les réseaux d'énergie et de télécommunication. Le tout constraint non seulement par des exigences d'adéquation entre la gamme du mesurande et celle des appareils de mesures mais également par des exigences de coût d'investissement et d'exploitation en général assez sévères.

Les pratiques actuelles correspondent aux étapes de définition des objectifs et de sélection du site (étapes 0 et 1 de la [figure 1](#)) auxquelles s'ajoute une évaluation empirique des problèmes potentiels. Ces pratiques donnent globalement satisfaction, mais des difficultés subsistent, en particulier pour les collecteurs de grande taille et/ou de section non normalisée. Parmi les difficultés récurrentes, on peut citer le fait que :

- les sites correspondant à toutes les spécifications sont rares, car les singularités sont nombreuses. Certains compromis doivent être acceptés, sans toujours pouvoir en évaluer les conséquences, (voir ci-après) ;

figure 1
Détails de la méthodologie proposée pour qualifier un site débitmétrique et concevoir son instrumentation.



- la vérification des résultats de mesures est souvent difficile et limitée au bas de la gamme des débits à mesurer (débits de temps sec). Cela limite les possibilités d'étalonnage du calcul de la vitesse moyenne, et du contrôle des incertitudes ;
- l'évaluation des risques d'ensablement réserve parfois des (mauvaises) surprises. Certains sites ne présentent pas de sédimentation chronique mais peuvent poser temporairement des problèmes difficiles à prévoir ou à détecter par observation directe.

Notre travail vise à rationaliser les préconisations relatives à la mise en place de débitmètre et le cas échéant à les assouplir, pour permettre des mesures dans des sites s'éloignant des conditions idéales tout en gardant une maîtrise sur l'incertitude des résultats obtenus. Il s'appuie sur une modélisation des écoulements, et plus particulièrement de la répartition des vitesses dans un volume de collecteur. En effet la connaissance de cette répartition est essentielle pour préciser la représentativité des mesures de débits utilisant des capteurs de vitesses. Le champ de vitesse à proximité du fond permet en outre d'évaluer les risques d'ensablement.

La modélisation hydrodynamique étant assez lourde à mettre en œuvre dans le contexte opérationnel, nous avons donc cherché à imaginer une méthodologie intermédiaire entre les pratiques empiriques actuelles et une modélisation systématique des sites de mesures. La [figure 1](#) détaille cette méthodologie dont la deuxième et la troisième étape constituent la clé, et supposent la réalisation préalable de modélisations génériques. Celles-ci doivent représenter des configurations types sous une forme paramétrée, facilitant leur transposition aux situations réelles. On pourra alors, à l'étape 4, soit rejeter le site et itérer à l'étape 0, soit qualifier le site et passer à l'étape 5 de conception du point de mesure, soit encore considérer que le cas est douteux. On pourra alors faire appel à une modélisation spécifique.

FAISABILITÉ DE LA MÉTHODOLOGIE

L'étude de faisabilité de la méthodologie [7] a porté sur la modélisation générique (étape 3) en prenant comme cas d'étude celui de l'évolution d'un champ de vitesse dans un collecteur en aval d'un coude, pour définir la distance d'influence de cette singularité, et *a contrario*, la zone *a priori* favorable à l'implantation d'un débitmètre impliquant une mesure de vitesse.

■ Indice de singularité et longueur d'influence

Pour quantifier l'influence d'une singularité sur le champ de vitesses, nous proposons un indice de singularité au niveau de la section S_x qui est basé sur l'écart quadratique moyen entre un champ de vitesse donné discréteisé et un champ développé, normalisé par la vitesse moyenne :

$$I_{sx} = 100 \times \frac{\sqrt{\sum_n (U(x, y, z) - U(\infty, y, z))^2}}{n\bar{U}} \quad (1)$$

$U(x, y, z)$ est la vitesse locale dans la section d'abscisse x , comptée à partir de la sortie du coude ([figure 2](#)) ; $U(\infty, y, z)$ est la vitesse dans une section où l'écoulement est pleinement développé, \bar{U} est vitesse moyenne dans la section.

A titre indicatif, si on applique le même mode de calcul pour comparer un champ uniforme à un champ développé, on obtient une valeur de 2,8 % pour une section circulaire de 1,5 m de diamètre remplie à 55 %. Cette valeur peut paraître faible mais elle traduit en fait de forts gradients transversaux et verticaux de vitesses. Loin à l'aval de la singularité, on parlera par la suite d'infini aval, la vitesse est égale à $U(\infty, y, z)$, et l'indice devrait être nul mais, du fait de la diffusion numérique, un indice égal à zéro est très difficile à obtenir. Par ailleurs, pour ce collecteur circulaire coudé, on a observé sur les simulations qu'un indice de 0,2 % correspond au fait que seulement 10 % de la surface mouillée présente une vitesse locale $U(x, y, z)$ différente de plus de 10 % de la vitesse $U(\infty, y, z)$. Enfin, cette valeur de 0,2 % correspond également à l'écart entre les profils développés calculés par un modèle monophasique (on remplace la condition de surface libre par un toit rigide) et un modèle biphasique (on modélise la surface libre).

L'indice de singularité ne doit donc pas être interprété en valeur absolue, mais en termes de variations et de situation dans la gamme 0,2 %-3 %. Dans la suite la valeur de 0,2 % définit conventionnellement la distance d'influence à l'aval d'un coude, appelée longueur de rétablissement et notée L_R .

■ Paramétrage

L'étude numérique a pour but d'identifier les paramètres ayant l'effet le plus sensible sur l'indice de singularité, et de décrire cet effet sous la forme la plus générique possible, en exprimant l'indice de singularité en fonction de paramètres à définir, de préférence sous forme adimensionnelle.

Parmi les paramètres susceptibles de varier dans les configurations réelles et d'avoir une influence sur la longueur de rétablissement on peut citer :

- la taille du collecteur
- la forme de la section
- la rugosité du matériau
- l'angle du coude
- le rayon du coude
- la hauteur de remplissage
- la vitesse de l'écoulement
- la pente du radier

Même en résumant la gamme pratique de variations de chacun de ces paramètres à quelques modalités, la combinatoire qui en résulte reste foisonnante et incompatible avec les temps de calcul nécessaires pour chaque simulation. Pour l'explorer nous avons fixé certains paramètres :

- section : circulaire
- rugosité : 2 mm
- angle : 90°

La forme circulaire est standard, et couvre de nombreux cas de figure. L'effet de la rugosité a été testé au préalable, et reste limité. Quant à l'angle de 90°, il est *a priori* le plus défavorable. Pour le rayon du coude nous avons utilisé une gamme de trois valeurs : 6 m, 9 m et 12 m.

Pour la taille du collecteur nous avons testé deux valeurs 0,8 m et 1,5 m, couvrant une large gamme de situations.

Cette gamme pourra être étendue par la suite en fonction des résultats obtenus. L'effet de la hauteur de remplissage a été étudié plus en détail sur la gamme 0,66 à 1,2 m, soit un taux de remplissage de 44 à 80 %, et en l'associant à une vitesse moyenne amont correspondant à un écoulement uniforme pour une pente de 0,04 %.

L'effet de la vitesse moyenne a été étudié par ailleurs sur une gamme de 0,7 m/s à 1,2 m/s, qui correspond à des conditions d'entrée selon un écoulement uniforme, déterminé par la hauteur d'eau et une pente variant entre 0,04 % et 0,1 % pour un taux de remplissage de 50 % d'un collecteur de 1,5 m de diamètre. Cette gamme est assez réduite, et pourra être étendue par la suite.

Pour les collecteurs étudiés (**tableau 1**), l'écoulement est turbulent et le nombre de Reynolds $Re = \frac{UD_h}{v}$ est supérieur à 10^{+5} , (D_h est le rayon hydraulique, $g = 9,81 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$ l'accélération de la pesanteur, $v = 10^{-6} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ est la viscosité cinétique de l'eau).

Tableau 1
Cas étudiés.

Géométrie	Diamètre (m)	Taux de remplissage (%)	Vitesse moyenne (m/s)	Rayon de courbure (m)
Circulaire	1,5	44	0,65	6
Circulaire	1,5	44	0,65	9
Circulaire	1,5	44	0,65	12
Circulaire	1,5	44	0,85	9
Circulaire	1,5	44	1,00	9
Circulaire	1,5	44	1,15	9
Circulaire	1,5	51	0,73	9
Circulaire	1,5	59	0,77	9
Circulaire	1,5	75	0,80	9
Circulaire	1,5	80	0,83	9

■ Modélisation numérique

Cette étude repose sur l'utilisation du code industriel CFX qui permet de calculer les champs des vitesses dans une section droite verticale de collecteur. La modélisation des écoulements tridimensionnels est basée sur les équations de conservation de la masse et de la quantité de mouvement en moyenne de Reynolds pour un écoulement incompressible :

$$\frac{\partial U_i}{\partial x_i} = 0 \quad (2)$$

$$\frac{\partial U_i}{\partial t} + U_j \frac{\partial U_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\nu \frac{\partial U_i}{\partial x_j} - \overline{u_i u_j} \right) \quad (3)$$

où x_i présente les coordonnées cartésiennes, U_i les composantes de la vitesse dans la direction de x_i , ρ la masse volumique, P la pression, ν la viscosité cinétique et $-\overline{u_i u_j}$ les composantes du tenseur de Reynolds. Ces dernières représentent les effets des fluctuations turbulentes sur l'écoulement moyen et posent un problème de fermeture du système des équations. Les modèles de turbulence ont pour but de fermer le système, en faisant des hypothèses qui permettent de déterminer les contraintes de Reynolds et donc de résoudre le système.

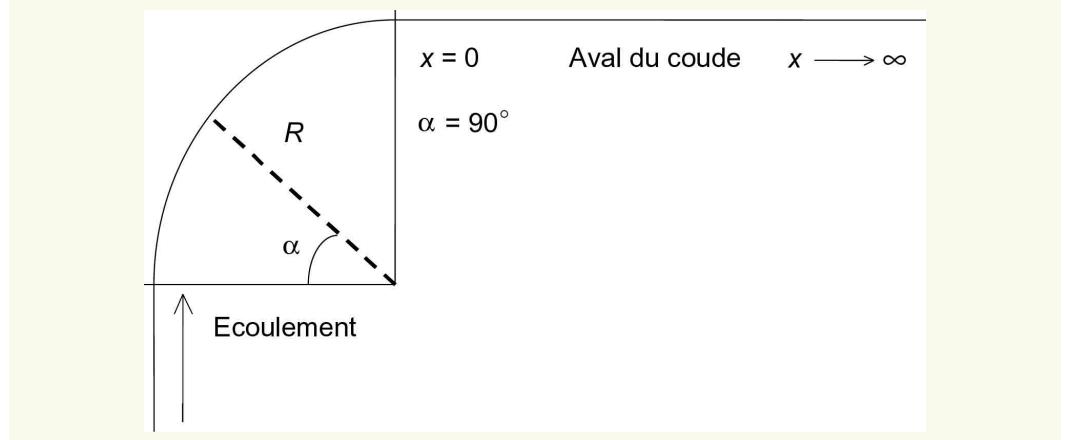
Le code utilise une méthode des volumes finis avec des volumes de contrôle tétraédriques et un maillage cartésien structuré. Le domaine de calcul concerne un collecteur circulaire et comprend une longueur de 50 m en amont du coude et de 120 m en aval ([figure 2](#)).

Les conditions aux limites à l'amont sont une hauteur d'eau h et une vitesse \bar{U} uniforme dans toute la section. La longueur en amont est suffisante pour permettre, à partir de ces informations, d'obtenir un champ de vitesses développé. Une condition de pression hydrostatique est appliquée à l'aval (hauteur d'eau constante sur toute la longueur). L'écoulement près des parois solides est modélisé avec une loi de comportement, la fonction de paroi [8].

Compte tenu du caractère anisotrope des écoulements dans des canaux étroits à surface libre, nous avons utilisé le modèle de turbulence proposé par [9].

Afin de maintenir des temps de calculs compatibles avec des essais systématiques, la surface libre est représentée par un toit rigide. Cette simplification ne permet pas de représenter le « dip phenomenon », c'est-à-dire le fait que la vitesse maximale est située en dessous de la surface libre dans la zone d'écoulement développé en canal étroit. Cependant elle a été retenue pour quatre raisons :

figure 2
Domaine modélisé.



- La condition du taux de cisaillement nulle au niveau de la surface libre est bien reproduite par ce type de simulation numérique et elle a donc été utilisée par différents auteurs [10-12] pour la simulation numérique d'écoulement à surface libre ;
- tant que l'on est dans la zone d'écoulement non développé, les courants secondaires de premier type de Prandtl sont primordiaux et le « *dip phenomenon* » n'est pas présent comme cela a été vérifié expérimentalement [13] ;
- les résultats numériques sont en bon accord avec ceux obtenus expérimentalement [13] ;
- dans la zone où l'écoulement est développé, l'écart quadratique moyen entre les résultats de simulations monophasique et biphasique est faible soit inférieur ou égal à 0,2 % pour différentes hauteurs d'eau.

RÉSULTATS

Les résultats de simulation permettent de décrire l'influence d'un coude en distinguant 3 zones en aval du coude :

- ❶ une zone de forte hétérogénéité : le tourbillon est produit par la force centrifuge qui crée des courants secondaires du premier type de Prandtl. Un unique et important tourbillon existe, la vitesse maximum des courants secondaires $U_S = \sqrt{v^2 + w^2}$ est de l'ordre de 10 à 25 % de la vitesse maximale U_{\max} dans la section ; où v et w sont les composantes de la vitesse dans les directions transversales et verticales,
- ❷ une zone de transition : l'hétérogénéité est faible, mais l'écoulement n'est pas entièrement développé, il n'existe toujours qu'un seul tourbillon mais la vitesse U_s est de l'ordre de 2 à 3 % de la vitesse maximale,
- ❸ une zone où l'écoulement est développé : les tourbillons moyens sont produits par l'effet des contraintes de Reynolds. On observe deux courants contrarotatifs centrés au milieu de la section avec une vitesse verticale descendante au milieu, la vitesse U_s est de l'ordre de 2 % de la vitesse maximale.

■ Influence de la hauteur de remplissage

Dans cette étude, diamètre et rayon de courbure sont fixés. La [figure 3](#) montre les champs de vitesses à dix fois la largeur à la surface libre en aval d'un coude à 90° avec rayon de courbure de 9 m, dans un collecteur circulaire de 1,5 m de diamètre avec une vitesse en entrée correspondant à la valeur moyenne en régime uniforme engendrée par une pente de 0,04 %.

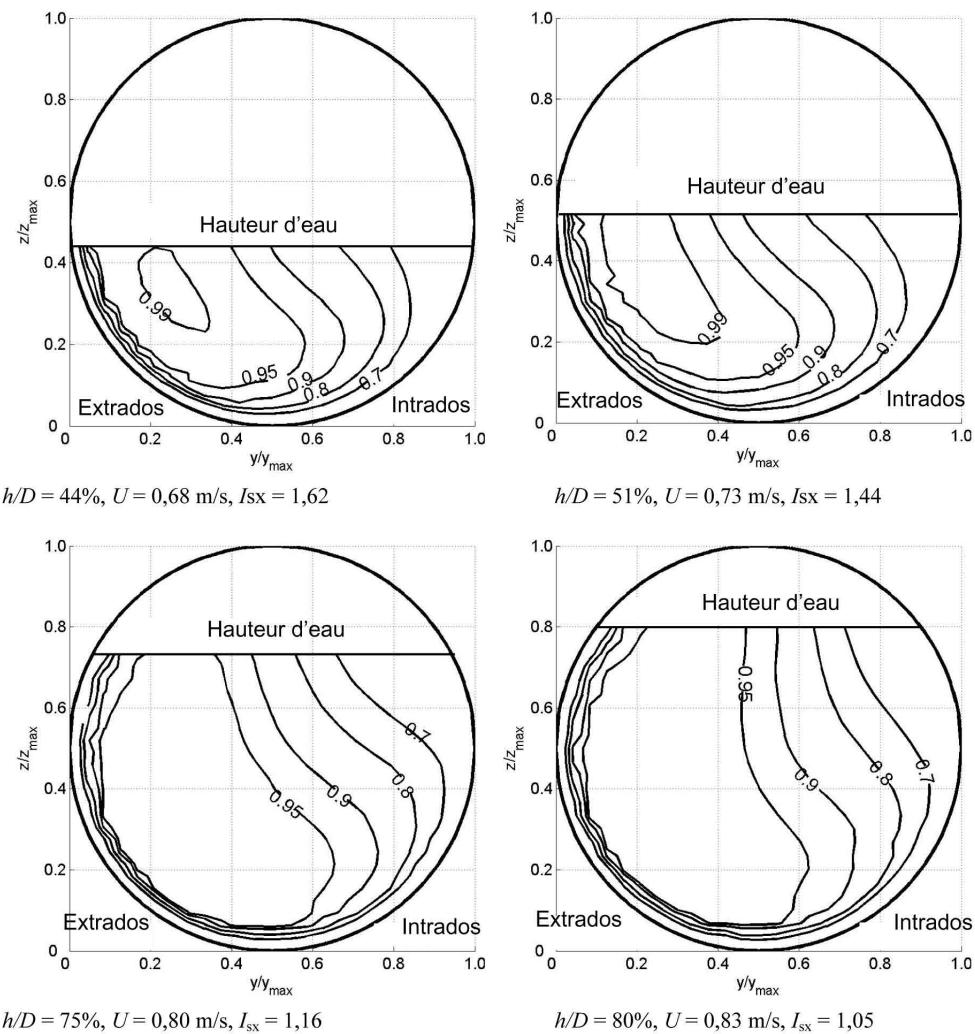
On observe que les champs de vitesses ne sont pas symétriques par rapport au plan vertical médian du collecteur et que les vitesses maximales U_{\max} sont décalées vers l'extrados quelque soit la hauteur d'eau.

Les indices de singularité, compris ici entre 1 et 1,6, correspondent à des vitesses allant localement de 70 % à l'intrados à 100 % de la vitesse maximale au niveau de l'extrados. Nous avons par ailleurs pu vérifier que le ratio de la vitesse moyenne \bar{U} sur la vitesse maximale dans la section reste compris entre 0,85 et 0,87 pour les hauteurs d'eau étudiées, ce qui est en accord avec la gamme mentionnée dans la norme NF EN ISO 748 sur les méthodes d'exploration du champ des vitesses.

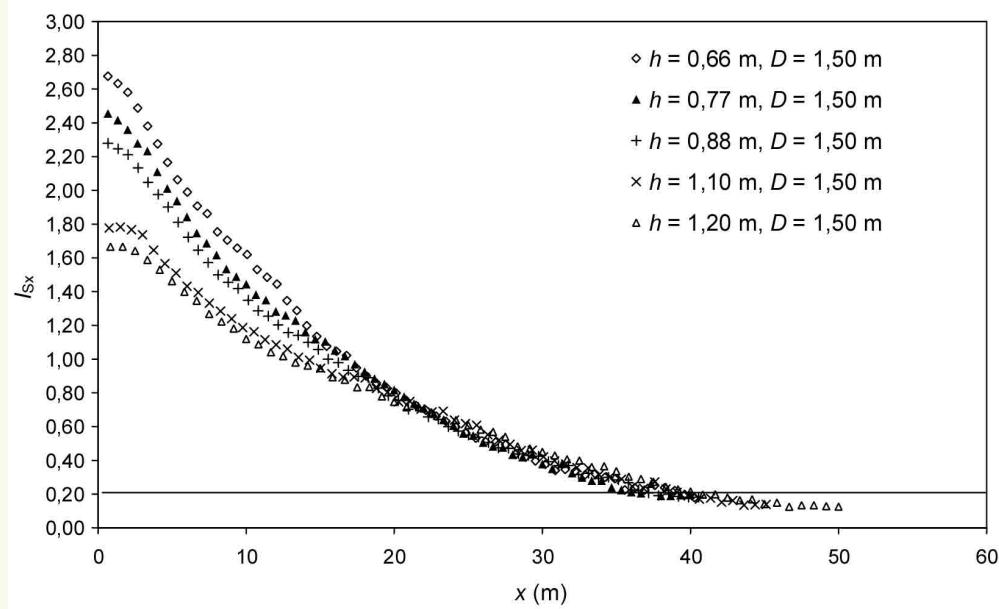
La [figure 4](#) montre que, pour un rayon de courbure, un diamètre et une pente donnés, l'indice de singularité à l'aval immédiat d'un coude est d'autant plus grand que la hauteur d'eau est faible. La [figure 4](#) montre aussi que cet indice décroît et tend vers une valeur commune à partir de 20 fois la largeur à la surface libre en aval du coude. On note surtout que l'indice ne devient inférieur à la valeur seuil, quelque soit la hauteur d'eau, qu'à 35 fois la largeur à la surface libre, soit 3,5 fois plus loin en aval que les indications d'un constructeur de capteur [14].

figure 3

Champ de vitesses U/U_{max} à 10^*B à l'aval d'un coude pour un collecteur de 1,5 m de diamètre pour différentes hauteurs d'eau.

**figure 4**

Influence de la hauteur d'eau sur l'indice de singularité pour un collecteur de 1,5 m de diamètre, un rayon de courbure de 9 m, et une pente de 0,04 %.

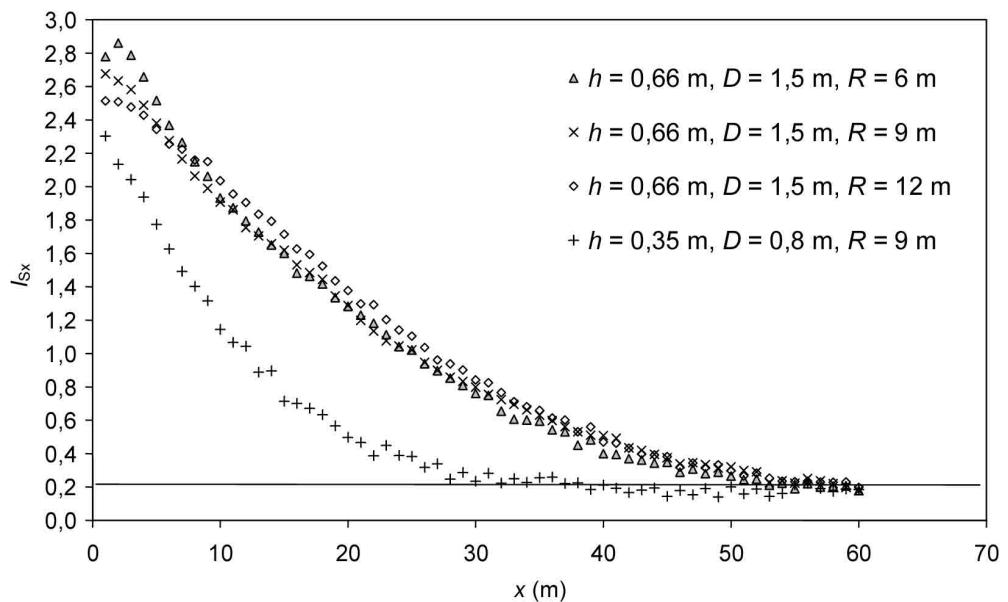


■ Influences du diamètre et du rayon de courbure

La **figure 5** montre que, pour un taux de remplissage donné (0,44), le rayon de courbure n'a qu'une faible influence sur l'indice de singularité excepté à très faible distance en aval du coude. Plus loin en aval, l'indice tend vers la valeur commune de 0,2. On note aussi que, pour un rayon de courbure R donné, le diamètre D du collecteur a une grande influence sur l'indice de singularité jusqu'à une distance de 20 fois la largeur à la surface libre en aval du coude.

figure 5

Influence du rayon du coude et du diamètre sur l'indice de singularité pour $h/D = 44 \%$.



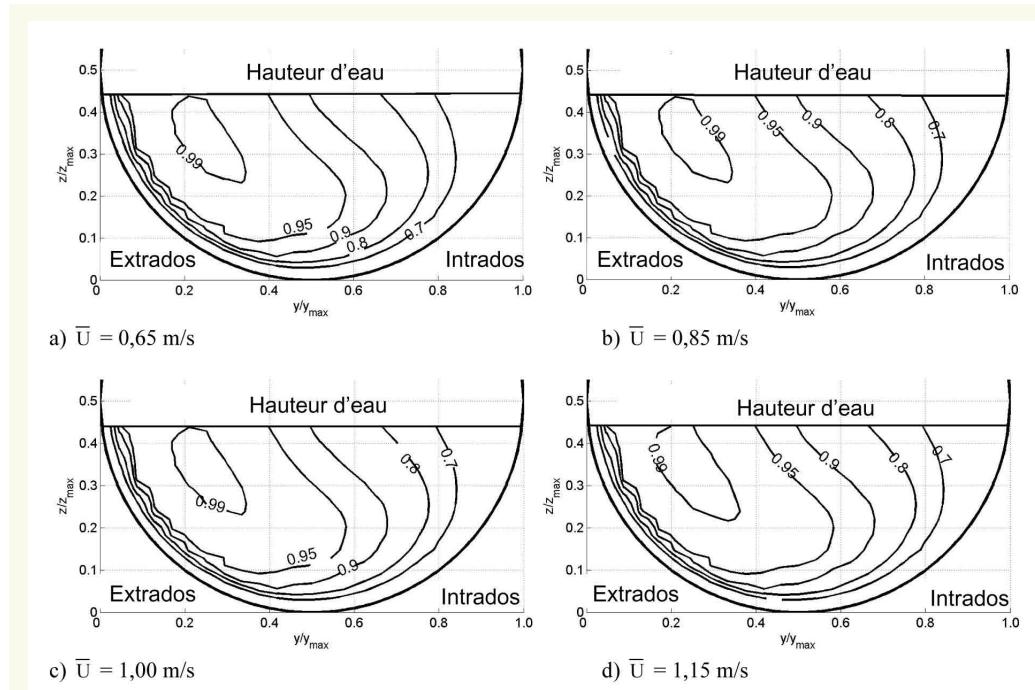
■ Influence de la vitesse moyenne ou de la pente

La **figure 6** montre que, pour la gamme considérée soit 0,70 m/s à 1,20 m/s la vitesse imposée en amont n'a pas d'influence sur le champ de vitesses adimensionnel U/U_{\max} . Ce résultat est très intéressant pour la transposition des modélisations génériques, mais mériterait d'être confirmé sur une plus large gamme de vitesses.

figure 6

Champ de vitesses U/U_{\max} à $10^{\circ}B$ à l'aval d'un coude à hauteur d'eau constante pour différentes vitesses \bar{U} en amont.

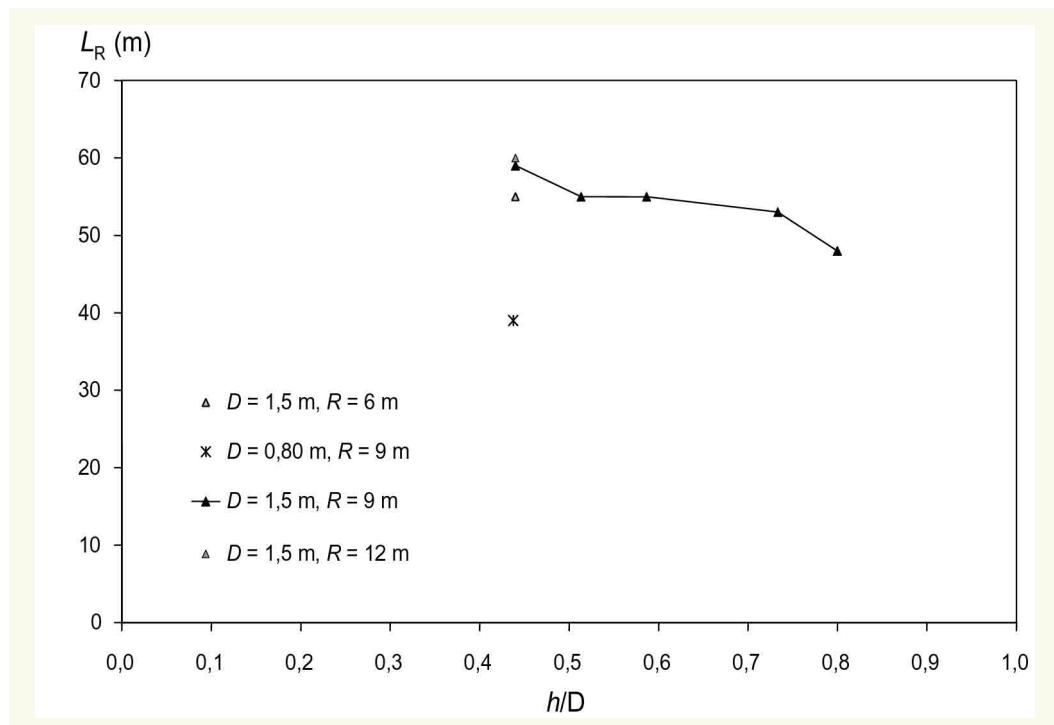
a
b
c
d



■ Tentative de généralisation

La **figure 7**, établie pour une pente de 0,04 % et la vitesse associée, montre que pour un diamètre de collecteur et un rayon de courbure donné, la longueur de rétablissement décroît légèrement avec le taux de remplissage. Pour un taux de remplissage donné, cette longueur est directement influencée par le diamètre du collecteur puisqu'elle diminue de 33 % quand le diamètre diminue de 50 %. Il convient de noter que le nombre de Dean, défini, comme c'est usuel pour les écoulements en conduites, comme le quotient du rayon du tube par le rayon de courbure du coude, n'a pas permis une formulation générique des résultats ci-dessous. A terme, il conviendrait de formuler les résultats en fonction de nombres adimensionnels qui restent à identifier.

figure 7
Influence du taux de remplissage sur la longueur de rétablissement.



CONCLUSION

La prise en compte du contexte hydraulique est un point essentiel pour la conception d'un point de mesure en collecteur d'assainissement, et le choix d'une section de mesure doit être mené conjointement avec celui d'une méthode et d'une technologie. Dans l'exemple traité ici la méthode envisagée est basée sur la mesure de vitesse moyenne dans une section. Cette méthode est potentiellement adaptée à de nombreuses configurations de sites, mais les diverses technologies disponibles restent sensibles à la répartition spatiale des vitesses dans une section. La prévision de cette répartition sur un site donné pour toute la gamme des sollicitations hydrauliques nécessite le recours à des modèles hydrodynamiques, dès lors que le site concerné est un peu complexe. De plus ces études peuvent être assez lourdes. Nous avons cherché à évaluer les apports possibles d'une modélisation « générique » de configurations types pour approcher le comportement hydraulique de sites particuliers correspondant à ces configurations.

Nous avons étudié sur un exemple l'intérêt et la faisabilité d'une telle démarche. Il s'agit de définir la distance de rétablissement d'un profil développé de vitesses à l'aval d'une singularité d'un type particulier, en l'occurrence un coude sur un collecteur de circulaire. Une représentation monophasique de l'écoulement à surface libre s'est avérée adaptée pour représenter la modification importante des courants secondaires provoquée par la singularité. Après avoir défini un indice de singularité du champ de vitesse et proposé une définition conventionnelle de la longueur de rétablissement, nous

avons pu identifier les paramètres ayant la plus grande influence, à savoir le taux de remplissage et le diamètre du collecteur. L'influence du rayon de courbure paraît moindre et celle de la vitesse moyenne négligeable, dans les gammes de valeurs testées.

Il reste à progresser dans l'expression des résultats sous forme adimensionnelle, et à étudier l'influence d'autres paramètres tels que l'angle du coude ou la forme de la section.

On pourra ensuite chercher à étendre l'approche en paramétrant non plus la longueur de rétablissement d'un champ développé, mais le champ de vitesse dans des sections situées dans la zone perturbée. Ces informations pourraient alors être combinées avec une connaissance de l'échantillonnage spatial réalisé par les capteurs pour optimiser l'implantation de capteurs dans une section donnée, définir les corrections à appliquer aux mesures réalisées pour obtenir une évaluation de la vitesse moyenne et évaluer l'incertitude du résultat.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- 1 Les services publics de l'assainissement en 2004, Les dossiers de l'IFEN, **2008**, N°10
- 2 LE GAUFFRE P., JOANNIS C., BREYSSE D., GIBELLO C., DESMULLIEZ J.J., *Gestion patrimoniale des réseaux d'assainissement urbains Guide méthodologique*, Tec & Doc, **2004**, 395 p.
- 3 MOUCHEL J.M., DEUTSCH J.C., CHEBBO G., ANDRIEU H., DE GOUVELLO B., DIAB Y., L'hydrologie urbaine, une source pour la ville, La Recherche-Ville et mobilité durables, No. 398, **2006**, pp. 32-34.
- 4 Bertrand-Krajewski J.L., LAPLACE D., JOANNIS C., CHEBBO G., Quelles mesures pour quels objectifs, *TSM*, Vol. 2, **2001**, pp. 45-56.
- 5 LAPLACE D., DESHONS P., Le supportage flottant. Une innovation pour la mesure de débit en continu en assainissement, Novatech 1998, *3rd International Conference on Innovative Technologies in Urban Storm Drainage*, **1998**, pp. 207-214.
- 6 LECLERC P., BATTAGLIA Ph., Recommandations pratiques pour la conception de stations de mesure de débit. *TSM* numéro 2, **février 2001**, pp. 45-56.
- 7 BONAKDARI H., *Modélisation des écoulements en collecteur d'assainissement – Application à la conception de points de mesures*, Thèse de doctorat, Université de Caen – Basse-Normandie, **2006**, 263 pages.
- 8 LAUNDER B.E., SPALDING D.B., The numerical computation of turbulent flows, *Computational Methods Appl. Mech. Eng.*, Vol. 3, **1974**, pp. 269-289.
- 9 SPEZIALE C.G., SARKAR S., GATSKI T.B., Modelling the pressure-strain correlation of turbulence: an invariant dynamical systems approach, *Journal Fluid Mechanics*, Vol. 277, **1991**, pp. 245-272.
- 10 CZERNUSZENKO W., RYLOV A., A generation of Prandtl's model for 3D open channel flow, *Journal of Hydraulic Research*, Vol. 38, **2000**, No. 2, pp. 133-139.
- 11 MORVAN H., PENDER G., WRIGHT N.G., ERVINE D.A., Three dimensional hydrodynamics of meandering compound channels, *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 128, No. 1, **2002**, pp. 674-682.
- 12 RAMESHWARAN P., NADEN P.S., Three-dimensional numerical simulation of compound channel flows, *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 129, No. 8, **2003**, pp. 645-652.
- 13 LARRARTE F., JAUMOILLIÉ P., JOANNIS C., Computational Fluid Dynamics: an aid for designing the instrumentation of sewer sections, *Novatech 2004*, Tome 1, **2004**, pp. 729-736.
- 14 Nivus, Instructions pour le montage de capteurs de vitesse d'écoulement, **1999**.

