Etude expérimentale et numérique du taux de cisaillement en réseaux d'assainissement.

Hossein Bonakdari *,**,***, Frédérique Larrarte *,***,
Claude Joannis *,***
* Laboratoire Central des Ponts et Chaussées – route de Bouaye - BP 4129 - 44341 Bouguenais Cedex
** Centre de Géomorphologie M2C UMR 6143 CNRS, 24 rue des Tilleuls, 14000 Caen
*** GEMCEA, 149, rue Gabriel Péri, 54500 Vandoeuvre Lès Nancy

Résumé La présence de sédiment au fond des collecteurs présente des implications hydrauliques mais également environnementales. La littérature professionnelle définit des règles de conception permettant d'éviter la sédimentation mais qu'en est-il du diagnostic d'un site existant? Un programme de recherche est en cours au LCPC pour étudier comment les simulations numériques peuvent être utilisées pour estimer si la vitesse ou le cisaillement sont suffisant pour éviter la présence de sédiment sur un site spécifique. Cet article présente les expériences de terrain, le modèle numérique et les bases théoriques. Les résultats expérimentaux et numériques sont ensuite montrés, comparés, discutés.

Abstract Sediment deposit is of interest for hydraulic and environmental reasons. Professional literature gives indications that are supposed to be valid in a large number of situations. But what about a specific area? Researches are in progress in LCPC to study how numerical simulations might be used to estimate wether the velocity or the shear stress is strong enough to avoid sedimentation in a specific area. Firstly this paper presents the experimental site, numerical method and theoretical basis used to calculate the shear stress. Then the experimental and numerical results are presented, compared and discussed.

Mots clés champs de vitesses, courants secondaires, taux de cisaillement, réseaux d'assainissement, mécanique des fluides numérique.

1 Introduction

Les faibles vitesses favorisent la sédimentation dans les collecteurs d'assainissement lors des périodes de faibles débits. L'accumulation des sédiments induit une réduction des sections mouillées. Cela diminue les capacités hydrauliques et modifie les caractéristiques de l'écoulement. Tout cela peut entraîner des dysfonctionnements des réseaux avec en particulier des déversements au milieu récepteur.

DOI: 10.5150/jngcgc.2006.034-B (disponible en ligne - http://www.paralia.fr - available online)

Pour les réseaux neufs, afin d'éviter la formation de dépôt, on utilise lors de la conception des critères dit d'autocurage. Ces conditions sont basées sur une pente minimum, une vitesse ou une contrainte de cisaillement minimale que l'écoulement doit exercer sur les parois des collecteurs [1]. La pente est le critère le plus simple puisque la contrainte tangentielle sur le fond et les parois est proportionnelle au rayon hydraulique et à la pente. La norme EN 752-4 recommande que la pente minimale, exprimée en $^0/_{00}$, soit l'inverse du diamètre D, exprimé en mètre, du collecteur.

Pour ce qui concerne la vitesse d'autocurage [1] indique que la vitesse minimale dans le collecteur doit être de 0,60 et 0,90 m/s pour respectivement les réseaux d'eaux usées et les réseaux pluviaux. En France les valeurs minimales recommandées sont de 0,30 et 0,60 m/s. On est alors sur une logique de seuil de vitesse permettant d'éviter la sédimentation. Dans une logique différente, la norme européenne EN-752-4 stipule que la vitesse doit être de 0,70 m/s au moins une fois par jour, ceci afin de permettre la reprise du dépôt. Pour le cisaillement, la variabilité est grande elle aussi avec des valeurs par exemple de 1 à 1,50 N/m^2 en Suède et de 6,20 N/m^2 au Royaume Uni. Il n'y a pas de recommandation sur cette donnée en France.

On comprend bien que ces règles génériques sont définies à des fins de conception et supposées valables pour un grand nombre de situations mais la question se pose de leur adéquation au diagnostic d'un site existant. Ce diagnostic peut être utile pour mettre au point un programme de curage ou pour installer un point de mesure. Le LCPC mène des recherches expérimentales et numériques sur les flux polluants dans les collecteurs d'assainissement et donc sur les champs de vitesses et le transport solide. Cela amène à s'intéresser au taux de cisaillement au niveau du radier. La mécanique des fluides numérique (*CFD*) permet, connaissant la vitesse et la hauteur d'eau mesurées dans deux sections, de déterminer dans une section intermédiaire le champ de vitesse et les contraintes de Reynolds qui sont impliquées dans la génération de la turbulence. Ces derniers influencent de manière significative le transport solide. En particulier, le taux de cisaillement est le critère important pour étudier les processus de sédimentation et d'érosion des particules en réseaux d'assainissement. Cet article présente successivement les champs spatiaux de vitesses mesurés dans un site réel pour différents niveaux d'eau, la validation de l'application du modèle numérique tridimensionnel dans les canaux étroits et composés, l'étude de l'effet des contraintes de Reynolds sur le taux de cisaillement et enfin les potentialités de la mécanique des fluides numérique pour prévoir les variables difficiles à mesurer dans les cas pratiques.

2 Etude expérimentale

Le site expérimental est situé sous le Jardin des Plantes de la ville de Nantes. Les effluents d'une population de 150.000 équivalent habitants transitent par ce collecteur unitaire de section ovoïde à banquette de hauteur maximale D = 2,30 m.

Les parois sont en béton de bonne qualité et le coefficient de Manning Strickler a été évalué à 70. Un dépôt sédimentaire a été observé par intermittence.

Pour étudier la distribution spatiale des vitesses, 3 vélocimètres à effet Doppler sont fixés sur un support vertical coulissant le long d'un étai [2]. Après divers essais, la manière la plus efficace de procéder consiste à effectuer des mesures par balayage horizontal de la section mouillée en allant du haut vers le bas. Trois acquisitions sont effectuées simultanément avec un pas vertical de 10 cm. Chaque acquisition est définie comme étant la moyenne des vitesses instantanées mesurées pendant 10 secondes. Chaque mesure est la moyenne de deux acquisitions. Du fait des solides transportés en suspension, les capteurs ne sont pas visibles dès qu'ils sont immergés de quelques centimètres aussi la réalisation du réplicat permet-elle de détecter un certain nombre d'encrassements. En pratique dès que les deux acquisitions en un même point diffèrent de plus de 0,05 m/s, les capteurs sont relevés, nettoyés et les deux acquisitions refaites.

3 Etude numérique

L'étude numérique repose sur l'utilisation du code industriel CFX qui résout les équations de Navier Stokes tridimensionnelles et permet de calculer les champs des vitesses dans une section droite verticale de collecteur. Le code utilise une méthode des volumes finis avec des volumes de contrôle tétraédriques et un maillage cartésien structuré. Les données hydrauliques sont déterminées par la résolution d'un système d'équations comprenant l'équation de continuité, les équations de quantité de mouvement, le modèle de turbulence.

La hauteur d'eau et la vitesse mesurées expérimentalement sont données comme condition aux limites à l'amont, une condition de pression hydrostatique est appliquée à l'aval, la surface libre est représentée par une condition de « *volume of fluid* ». L'écoulement près des parois solides est modélisé avec la fonction de paroi (« wall function ») [3]. La rugosité est calculée à partir de la relation de Darcy-Weisbach pour un coefficient de Manning-Strickler évalué à K = 70 :

$$KR_h^{1/6} = -2\log\left(\frac{k_s}{3,7(4R_h)}\right)\sqrt{8g} \qquad (1),$$

où R_h est le rayon hydraulique, g l'accélération de la pesanteur et k_s représente la rugosité. Pour du béton de bonne qualité ceci donne une rugosité de 2 mm.

4 Théorie

La présence ou non de dépôt dans un collecteur est liée au contexte hydraulique. Si le cisaillement atteint et dépasse une valeur seuil, les particules solides ne sédimenteront pas. Cette valeur seuil de cisaillement au fond τ_{bo} peut être déterminée de diverses manières. Par exemple on peut déterminer ce cisaillement

à partir des données dans une tranche verticale de l'écoulement en utilisant l'équation (1) qui le relie directement à la vitesse de cisaillement u_* par la relation :

$$\tau_{bo} = \rho u_*^2 \qquad (2),$$

où ρ est la densité du fluide. Cette vitesse de cisaillement est calculée en lissant les profils verticaux de vitesses dans la zone de proche paroi, (z/h<0.2), par une loi logarithmique [4] :

$$\frac{U_{(z)}}{u_*} = \frac{1}{\kappa}\ln\left(\frac{z}{k_s}\right) + B_s \qquad (3),$$

où κ est la constante de Von-Karman, B_s une constante égale à 8.5 pour un écoulement turbulent rugueux défini par $R_e^* = \frac{u_* k_s}{\nu} > 70$.

L'approche ci-dessus repose sur une valeur locale du cisaillement. En pratique son utilisation nécessite des profils verticaux de vitesses et en particulier des mesures en proche paroi. On comprend aisément la difficulté à obtenir des résultats expérimentaux dans les collecteurs. A une échelle plus globale, on peut écrire le principe fondamental de la dynamique dans une section droite verticale et définir là le cisaillement moyen τ_{bm} au radier de la section en fonction de la vitesse moyenne dans la section U par la relation :

$$\tau_{bm} = \rho f \frac{U^2}{8} \qquad (4),$$

où f est le facteur de frottement qui, pour un écoulement turbulent, peut être estimé en utilisant l'équation Colebrooke-White suivante [5]:

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = 2\log\left(\frac{4R_h}{k_s}\right) + 1.14 \qquad (5).$$

A contrario si on connaît le cisaillement, on peut inverser l'équation (3) et calculer la vitesse associée. Et si on peut déterminer, par exemple par des mesures en laboratoire, le seuil critique permettant l'érosion, on peut déterminer la vitesse permettant l'autocurage.

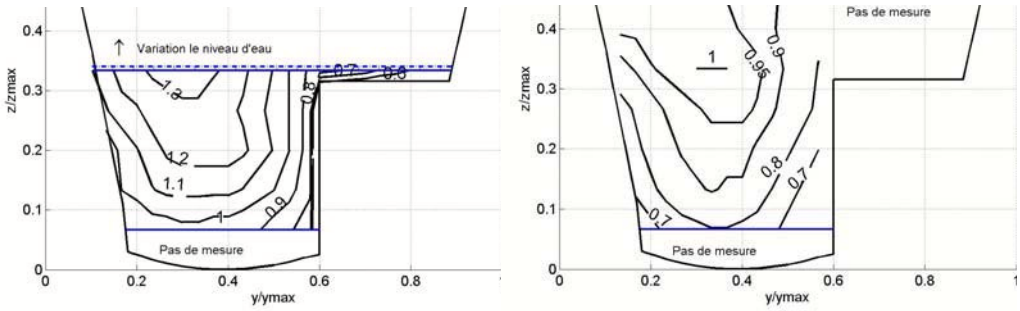
5 Résultats

5.1 Champs de vitesses expérimentaux

L'écoulement est turbulent et fluvial puisque le nombre de Reynolds $Re = \frac{UR_h}{\nu}$ est supérieur à $9x10^{+4}$ et le nombre de Froude $F = \frac{U}{\sqrt{gR_h}}$ est égal à 0,35, où U est la vitesse, R_h le rayon hydraulique, g = 9.81 $m.s^{-2}$ l'accélération de la pesanteur et ν la viscosité cinématique telle que $\nu = 10^{-6}$ $m^2.s^{-1}$.

La hauteur d'eau lors des mesures a toujours été comprise entre 0,50 et 0,80 m. La banquette est donc immergée et la section composée avec un ratio Hr qui croit de 0,15 à 0,44, où Hr est le ratio de la hauteur h au dessus de la banquette sur la hauteur H dans le chenal principal. Le canal est étroit et le coefficient d'aspect Ar = b/H est compris entre 1,10 et 1,20, où b est la largeur à la surface libre.

La figure 1 présente les cartes de vitesses obtenues pour divers taux de remplissage. On voit la présence de gradients de vitesses très marqués aux parois et au fond ainsi que le décalage de la vitesse maximale en dessous de la surface libre pour les taux de remplissage de 27% et plus. Ce phénomène a également été observé par [6] et [7] dans des canaux circulaires avec toujours des coefficients d'aspect Ar < 2. En lissant les profils de vitesses par une loi logarithmique (2), on peut maintenant déterminer la vitesse de cisaillement dans le chenal principal. Cela donne des valeurs de 0,014 m/s pour une hauteur d'eau de 0,51 m soit une banquette juste immergée. Cette vitesse croit ensuite linéairement de 33% quand la hauteur d'eau augmente de 37%.



H / D = 0,23 H / D = 0,37

Figure 1 : cartes de vitesses adimensionnalisées par la vitesse maximale Vmax pour divers taux de remplissage

5.2 Comparaison des résultats expérimentaux et numériques

L'outil numérique utilise les équations de Navier Stokes en moyenne de Reynolds et calcule les trois composantes des champs de vitesses, y compris les fluctuations turbulentes. Le code calcule également les contraintes de Reynolds et donc la vitesse de cisaillement et ceci sans aucune calibration.

La figure 2 montre la distribution transversale du taux de cisaillement local (τ) pour deux niveaux d'immersion de la banquette. Les symboles indiquent le taux de cisaillement obtenu à partir des équations (1) et (2) et des profils expérimentaux, les traits correspondent aux résultats des calculs avec le code CFX. On constate que le modèle de turbulence k-epsilon sous évalue fortement le cisaillement, ceci est dû à la non prise en compte de l'anisotropie de la turbulence et des contraintes de Reynolds associées. A contrario, le modèle RSM donne une

quantification généralement bonne des résultats expérimentaux même si des écarts non expliqués à ce jour demeurent en certains points.

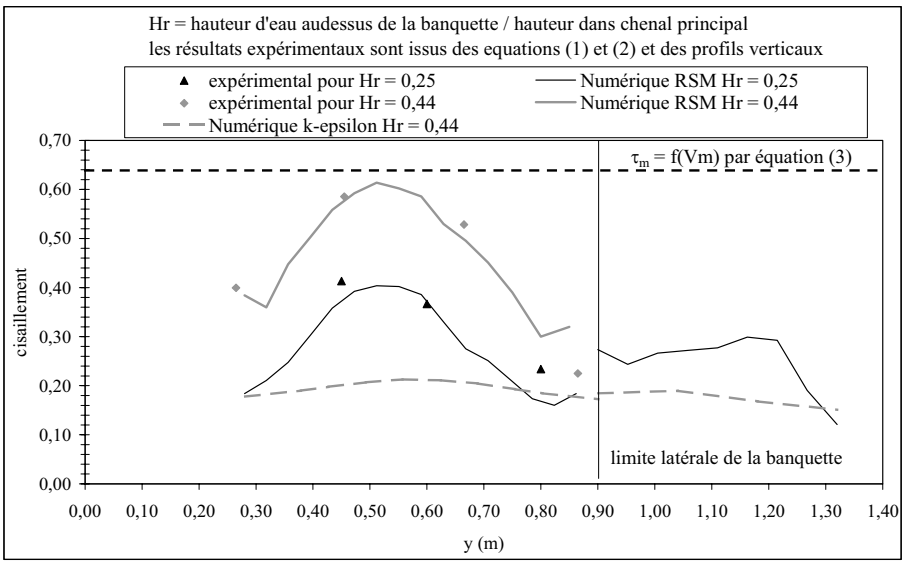


Figure 2 : Comparaison des contraintes de cisaillement numériques et expérimentales.

Cette anisotropie est liée à la présence de courants secondaires de second type de Prandlt dus à l'étroitesse des collecteurs (coefficients d'aspect inférieurs à 5). En effet les vecteurs de courants secondaires (V,W) obtenus par la simulation numérique dans la section transversale présentent deux vortex dans le canal principal et deux sur la banquette (figure 3). En regardant vers l'amont, ces courants tournent dans le sens trigonométrique quand ils sont sur la partie gauche et en sens inverse dans la partie droite. Cela se traduit par des vecteurs dirigés vers le bas dans la zone commune. On note que les vortex ont la même dimension dans le chenal principal alors que celui à l'angle de la banquette et de la paroi de droite est au deux tiers plus petit que l'autre vortex au dessus de la banquette. De ce fait, à l'intersection des deux vortex soit au centre du chenal principal et au tiers de la banquette, le taux de cisaillement est maximal, comme illustré par la figure 2, en raison du transport de fluide ayant une quantité de mouvement élevée vers le fond (W<0). En revanche, dans la région proche des parois latérales, le taux de cisaillement présente un maximum relatif car le fluide est alors associé à de faibles quantités de mouvement. Au dessus de l'angle de la banquette, on constate un phénomène inversé puisque l'intersection du vortex du chenal principal et du vortex au dessus de la banquette est associée au transport de fluide ayant une quantité de mouvement élevée vers le haut et le centre (W>0).

Si on considère un cisaillement critique de 1 N/m^2 comme indiqué en Suède, on peut calculer la vitesse critique associée. On constate sur la figure 4 que cette vitesse n'augmente que très lentement avec la hauteur d'eau et tend vers la valeur de 0,60 m/s utilisée en France pour les réseaux d'eaux usées. Cette vitesse d'autocurage est un minimum inférieur de 14% à la valeur seuil de 0,70 m/s de la

norme européenne EN 752-4. La figure 4 montre que la vitesse moyenne mesurée dans la section croit avec la hauteur d'eau mais reste de 50 à 25% inférieure à la vitesse d'autocurage alors qu'on a pu noter une présence intermittente de sédiments ce qui indique que ceux ci sont parfois remis en suspension. Bien qu'il ne soit pas possible d'effectuer des mesures par temps de pluie, les pics de vitesses consécutifs aux évènements pluvieux sont particulièrement susceptibles de générer ces remises en suspension qui associés aux pics de débit peuvent entraîner des déversements au milieu récepteur et avoir des conséquences sur les zones côtières.

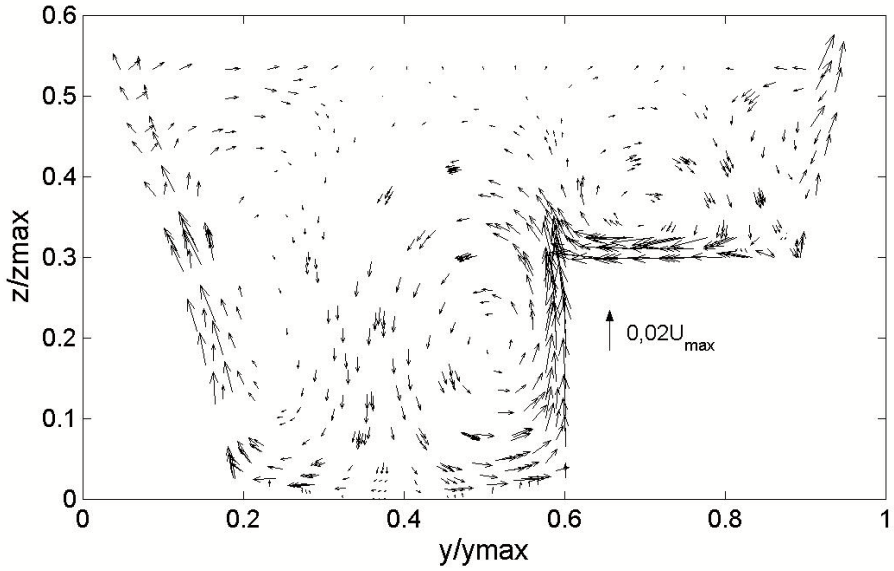


Figure 3 : courants secondaires dans la section transversale.

6 Conclusion

Un ensemble de données expérimentales a été acquis dans un collecteur ovoïde à banquette. Ceci a permis de constater que le dépôt n'est pas permanent malgré une vitesse moyenne et un cisaillement inférieurs aux valeurs d'autocurage données par les normes. Ceci met en évidence l'intérêt d'une étude un peu fine de chaque site afin d'en connaître le fonctionnement réel.

Le cisaillement a été étudié numériquement. Cela a permis de montrer une fois encore l'intérêt de cet outil qui permet d'étudier des paramètres très délicats à mesurer sur le terrain. Cette étude a également rappelé l'importance du modèle de turbulence sur la capacité d'un code à représenter les phénomènes tridimensionnels associés aux champs de vitesses dans des canaux étroits.

Cette étude va se poursuivre d'une part avec un nouveau montage qui permet des mesures au dessus de la banquette quelles que soient les conditions pluviométriques et d'autre part pour étudier l'interaction cisaillement – sédimentation dans d'autres contextes.

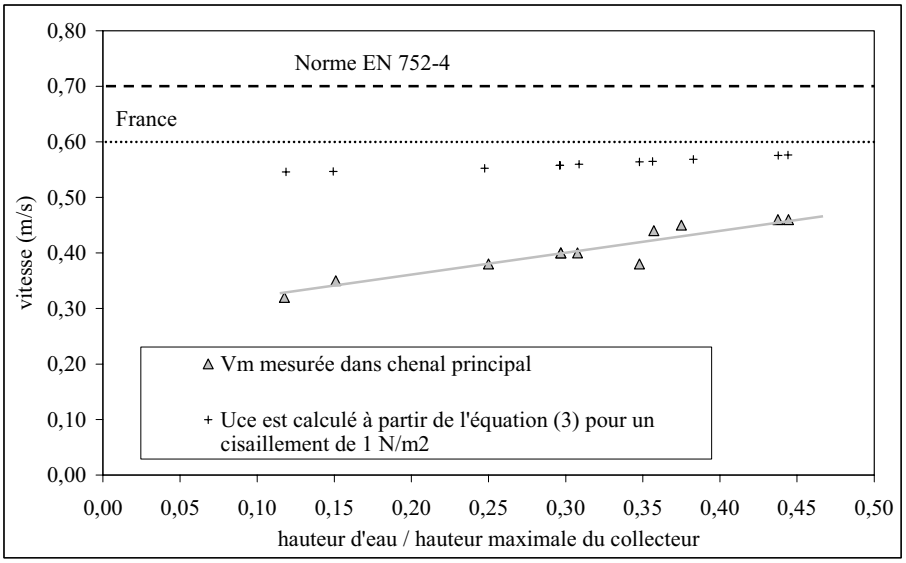


Figure 4 : évolution des vitesses caractéristiques dans la section principale en fonction de la hauteur d'eau.

Remerciements

Les auteurs remercient le GIP GEMCEA et la Direction de la Recherche et de l'Animation Scientifique et Technique du Ministère chargé de l'Equipement pour le soutien apporté ainsi que les personnels du LCPC et de la Direction de l'Assainissement de la Communauté Urbaine de Nantes pour leur aide lors ces travaux.

Bibliographie

1 Ashley R. M., Bertrand-Krajewski J. L., Hvitved-Jacobsen T. and Verbanck M. (2004), Solid in sewers. *IWA Publishing*, ISBN 1-900222-91-4.

2 Bonakdari H., Larrarte F., Bardiaux J-B., (2006), Experimental and computational study of velocity fields in narrow or compound section sewers, *Proc. 7th Int. Conference on Urban Drainage Modeling*, Melbourne, 3-7 Avril 2006.

5 Chanson H. (2004), The hydraulics of open channel flow: an introduction. Second edition. *Elsevier Butterworth-Heinemann*, UK, ISBN 0-7506-5976-5.

4 Graf W., Altinakar, M. S. (1996). Hydraulique fluviale, Tome 2, *PPUR Lausanne*, ISBN 2-88074-300-1.

6 Knight D. W., Sterling M; (2000), Boundary shear in circular pipes running partially full., *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol 126, N°4, April, pp.

3 Launder B. E. and Spalding D. B. (1974), The numerical computation of turbulent flows., *Proc. Computational Methods Appl. Mech. Eng.*, vol 3, pp. 269-289.

7 Wohrle C., Brombach H., (1991), Probenahme im abwasserkanal, *Wasserwirtschaft*, Vol. 81, pp 60-65.