Contrainte de cisaillement et vitesse d'autocurage dans des collecteurs ovoïdes à banquette

Hossein Bonakdari

Division eau et environnement - Laboratoire central des ponts et chaussées, route de Bouaye, BP 4129, 44341 Bouguenais Cedex, <u>hossein.bonakdari@lcpc.fr</u>

RÉSUMÉ: La connaissance des phénomènes relatifs au dépôt de sédiment présente un intérêt pour des raisons hydrauliques, techniques et de gestion. La littérature professionnelle donne des indications qui sont supposées être valides dans un grand nombre de situations. Mais qu'en est il pour un site préci? Cet article présente, la base théorique pour calculer le taux de cisaillement, les sites expérimentaux et la méthode numérique. La comparaison entre les différentes méthodes prouve que dans les canaux étroits et composés, l'outil numérique donne un accès précis et local du cisaillement qui ne peut pas être correctement déterminer par la méthode traditionnelle ou par la loi logarithmique.

MOTS -CLES: contraintes de cisaillement, auto-curage, contraintes de Reynolds, modélisation numérique, hydrodynamique.

ABSTRACT: Sediment deposit is of interest for hydraulic, technical and management reasons. Professional literature gives indications that are supposed to be valid in a large number of situations. But what about a specific area? This paper presents the theoretical basis to calculate the shear stress, the experimental sites and the numerical method. The comparison between different method shows that in narrow and compound channels, the numerical tool gives an access to precise and local shear stress that is not properly determine by traditional method or by the logarithmic law.

KEYWORDS: shear stress, self-cleansing, Reynolds stress, numerical modeling, hydrodynamic

1. INTRODUCTION

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

Afin d'éviter la formation de dépôt, la conception des réseaux nécessite la prise compte d'un certain nombre de 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, (Ashley *et al.*, 2004). La pente est le critère le plus simple à vérifier 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, Ashley *et al.*, (2004) indiquent 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 d'eaux pluviales. En France les valeurs 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 remise en suspension du dépôt. Pour le cisaillement, la variabilité est aussi grande avec des valeurs, par exemple, de 1,00 à 1,50 N/m² en Suède, 6,20 N/m² 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 de sites existants. Dans le cadre de la mise au point d'un protocole permettant de qualifier des sections de mesure, (Bonakdari et Larrarte, 2006a), le LCPC mène des recherches expérimentales *in situ* 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 et à prendre en compte les effets d'échelle dans la gestion des sites de mesures. Cet article présente les aspects théoriques, les résultats numériques et l'influence de l'échelle du collecteur sur le taux de cisaillement.

2. THEORIE

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 :

$$\tau_{\rm bo} = \rho u_*^2$$
 [Eq.1]

où ρ est la densité du fluide. L'expression complète de la vitesse de cisaillement à partir des équations de Navier-Stokes selon l'équation 2 :

$$-\overline{u_i u_j} + v \frac{dU_i}{dx_j} = u_*^2 \left(1 - \xi\right)$$
[Eq.2]

où u_i sont les fluctuations de vitesses et les termes $-\overline{u_i u_j}$ définissent les contraintes de Reynolds avec i=1, j=3 au fond et i=1, j=2 sur les parois latérales; ξ est la distance relative à la paroi solide, U_i est la composante moyenne de la vitesse dans la direction i.

Cette vitesse de cisaillement est calculée plus empiriquement en lissant les profils verticaux de vitesses dans la zone de proche paroi, (z/h<0,2), par une loi logarithmique, (Graf et Altinakar, 1996) :

$$\frac{U_{(z)}}{u_*} = \frac{1}{\kappa} \ln\left(\frac{z}{k_s}\right) + B_s$$
 [Eq.3]

où κ est la constante de Von-Karman, k_s représente la rugosité de surface, B_s est une constante égale à 8,50 pour un écoulement turbulent rugueux défini pour $R_e^* = \frac{u_*k_s}{v_s} > 70$.

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.

À 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_m dans la section transversale en fonction de la vitesse moyenne dans la section U par la relation :

$$\tau_m = \rho f \frac{U_{moy}^2}{8}$$
 [Eq.4]

où f est le facteur de frottement qui, pour un écoulement turbulent, peut être estimé en utilisant l'équation de Colebrooke-White, (Graf et Altinakar, 1996) :

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = 2\log\left(\frac{4R_h}{k_s}\right) + 1,14$$
[Eq.5]

où k_s est la rugosité pariétale qui est comprise entre 0,30 et 3,00 mm pour du béton. L'évaluation de la rugosité de paroi en réseaux d'assainissement réel n'est pas facile. La rugosité est calculée à partir de la relation de Darcy-Weisbach pour un coefficient de Manning-Strickler évalué à K = 70 :

$$KR_{h}^{1/6} = -2\log\left(\frac{k_{s}}{3,7(4R_{h})}\right)\sqrt{8g}$$
 [Eq.6]

Pour du béton de bonne qualité ceci donne une rugosité de 2,10-2,50 et 2,50-2,70 mm pour les sites de Cordon Bleu et Jardin des Plantes respectivement.

À contrario, si on connaît le cisaillement, on peut inverser l'équation 4 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 définir la vitesse permettant l'autocurage.

Enfin en simplifiant les équations de mouvement en régime permanent uniforme et après quelques hypothèses simplificatrices, le cisaillement dans une section peut être calculé par la formule suivante (Graf et Altinakar, 1996) :

$$\tau_{\rm m} = \rho g R_{\rm h} I \qquad [Eq.7]$$

où Rh est le rayon hydraulique, I la pente, g l'accélération de la pesanteur.

3. ETUDE NUMERIQUE

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 et 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* ». La fonction de paroi est utilisée pour déterminer la vitesse à proximité de la paroi selon des lois empiriques. Celles-ci prévoient un profil logarithmique de vitesse proche d'une paroi et un premier nœud de maillage hors de la sous-couche visqueuse, (Launder et Spanding, 1974).

4. ETUDES EXPERIMENTALES

Deux sites expérimentaux situés sur le réseau unitaire de la ville de Nantes respectivement à Cordon Bleu (noté CB) et au Jardin des Plantes (noté JdP) ont été utilisés. Les géométries correspondent à des ovoïdes à banquettes (Figure 1).



Figure 1 : Section transversale des sites expérimentaux.

Pour étudier la distribution spatiale des vitesses, 3 vélocimètres à effet Doppler sont utilisés, (Bonakdari *et al.*, 2006). Trois acquisitions sont effectuées simultanément. 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.

5. RESULTATS

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 Hr = 0,23, où Hr est la hauteur d'eau au-dessus de la banquette / hauteur dans chenal principal, dans le site de

Cordon Bleu. Les symboles indiquent le taux de cisaillement obtenu localement à partir d'un profil vertical expérimental et des équations 1 et 3. Les traits correspondent aux résultats des calculs avec le code CFX. Pour la modélisation numérique, le modèle de turbulence de deuxième ordre RSM (*Reynolds Stress Model*) a utilisé. En effet, le modèle de turbulence k-epsilon sous-évalue fortement le cisaillement, (Bonakdari et Larrarte, 2006b). Ceci est dû à la non prise en compte de l'anisotropie de la turbulence et des contraintes de Reynolds associées, (Bonakdari et Larrarte, 2006c). Le modèle RSM donne une quantification généralement bonne des résultats expérimentaux avec des écarts de l'ordre moyen de 5%. On peut noter que le taux de cisaillement moyen calculé avec l'équation 4 et la vitesse moyenne calculée dans la section sur-évalue de 10 à 20% le cisaillement maximal déterminé au milieu du chenal principal. Ceci s'explique par le fait que la valeur moyenne est calculée avec les vitesses dans toute la section alors que le cisaillement est une valeur locale déterminée dans la zone logarithmique où les gradients de vitesses et l'effet des contraintes de Reynolds sont très importants. On note enfin que le cisaillement moyen calculé en fonction de la pente du radier et du rayon hydraulique avec l'équation 7 donne le même résultat, à 4% près, que le cisaillement calculé à partir de la vitesse moyenne, par équation 4.



Figure 2 : Comparaison des contraintes de cisaillement numériques et expérimentales avec la valeur moyenne à Cordon Bleu.

Parmi les nombreuses valeurs de cisaillement critique, la valeur la plus faible est celle de la Suède et est égale à 1 N/m². On peut calculer la vitesse critique associée à partir de l'équation (4). On constate sur la Figure 2 que pour le site de Cordon Bleu cette vitesse n'augmente que très lentement et reste comprise entre 0,60 m/s, vitesse d'autocurage utilisée en France pour les réseaux d'eaux usées, et 0,70 m/s, valeur de la norme européenne EN 752-4. Et effectivement, en plus de 5 ans de mesures, aucune sédimentation n'a été observée sur ce site. Pour le site du Jardin des Plantes, la vitesse croit avec la hauteur d'eau avec un minimum inférieur de 14% à la valeur seuil de 0,70 m/s de la norme européenne. La Figure 3 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 vers le milieu récepteur.



Figure 3 : évolution des vitesses caractéristiques dans la section principale en fonction de la hauteur d'eau.

Les deux collecteurs ont la même géométrie d'ovoïde à banquette mais des dimensions différentes. Afin de quantifier l'influence de la vitesse moyenne, nous avons représenté sur la Figure 4 l'évolution du rapport du cisaillement numérique local par l'énergie cinétique de l'écoulement ρU^2_{moy} . On peut constater que, pour le chenal principal de Cordon Bleu, les deux courbes sont très proches ce qui traduit bien une influence de la vitesse moyenne. Par contre tant au dessus de la banquette qu'au Jardin des Plantes, les courbes ne tendent pas vers une valeur commune. Ceci montre que, comme on pouvait s'y attendre, l'énergie cinétique moyenne de l'écoulement ne suffit pas à quantifier le cisaillement au fond. En effet Bonakdari et Larrarte (2006c) ont montré que, pour des contextes tridimensionnels, le premier terme à gauche de l'équation 2 n'est pas négligeable. Ce terme correspond aux contraintes de Reynolds qui produisent l'anisotropie de la turbulence dans les canaux étroits.



Figure 4 : Influence de l'énergie cinétique de l'écoulement sur le cisaillement local.

Intéressons nous maintenant à la sous-couche visqueuse que nous caractérisons par la vitesse de cisaillement qui peut être soit déterminée numériquement dans le cadre des travaux numériques, soit déterminée avec les équations 1 et 2. Le tableau 1 présente les valeurs obtenues par la modélisation numérique pour les deux sites du Jardin des Plantes et de Cordon Bleu. On constate un doublement de la vitesse de cisaillement pour une même immersion de la banquette entre le Jardin des Plantes et Cordon Bleu.

Hauteur d'eau (m)	Hr	Vitesse moyenne de cisaillement	Site expérimental
		calculée avec CFX (m/s)	
0,60	0,25	0,016	Jardin des plantes
0,80	0,44	0,021	Jardin des plantes
1,06	0,13	0,027	Cordon Bleu
1,20	0,23	0,033	Cordon Bleu

Tableau 1 : valeur de la vitesse de cisaillement moyen obtenue par la modélisation numérique pourles deux sites du Jardin des Plantes et du Cordon Bleu.

La Figure 5 représente cela différemment. On note que le rapport $\frac{\tau}{\rho U_{moy}u_{*moy}}$, où u_{*moy} est la

moyenne des vitesses de cisaillement locales calculée avec CFX, présente les mêmes maximum et minimum dans le chenal principal. On voit ainsi l'intérêt de l'outil numérique qui permet de déterminer les valeurs de cisaillement en tout point alors que les méthodes globales traditionnelles utilisant le cisaillement moyen déterminé soit à partir de la pente et du rayon hydraulique soit de la vitesse moyenne, ne permet pas de calculer la complexité du cisaillement dans les sections transversales étroites. Le même constat peut être fait au-dessus de la banquette sauf dans les cas de très faible immersion comme à Cordon Bleu pour le cas Hr = 0,13. En effet dans ce dernier cas, la banquette est faiblement immergée et l'anisotropie des contraintes de Reynolds est faible ce qui n'est plus le cas pour des hauteurs d'eau plus importantes, (Bonakdari et Larrarte, 2006c). On peut noter que si le position transversale du maximum local reste constant pour un site donné, elle varie d'un site à l'autre. Ceci traduit l'influence de la banquette qui est proportionnellement plus large au Jardin des Plantes.



Figure 5 : Influence la vitesse moyenne et de la vitesse de cisaillement sur la taux de cisaillement.

6. CONCLUSION

Ces travaux ont permis d'acquérir un ensemble de données expérimentales dans deux collecteurs ovoïde à banquette et de modéliser les champs de vitesses tridimensionnels avec un code résolvant les équations de Navier Stokes en moyenne de Reynolds. Ceci a permis de montrer que les méthodes globales de détermination du cisaillement sur-évalue le cisaillement local en chaque point du collecteur. Cela a en outre permis de montrer, une fois encore, l'intérêt de l'outil qui permet d'étudier des paramètres très délicats à mesurer sur le terrain tels que les fluctuations turbulentes de vitesses et leurs influences sur le cisaillement.

Remerciements

L'auteur remercie le GIP GEMCEA et la Direction de la Recherche et de l'Animation Scientifique et Technique du Ministère chargé de l'Équipement pour le soutien apporté, le centre de Géomorphologie de l'université de Caen ainsi que les personnels du LCPC et de la Direction de l'Assainissement de la Communauté Urbaine de Nantes pour leur aide lors de ces travaux.

7. BIBLIOGRAPHIE

- Ashley R. M., Bertrand-Krajewski J. L., Hvitved Jacobsen T., Verbanck M., (2004), Solid in sewers., IWA Publishing, ISBN 1-900222-91-4, 340 p.
- Bonakdari H., Larrarte F., Bardiaux J-B., (2006), Experimental and computational study of velocity fields in narrow or compound section sewers, 7th Int. Conference on Urban Drainage Modelling, Melbourne, 3-7 Avril 2006, p. 169-176.
- Bonakdari H., Larrarte F., (2006a), Effet des caractéristiques d'un coude sur l'écoulement en réseaux d'assainissement, 24^{èmes} Rencontres Universitaires de Génie Civil, La Grande Motte, mai.
- Bonakdari H., Larrarte F., (2006b), Experimental and numerical investigation on self-cleansing and shear in sewers, soumis à 2nd International IWA Conference on Sewer Operation and Maintenance, Vienna, Austria, octobre.
- Bonakdari H., Larrarte F., (2006c), Experimental and numerical study of the shear stress in narrow compound channel. Int. Conference on turbulence and interaction, Porquerolles, France, mai.
- Graf W., Altinakar, M. S., (1996), Hydraulique fluviale., Tome 2, PPUR Lausanne, ISBN 2-88074-300-1, 627 p.
- Launder B. E., Spalding D. B., (1974), The numerical computation of turbulent flows., Computational Methods Appl. Mech. Eng., vol 3, pp. 269-289.
- NF EN 752-4, (1997), Réseaux d'évacuation et d'assainissement à l'extérieur des bâtiments Partie 4 : conception hydraulique et considérations liées à l'environnement, 36 p.