

Une nouvelle approche de modélisation 3D : Smoothed Particle Hydrodynamics (SPH)

Utilisation sur la communauté d'agglomération du douaisis

A new approach to 3D modelling: Smoothed Particle hydrodynamics (SPH)

Application at the communauté d'agglomération du douaisis

Priscille Béguin¹, Adrien Momplot¹, Tanguy Pouzol¹, Ludovic Dennin², Nicolas Revel³, Damien Granger³

¹ ÆGIR, 227 cours Lafayette 69 006 Lyon, contact@aegir-ingenierie.fr

² Communauté d'Agglomération du Douaisis, 746, rue Jean Perrin - BP 300 - 59351 Douai Cedex

³ Suez Eau France, 5 rue des Précurseurs 59 653 Villeneuve D'Ascq cedex

RÉSUMÉ

Cette communication s'attache à démontrer l'efficacité et la pertinence d'une nouvelle méthode de modélisation des écoulements hydrauliques au sein des réseaux d'assainissement en trois dimensions. Comparé aux méthodes classiques de type RANS, la méthode Smoothed Particle Hydrodynamics (SPH) s'affranchit des calculs en éléments finis et produit des résultats de modélisations moins chronophages et plus précis. Son application à un cas d'étude de terrain sur le territoire de la ville de Douai permet d'apprécier les limites et les valeurs ajoutées ainsi que les avantages apportés à l'exploitant. Le développement de ce nouveau modèle de calcul laisse entrevoir des perspectives de modélisations de phénomènes jusque-là très difficilement descriptibles par les méthodes RANS traditionnellement utilisées par l'industrie.

ABSTRACT

The purpose of this article is to demonstrate the efficiency and the relevance of a new three dimensions flow method in the context of sewer flows. Compared to a traditional RANS method, Smoothed Particle Hydrodynamics (SPH) is a meshless method that is faster and more accurate. When applied to a real testcase in Douai (France), it is possible to identify the limitations and gains of the SPH method, as well as the benefits for the operators of the modelled structure. The use of the SPH method and its further developments allows to simulate structures and behaviours that are extremely difficult to describe with traditional RANS-like methods used nowadays by the industry.

MOTS CLÉS

Assainissement, Instrumentation, Modélisation, SPH, Visualisation

1 INTRODUCTION

Développée au cours des années 1990 à 2000, la modélisation RANS en 3D des écoulements hydrauliques a rapidement démontré son efficacité et son intérêt (Stovin, 1996, Lipeme, 2004 ; Vazquez *et al.*, 2005, Bonakdari, 2006 ; Dufresne, 2008). Cette méthode, très largement appliquée par l'industrie, est depuis 5 ans la référence de robustesse et de précision dans le domaine de l'assainissement. Utilisée dans de très nombreux projets et appliquée dans une large gamme de problématiques et de sujets, elle a fait ses preuves en laboratoire et sur le terrain (Fach *et al.*, 2009 ; Lipeme *et al.* ; 2011, Isel *et al.*, 2014 ; Maté Marín *et al.*, 2018). Outil d'aide à la décision, la modélisation 3D apporte aux opérationnels de l'assainissement les connaissances nécessaires de maîtrise des ouvrages hydrauliques dont ils ont la charge, en particulier, les ouvrages complexes tels que les déversoirs d'orage (DO). La modélisation numérique est un outil efficace pour comprendre les phénomènes hydrauliques les plus complexes et témoigne du fonctionnement d'ouvrages non visitables lors d'évènements pluvieux.

Cependant, la méthode RANS reste un processus de modélisation coûteux et chronophage. Son application demande de l'expertise, de l'expérience et une puissance de calcul spécifiquement dédiée. Les temps de calculs ainsi que les contraintes d'exploitation limitent le déploiement de cet outil à l'échelle industrielle et donc son utilisation par les opérationnels.

La méthode Smoothed Particle Hydrodynamics (SPH) (Gómez-Gesteira *et al.*, 2010) est un paradigme différent, une nouvelle approche, qui permet également de modéliser les écoulements complexes du réseau d'assainissement en 3D.

Cet article décrit la méthode SPH d'un point de vue théorique, ses avantages et ses limites. Dans un second temps, nous présenterons l'application à un cas réel de cette méthode, réalisée dans le cas d'une étude menée par la société ÆGIR pour le compte du délégataire SUEZ Eau pour la Communauté d'Agglomération du Douaisis. Enfin, une dernière partie est consacrée à un retour d'expérience, du point de vue de l'exploitant.

2 SPH : THEORIE, AVANTAGES ET INCONVENIANTS

SPH est une méthode de résolution des équations de Navier-Stokes qui s'appuie sur une approche Lagrangienne plutôt qu'Eulérienne comme dans les méthodes de types RANS (Monaghan J. J., 1994). En conséquence, les fluides ne sont plus distribués sur un maillage de l'espace mais représentés par des particules. La position des particules dans l'espace au cours du temps est obtenue en intégrant leurs vitesses et accélérations. Les propriétés d'une particule (densité, pression) sont obtenues par une interpolation locale à l'aide d'une fonction de pondération appelée noyau de rayon d'influence h . Ainsi, les équations de Navier-Stokes deviennent avec SPH :

$$\left\langle \frac{d\rho_i}{dt} \right\rangle = \sum_j m_j (\mathbf{u}_i - \mathbf{u}_j) \cdot \nabla W_{ij} ; \left\langle \frac{d\mathbf{u}_i}{dt} \right\rangle = \sum_j m_j \left(\frac{p_i}{\rho_i^2} + \frac{p_j}{\rho_j^2} \right) \cdot \nabla W_{ij} ;$$

$$\left\langle \frac{de_i}{dt} \right\rangle = \frac{1}{2} \sum_j m_j \left(\frac{p_i}{\rho_i^2} + \frac{p_j}{\rho_j^2} \right) (\mathbf{u}_i - \mathbf{u}_j) \cdot \nabla W_{ij} ; \frac{dm_i}{dt} = 0$$

Où : $\langle \rangle$ est l'approximation SPH ; i est la particule où les équations sont résolues ; j est l'ensemble des particules dans le rayon d'influence du noyau appliqué à la particule i ; t est le temps ; ρ_k , m_k , \mathbf{u}_k , p_k , e_k sont respectivement la masse volumique, la masse, la vitesse, la pression et l'énergie d'une particule k ; W_{ij} est le noyau centré sur la particule i calculé au point j et ∇f est le gradient d'une fonction f .

Le noyau étant parfaitement défini en avance, il est également simple de calculer son gradient. Ainsi, les calculs nécessaires à la méthode SPH sont simples et directs. La méthode SPH a prouvé sa précision et son efficacité pour de nombreuses applications (Crespo *et al.*, 2011). Ses principaux avantages sont : méthode sans maillage, simulation de processus dynamiques, facilité de mise en place d'interactions solide-liquide dynamiques. Le principal inconvénient réside dans le fait que le temps de calcul nécessaire dépend du nombre de particules de la simulation et de leur vitesse au cours du temps. De plus, la modélisation actuelle des solides implique de modifier la géométrie des ouvrages en amont, rajoutant de fait une étape dans la mise en place des simulations (Crespo *et al.*, 2007).

3 UTILISATION DE LA METHODE GRACE A L'OUTIL KRAEKEN SUR LA COMMUNAUTE D'AGGLOMERATION DU DOUAISIS

3.1 Contexte

La Communauté d'Agglomération du Douaisis souhaite définir l'instrumentation d'un DO du site Polygone, de charge >600kg DBO₅/j, situé sur le territoire de la ville de Douai. Cette instrumentation doit permettre le suivi du débit déversé et être la plus légère possible en termes d'installation, de maintenance et de contrôle, tout en minimisant les incertitudes. Le délégataire SUEZ Eau pour la Communauté d'Agglomération du Douaisis a fait appel à ÆGIR, bureau d'études spécialisé dans la modélisation 3D, qui a proposé de faire appel à la méthode SPH via son outil de modélisation Kræken, développé en interne.

3.2 Méthode

La géométrie de l'ouvrage est fournie par la société Jarriquez (jarriquez.com), spécialisé dans le relevé topographique à l'aide d'une technologie laser innovante.

La définition de la campagne de calculs du DO dépend des données d'exploitation disponibles (données de terrain, modélisation 2D du réseau). Dans le cas présent, c'est l'étude des capacités hydrauliques maximales théoriques des canalisations connexes au DO Polygone qui est utilisée par manque de données d'exploitation. Le logiciel HSL de l'ENGEES (<http://hydraulique-des-reseaux.engees.eu/home/outils-de-calcul>) est utilisé dans ce but. Au final, l'étude du DO Polygone comprend 8 calculs répartis régulièrement entre les débits minimum et maximum.

Les calculs SPH sont menés à l'aide de Kræken. A l'issue de chaque calcul, la surface libre est extraite. L'ensemble des 8 surfaces libres est analysé afin de déterminer un endroit propice à une mesure par hauteur d'eau. Les conditions sont :

- Pour un débit donné, la surface libre est constante à ± 1 cm dans un carré de 10 cm de côté autour du point évalué. Cela assure une mesure de qualité pour le capteur de hauteur d'eau.
- Pour deux débits significativement différents, la hauteur d'eau à l'endroit de la mesure change significativement. Cela assure la distinguabilité des différents débits par mesure de hauteur.

Si un endroit de la chambre du DO remplit ces deux conditions, alors les hauteurs d'eau à cet endroit sont extraites pour chaque débit simulé et la loi $Q = f(h)$ est construite à l'aide d'une régression linéaire. Si aucun endroit n'est éligible, le DO est considéré comme impropre à la mesure en l'état et des modifications de l'ouvrage sont à envisager.

3.3 Résultats

L'analyse des simulations du DO Polygone montre qu'il est possible de suivre le débit déversé à l'aide d'une unique mesure de hauteur d'eau. L'emplacement du capteur et la loi reliant le débit déversé à la hauteur sont montrés en Figure 1.

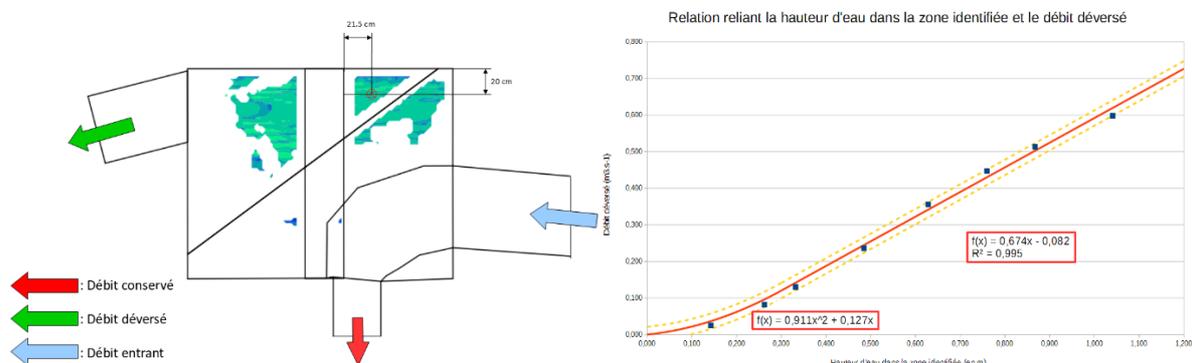


Figure 1 : À gauche le résultat de l'analyse concernant l'emplacement du capteur (les points en vert sont les points remplissant les deux conditions). À droite, la loi obtenue. Les points bleus sont les simulations, la ligne rouge, la droite retenue, les lignes en jaune les incertitudes sur cette loi.

Au point de mesure retenu, la loi $Q = f(h)$ est :

$$Q_{dev} = 0.674 * h_{mesurée} - 0.082 \pm 0.014 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$$

Où : Q_{dev} est le débit déversé par le DO Polygone (en $m^3.s^{-1}$) ; $h_{mesurée}$ est la hauteur d'eau mesurée dans la zone identifiée, par rapport au fil d'eau de la canalisation de décharge (en m).

4 RETOUR D'EXPERIENCE DE L'EXPLOITANT

L'arrêté du 21 juillet 2015 a permis de définir et de distinguer plus précisément une « mesure » d'une « estimation » (article 17-II). Dans ce contexte, certains déversoirs d'orage de charge supérieure à 600kg de DBO₅/j, comme le DO Polygone, ne peuvent donner des « mesures » car il n'est pas possible de respecter les règles de pose de l'instrumentation (système non normé, linéaire amont ou aval du capteur insuffisant, etc.). De plus, telle que demandée par l'arrêté du 21 juillet 2015, la réalisation d'une étude spécifique, permettant de comparer le débit mesuré par le dispositif concerné à des valeurs fournies par toute autre méthode garantissant un mesurage de qualité, est souvent très difficile à mettre en place car chronophage, ou peut nécessiter de nombreux instruments de mesures et peut s'étaler dans la durée.

Dans ce contexte, la modélisation 3D et plus particulièrement la méthode SPH permet d'appréhender ces déversoirs d'orages « complexes » et permet de répondre pleinement à la réglementation. Le coût global étant du même ordre que pour une instrumentation classique (coût capteurs, pose et étude spécifique). Néanmoins, cette méthodologie, qui définit une loi hauteur débit, donne une mesure via un capteur sans contact avec l'effluent (type US) ce qui réduit les coûts d'exploitation par rapport à des capteurs de contact (type Doppler).

BIBLIOGRAPHIE

Bonakdari H. "Modélisation des écoulements en collecteur d'assainissement – Application à la conception de point de mesures". Thèse de doctorat, Caen : Université de Caen, 2006, 263 p.

Crespo A. J. C., Gómez-Gesteira M., Dalrymple R. A., 2007. "Boundary Conditions Generated by Dynamic Particles in SPH Methods". *CMC: Computers, Materials, & Continua*, 5(3), 173-184.

Crespo A. J. C., Dominguez J. M., Barreiro A., Gómez-Gesteira M., Rogers B. D., 2011. "GPUs, a new tool of acceleration in CFD: Efficiency and reliability on Smoothed Particle Hydrodynamics methods." *PLoS ONE*, 6(6), e20685.

Dufresne M. "La modélisation 3D du transport solide dans les bassins en assainissement : Du pilote expérimental à l'ouvrage réel". Thèse de doctorat, Strasbourg : Université Louis Pasteur, 2008, 226 pages

Fach S., Sitzenfren R., Rauch W., 2009. "Determining the spill flow discharge of combined sewer overflows using rating curves based on computational fluid dynamics instead of the standard weir equation". *Water Sci. Technol.*, 60, 3035-3043.

Gómez-Gesteira M., Rogers B. D., Dalrymple R. A., Crespo A. J. C., 2010. "State-of-the-art of classical SPH for free-surface flows". *Journal of Hydraulic Research*, 48, 6-27.

Isel S., Dufresne M., Fischer M., Vazquez J., 2014. "Assessment of the overflow discharge in complex CSO chambers with water level measurements e on-site validation of a CFD-based methodology". *Flow. Meas. Instrum.*, 35, 39-43.

Lipeme Kouyi G. "Expérimentations et modélisations tridimensionnelles de l'hydrodynamique et de la separation particulaire dans les déversoirs d'orage". Thèse de doctorat, Strasbourg : Université Louis Pasteur, 2004, 274 pages

Lipeme Kouyi, G., Bret P., Didier J.-M., Chocat B., Billat C., 2011. "The use of CFD modelling to optimise measurement of overflow rates in a downstream- controlled dual-overflow structure". *Water Sci. Technol.*, 64, 521-527.

Monaghan J. J., 1994. "Simulating free surface flows with SPH". *Journal of computational physics*, 110, 399-406.

Maté Marín A., Rivière N., Lipeme Kouyi G., 2018. "DSM-flux: A new technology for reliable Combined Sewer Overflow discharge monitoring with low uncertainties". *Journal of Environmental Management*, 215, 273-282.

Stovin V. R. "The prediction of sediment deposition in storage chambers based on laboratory observations and numerical simulations". Thèse de doctorat, Sheffield : University of Sheffield, 1996, 305 pages.

Vazquez J., Zug M., Buyer M., Lipeme Kouyi G., 2005. "CSOs: Tools for assessing their operation in our systems". *Water Science and Technology*, 51(2), 179-185