HAL
open science

Expérimentation et modélisation de l'hydrodynamique et de la dispersion de la pollution particulaire au sein des déversoirs latéraux

Alejandro Claro Barreto

To cite this version:

Alejandro Claro Barreto. Expérimentation et modélisation de l'hydrodynamique et de la dispersion de la pollution particulaire au sein des déversoirs latéraux. Environnement et Société. Université de Lyon, 2020. Français. NNT : 2020LYSEI083 . tel-03177292

HAL Id: tel-03177292

https://theses.hal.science/tel-03177292v1

Submitted on 23 Mar 2021

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

N°d'ordre NNT : 2020LYSEI083

THESE de DOCTORAT **DE L'UNIVERSITE DE LYON**
opérée au sein de
Institut National des Sciences Appliquées de Lyon

Ecole Doctorale ED162
Mécanique, Energétique, Génie Civil et Acoustique

Spécialité : Génie Civil

Soutenue publiquement le 05/10/2020, par :
Alejandro CLARO BARRETO

Expérimentation et modélisation de l'hydrodynamique et la dispersion de la pollution particulaire au sein des déversoirs latéraux

Devant le jury composé de :

GHENAIM, Abdellah	Professeur, INSA Strasbourg	Rapporteur
LARRARTE, Frédérique	Directrice de Recherche, Université Gustave Eiffel et Laboratoire d'Hydraulique Saint-Venant	Rapporteuse
BUFFIERE, Pierre	Professeur, INSA Lyon	Examinateur
CHEBBO, Ghassan	Directeur de Recherche, École des Ponts ParisTech	Examinateur
LIPEME KOUYI, Gislain	Maître de Conférences HDR, INSA Lyon	Directeur de thèse
RIVIERE, Nicolas	Professeur, INSA Lyon	Co-directeur de thèse
BIOTEAU, Franck	Directeur Assainissement, Valence Romans Agglo	Invité

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2020LYSEI083/these.pdf
© [A. Claro Barreto], [2020], INSA Lyon, tous droits réservés

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2020LYSEI083/these.pdf
© [A. Claro Barreto], [2020], INSA Lyon, tous droits réservés

Département FEDORA – INSA Lyon - Ecoles Doctorales – Quinquennal 2016-2020

SIGLE	ECOLE DOCTORALE	NOM ET COORDONNEES DU RESPONSABLE
CHIMIE	**CHIMIE DE LYON** http://www.edchimie-lyon.fr Sec. : Renée EL MELHEM Bât. Blaise PASCAL, 3e étage secretariat@edchimie-lyon.fr INSA : R. GOURDON	**M. Stéphane DANIELE** Institut de recherches sur la catalyse et l'environnement de Lyon IRCELYON-UMR 5256 Équipe CDFA 2 Avenue Albert EINSTEIN 69 626 Villeurbanne CEDEX directeur@edchimie-lyon.fr
E.E.A.	**ÉLECTRONIQUE, ÉLECTROTECHNIQUE, AUTOMATIQUE** http://edeea.ec-lyon.fr Sec. : M.C. HAVGOUDOUKIAN ecole-doctorale.eea@ec-lyon.fr	**M. Gérard SCORLETTI** École Centrale de Lyon 36 Avenue Guy DE COLLONGUE 69 134 Écully Tél : 04.72.18.60.97 Fax 04.78.43.37.17 gerard.scorletti@ec-lyon.fr
E2M2	**ÉVOLUTION, ÉCOSYSTÈME, MICROBIOLOGIE, MODÉLISATION** http://e2m2.universite-lyon.fr Sec. : Sylvie ROBERJOT Bât. Atrium, UCB Lyon 1 Tél : 04.72.44.83.62 INSA : H. CHARLES secretariat.e2m2@univ-lyon1.fr	**M. Philippe NORMAND** UMR 5557 Lab. d'Ecologie Microbienne Université Claude Bernard Lyon 1 Bâtiment Mendel 43, boulevard du 11 Novembre 1918 69 622 Villeurbanne CEDEX philippe.normand@univ-lyon1.fr
EDISS	**INTERDISCIPLINAIRE SCIENCES-SANTÉ** http://www.ediss-lyon.fr Sec. : Sylvie ROBERJOT Bât. Atrium, UCB Lyon 1 Tél : 04.72.44.83.62 INSA : M. LAGARDE secretariat.ediss@univ-lyon1.fr	**Mme Sylvie RICARD-BLUM** Institut de Chimie et Biochimie Moléculaires et Supramoléculaires (ICBMS) - UMR 5246 CNRS - Université Lyon 1 Bâtiment Curien - 3ème étage Nord 43 Boulevard du 11 novembre 1918 69622 Villeurbanne Cedex Tel : +33(0)4 72 44 82 32 sylvie.ricard-blum@univ-lyon1.fr
INFOMATHS	**INFORMATIQUE ET MATHÉMATIQUES** http://edinfomaths.universite-lyon.fr Sec. : Renée EL MELHEM Bât. Blaise PASCAL, 3e étage Tél : 04.72.43.80.46 infomaths@univ-lyon1.fr	**M. Hamamache KHEDDOUCI** Bât. Nautibus 43, Boulevard du 11 novembre 1918 69 622 Villeurbanne Cedex France Tel : 04.72.44.83.69 hamamache.kheddouci@univ-lyon1.fr
Matériaux	**MATÉRIAUX DE LYON** http://ed34.universite-lyon.fr Sec. : Stéphanie CAUVIN Tél : 04.72.43.71.70 Bât. Direction ed.materiaux@insa-lyon.fr	**M. Jean-Yves BUFFIÈRE** INSA de Lyon MATEIS - Bât. Saint-Exupéry 7 Avenue Jean CAPELLE 69 621 Villeurbanne CEDEX Tél : 04.72.43.71.70 Fax : 04.72.43.85.28 jean-yves.buffiere@insa-lyon.fr
MEGA	**MÉCANIQUE, ÉNERGÉTIQUE, GÉNIE CIVIL, ACOUSTIQUE** http://edmega.universite-lyon.fr Sec. : Stéphanie CAUVIN Tél : 04.72.43.71.70 Bât. Direction mega@insa-lyon.fr	**M. Jocelyn BONJOUR** INSA de Lyon Laboratoire CETHIL Bâtiment Sadi-Carnot 9, rue de la Physique 69 621 Villeurbanne CEDEX jocelyn.bonjour@insa-lyon.fr
ScSo	**ScSo*** http://ed483.univ-lyon2.fr Sec. : Véronique GUICHARD INSA : J.Y. TOUSSAINT Tél : 04.78.69.72.76 veronique.cervantes@univ-lyon2.fr	**M. Christian MONTES** Université Lyon 2 86 Rue Pasteur 69 365 Lyon CEDEX 07 christian.montes@univ-lyon2.fr

*ScSo : Histoire, Géographie, Aménagement, Urbanisme, Archéologie, Science politique, Sociologie, Anthropologie

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2020LYSEI083/these.pdf
© [A. Claro Barreto], [2020], INSA Lyon, tous droits réservés

Remerciements

Je tiens à remercier mon directeur, Dr. Gislain Lipeme Kouyi, et co-directeur, Prof. Nicolas Rivière, pour leur soutien en continu, leurs disponibilité permanente dès que j'avais des doutes ou besoin de conseils, et d'avoir partagé avec moi leurs connaissances. Je remercie également Dr. Emmanuel Mignot de m'avoir aidé et conseillé au début du projet.

J'adresse tous mes remerciements au Prof. Abdellah Ghenaim et la Dr. Frédérique Larrarte d'avoir accepté d'être les rapporteurs de cette thèse, vos appréciations ont permis d'améliorer de manière importante le manuscrit. Je remercie également aux autres membres du jury, Prof. Ghassan Chebbo et Prof. Pierre Buffiere, par les échanges lors de la soutenance de thèse qui m'ont offert les dernières pistes d'amélioration.

Cette thèse CIFRE a été financé par la communauté d'agglomération Valence Romans Agglo et le ministère de l'Enseignement supérieur et de la Recherche. Je remercie mes encadrants en entreprise, M. Franck Bioteau et M. Loïc Teyssier, ainsi que l'ensemble de membres de l'unité de l'assainissement pour leur aide et leur expertise sur le terrain.

J'exprime mes remerciements aux techniciens de l'OTHU et du laboratoire DEEP, Stéphane Vacherie, Nicolas Walcker, Serge Naltchayan Dominique Babaud et Richard Poncet, pour leur aide dans les travaux en laboratoire et sur le terrain. Je remercie Dr. Boram Kim, Mme Nathalie Dumont et M Bruno Sialve pour leurs aides et conseils sur les analyses biochimiques essentiels du projet.

Je tiens aussi à remercier les doctorants des laboratoires DEEP et LMFA, Ainhoa Maté Marín, Xiaoxiao Zhu, Santiago Sandoval, Robin Garnier, Helene Coarita, Amin Laafar, Clement Perrot Minot et Sébastien Pouchoulin, qui m'ont offert leur aide à plusieurs occasions et avec qui j'ai passé des bons moments.

Enfin et surtout, je tiens à remercier à deux femmes exceptionnelles : ma mère, Sara, qui a été toujours à mes côtés, et mon épouse, Amal, qui m'a accompagnée dans cette aventure et grâce à son soutien inconditionnel et sa bienveillance j'ai réussi à surmonter les moments les plus difficiles.

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2020LYSEI083/these.pdf
© [A. Claro Barreto], [2020], INSA Lyon, tous droits réservés

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2020LYSEI083/these.pdf
© [A. Claro Barreto], [2020], INSA Lyon, tous droits réservés

Liste de publications

Revues internationales - Co-auteur

Haussmann, M., Claro Barreto, A., Lipeme Kouyi, G., Rivière, N., Nirschl, H. & Krause, M. J. (2019). Large-eddy simulation coupled with wall models for turbulent channel flows at high Reynolds numbers with a lattice Boltzmann method—Application to Coriolis mass flowmeter. *Computers & Mathematics with Applications*, *78*(10), 3285-3302. doi :https://doi.org/10.1016/j.camwa.2019.04.033

Springer, F., Carrera, L., Lipeme Kouyi, G., Claro Barreto, A. & Buffiere, P. (2020). The liquid-gas mass transfer coefficient in open channel flow is correlated to the turbulent kinetic energy at the interface. *The Canadian Journal of Chemical Engineering*, *98*(5), 1191-1201. doi :10.1002/cjce.23704

Actes de conférences internationales - Présentation orale

Claro Barreto, A., Lipeme Kouyi, G., Krause, M. J., Nathen, P. & Rivière, N. (2017a). Large-eddy simulation coupled with wall models for turbulent channel flows at high Reynolds numbers with a Lattice Boltzmann Method. In *26th International Conference on Discrete Simulation of Fluid Dynamics*, Erlangen, Allemagne

Claro Barreto, A., Lipeme Kouyi, G., Rivière, N. & Krause, M. J. (2017b). Validation of Large-Eddy simulation of open channel flow at high Reynolds number with a Lattice Boltzmann method. *Proceedings of the 14th ICUD-International Conference on Urban Drainage*, Prague, République Tchèque

Actes de conférences internationales - Poster

Zhu, X., Claro Barreto, A. & Lipeme Kouyi, G. (2016). Design and performance evaluation of Hydrocyclone and Lamella Settler for Urban Stormwater Sediments. *8th International Conference on Sewer Process and Networks (SPN8)*, Rotterdam, Pays-Bas

Actes de conférences nationales - Présentation orale

Claro Barreto, A., Rivière, N. & Lipeme Kouyi, G. (2016). La méthode Lattice Boltzmann couplée au modèle LES pour la simulation des écoulements à surface libre - résultats préliminaires. *7èmes Journées Doctorales en Hydrologie Urbaine (JDHU)*, Nantes, France

Articles en cours

Claro Barreto, A., Lipeme Kouyi, G., & Rivère, N. (en cours). Validation of 3D numerical hydrodynamic model of complex lateral CSO with on-site measurements.

Claro Barreto, A., Lipeme Kouyi, G., Mignot, E. & Rivère, N. (en cours). Experimental mass distribution of suspended sediments within sharp-crested side weir in subcritical flow.

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2020LYSEI083/these.pdf
© [A. Claro Barreto], [2020], INSA Lyon, tous droits réservés

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2020LYSEI083/these.pdf
© [A. Claro Barreto], [2020], INSA Lyon, tous droits réservés

Résumé

Il est maintenant bien établi que les déversoirs d'orages (DO) d'un système de collecte sont la principale source de pollution pour les milieux récepteurs en temps de pluie. La maîtrise de ces flux de pollution déversés par les DO requiert l'étude du fonctionnement hydraulique et du transport de polluants, véhiculés majoritairement sous forme particulaire en suspension. En France, les déversoirs latéraux sont les plus répandus. La mécanique des fluides numérique (CFD, en anglais) est l'approche numérique qui permet aujourd'hui de mieux appréhender la complexité des écoulements au sein de ces DO latéraux. Sauf qu'il n'existe aucune étude, à notre connaissance, couplant modélisation CFD et données de débits et de concentrations en polluants collectées *in situ* sur le long terme pour comprendre le fonctionnement hydraulique et vis-à-vis de la pollution d'un DO latéral complexe soumis à l'autosurveillance règlementaire.

Les objectifs de cette thèse sont : (i) réaliser des expérimentations et des simulations numériques (à l'aide des méthodes des volumes finis et de Boltzmann sur réseau) à deux échelles (laboratoire et terrain) pour comprendre le comportement hydrodynamique et la dispersion des polluants particulaires au sein d'un déversoir latéral ; (ii) exploiter les outils de modélisation validés et les données expérimentales pour améliorer l'instrumentation du déversoir d'orage autosurveillé de la ville de Valence ; (iii) vérifier si le critère de conformité sur la pollution est approprié par rapport à l'Arrêté du 21 juillet 2015.

Les résultats obtenus montrent que : (i) la modélisation des écoulements à surface libre à l'aide de la méthode de Boltzmann sur réseau nécessite encore des développements importants, notamment la définition des conditions aux limites adéquates pour le cas des écoulements turbulents ; (ii) une stratégie de modélisation 3D (à l'aide du modèle de turbulence RNG k-ϵ) permettant de prédire la répartition des débits n'assure pas la reproduction de la répartition massique des polluants particulaires, du fait notamment de la non reproduction des courants secondaires ; (iii) la même stratégie permet malgré tout d'identifier les zones d'échantillonnage et de simuler l'implémentation d'un capteur pour le suivi de la qualité des rejets d'un DO latéral par temps de pluie (e.g. le positionnement pertinent d'un turbidimètre *in situ*) ; (iv) la concentration en DBO_5 (demande biochimique en oxygène sur 5 jours) était corrélée à la concentration en MES (matières en suspension), et donc le suivi de la DBO_5 (paramètre règlementaire) pourrait être fait à partir des concentrations en MES (e.g. mesurées à l'aide d'un turbidimètre) sur le site d'étude.

Nous avons également constaté que les concentrations en DBO_5 du flux déversé sont inférieures à celles liées au bilan 24 heures en entrée de la station d'épuration. Le critère de conformité réglementaire, fondé sur le flux de DBO_5 déversé, est compris entre 3.9% et 5.3%, et le seuil réglementaire impose une valeur inférieure à 5% du flux total produit par le système de collecte. Ce résultat indique que la ville de Valence pourrait envisager d'analyser la conformité de leur système de collecte à l'aide de ce critère.

Enfin, ces travaux ont également permis de valider pour la première fois l'approche CFD (modélisation 3D) appliquée au cas d'un déversoir latéral complexe soumis à l'autosurveillance réglementaire grâce aux données *in situ* de hauteurs d'eau, débits amont et débits déversés. Ils confirment l'emploi de l'approche CFD et des essais en laboratoire comme outils opérationnels permettant (i) de comprendre le comportement hydrodynamique d'un DO en temps de pluie, (ii) de mettre en place l'autosurveillance et (iii) d'analyser la conformité d'un système de collecte.

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2020LYSEI083/these.pdf
© [A. Claro Barreto], [2020], INSA Lyon, tous droits réservés

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2020LYSEI083/these.pdf
© [A. Claro Barreto], [2020], INSA Lyon, tous droits réservés

Abstract

It is well established that combined sewer overflows (CSO) are the main source of pollution for the receiving environnements during wet weather. The control of pollution flux discharges by CSO requires the study of hydraulics and pollutant transport, conveyed mostly as suspended particles. In France, the side weirs CSO are the most widespread. Computational fluid dynamics (CFD) is the numerical approach that allows nowadays to better address the complexity of the flows within these structures. To our knowledge, there is a gap regarding the coupling between CFD and long term *in situ* data of discharge overflow and pollutant's concentration in order to understand the hydraulics and pollutant characteristics of a complexe lateral CSO for regulatory self-monitoring purposes.

The objectives of this PhD are : (i) to carry out experimental and numerical simulations (by means of the finite volume method and the lattice Boltzmann method) to understand the hydraudynamic behaviour and particulate pollutants' dispersion within a side weir CSO; (ii) to use validated numerical approches and experimental data to improve the implementation of the self-monitoring of the side CSO in the city of Valence (France); (iii) to verify if the pollution criteria is appropriate to fulfil Ministerial Order of 21 July 2015.

The results obtained show that : (i) the modeling of open channel flows by means of the Lattice Boltzmann Method still requires significant developpement, notably the definition of appropriate boundary conditions for turbulent flows; (ii) a 3D simulation strategy (by means of the turbulence model RNG k-ϵ) enabling to reproduce discharge distribution does not necessarily reproduce particulate pollutants mass distribution, due to the incorrect secondary currents simulation; (iii) the same strategy allows nevertheless to identify sampling areas and to simulate a sensor's implementation in order to mesure the lateral CSO polluant loads in wet weather (e.g. the relevant location of a *in situ* tubidimeter); (iv) according to the first *in situ* measurement campaigns of the discharge overflow, the BOD_5 (biochemical oxygen demand during 5 days) co ncentration is correlated to TSS (Total suspended CSOlids) concentration, and therefore the monitoring of BOD_5 (compliance parameter) could be obtained from *in situ* TSS concentrations (e.g. measured by means of a turbidimeter).

We also noted that BOD_5 concentrations in diverted overflows are lower than 24 hours compound sampling at the inlet of the waste water treatment plant. The pollution compliance criteria, based on BOD_5 overflow flux, is between 3.9% and 5.3%, and the regulatory threshold is less than 5% of total BOD_5 flux produced by the sewerage system. This result shows that the city of Valence (France) could assess its sewerage system compliance by means of this pollution criterion.

Finally, this work also allowed to validate for the first time the CFD approach (3D numerical simulation) applied to a complexe lateral CSO in the framework of self-monitoring regulation thanks to *in situ* data of water levels, upstream flowrates and overflow discharges. It confirms the use of CFD and laboratory tests as operational tools allowing (i) to understand the hydrodynamic behaviour of CSO in wet weather, (ii) to implement self-monitoring and (iii) to analyse sewerage system compliance.

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2020LYSEI083/these.pdf
© [A. Claro Barreto], [2020], INSA Lyon, tous droits réservés

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2020LYSEI083/these.pdf
© [A. Claro Barreto], [2020], INSA Lyon, tous droits réservés

Table des matières

Remerciements i

Liste de publications iii

Résumé v

Abstract vii

Table des figures 5

Liste des tableaux 13

Liste des symboles 19

1 Introduction 25
- 1.1 Contexte . . . 25
  - 1.1.1 Les enjeux opérationnels . . . 25
  - 1.1.2 Les enjeux scientifiques . . . 26
- 1.2 Problématique . . . 30
- 1.3 Objectifs . . . 30
  - 1.3.1 Opérationnels . . . 30
  - 1.3.2 Scientifiques . . . 30
- 1.4 Structure du manuscrit . . . 31

I L'hydrodynamique au sein d'un déversoir latéral 33

2 L'autosurveillance du déversoir d'orage « Gambetta » 35
- 2.1 Introduction . . . 35
- 2.2 Matériel et méthodes . . . 36
  - 2.2.1 Le système de collecte de la ville de Valence . . . 36
  - 2.2.2 Le déversoir d'orage « Gambetta » . . . 37
  - 2.2.3 L'autosurveillance du déversoir d'orage « Gambetta » . . . 40
  - 2.2.4 La méthodologie de pré-traitement des données *in situ* . . . 41
  - 2.2.5 La méthodologie d'extraction d'un événement pluvieux . . . 42
  - 2.2.6 Pré-étude du fonctionnement hydraulique global . . . 44
  - 2.2.7 La courbe de remous . . . 46
  - 2.2.8 L'incertitude expérimentale des grandeurs géométriques et hydrauliques . . . 48
- 2.3 Résultats . . . 50
  - 2.3.1 Pré-traitement des données *in situ* . . . 50
  - 2.3.2 Les événements pluvieux depuis l'année 2011 . . . 52
  - 2.3.3 L'écoulement dans la conduite amont . . . 53
  - 2.3.4 L'écoulement dans les conduites de déversement . . . 57
  - 2.3.5 L'incertitude du débit déversé *in situ* . . . 60

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2020LYSEI083/these.pdf
© [A. Claro Barreto], [2020], INSA Lyon, tous droits réservés

2.4 Discussion . . . 60
2.5 Conclusion . . . 61

3 L'hydrodynamique d'un déversoir latéral en régime fluvial 63
3.1 Introduction . . . 63
3.2 Matériel et Méthodes . . . 65
3.2.1 Le déversoir latéral . . . 65
3.2.2 Mesures expérimentales . . . 66
3.2.3 Le modèle numérique . . . 73
3.3 Vérification et validation du modèle numérique . . . 90
3.3.1 Vérification : la convergence des résultats . . . 90
3.3.2 Vérification : résultats numériques avec oscillation - $P_{\text{NOF}} = 0$ . . . 91
3.3.3 Validation : le débit déversé . . . 91
3.3.4 L'incertitude globale des résultats numériques et expérimentaux . . . 91
3.4 Résultats et discussions . . . 93
3.4.1 La performance globale des modèles de turbulence . . . 93
3.4.2 La performance locale des modèles de turbulence . . . 97
3.4.3 La répartition spatiale des lignes de courant liées au déversement latéral . . . 108
3.5 Conclusions . . . 110
3.6 Perspectives . . . 110

4 Modélisation hydraulique du déversoir d'orage « Gambetta » 111
4.1 Introduction . . . 111
4.2 Matériel et méthodes . . . 112
4.2.1 Le déversoir d'orage « Gambetta » . . . 113
4.2.2 Les modèles numériques . . . 114
4.2.3 La campagne de simulation . . . 118
4.2.4 La vérification et validation . . . 119
4.2.5 L'incertitude élargie selon la méthode GUM . . . 120
4.2.6 Méthode de vérification d'emplacement d'un capteur de qualité . . . 121
4.3 La vérification des résultats numériques . . . 121
4.3.1 Vérification de la conservation de la masse . . . 122
4.3.2 L'incertitude relative des résultats numériques - GCI modifiée . . . 128
4.4 La validation des résultats numériques . . . 129
4.4.1 Le débit déversé en temps de pluie . . . 131
4.4.2 La hauteur d'eau dans la chambre du DO « Gambetta » . . . 132
4.5 Résultats . . . 134
4.5.1 Les lois de déversement en temps de pluie . . . 134
4.5.2 La distribution spatiale des lignes de courant au niveau de la section d'entrée « réelle » . . . 136
4.5.3 Le temps de séjour de l'écoulement . . . 140
4.5.4 Simulation de l'implémentation d'un capteur de suivi de la pollution . . . 140
4.6 Discussions . . . 141
4.7 Conclusions . . . 143
4.8 Perspectives . . . 144

5 Modélisation des écoulements turbulents avec la méthode de Boltzmann sur réseaux 145
5.1 Introduction . . . 145
5.2 Matériel et Méthodes . . . 147
5.2.1 Le canal bi-périodique . . . 147
5.2.2 La méthode de Boltzmann sur réseaux . . . 147
5.2.3 La simulation de la turbulence . . . 149

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2020LYSEI083/these.pdf
© [A. Claro Barreto], [2020], INSA Lyon, tous droits réservés

5.2.4 L'écoulement proche de parois . . . 149
5.3 Résultats . . . 149
5.3.1 L'influence du calcul de $f^{(1)}$ sur les statistiques turbulentes . . . 149
5.3.2 L'influence des lois de parois sur les statistiques turbulentes . . . 150
5.3.3 L'applicabilité de l'opérateur SRT pour des écoulements turbulents . . . 150
5.4 Discussion . . . 150
5.5 Conclusions . . . 150

II Le transport particulaire au sein d'un déversoir latéral de décharge 153

6 La répartition massique au sein d'un déversoir latéral à échelle réduite 155
6.1 Introduction . . . 155
6.2 Matériel et méthodes . . . 158
6.2.1 La masse volumique des particules inertes . . . 158
6.2.2 La granulométrie des particules inertes . . . 160
6.2.3 Le déversoir latéral expérimental . . . 160
6.2.4 Le protocole expérimental de répartition massique des particules inertes . . . 161
6.2.5 Analyse dimensionnelle du transport de particules . . . 165
6.2.6 Le modèle numérique du transport des particules discrètes - DPM . . . 166
6.2.7 La méthode de calcul de la répartition massique . . . 168
6.3 Résultats et Discussions . . . 169
6.3.1 La granulométrie des particules déversées . . . 170
6.3.2 La répartition massique expérimentale . . . 171
6.3.3 Probabilité de déversement de l'eau . . . 172
6.3.4 La répartition massique numérique . . . 173
6.4 Conclusions . . . 176
6.5 Perspectives . . . 176

7 La pollution déversée au niveau du déversoir d'orage « Gambetta » 179
7.1 Introduction . . . 179
7.2 Matériel et méthodes . . . 181
7.2.1 Le site expérimental . . . 181
7.2.2 Protocole de mesure de la pollution au sein d'un déversoir d'orage en temps de pluie . . . 183
7.2.3 Les analyses physico-chimiques . . . 187
7.2.4 L'incertitude des relations entre les paramètres physico-chimiques . . . 189
7.2.5 La concentration moyenne événementielle maximale CME_{max} du déversement 190
7.2.6 La concentration moyenne événementielle . . . 190
7.2.7 La concentration moyenne du déversoir d'orage . . . 192
7.2.8 Le critère de flux de pollution . . . 192
7.3 Résultats et Discussions . . . 199
7.3.1 Le flux de pollution déversé en temps de pluie . . . 200
7.3.2 Caractérisation de la pollution déversée en temps de pluie par le déversoir d'orage « Gambetta » . . . 202
7.3.3 Mesure de la demande biochimique en oxygène sur 5 jours (DBO_5) à l'aide des matières en suspension (MES) . . . 207
7.4 Conclusions . . . 207
7.5 Perspectives . . . 209

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2020LYSEI083/these.pdf
© [A. Claro Barreto], [2020], INSA Lyon, tous droits réservés

III Conclusions et perspectives **211**

8 Conclusions **213**

9 Perspectives **217**

IV Annexes **221**

A Fiche technique du déversoir d'orage « Gambetta » **223**
A.1 Fonctionnement hydraulique du déversoir d'orage 226
A.1.1 La hauteur d'eau dans la chambre du DO en fonction de la Hauteur d'eau Amont 229
A.1.2 Le débit d'entrée selon la hauteur d'eau Amont 230
A.2 Fonctionnement hydraulique en temps de pluie 232

B Base de données de l'hydrodynamique du déversoir latéral à échelle réduite **239**

C Les probabilité de déversement 2D des lignes de courant du déversoir latéral à échelle réduite **255**

D Hydrodynamique de la conduite amont du déversoir d'orage « Gambetta » **257**
D.1 Introduction 257
D.2 Matériel et méthodes 257
D.2.1 Le pré-traitement 257
D.2.2 La résolution numérique 259
D.2.3 Le post-traitement 260
D.2.4 L'incertitude élargie selon la méthode GUM 261
D.3 Vérification et Incertitude du modèle numérique 3D 261
D.3.1 Vérification : La conservation de la masse 261
D.3.2 L'incertitude liée au maillage - Critère GCI 262
D.4 Résultat : La loi Hauteur-Débit 263
D.5 Conclusion 265

E Les probabilités d'oscillation du modèle numérique du déversoir d'orage « Gambetta » **267**

F Base de données des campagnes de mesure du flux de pollution du déversoir d'orage « Gambetta » **269**

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2020LYSEI083/these.pdf
© [A. Claro Barreto], [2020], INSA Lyon, tous droits réservés

Table des figures

2.1 Schémas 2D (Fig. 2.1b) et 3D (Fig. 2.1b) du déversoir d'orage Gambetta d'après le relevé topographique 3D. . . . 37

2.2 Bassin versant du déversoir d'orage « Gambetta ». L'étoile blanche correspond au déversoir d'orage « Gambetta ». . . . 38

2.3 Les sections transversales du déversoir d'orage « Gambetta ». . . . 39

2.4 Schéma 3D du fonctionnement hydraulique du déversoir d'orage « Gambetta » en temps sec (2.4a) et temps de pluie (2.4b). . . . 40

2.5 La localisation du pluviomètre « Belle Meunière » (en bleu) dans le système de collecte de la ville de Valence. Les lignes rouges représentent les principaux collecteurs du système de collecte et l'étoile noire correspond au déversoir d'orage « Gambetta ». . . . 43

2.6 Le schéma 2D de la conduite amont du déversoir d'orage « Gambetta ». . . . 44

2.7 L'incertitude composée relative $\left(u_c(X)/X\right)$ de la surface mouillé A et le rayon hydraulique R_h en fonction de la hauteur d'eau dans la section de contrôle à l'amont du DO « Gambetta » (H_{Amont}). . . . 45

2.8 Schéma 3D de l'emplacement de la sonde de hauteur d'eau dans la chambre du déversoir d'orage « Gambetta » . . . 46

2.9 La hauteur d'eau dans la chambre du DO (H_{chambre}) en fonction de la hauteur d'eau dans la conduite amont du DO (H_{Amont}) en temps de pluie. . . . 47

2.10 Schéma 2D de la géométrie des conduites de décharges « Gauche » (haut) et « Droit » (bas) du déversoir d'orage « Gambetta ». Les nombres correspondent à la pente du radier en %. Les lignes verticales noires correspondent à l'emplacement des sondes de vitesse et hauteur d'eau. . . . 47

2.11 Le pourcentage des données *in situ* retenues après application des étapes 1, 2.1 et 2.2 sur les points de mesure « Amont », « Gauche » et « Droit ». . . . 51

2.12 Le pourcentage des données *in situ* retenues après application (2.12a) des trois étapes et (2.12b) de l'étape 3 avec la hauteur d'eau seuil à l'amont $H_{\text{min}} = 0.400\,m$. . . . 51

2.13 L'intensité moyenne maximale sur 12 minutes $\overline{I_{12}}$ en fonction de la hauteur totale précipitée H_p entre l'année 2011 à 2018. Les lignes pointillées indiquent le percentile à 75% de chacune des variables. . . . 53

2.14 Le débit d'entrée D_{E} expérimental dans la conduite amont du déversoir d'orage « Gambetta » en temps de pluie. . . . 54

2.15 Le nombre de Froude Fr expérimental dans la conduite amont du déversoir d'orage « Gambetta » en temps de pluie. . . . 55

2.16 La courbe de remous dans la conduite amont du DO « Gambetta » en fonction de la hauteur d'eau à l'amont H_{Amont} (sens horizontal) et du coefficient de rugosité de Strickler K_s (sens vertical). . . . 56

2.17 Le débit *in situ* déversé « Total » relatif $D_{\text{T}}/D_{\text{E}}$ pour les années 2017 (cercle bleu) et 2018 (étoile rouge) en fonction du débit d'entrée D_{E}. Les barres d'erreur correspondent à l'intervalle de confiance à 95%. . . . 57

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2020LYSEI083/these.pdf
© [A. Claro Barreto], [2020], INSA Lyon, tous droits réservés

2.18 Les courbes de remous des conduites de décharge « Gauche » et « Droit » pour les débits totaux déversés D_T 800 m^3/h (2.18a), 7000 m^3/h (2.18b) et 11000 m^3/h (2.18c) avec un partage du débit $\alpha_D = 0.5$ et un coefficient de Strickler $K_s = 70\, m^{1/3}/s$. La localisation et la longueur approximée du ressaut hydraulique est indiqué par les lignes pointillées en rouge. La section de mesure *in situ* de la vitesse et de la hauteur d'eau est indiquée par les lignes noires. 59
2.19 L'incertitude élargie relative $U(D_{exp})/D_{exp}$ des débits déversés expérimentaux « Gauche » (cercle bleu), « Droit » (étoile rouge) et « Total » (diamond violet), selon la méthode GUM (voir Section 2.2.8.1). 60

3.1 Schéma 2D du déversoir latéral. Q_{xi} : débit d'entrée ; Q_{xo} : débit conservé ; Q_{zo} : débit déversé. 66
3.2 Le déversoir latéral à crête mince de pelle $p_{lat} = 75\, mm$. 67
3.3 La vanne guillotine à $0.2\, m$ à l'amont de la sortie du canal du débit conservé Q_{xo}. 68
3.4 Plans transversaux yz (lignes pointillées en bleu) de mesure des vitesses instantanées avec la sonde ADV. 69
3.5 Charriot de déplacement de la sonde ADV dans les 3 axes. Les sens de déplacement sont indiqués par les flèches rouges. 70
3.6 La convergence de la variance des vitesses locales $\overline{u_i}$, avec $i = 1, 2, 3$, et le temps de mesure minimal pour la vitesse, les contraintes de Reynolds normales ($\overline{u_i' u_i'}$, avec $i = 1, 2, 3$) et de cisaillement ($\overline{u_i' u_j'}$ avec $i \neq j$ et $i = 1, 2, 3$) pour une erreur relative en valeur absolue $|e_r| \leq 1\%$. 71
3.7 Vue vers l'aval de la distribution spatiale de vitesse longitudinale moyenne $\overline{u}/U_0$ à l'entrée du canal amont (Fig. 3.7a), et à l'amont (3.7b-3.7c) et l'aval (3.7d-3.7e) du déversoir latéral. SD : Sens du déversement. SL : Seuil latéral à $y/H = 0.75$. $H = 0.100\, m$. $B = 0.300\, m$. 72
3.8 Schéma 2D de la géométrie du modèle numérique du déversoir latéral. 84
3.9 Vue en plan des maillages grossier (Fig. 3.9a), medium (Fig. 3.9b) et fin (Fig. 3.9c) au niveau de la section de dérivation du déversoir latéral. 86
3.10 Exemple d'une valeur expérimentale aberrante après inspection visuel des profils verticaux. 90
3.11 Erreur relative de la conservation de la masse E_{CM}/D_E en fonction des modèles de turbulence RNG k-ω et SST k-ω. Les barres verticales correspondent à l'intervalle de confiance à 95%. 90
3.12 Les débits déversés expérimental et numériques. Les données numériques correspondent aux trois résolutions des modèles de turbulence RNG k-ω et SST k-ω. Les barres verticales représentent l'intervalle de confiance à 95%. 92
3.13 Pourcentage de chevauchement des intervalles de confiance à 95% $\left(\psi_{IC}\right)$ entre les données expérimentales et numériques (RNG en bleu et SST en rouge) (i) pour l'ensemble des mesures depuis $x/B \geq -1.00$ (Fig. 3.13a) et (ii) par section de mesure yz dans le domaine $x/B \in [-1.00, 2.00]$ (Fig. 3.13b). 94
3.14 Erreur moyenne quadratique (RMSE) des modèles de turbulence RNG (bleu) et SST (rouge) en fonction des sections transversales yz (Fig. 3.14a-3.14d-3.14g-3.14j), xy (Fig. 3.14b-3.14e-3.14h-3.14k) et zx (Fig. 3.14c-3.14f-3.14i-3.14l) pour les vitesses $\overline{u}/U_0$ (Fig. 3.14a-3.14b-3.14c), $\overline{v}/U_0$ (Fig. 3.14d-3.14e-3.14f) et $\overline{w}/U_0$ (Fig. 3.14g-3.14h-3.14h) et l'énergie cinétique turbulente k/U_0^2 (Fig. 3.14j-3.14k-3.14l). Les barres verticales et horizontales correspondent à l'intervalle de confiance à 95% de l'erreur RMSE. 96
3.15 Profils verticaux de la vitesse longitudinale $\overline{u}/U_0$ selon les coordonnées du Tableau 3.9. Expérimental - Noir, RNG k-ϵ - Bleu, SST k-ω - Rouge 99
3.16 Profils verticaux de la vitesse verticale $\overline{v}/U_0$ selon les coordonnées du Tableau 3.9. Expérimental - Noir, RNG k-ϵ - Bleu, SST k-ω - Rouge. 100

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2020LYSEI083/these.pdf
© [A. Claro Barreto], [2020], INSA Lyon, tous droits réservés

3.17 Profils verticaux de la vitesse horizontale $\overline{w}/U_0$ selon les coordonnées du Tableau 3.9. Expérimental - Noir, RNG k-ϵ - Bleu, SST k-ω - Rouge. 101
3.18 Profils verticaux de l'énergie cinétique turbulente k/U_0^2 selon les coordonnées du Tableau 3.9. Expérimental - Noir, RNG k-ϵ - Bleu, SST k-ω - Rouge. 102
3.19 Courants secondaires expérimentaux (EXP) et numériques (RNG et SST) au niveau de la section transversale yz à $x/B = 0.0$. La surface bleue autour de chaque vecteur correspond à l'intervalle de confiance à 95% du vecteur $\overrightarrow{wv} = \langle \overline{w}, \overline{v} \rangle$. 104
3.20 Courants secondaires expérimentaux (EXP) et numériques (RNG et SST) au niveau de la section transversale yz à $x/B = 0.25$. La surface bleue autour de chaque vecteur correspond à l'intervalle de confiance à 95% du vecteur $\overrightarrow{wv} = \langle \overline{w}, \overline{v} \rangle$. 105
3.21 Courants secondaires expérimentaux (EXP) et numériques (RNG et SST) au niveau de la section transversale yz à $x/B = 1.00$. La surface bleue autour de chaque vecteur correspond à l'intervalle de confiance à 95% du vecteur $\overrightarrow{wv} = \langle \overline{w}, \overline{v} \rangle$. 106
3.22 Vue vers l'aval de la distribution spatiale de vitesse longitudinale moyenne $\overline{u}/U_0$ expérimentale et numérique (RNG k-ϵ et SST k-ω) à l'entrée du canal amont (Fig. 3.22a-3.22b-3.22c) et à l'amont (3.22d-3.22e-3.22f) du déversoir latéral. SD : Sens du déversement. SL : Seuil latéral à $y/H = 0.75$. $H = 0.100\ m$. $B = 0.300\ m$. 107
3.23 La trajectoire des particules d'eau en 3D (Fig. 3.23a), le lieu de passage des particules d'eau à l'entrée du canal (Fig.3.23b) et la probabilité de déversement en 2D (Fig. C.1c). Modèle de turbulence RNG k-ϵ et résolution N°3. 109

4.1 Schéma 3D du fonctionnement hydraulique du déversoir d'orage « Gambetta » en temps de pluie, d'après Chapitre 2 - Section 2.2.2.3. 113
4.2 Schéma 2D du DO « Gambetta » 114
4.3 Décomposition volumétrique de la géométrie du DO « Gambetta » 115
4.4 Les résolutions N°1 (4.4a), N°2 (4.4b) et N°3 (4.4c) du maillage hexaèdre « non-conformal » au niveau de la chambre du DO « Gambetta ». 116
4.5 Exemple d'une loi de déversement d'un déversoir d'orage en temps de pluie. 120
4.6 Schéma 3D de la localisation de la sonde de turbidité à l'aval du DO « Gambetta ». 121
4.7 L'erreur relative de la conservation globale de la masse des trois résolutions du modèle hydraulique du DO « Gambetta ». 122
4.8 La contribution de chaque condition limite à l'écart-type de l'erreur sur la conservation de la masse (σ_{CM}) en fonction du débit d'entrée dans le DO « Gambetta » et du maillage utilisé. 124
4.9 La contribution de la condition de sortie « Conservé » sur l'écart-type de l'erreur sur la conservation de la masse (σ_{CM}) en fonction du débit d'entrée dans le DO « Gambetta ». . 125
4.10 Profil de profondeur (en bleu) au niveau de la sortie « Conservé » pour les débits d'entrée 3000, 5000 et 7000 $[m^3/h]$ et les trois résolutions N°1, N°2 et N°3. 126
4.11 L'écart-type relatif du débit déversé ($\sigma_{\mathrm{RD}} = \sigma_{\mathrm{D}}/D_{\mathrm{E}}$) en fonction du débit d'entrée dans le DO « Gambetta ». 127
4.12 Le débit déversé relatif des sorties « Gauche » (4.12a), « Droit » (4.12b) et « Total » (4.12c) pour les résolutions N°1 (ϕ_3), N°2 (ϕ_2) et N°3 (ϕ_1) et les valeurs extrapolées ϕ_{ext}^{32} et ϕ_{ext}^{21} (selon la procédure GCI - Section 4.2.4.2) en fonction du débit d'entrée D_{E} dans le DO « Gambetta ». Les barres d'erreur correspondent à l'intervalle de confiance à 95%. A noter que les résultats pour chaque D_{E} ne sont pas superposés pour des raisons de lisibilité. . 130
4.13 Débits déversés « Total » (4.13a) , « Gauche » (4.13b) et « Droit » (4.13c) en fonction des débits d'entrée au niveau du DO « Gambetta ». Les barres d'erreur correspondent à l'intervalle de confiance à 95% du débit expérimental moyen. 133
4.14 Hauteur d'eau expérimentale (cercle bleu) et numérique (étoile rouge) dans la chambre du DO « Gambetta » en fonction du débit d'entrée D_{E}. Les barres d'erreur des données expérimentales (en bleu) et numériques (en rouge) correspondent à l'intervalle de confiance à 95% sur la hauteur d'eau H_{chambre}. 134

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2020LYSEI083/these.pdf
© [A. Claro Barreto], [2020], INSA Lyon, tous droits réservés

4.15 Loi du déversement $D = f\left(H_{\text{Amont}}\right)$ des débits déversés « Gauche » D_{G} et « Droit » D_{D} en fonction de la hauteur d'eau de la conduite amont du « Gambetta » H_{Amont} après application de la procédure GCI (voir Section 4.2.4.2). Les lignes discontinues représentent l'intervalle de confiance à 95% selon la procédure GUM (voir Section 4.2.5.1). 135
4.16 Incertitude élargie relative $U(D)/D$ (avec $U(D) = 2{*}u_c(D)$) des débits déversés « Gauche » D_{G} et « Droit » D_{D} en fonction de la hauteur d'eau de la conduite amont du « Gambetta » H_{Amont} après application de la procédure GCI (voir Section 4.2.5.1). 136
4.17 La distribution spatiale au niveau de la section d'entrée réelle des lignes de courant qui sortent par les conditions limites « Gauche » (violet), « Droit » (orange) et « Conservé » (bleu) en fonction des débits d'entrée $3000\,m^3/h$ (Fig. 4.17a-4.17d-4.17g), $5000\,m^3/h$ (Fig. 4.17b-4.17e-4.17h) et $7000\,m^3/h$ (Fig. 4.17c-4.17f-4.17i) pour les trois résolutions N°1, N°2 et N°3. L'écoulement s'éloigne de l'observateur (vue vers l'aval). 137
4.18 Le contour de vitesse moyenne (Fig. 4.18a-4.18c-4.18e) à l'entrée réelle et la surface libre (Fig. 4.18b-4.18d-4.18f) au niveau de la conduite « fictive » du DO « Gambetta » pour le débit d'entrée $D_{\text{E}} = 3000\,m^3/h$ et les résolutions N°1 (Fig. 4.18a-4.18b), N°2 (Fig. 4.18c-4.18d) et N°3 (Fig. 4.18e-4.18f). 139
4.19 La distribution spatiale des lignes de courant observées par la sonde de turbidité localisée à côté de la vanne guillotine du DO « Gambetta ». 142

5.1 Schéma 3D du canal bi-périodique avec conditions de périodicité dans les sens principal (l'axe X) et transversal (l'axe Y). La mi-hauteur du canal $H = 1\,m$, d'après Haussmann et al. (2019). 147
5.2 L'arrangement à 3 dimensions spatiales avec 19 vecteurs de vitesse discrète, d'après Viggen (2014). Les vecteurs en noir correspondent aux nœuds les plus proches du nœud central 148
5.3 Principe de collision et convection de la méthode Boltzmann sur réseaux. Les distributions de particules f_i (en noir) font collision au sein du nœud (à gauche) et ensuite elles sont diffusées vers les nœuds voisins (à droit). Adapté de Viggen (2014). 149

6.1 Distribution granulométrique des particules en verre expansé sèches et hydratées pendant 24 heures. L'échantillon mesuré correspond aux particules de diamètre nominal $100\,\mu m \leq d_p \leq 300\,\mu m$ de la société Poraver®. Les lignes en pointillées correspondent aux percentiles à 5% et 95% des mesures expérimentales. 161
6.2 Schéma hydraulique du déversoir latéral en régime fluvial. 162
6.3 Le mélange des particules en verre expansé avant injection. 162
6.4 Le système de fixation du tuyau d'injection et le panache des particules lors d'un essai expérimental. 163
6.5 Les 9 positions d'injections des particules de verre expansé à l'amont du déversoir latéral, dans un plan perpendiculaire à l'écoulement amont.. L'écoulement s'approche de l'observateur. 163
6.6 Le chariot de déplacement vertical (y) et horizontal (z) du tuyau d'injection de particules inertes. 164
6.7 Le manchon sur mesure utilisé pour piéger les particules de verre expansé du déversoir latéral. 164
6.8 Exemple de tamis en polyester de taille réduite (même maille de $33\,\mu m$) pour mesure de la masse déversée par l'un des canaux du déversoir latéral. 165
6.9 Le nombre de Shields (Θ) en fonction du nombre de Reynolds de la particule (Re_ω) pour les particules utilisées (cercles rouges) et celles rencontrées en réseaux unitaire en temps de pluie (étoiles noires). La ligne pointillée en bleue correspond au seuil de mise en mouvement (J. Guo 2002). Les lignes rouges correspondent aux seuils de suspension de la littérature (Bagnold 1966 ; Cheng et Chiew 1999 ; Garcia 1999 ; van Rijn 1984, 1993). 166
6.10 Les plans numériques d'observation de particules du déversoir latéral. 169

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2020LYSEI083/these.pdf
© [A. Claro Barreto], [2020], INSA Lyon, tous droits réservés

6.11 Pourcentage de déversement massique expérimental du déversoir latéral. L'écoulement s'éloigne de l'observateur. 171
6.12 Probabilité de déversement numérique de l'eau pour le déversoir latéral, avec l'échelle constante du temps $C_L = 0.15$. 172
6.13 La masse déversée en fonction du point d'injection. Les résultats numériques pour les trois maillages et expérimentaux. Les barres d'erreur correspondent à l'intervalle à 95% (i.e. 2σ). 174
6.14 Les trajectoire des particules en verre expansé avec $\rho_p = 2010\,^{Kg}/_{m^3}$ et $d_p = 400\,\mu m$ pour le point d'injection «1». 174
6.15 L'erreur relative $(y_{\text{Sim}} - y_{\text{Exp}})/y_{\text{Exp}}$ de la masse déversée (Fig. 6.15a) et de la masse conservé (Fig. 6.15b) en fonction de la constante C_L pour tous les 9 points d'injection. 175

7.1 Schéma 3D des équipements installés au déversoir d'orage «Gambetta» pour suivre le flux de pollution en temps de pluie. Le sens de l'écoulement est indiqué par les flèches en mauve pour l'entrée, en violet foncée pour le déversement et en orange pour le débit conservé. 182
7.2 Schéma du système de fixation d'une sonde de turbidité (DN40) au centre de la conduite d'entrée du déversoir d'orage «Gambetta». Les diamètres externes de la sonde de turbidité, du tuyaux PVC, du tuyau d'aspiration souple sont respectivement 40, 70, 15.9 mm. A noter que les dessins ne sont pas à l'échelle. 183
7.3 État des conduites de déversement «Gauche» (Fig. 7.3a) et «Droit» (Fig. 7.3b) en temps sec. 184
7.4 Exemple des macro déchets accrochés au système de support de la sonde de turbidité et de prélèvement pour la section de mesure «Amont». 187
7.5 Les matières en suspension (MES) en fonction de la turbidité pour les trois sections de mesure. 188
7.6 Demande biologique en oxygène sur 5 jours (DBO_5) avec la méthode normée NF EN 1899-1 (en abscisses) versus celle obtenue avec la méthode Enverdi® DBO Code Sandre [991] (en ordonnées). Les barres horizontales et verticales représentent l'intervalle de confiance à 95%. La ligne pointillée en noir représente la fonction $y = x$ et les lignes en pointillées rouges représentent l'incertitude relative à $\pm 20\%$. 189
7.7 Instant temporel de l'échantillonnage dans au moins l'un des points de mesure (i.e. Amont, Droit et Gauche) pour chaque événement pluvieux. Le temps relatif correspond au rapport entre le temps et la durée de l'événement pluvieux. 203
7.8 Le rapport des concentrations instantanées de la conduite «Gauche» sur la conduite «Droit» $C_{\text{Gauche}}/C_{\text{Droit}}$ en fonction des paramètres physico-chimiques pour l'événement pluvieux du 07/03/2019. Les barres verticales représentent l'intervalle de confiance à 95%. Les lignes pointillées horizontales rouges correspondent à l'incertitude expérimentale de $\pm 20\%$. 204
7.9 Le rapports DBO_5/MES (Fig. 7.9a), DCO/MES (Fig. 7.9a), et DCO/DBO_5 (Fig. 7.9a) pour les concentrations instantanées (DO «Gambetta»), sur 24 heures (STEP Valence) et moyennes événementielles (Espagne - Suarez et Puertas 2005; et Marais-Paris Gromaire et al. 2001). 205
7.10 Matières volatiles en suspension (MVS) en fonction des matières en suspension (MES) pour les deux conduites de décharge du déversoir d'orage «Gambetta». 206

A.1 La localisation du déversoir d'orage «Gambetta» (étoile noire) dans le système de collecte de la ville de Valence. Les lignes rouges représentent les principaux collecteurs du système de collecte et le symbole en bleu correspond au pluviomètre «Belle Meunière». 223
A.2 Vue en 3D de la localisation du DO «Gambetta». Les débits d'entrée, déversé et conservé correspondent aux flèches bleue, rouge et jaune, respectivement. 224

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2020LYSEI083/these.pdf
© [A. Claro Barreto], [2020], INSA Lyon, tous droits réservés

A.3 Schémas 3D du déversoir d'orage Gambetta d'après le relevé topographique 3D. Chapitre 2 - Section 2.2.2 . . . 224
A.4 Schéma 3D du fonctionnement hydraulique du déversoir d'orage «Gambetta» en temps sec (A.4a) et temps de pluie (A.4b). Chapitre 2 - Section 2.2.2.3. . . . 225
A.5 Loi du déversement numérique $D = f(H_{\text{Amont}})$ des débits déversés «Gauche» D_{G} et «Droit» D_{D} en fonction de la hauteur d'eau de la conduite amont du «Gambetta» H_{Amont}. Les lignes discontinues représentent l'intervalle de confiance à 95% selon la procédure GUM (voir Section 4.2.5.1). . . . 226
A.6 Incertitude élargie relative $U(D)/D$ (avec $U(D) = 2{*}u_c(D)$) des débits déversés «Gauche» D_{G} et «Droit» D_{D} en fonction de la hauteur d'eau de la conduite amont du «Gambetta» H_{Amont} après application de la procédure GCI (voir Section 4.2.5.1). . . . 226
A.7 L'incertitude élargie relative $U(D_{\text{exp}})/D_{\text{exp}}$ des débits déversés expérimentaux «Gauche» (cercle bleu), «Droit» (étoile rouge) et «Total» (diamond violet), selon la méthode GUM (voir Section 2.2.8.1). . . . 228
A.8 Schéma 3D de l'emplacement de la sonde de hauteur d'eau dans la chambre du déversoir d'orage «Gambetta». Chapitre 2 - Section 4.2.1.2. . . . 229
A.9 La hauteur d'eau dans la chambre du DO (H_{chambre}) en fonction de la hauteur d'eau dans la conduite amont du DO (H_{Amont}) en temps de pluie. Chapitre 2 - Section 4.2.1.2. . . . 229
A.10 L'incertitude élargie relative $\left(U_{95\%}(X)/X\right)$ du débit d'entrée $D_{\text{Amont}} \equiv D_{\text{E}}$ en fonction de la hauteur d'eau au niveau de la section de contrôle H_{Amont}. . . . 230
A.11 L'incertitude élargie relative $\left(U_{95\%}(X)/X\right)$ du débit d'entrée $D_{\text{Amont}} \equiv D_{\text{E}}$ en fonction de la hauteur d'eau au niveau de la section de contrôle H_{Amont}. . . . 231
A.12 L'incertitude élargie relative $\left(U_{95\%}(X)/X\right)$ du débit d'entrée $D_{\text{Amont}} \equiv D_{\text{E}}$ en fonction de la hauteur d'eau au niveau de la section de contrôle H_{Amont}. . . . 231
A.13 La surface libre (Figs. A.13a-A.13b) et la vitesse au niveau de la surface libre (Fig. A.13c) pour un débit d'entrée $D_{\text{E}} = 2000\ m^3/h$. . . . 232
A.14 La surface libre (Figs. A.14a-A.14b) et la vitesse au niveau de la surface libre (Fig. A.14c) pour un débit d'entrée $D_{\text{E}} = 3000\ m^3/h$. . . . 233
A.15 La surface libre (Figs. A.15a-A.15b) et la vitesse au niveau de la surface libre (Fig. A.15c) pour un débit d'entrée $D_{\text{E}} = 4000\ m^3/h$. . . . 234
A.16 La surface libre (Figs. A.16a-A.16b) et la vitesse au niveau de la surface libre (Fig. A.16c) pour un débit d'entrée $D_{\text{E}} = 4500\ m^3/h$. . . . 235
A.17 La surface libre (Figs. A.17a-A.17b) et la vitesse au niveau de la surface libre (Fig. A.17c) pour un débit d'entrée $D_{\text{E}} = 5000\ m^3/h$. . . . 236
A.18 La surface libre (Figs. A.18a-A.18b) et la vitesse au niveau de la surface libre (Fig. A.18c) pour un débit d'entrée $D_{\text{E}} = 6000\ m^3/h$. . . . 237
A.19 La surface libre (Figs. A.19a-A.19b) et la vitesse au niveau de la surface libre (Fig. A.19c) pour un débit d'entrée $D_{\text{E}} = 7000\ m^3/h$. . . . 238

B.1 Les plans 2D de mesure des vitesses instantanées à l'aide du capteur ADV. . . . 239

C.1 Probabilité de déversement de l'écoulement pour le modèle de turbulence RNG k-ϵ pour les résolutions grossière (Fig. C.1a), moyenne (Fig. C.1b) et fin (Fig. C.1c). . . . 255
C.2 La probabilité de déversement des lignes de courants pour le modèle de turbulence SST k-ω pour les résolutions grossières (Fig. C.2a), moyenne (Fig. C.2b) et fin (Fig. C.2c). . . . 256

D.1 Schéma 3D de la géométrie de la conduite à l'amont du déversoir d'orage «Gambetta». . . 258
D.2 Les trois résolution spatiales au niveau de la section transversale du modèle à l'amont du déversoir d'orage «Gambetta» . . . 258
D.3 L'erreur relative (E_X/X) de la conservation de la masse (E_{D}) en fonction du débit à l'amont du DO «Gambetta». . . . 262

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2020LYSEI083/these.pdf
© [A. Claro Barreto], [2020], INSA Lyon, tous droits réservés

D.4 L'écart-type relatif (σ_X/X) de la conservation de la masse (E_D) en fonction du débit à l'amont du DO « Gambetta » D_E. 262
D.5 Le débit d'entrée relatif (D_E/D_N) en fonction du débit d'entrée nominale D_N à l'amont du déversoir d'orage « Gambetta ». 263
D.6 Le coefficient de variation à l'intervalle de confiance au 95% $\left(CV_{95\%} = k * u_c(X)/X \text{ avec } k = 2\right)$ du débit à l'amont du DO « Gambetta » (D_{Amont}) en fonction de la hauteur d'eau au niveau de la section de contrôle (H_{Amont}). 264
D.7 Le débit à l'amont du déversoir d'orage « Gambetta » (D_E) en fonction de la hauteur d'eau au niveau de la section de contrôle (H_{Amont}). 265
D.8 L'incertitude élargie relative $\left(U_{95\%}(X)/X\right)$ du débit d'entrée $D_{Amont} \equiv D_E$ en fonction de la hauteur d'eau au niveau de la section de contrôle H_{Amont}. 266

E.1 Le débit déversé relatif D_i/D_E dans les conduites de décharge « Droit » D_D et « Gauche » D_G en fonction du débit d'entrée D_E dans le DO « Gambetta ». 268

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2020LYSEI083/these.pdf
© [A. Claro Barreto], [2020], INSA Lyon, tous droits réservés

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2020LYSEI083/these.pdf
© [A. Claro Barreto], [2020], INSA Lyon, tous droits réservés

Liste des tableaux

1.1 Critères de conformité réglementaire du système de collecte en temps de pluie, d'après le Commentaire Technique de l'Arrêté du 21 juillet 2015. 26

2.1 Pourcentage du volume annuel déversé par les 3 principaux déversoirs d'orage du système de collecte de la ville de Valence entre l'année 2013 et 2018, d'après les bilans annuels (Valence Romans Agglo 2013b, 2014, 2015, 2016, 2017, 2018). 36

2.2 Précision des capteurs installés dans le déversoir d'orage « Gambetta ». ⋇ : la précision donnée par le constructeur ; US : ultrason ; DP : Doppler. 41

2.3 La plage de mesure des sondes ultrasons pour la hauteur d'eau selon le point de mesure. 41

2.4 Pourcentage théorique des données retenues pour les points de mesure « Amont », « Gauche » et « Droit » en fonction du temps de déversement pour une fréquence de déversement moyenne hebdomadaire. 42

2.5 Le nombre et la durée médiane des déversements par année pour les points de mesure « Amont », « Gauche » et « Droit ». Les valeurs en parenthèses correspondent aux valeurs minimale et maximale. L'année 2011 n'est pas prise en compte dû à un problème d'acquisition de données. 52

3.1 Nombre de points de mesure de vitesse 3D à l'aide de l'ADV et les valeurs aberrantes (outliers) par section de mesure (Fig. 3.4). 69

3.2 Coefficient de variation élargi $2\left|\sigma/\mu\right|$ (médiane) des champs de vitesses $\overline{u}$, $\overline{v}$ et $\overline{w}$, et de l'énergie cinétique turbulente k pour l'ensemble des résultats expérimentaux. Les valeurs entre crochets correspondent aux percentiles à 5% et 95%. 70

3.3 Conditions limites du modèle numérique 3D du déversoir latéral. 81

3.4 Méthodes de solution, schémas de discrétisation spatiale et facteurs de relaxation utilisés pour les différentes grandeurs macroscopiques. 84

3.5 Caractéristiques des maillages grossier, médium et fin employés pour le déversoir latéral expérimental. 85

3.6 Pourcentage total de points avec une probabilité finale de non oscillation $P_{\text{NOF}} = 0$ en fonction des champs de vitesses et de l'énergie cinétique turbulente pour les modèles de turbulence RNG k-ω et SST k-ω. 91

3.7 Hauteur d'eau h_0 (en m) au début du déversement ($x/B = 0$). La hauteur « EXP » est obtenue selon la Section 3.2.2.2. L'intervalle de confiance à 95% est indiqué entre crochets. $B = 0.300\,m$. 92

3.8 Coefficient de variation élargi $2\left|\sigma/\mu\right|$ (médiane) des champs de vitesses $\overline{u}$, $\overline{v}$ et $\overline{w}$, et de l'énergie cinétique turbulente k pour l'ensemble des résultats expérimentaux et numériques (i.e. les modèles de turbulence RNG k-ω et SST k-ω). Les valeurs entre crochets correspondent aux percentiles à 5% et 95% de $2\left|\sigma/\mu\right|$. 93

3.9 Coordonnées horizontale (z/B) et longitudinale (x/B) des profils verticaux du Tableau 3.10 et les Figs. 3.15-3.16-3.17-3.18. 97

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2020LYSEI083/these.pdf
© [A. Claro Barreto], [2020], INSA Lyon, tous droits réservés

3.10 Erreur moyenne quadratique (RMSE) non dimensionnelle des modèles de turbulence RNG (en bleu) et SST (en rouge et en italique) pour chaque profil vertical des vitesses $\overline{u}/U_0$, $\overline{v}/U_0$ et $\overline{w}/U_0$ et de l'énergie cinétique turbulente k/U_0^2 selon les coordonnées du Tableau 3.9. $U_0 = 0.353\ m/s$ - $B = 0.300\ m$. 98

4.1 Caractéristiques des maillages élaborés pour le DO « Gambetta ». Toutes les mailles sont des hexaèdres. 114
4.2 Méthodes de solution et les schémas de discrétisation spatiale pour les différentes grandeurs macroscopiques. 115
4.3 Conditions limites du modèle numérique 3D du déversoir latéral. h_{EV} est la hauteur d'eau normale de la section d'entrée virtuelle ($K_s = 70.99\ m^{1/3}/s$ - Annexe D). $h_{Fr<1}$ est la hauteur d'eau de l'écoulement en régime fluvial ($Fr < 1$) à l'aval de la condition d'entrée. $R_h(h_{\text{EV}})$ est le rayon hydraulique du canal ovoïde d'entrée (Eq. 2.6 - Chapitre 2) 118
4.4 Le débit d'entrée $D_{\text{E}}\left(m^3/h\right)$ minimum et maximum du déversoir d'orage « Gambetta ». 118
4.5 Les critères de convergence sur le bilan de masse de la simulation numérique 3D. 119
4.6 L'erreur relative liée au maillage (i.e. GCI) et les valeurs extrapolées $\left(\phi_{\text{ext}}\right)$ en fonction du débit d'entrée $\left(\overline{D_{\text{E}}}\right)$ et des résolutions N°2 et N°3 (i.e. maillages intermédiaire et fin, respectivement) pour le débit déversé « Gauche » (D_{Gauche}). L'écart-type correspond aux valeurs en parenthèse. 128
4.7 L'erreur relative liée au maillage (i.e. GCI) et les valeurs extrapolées $\left(\phi_{\text{ext}}\right)$ en fonction du débit d'entrée $\left(\overline{D_{\text{E}}}\right)$ et des résolutions N°2 et N°3 (i.e. maillages intermédiaire et fin, respectivement) pour le débit déversé « Droit » (D_{Droit}). L'écart-type correspond aux valeurs en parenthèse. Les résultats aberrants sont indiqués en couleur rouge $\left(\overline{D_{\text{E}}} = 6000\ m^3/h\right)$. 128
4.8 L'erreur relative liée au maillage (i.e. GCI) et les valeurs extrapolées $\left(\phi_{\text{ext}}\right)$ en fonction du débit d'entrée $\left(\overline{D_{\text{E}}}\right)$ et des résolutions N°2 et N°3 (i.e. maillages intermédiaire et fin, respectivement) pour le débit déversé « Total » (D_{Total}). L'écart-type correspond aux valeurs en parenthèse. 129
4.9 Le débit d'entrée D_{E} moyen avec son écart-type et le débit déversée « Gauche » D_{G} moyen avec son écart-type au sein du DO « Gambetta ». 131
4.10 Le débit d'entrée D_{E} moyen avec son écart-type et le débit déversée « Droit » D_{D} moyen avec son écart-type au sein du DO « Gambetta ». 131
4.11 Le débit d'entrée D_{E} moyen avec son écart-type et le débit déversée « Total » D_{T} moyen avec son écart-type au sein du DO « Gambetta ». 132
4.12 Temps de séjour (en secondes) le long des lignes de courant (i.e. l'écoulement) sortant par la condition limite « Conservé ». L'écart-type est donné entre parenthèses et les valeurs minimale et maximale sont indiqués respectivement entre crochets. 140
4.13 Temps de séjour (en secondes) le long des lignes de courant (i.e. l'écoulement) sortant par la condition limite « Gauche ». L'écart-type est donné entre parenthèses et les valeurs minimale et maximale sont indiqués respectivement entre crochets. 141
4.14 Temps de séjour des lignes de courant (i.e. l'écoulement) sortant par la condition limite « Droit ». L'écart-type est donné entre parenthèses et les valeurs minimale et maximale sont indiqués respectivement entre crochets. 141
4.15 Le pourcentage (%) de lignes de courant qui restent dans le domaine de calcul sans sortir par aucune des conditions limites. 141

6.1 Les dérivées partielles et les écarts-type du calcul de la masse volumique des particules par pycnomètre à eau. 159
6.2 Dérivées partielles et écarts-type du calcul de la masse volumique de l'eau par pycnomètre à bouchon capillaire. 160

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2020LYSEI083/these.pdf
© [A. Claro Barreto], [2020], INSA Lyon, tous droits réservés

6.3 Les 6 mesures indépendantes de la masse volumique des particules en verre expansé, la moyenne ($\overline{\rho}_s$ - Eq. 6.5) et l'écart-type ($u(\overline{\rho}_s)$ - Eq. 6.6). 160
6.4 Diamètres nominaux (DN) inférieurs ou égaux à 10%, 50% et 90% du volume des distributions granulométriques des particules en verre expansé sèches et hydratées 24 heures. 161
6.5 Positions d'injections des particules de verre expansé à l'amont du déversoir latéral selon les coordonnées adimensionnelles y/H et z/B. La largeur du canal rectangulaire $B = 0.300\ m$. La hauteur d'eau moyenne $H = 0.100\ m$. 170
6.6 Diamètres nominaux médianes DN 10, DN 50 et DN 90 des particules piégées dans les canaux du débit conservé et du débit déversé, ainsi que celles demeurées dans le bac de mélange à l'amont en fonction du point d'injection (Tableau 6.5). 170
6.7 Pourcentage (%) de masse déversée expérimentale pour les différents points d'injection selon les coordonnées adimensionnelles y/H et z/B. La largeur du canal rectangulaire $B = 0.300\ m$. La hauteur d'eau moyenne $H = 0.100\ m$. 171

7.1 Caractéristiques des préleveurs automatiques installés dans le déversoir d'orage « Gambetta ». 182
7.2 L'ensemble des analyses physico-chimiques pour caractériser la pollution déversée par le déversoir d'orage « Gambetta ». 186
7.3 Caractéristiques de l'ensemble des événements pluvieux qui ont produit un déversement entre l'année 2013 et 2018 (« Tous ») et ceux mesurés. *Section de mesure* : La section de mesure « Aval » est condamnée (symbole ×) après la première campagne de mesure afin d'équiper la section de mesure « Amont ». 186
7.4 Spécifications analytiques de la méthode Enverdi® DBO. 188
7.5 La charge en DBO_5 collectée à l'entrée de la STEP ($V_{A3} \times \overline{C}_{A3}$), le volume total déversé du système de collecte (V_{A1}) et la concentration moyenne événementielle maximale CME_{max} du déversement selon l'Eq. 7.5 pour les années 2014 à 2018, d'après Valence Romans Agglo (2018). 191
7.6 La concentration moyenne événementiel en DBO_5 des flux de pollution déversés par le déversoir d'orage (DO) « Gambetta » dans l'année 2018. 192
7.7 La concentration en DBO_5 du bilan 24 heures des flux de pollution à l'entrée de la STEP pour les 3 déversements mesurés au niveau du DO « Gambetta » dans l'année 2018. . . . 193
7.8 Volumes et flux de pollution déversés dans l'année 2018 par les déversoirs d'orage (DO) qui collectent en amont une charge supérieure à 600 Kg de DBO_5 par jour, d'après Valence Romans Agglo (2018). 196
7.9 Le volume, la concentration moyenne et la masse en DBO_5 des flux de pollution déversés par le déversoir d'orage (DO) « Gambetta » dans l'année 2018. La masse est calculée selon les hypothèses « **STEP** », « **CMS** » et « **Rapport** ». L'incertitude relative élargie ($2\sigma/\mu$) est indiquée entre parenthèses. 201
7.10 Le volume et la masse en DBO_5 des flux de pollution déversés et collectés par le système de collecte de la ville de Valence dans l'année 2018 en fonction des hypothèses « **STEP** », « **CMS** » et « **Rapport** ». L'incertitude relative élargie ($2\sigma/\mu$) est indiquée entre parenthèses et l'intervalle de confiance à 95% ($\mu \pm 2\sigma$) est indiqué entre crochets. 201
7.11 La demande biochimique en oxygène sur 5 jours (DBO_5) moyenne (i) sur 24 heures à l'entrée de la station d'épuration (STEP) de Valence et (ii) événementielle (Eq. 7.6) dans les conduites de déversement « Gauche » et « Droit » en fonction de l'événement pluvieux. . 202
7.12 Coefficient directeur a et de détermination R^2 de la relation empirique MVS $= a$ MES en fonction de la section de mesure. $u(a)$ est l'incertitude du coefficient a. 206
7.13 Coefficients directeur a et de détermination R^2 de la relation empirique $DBO_5 = a$ MES en fonction de la section de mesure. $u(a)$ est l'incertitude du coefficient a. 207
7.14 Coefficients directeur a et de détermination R^2 de la relation empirique $DBO_5 = a$ MES de l'événement pluvieux du 07/03/2019 en fonction de la section de mesure et de la méthode de mesure de la DBO_5. $u(a)$ est l'incertitude du coefficient a. 208

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2020LYSEI083/these.pdf
© [A. Claro Barreto], [2020], INSA Lyon, tous droits réservés

7.15 Relations empiriques entre les matières en suspension (MES), la demande biochimique en oxygène sur 5 jours (DBO_5) et la demande chimique en oxygène (DCO) par bassin versant selon les concentrations moyennes événementielles mesurées par Suarez et Puertas (2005). 208

A.1 Les caractéristiques du déversoir d'orage « Gambetta ». 224
A.2 Précision des capteurs installés dans le déversoir d'orage « Gambetta ». ⋇ : la précision donnée par le constructeur ; US : ultrasone ; DP : Doppler. Chapitre 2 - Section 2.2.3 . . . 225
A.3 Les lois de déversement des conduite de décharge « Gauche » et « Droit ». 227

B.1 Les vitesses et contraintes de Reynolds locales au niveau de la section transversale $x/B = -6.363$. 240
B.2 Les vitesses et contraintes de Reynolds locales au niveau de la section transversale $x/B = -6.363$. (Continuation) 241
B.3 Les vitesses et contraintes de Reynolds locales au niveau de la section transversale $x/B = -1.00$. 242
B.4 Les vitesses et contraintes de Reynolds locales au niveau de la section transversale $x/B = -1.00$. (Continuation) 243
B.5 Les vitesses et contraintes de Reynolds locales au niveau de la section transversale $x/B = 0.00$. 244
B.6 Les vitesses et contraintes de Reynolds locales au niveau de la section transversale $x/B = 0.00$. (Continuation) 245
B.7 Les vitesses et contraintes de Reynolds locales au niveau de la section transversale $x/B = 0.00$. (Continuation) 246
B.8 Les vitesses et contraintes de Reynolds locales au niveau de la section transversale $x/B = 0.25$. 247
B.9 Les vitesses et contraintes de Reynolds locales au niveau de la section transversale $x/B = 1.00$. 248
B.10 Les vitesses et contraintes de Reynolds locales au niveau de la section transversale $x/B = 1.00$. (Continuation) 249
B.11 Les vitesses et contraintes de Reynolds locales au niveau de la section transversale $x/B = 1.00$. (Continuation) 250
B.12 Les vitesses et contraintes de Reynolds locales au niveau de la section transversale $x/B = 2.00$. 251
B.13 Les vitesses et contraintes de Reynolds locales au niveau de la section transversale $x/B = 2.00$. (Continuation) 252
B.14 Les vitesses et contraintes de Reynolds locales au niveau de la section transversale $x/B = 2.00$. (Continuation) 253

D.1 Nombre d'éléments héxaèdres selon la résolution pour le modèle numérique de l'amont du DO « Gambetta ». 259
D.2 Les schémas de discrétisation spatiaux et du couplage Vitesse-Pression. 259
D.3 Les critères de convergence sur le bilan de masse du modèle numérique 3D de la conduite amont du déversoir d'orage « Gambetta ». 260
D.4 Le GCI et la solution extrapolée $\phi_{\text{ext}^{ij}}$ moyens et ses écart-types pour les maillages intermédiaire (Résolution N°2 - GCI_{32} et ϕ^{32}_{ext}) et fin (Résolution N°3 - GCI_{21} et ϕ^{21}_{ext}) en fonction du débit à l'amont du déversoir d'orage « Gambetta ». 263
D.5 La hauteur d'eau moyenne avec son écart-type et le débit d'entrée moyen ($\overline{\phi^{21}_{\text{ext}}}$ si Type σ est « GCI » sinon $\overline{\phi_2}$) avec son écart-type au niveau de la section de contrôle à l'amont du DO « Gambetta ». Les valeurs en rouge correspondent à des résultats numériques incorrectes. 264

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2020LYSEI083/these.pdf
© [A. Claro Barreto], [2020], INSA Lyon, tous droits réservés

E.1 La probabilité de non-oscillation P_{NO} en (%) selon la procédure GCI en fonction du débit d'entrée et du débit déversé. 267
E.2 La probabilité de non-oscillation relative $\hat{P}_{\text{NO}}$ en (%) selon la procédure GCI en fonction du débit d'entrée et du débit déversé. 267

F.1 Moyen et écart-type (entre parenthèses) des différents paramètres physico-chimiques des échantillons collectés à l'amont et à l'aval du déversoir d'orage « Gambetta ». Événement pluvieux du 2018/10/29. 270
F.2 Moyen et écart-type (entre parenthèses) des différents paramètres physico-chimiques des échantillons collectés dans les conduites de décharge « Gauche » et « Droite » du déversoir d'orage « Gambetta ». Événement pluvieux du 2018/10/29. 271
F.3 Moyen et écart-type (entre parenthèses) des différents paramètres physico-chimiques des échantillons collectés à l'amont et à l'aval du déversoir d'orage « Gambetta ». Événement pluvieux du 2018/11/06. 272
F.4 Moyen et écart-type (entre parenthèses) des différents paramètres physico-chimiques des échantillons collectés dans les conduites de décharge « Gauche » et « Droite » du déversoir d'orage « Gambetta ». Événement pluvieux du 2018/11/06. 272
F.5 Moyen et écart-type (entre parenthèses) des différents paramètres physico-chimiques des échantillons collectés à l'amont et à l'aval du déversoir d'orage « Gambetta ». Événement pluvieux du 2018/12/19. 272
F.6 Moyen et écart-type (entre parenthèses) des différents paramètres physico-chimiques des échantillons collectés dans les conduites de décharge « Gauche » et « Droite » du déversoir d'orage « Gambetta ». Événement pluvieux du 2018/12/19. 273
F.7 Moyen et écart-type (entre parenthèses) des différents paramètres physico-chimiques des échantillons collectés dans les conduites de décharge « Gauche » et « Droite » du déversoir d'orage « Gambetta ». Événement pluvieux du 2019/03/07. 274

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2020LYSEI083/these.pdf
© [A. Claro Barreto], [2020], INSA Lyon, tous droits réservés

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2020LYSEI083/these.pdf
© [A. Claro Barreto], [2020], INSA Lyon, tous droits réservés

Liste des symboles

α_{air} Fraction volumique de l'air pour le modèle « VoF »

α_{D} Partage du débit total déversé entre les de deux conduites de déversement du déversoir d'orage « Gambetta »

α_{eau} Fraction volumique de l'eau pour le modèle « VoF »

α_{H} Angle d'ouverture du cone de mesure de la sonde ultrason de mesure de hauteur d'eau,

α_{VOF} Fraction volumique du modèle « VoF »

ϵ Taux de dissipation de l'énergie cinétique turbulente, m^2/s^3

μ Viscosité dynamique, $kg/(m\dot{s})$

ν Viscosité cinématique, m^2/s

ν_τ Viscosité cinématique turbulente, m^2/s

ω Taux de dissipation spécifique, $1/s$

ω_s Vitesse de chute de la particule, m/s

ϕ_{p} Rapport entre la surface d'une sphère de volume équivalent à celui de la particule et la surface réelle de la particule

ψ_{IC} Pourcentage de chevauchement des intervalles de confiance

ρ Masse volumique, kg/m^3

ρ_{eau} ou ρ_w Masse volumique de l'eau, kg/m^3

ρ_s Masse volumique de particules ou sédiments, kg/m^3

τ_{e} Temps de vie d'un tourbillon, s

τ_{iter} Temps d'interaction particule-tourbillon, s

τ_{tt} Temps nécessaire pour traverser le tourbillon, s

τ_w Contrainte de cisaillement à la paroi, $kg/(m \cdot s^2)$

φ_{DO} Rapport moyen entre CME^{A1} et CME^{A3}

φ_{ext} Solution numérique extrapolée

Θ Nombre de Shields

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2020LYSEI083/these.pdf
© [A. Claro Barreto], [2020], INSA Lyon, tous droits réservés

Fr Nombre de Froude

Re Nombre de Reynolds, m

Re_{ω} Nombre de Reynolds de la particule basé sur la vitesse de chute de la particule, m

$Re_{\mathrm{p,s}}$ Nombre de Reynolds de la particule basé sur D_{50}, m

Re_{p} Nombre de Reynolds de la particule, m

$\bigvee_p$ Fraction volumique des particules

$\overline{\mathrm{C}}_{\mathrm{A1}}$ Concentration moyenne annuelle du volume total déversé de l'ensemble des déversoir d'orage du système de collecte, $mg\ O_2/L$

$\overline{\mathrm{C}}_{\mathrm{A3}}$ Concentration moyenne annuelle du volume total annuel collecté par la station d'épuration d'eaux usées, $mg\ O_2/L$

$\overline{D}$ Débit moyen uniforme, m^3/s

$\overline{I_{12}}$ Intensité moyenne maximale sur 12 minutes, mm/h

$\overline{u_i' u_i'}$ Contrainte normale de Reynolds, m^2/s^2

$\overline{u_i' u_j'}$ Contrainte de cisaillement de Reynolds, m^2/s^2

$\overline{u_i}$ Vitesse dans la direction i moyenne dans le temps, m/s

$\overline{u}$ Vitesse longitudinale moyenne dans le temps, m/s

$\overline{v}$ Vitesse verticale moyenne dans le temps, m/s

$\overline{w}$ Vitesse transversale moyenne dans le temps, m/s

$\overline{x}$ Moyenne de la variable x

$\mathrm{CCR}_{\mathrm{DBO_5}}$ Critère de conformité réglementaire lié au flux de pollution de $\mathrm{DBO_5}$

$\mathrm{CCR}_{\mathrm{Volume}}$ Critère de conformité réglementaire lié au volume déversé

CME Concentration moyenne événementielle, mg/L

$\mathrm{CME}^{\mathrm{A1}}$ Concentration moyenne événementielle du flux déversé par un déversoir d'orage, mg/L

$\mathrm{CME}^{\mathrm{A3}}$ Concentration moyenne événementielle du flux collecté à l'entrée de la station d'épuration d'eaux usées, mg/L

$\mathrm{CME}_{\mathrm{max}}$ Concentration moyenne événementielle maximale, mg/L

$\mathrm{CMS}^{\mathrm{A1}}$ Concentration moyenne du déversoir d'orage, mg/L

COT Carbone organique total

$\mathrm{DBO_5}$ Demande biochimique en oxygène sur 5 jours, $mg\ O_2/L$

DBO_5^p Demande biochimique en oxygène sur 5 jours de la fraction particulaire, $mg\ O_2/L$

DCO Demande chimique en oxygène, $mg\ O_2/L$

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2020LYSEI083/these.pdf
© [A. Claro Barreto], [2020], INSA Lyon, tous droits réservés

GCI	Index de convergence du maillage
MES	Matières en suspension, mg/L
MVS	Matières volatiles en suspension, mg/L
PD_{eau}	Probabilité numérique de déversement de l'écoulement, %
PMD	Pourcentage de masse déversée, %
RMSE	Erreur moyenne quadratique
V_{A1}	Volume total déversé par l'ensemble de déversoir d'orage du système de collecte, m^3
V_{A2}	Volume total déversé par le déversoir d'orage à l'entrée de la station d'épuration des eaux usées, m^3
V_{A3}	Volume total collecté par la station d'épuration des eaux usées, m^3
V_G	Volume annuel déversé par le déversoir d'orage « Gambetta », m^3
$\widehat{x}$	Médiane de la variable x
A	Surface mouillée, m^2
B	Largeur au miroir, m
C_T	Coefficient de l'échelle constante du temps
C_{d-p}	Coefficient de la force de traînée sur une particule
C_d	Coefficient de décharge latéral
CV	Coefficient de variation
D	Débit, m^3/s
D_{32}	Diamètre moyen de Sauter, m
D_{50}	Diamètre médiane de particules, m
D_C	Débit conservé, m^3/s
D_{DO}	Débit déversé, m^3/s
D_D	Débit déversé dans la conduite « Droit » du déversoir d'orage « Gambetta », m^3/s
D_E ou D_{Amont}	Débit d'entrée au déversoir d'orage « Gambetta », m^3/s
D_G	Débit déversé dans la conduite « Gauche » du déversoir d'orage « Gambetta », m^3/s
D_h	Diamètre hydraulique, m
d_p	Diamètre des particules ou sédiments, m
D_T	Débit total déversé, m^3/s
DN	Diamètre nominal, m
E_{CM}	Erreur de la conservation de la masse, m^3/s
g	Accéleration due à la force gravitationelle, 9.807 m/s^2

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2020LYSEI083/these.pdf
© [A. Claro Barreto], [2020], INSA Lyon, tous droits réservés

H Hauteur d'eau mesurée par sonde ultrasone, m

h Hauteur d'eau, m

h_0 Hauteur d'eau à l'amont du déversoir latéral à échelle réduite, m

h_1 Hauteur d'eau à l'amont du ressaut hydraulique, m

h_2 Hauteur d'eau à l'aval du ressaut hydraulique, m

H_{Amont} Hauteur d'eau mesurée par sonde ultrasone au niveau de la conduite amont du déversoir d'orage « Gambetta », m

H_{chambre} Hauteur d'eau mesurée par sonde ultrasone au niveau de la chambre du déversoir d'orage « Gambetta », m

H_{DO} Hauteur d'eau mesurée par sonde ultrasone au niveau des conduites de déversement, m

H_{min} Hauteur d'eau minimale mesurée par sonde ultrasone, m

H_{p} Hauteur totale précipitée, m

H_{ref} Distance verticale entre le radier et la sonde ultrason de hauteur d'eau, m

H_{Total} Hauteur total précipitée, mm

$H_{\text{TS}^{95\%}}$ Percentile à 95% de la H_{TS}, m

H_{TS} Hauteur d'eau du profil de temps sec, m

H_C Hauteur d'eau critique, m

H_N Hauteur d'eau normale, m

I Pente longitudinale d'une conduite, m/m

I_τ Intensité turbulente

I_{p} Intensité de la pluie, mm/h

k Énergie cinétique turbulente, m^2/s^2

K_s Coefficient de rugosité de Strickler, $m^{1/3}/s$

L_{e} L'échelle de longueur du tourbillon, m

L_{ressaut} Longueur du ressaut hydraulique, m

L_{xi} Longueur du canal rectangulaire à l'amont du déversoir latéral à échelle réduite, m

L_{xo} Longueur du canal rectangulaire du débit conservé à l'aval du déversoir latéral à échelle réduite, m

L_{zo} Longueur du canal rectangulaire du débit déversé à l'aval du déversoir latéral à échelle réduite, m

$M_{<600}$ Flux de pollution annuel déversé par l'ensemble des déversoirs d'orage qui collectent une charge organique inférieure à 600 kg de DBO_5 par jour, kg

$M_{<600}$ Volume annuel déversé par l'ensemble des déversoirs d'orage qui collectent une charge organique inférieure à 600 kg de DBO_5 par jour, kg

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2020LYSEI083/these.pdf
© [A. Claro Barreto], [2020], INSA Lyon, tous droits réservés

$M_{>600}$ Flux de pollution annuel déversé par l'ensemble des déversoirs d'orage qui collectent une charge organique supérieure ou égale à 600 kg de DBO_5 par jour, kg

$M_{>600}$ Volume annuel déversé par l'ensemble des déversoirs d'orage qui collectent une charge organique supérieure ou égale à 600 kg de DBO_5 par jour, kg

M_{G} Flux de pollution annuel déversé par le déversoir d'orage « Gambetta », kg

p_{lat} Hauteur de la pelle du déversoir latéral à échelle réduite, m

PT Pourcentage théorique du temps de pluie à l'échelle annuelle, %

PT_{Amont} PT de la conduite amont du déversoir d'orage « Gambetta », %

PT_{DO} PT des conduites de déversement du déversoir d'orage « Gambetta », %

Q_{p} Débit du mélange eau-particules injecté à l'amont du déversoir latéral à échelle réduite, m^3/s

Q_{xi} Débit d'entrée du déversoir latéral à échelle réduite, m^3/s

Q_{xo} ou Q_{c} Débit conservé à l'aval du déversoir latéral à échelle réduite, m^3/s

Q_{zo} ou Q_{d} Débit déversé à l'aval du déversoir latéral à échelle réduite, m^3/s

R_h Rayon hydraulique, m

S_f Pente de frottement, m/m

St Nombre de Stokes

T_{D} Durée du déversement, h

$t_{\mathrm{I_o}}$ Date de la dernière intensité $I_{\mathrm{p}} > 0\ mm/h$

$t_{\mathrm{I_o}}$ Date de la première intensité $I_{\mathrm{p}} > 0\ mm/h$

T_{L} Temps de corrélation de la vitesse lagrangienne, s

$u(t) \equiv u$ Vitesse longitudinale instantanée, m/s

$U(x)$ Incertitude élargie de la variable x

$u(x)$ Incertitude-type de la variable x

U_0 Vitesse moyenne de référence, m/s

u_τ Vitesse de cisaillement à la paroi, m/s

$u_c(x)$ Incertitude-type composée de la variable x

$u_i^{'}$ Fluctuation temporelle de la vitesse dans la direction i, m/s

V Vitesse moyenne mesurée par sonde Doppler submergée, m/s

$v(t) \equiv v$ Vitesse verticale instantanée, m/s

$w(t) \equiv w$ Vitesse transversale instantanée, m/s

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2020LYSEI083/these.pdf
© [A. Claro Barreto], [2020], INSA Lyon, tous droits réservés

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2020LYSEI083/these.pdf
© [A. Claro Barreto], [2020], INSA Lyon, tous droits réservés

Introduction

1.1 Contexte

L'eau douce disponible, hormis celle stockée dans les glaciers, représente environ 0.8% du volume total des réserves d'eau sur terre (Postel et al. 1996). Cette ressource naturelle est essentielle pour l'humanité (i.e. la survie, l'hygiène, etc.) et l'environnement (i.e. la faune et la flore). Sa préservation est primordiale pour (i) la survie des espèces et (ii) l'accès pérenne pour le plus grand nombre d'êtres humains. Notamment, l'espèce humaine transforme de manière importante le cycle de l'eau à cause des activités domestiques, industrielles et agricoles (Chocat 1997a). Le cycle de l'eau est aussi modifié par l'urbanisation du territoire qui engendre l'augmentation des surfaces imperméables et, par conséquent, des volumes et débits de ruissellement collectés par les systèmes d'assainissement (Braud et al. 2013 ; Chocat 1997b ; Gooré Bi et al. 2015). Ces modifications provoquent un accroissement de la pollution des milieux récepteurs à cause des rejets urbains de temps de pluie (RUTP), à savoir, les rejets des déversoirs d'orages, des stations de traitement, aux exutoires des réseaux séparatifs des eaux pluviales, etc. La gestion adéquate de l'eau en ville s'avère ainsi fondamentale pour diminuer l'impact nocif des activités humaines sur la qualité de l'eau (Chocat 1997a).

En France, la loi sur l'eau de 1992 a consacré l'eau en tant que « patrimoine commun de la nation ». Plus récemment, la Directive Cadre européenne sur l'Eau, DCE 2000/60/CE), a permis l'instauration d'une politique communautaire de l'eau et impose un retour au bon état écologique et chimique des masses d'eau. Cette directive se traduit par des contraintes règlementaires pour les villes en les obligeant à mettre en place des politiques de gestion et de traitement des RUTP. Ensuite, le Règlement (CE) No 166/2006, concernant la création d'un registre européen des rejets et des transferts de polluants, impose une déclaration annuelle de tout polluant rejeté qui dépasse le seuil indiqué dans l'annexe II du même règlement. En France l'Arrêté du 22 juin 2007, abrogé récemment par l'Arrêté du 21 juillet 2015, a permis de concrétiser au niveau local l'implémentation de la DCE, grâce à la mise en place de l'autosurveillance des systèmes de collecte, en particulier au niveau des ouvrages de dérivation (i.e. les déversoirs d'orage, bifurcations, etc.). Depuis l'Arrêté du 21 juillet 2015, les maîtres d'ouvrage des systèmes de collecte doivent mettre en place une autosurveillance capable d'évaluer et de démontrer que le système de collecte respecte l'un des trois critères de conformité réglementaire en temps de pluie. Ces trois critères de conformité réglementaire sont rappelés dans le Tableau 1.1, d'après le Commentaire Technique de l'Arrêté du 21 juillet 2015. Chaque critère de conformité est évalué sur une moyenne quinquennale afin de prendre en compte des variations annuelles des précipitations. Ces critères sont relatifs aux déversoirs d'orage du système de collecte, car ces ouvrages représentent les principaux vecteurs de la pollution rejetée au milieu récepteur (Eganhouse et Sherblom 2001 ; J. B. Ellis et Yu 1995 ; EPA 2004 ; Gasperi et al. 2008 ; Madoux-Humery et al. 2015 ; Passerat et al. 2011 ; Riechel et al. 2016).

1.1.1 Les enjeux opérationnels

Le maître d'ouvrage du système de collecte de la ville de Valence cherche le critère de conformité réglementaire le mieux adapté au fonctionnement de son système d'assainissement en temps de pluie. En effet, l'hydrologie du bassin versant et l'architecture du système de collecte de la ville de Valence occasionnent des volumes déversés importants et nombreux. Ainsi, les critères de conformité en temps de

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2020LYSEI083/these.pdf
© [A. Claro Barreto], [2020], INSA Lyon, tous droits réservés

Type	Définition
Nombre	Moins de 20 jours de déversements ont été constatés durant l'année au niveau de chaque déversoir d'orage soumis à l'autosurveillance réglementaire.
Volume	Les rejets par temps de pluie représentent moins de 5% du volume total d'eaux usées produit par l'agglomération d'assainissement.
Qualité	Les rejets par temps de pluie représentent moins de 5% du flux total de pollution produit par l'agglomération d'assainissement, exprimés en Kg de DBO_5.

Tableau 1.1 – Critères de conformité réglementaire du système de collecte en temps de pluie, d'après le Commentaire Technique de l'Arrêté du 21 juillet 2015.

pluie concernant le *Nombre* et le *Volume* (Tableau 1.1) de déversements, au regard du bilan annuel de l'année 2018 (Valence Romans Agglo 2018), ne peuvent pas être respectés. L'Unité d'Exploitation de l'Assainissement (UEA), qui est le maître d'ouvrage du système de collecte, a décidé d'étudier la possibilité d'être conforme vis-à-vis du critère de conformité réglementaire lié à la *Qualité* de la pollution déversée en temps de pluie (Tableau 1.1). Si le système de collecte respecte ce critère de conformité, l'agglomération pourra éviter l'investissement d'environ 10 M€ pour la construction d'un bassin de stockage qui permettrait de diminuer le volume déversé en temps de pluie (Egis eau 2011).

Cette problématique opérationnelle est abordée à travers une collaboration entre la communauté d'agglomération « Valence Romans Agglo » (VRA) et l'Institut National de Sciences Appliquées (INSA) de Lyon. Cette collaboration se traduit par un projet de recherche qui est financé via le dispositif « Convention Industrielle de Formation par la Recherche » (CIFRE). Les deux laboratoires partenaires du projet sont (i) le laboratoire Déchets-Eaux-Environnement-Pollution (DEEP) et (ii) le Laboratoire de Mécanique des Fluides et d'Acoustique (LMFA). Ces trois entités, deux scientifiques et une collectivité, ont décidé de travailler sur l'évaluation des flux de polluants déversés en temps de pluie par le principal déversoir d'orage (DO) du système de collecte de la ville de Valence.

1.1.2 Les enjeux scientifiques

Les déversoirs d'orages (DO) sont des ouvrages de régulation de tout système de collecte en temps de pluie. Ces ouvrages sont conçus principalement pour limiter le débit (ou volume) envoyé vers les ouvrages de traitement (e.g. la station d'épuration d'eaux usées – STEP, les bassins de décantation, etc.) en temps de pluie afin d'assurer leur bon fonctionnement (Bertrand-Krajewski et al. 2000 ; Hager 2010). Les DO sont ainsi dimensionnés selon le fonctionnement hydraulique requis mais sans se référer à des recommandations de conception standardisées, car celles-ci n'existent pas (Ahm et al. 2016 ; Hager 2010). En outre, la géométrie d'un DO n'est en général pas adaptée à la métrologie, car elle est en général définie selon l'espace disponible après construction du réseau de collecte (Bertrand-Krajewski et al. 2000 ; Vazquez et al. 2006). En France, la plupart des DO sont des ouvrages non standardisés avec un fonctionnement hydraulique *a priori* inconnu (Lipeme Kouyi et al. 2011 ; Vazquez et al. 2006).

Le volume d'eau excédentaire, collecté par le DO, est directement rejeté au milieu naturel. Ce volume d'eau déversé est composé de micropolluants organiques (Launay et al. 2016), micropolluants inorganiques (Weyrauch et al. 2010), nutriments (Viviano et al. 2017), hormones (Phillips et al. 2012), microorganismes pathogènes (Passerat et al. 2011 ; Weyrauch et al. 2010), polluants prioritaires et dangereux (Gasperi et al. 2014 ; Zgheib et al. 2011), métaux lourds (e.g. le plomb, le cuivre, etc. - W. Schulz et al. 1994). La pollution déversée par les DO peut, par exemple, arriver à représenter entre 30% à 95% de la charge de pollution annuelle collectée tandis que le volume déversé est de l'ordre de 6% à 18% du volume annuel collecté (e.g. Launay et al. 2016 ; Phillips et al. 2012 ; Viviano et al. 2017). Le flux de pollution déversé par ces ouvrages représente ainsi la première, voire la principale, source de pollution rejetée par le système de collecte (Eganhouse et Sherblom 2001 ; J. B. Ellis et Yu 1995 ; EPA 2004 ; Gasperi et al. 2008 ; Madoux-Humery et al. 2015 ; Passerat et al. 2011 ; Riechel et al. 2016). Différents travaux expérimentaux ont étudié l'impact de ces rejets sur le milieu récepteur (e.g. Becouze-Lareure et al. 2016 ; Passerat et al.

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2020LYSEI083/these.pdf
© [A. Claro Barreto], [2020], INSA Lyon, tous droits réservés

2011 ; Riechel et al. 2016).

Certains dispositifs de prétraitement physico-chimiques de la pollution particulaire et/ou dissoute existent tels que les décanteurs lamellaires (e.g. Bridoux et al. 1998 ; Delporte et al. 1995), la coagulation-floculation chimique (e.g. Ebeling et al. 2003 ; Gasperi et al. 2012a ; El-Gendy et al. 2008 ; Plum et al. 1998) ou l'irradiation UV (e.g. Averill et al. 1997 ; Scheible et al. 2002 ; Wojtenko et al. 2003). Mais généralement, ces rejets en temps de pluie atteignent le milieu récepteur sans aucun prétraitement physique et/ou chimique.

1.1.2.1 La mesure du flux de pollution déversé

Le flux de pollution déversé est mesuré à l'aide de deux mesures indépendantes : le débit et la concentration de la pollution déversée. La mesure du volume déversé est généralement effectuée à l'aide d'un capteur de hauteur d'eau seul ou couplé à un capteur (submergé) de vitesse (e.g. Isel et al. 2014b ; Lipeme Kouyi et al. 2005).

La concentration de la pollution déversée par un DO *in situ* peut être mesurée de manière directe ou indirecte. La mesure directe correspond au mesurage *a posteriori* des paramètres de qualité de l'eau des échantillons collectés en temps de pluie. Ces échantillons sont en général recueillis à l'aide de préleveurs automatiques installés dans la conduite d'entrée de la chambre du DO (e.g. García et al. 2017 ; Vandelannoote et Desetables 2010). La mesure directe de la pollution au niveau des conduites de décharge est très rare à cause des contraintes opérationnelles et de sécurité *in situ* (Durand 2003 ; Maruéjouls et al. 2017 ; Roger et Tonghini 2010 ; Vandelannoote et Desetables 2010).

La mesure indirecte correspond au calcul des paramètres de qualité de l'eau à l'aide des relations empiriques basées sur la mesure *in situ* de la turbidité (e.g. Maruéjouls et al. 2017 ; Vandelannoote et Desetables 2010), la conductivité (e.g. García et al. 2017) ou la spectrométrie UV-Visible (e.g. Gruber et al. 2005). Ces relations sont couramment dépendantes du site et valables seulement pour le temps de pluie (Lacour et al. 2009 ; Métadier et Bertrand-Krajewski 2012). Ces relations doivent être construites, en outre, avec un nombre important d'événements pluvieux étudiés avec l'approche de mesure directe (Lacour et al. 2009 ; McCarthy et al. 2018 ; Métadier et Bertrand-Krajewski 2012).

Le principal avantage de la mesure indirecte par rapport à la directe correspond au mesurage en continu du paramètre d'entrée de la relation empirique qui permet de calculer la concentration en temps de pluie. Le mesurage est dit en continu, car la mesure de la turbidité et/ou la conductivité est réalisée avec un pas de temps de l'ordre d'une dizaine de secondes. Cependant, le déploiement de la mesure indirecte au niveau des conduites de décharge est difficile à mettre en ouvre, car les capteurs disponibles et utilisés doivent être submergés en permanence.

Différents travaux expérimentaux se sont intéressés à la mesure des concentrations moyennes événementielles (CME) afin de calculer la masse totale déversée en temps de pluie. Les CME sont calculées à l'aide d'une mesure directe (e.g. Diaz-Fierros et al. 2002 ; Suarez et Puertas 2005) ou indirecte (e.g. Maruéjouls et al. 2017 ; Roger et Tonghini 2010 ; Vandelannoote et Desetables 2010). Ces concentrations sont en général relatives aux matières en suspension (MES) et/ou à la demande chimique en oxygène (DCO) (e.g. Gruber et al. 2005 ; Maruéjouls et al. 2017 ; Suarez et Puertas 2005 ; Vandelannoote et Desetables 2010). Pourtant, la plupart de ces travaux expérimentaux ont mesuré la CME à l'exutoire des réseaux unitaires ou à l'amont des déversoirs d'orages, car ils ont supposé que les concentrations des flux déversés et d'entrée (ou de sortie) étaient similaires (e.g. García et al. 2017 ; Gasperi et al. 2010 ; Gromaire et al. 2001 ; Vandelannoote et Desetables 2010). Seuls les travaux expérimentaux de Diaz-Fierros et al. (2002) et Suarez et Puertas (2005) ont mesuré la CME des effluents déversés et la demande biochimique en oxygène sur 5 jours (DBO_5), mais ils n'ont pas calculé le flux de pollution déversé en temps de pluie.

L'approche expérimentale est indispensable mais reste insuffisante pour comprendre et maîtriser le flux de pollution déversé par un déversoir d'orage *in situ* en temps de pluie. La mesure de la pollution déversée (i) demande une mobilisation de moyens financiers et humains non négligeables et (ii) possède une précision dépendante du nombre et de la variabilité des événements pluvieux échantillonnés (McCarthy et al. 2018). En outre, la répartition de la pollution au sein d'un déversoir d'orage *in situ* en temps de pluie est fortement dépendante de l'écoulement en place. L'écoulement au sein de ces ouvrages est (i) tri-

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2020LYSEI083/these.pdf
© [A. Claro Barreto], [2020], INSA Lyon, tous droits réservés

dimensionnel, (ii) instationnaire, (iii) à surface libre et/ou en charge, (iv) turbulent, (v) chargé en polluants particulaires et dissous, et (vi) avec présence de discontinuités (e.g. le ressaut hydraulique) (Mignot et al. 2012, 2014 ; Momplot et al. 2017). La complexité de ces écoulements requiert l'utilisation de la mécanique des fluides numériques (CFD, en anglais) pour mieux appréhender le comportement hydrodynamique de ces ouvrages dans le but de mieux les instrumenter (Fach et al. 2009 ; Isel et al. 2013 ; Lipeme Kouyi et al. 2005).

1.1.2.2 La simulation du flux de pollution déversé

L'étude numérique du flux de pollution déversé au sein d'un déversoir d'orage *in situ* fait appel à l'utilisation de la mécanique des fluides numériques (CFD, en anglais) couplée à un modèle de transport de sédiments. L'approche CFD permet de reproduire les champs de vitesses et la turbulence de l'écoulement dans l'ensemble de l'ouvrage. Le modèle numérique du transport permet de prendre en compte les caractéristiques physiques et toutes les forces qui gouvernent le mouvement des sédiments (Dufresne et al. 2009a,b ; Lipeme Kouyi 2004).

La simulation du flux de pollution est composée des fractions dissoute et particulaire. Le flux de la pollution dissoute peut être approximé à l'aide de l'hydrodynamique parce que cette pollution est censée être complètement transportée par le fluide (i.e. l'eau). Au contraire, le flux de pollution particulaire dépend des caractéristiques de l'écoulement (e.g. le champ de vitesse, les courants secondaires) et des particules (i.e. la densité et le diamètre) (Pal et Ghoshal 2017 ; Verbanck 2000). La turbulence de l'écoulement influence la stratification de la pollution particulaire dans l'axe vertical de l'écoulement (Pal et Ghoshal 2017 ; Verbanck 2000). Il s'avère ainsi inévitable de maîtriser, en premier lieu, le fonctionnement hydrodynamique du déversoir d'orage *in situ* avant de simuler le transport de la pollution particulaire.

La méthode des volumes finis

La méthode de volumes finis est une technique numérique de discrétisation spatiale et temporelle des équations de Navier-Stokes (Versteeg et Malalasekera 2007). Les équations aux dérivées partielles non linéaires de Navier-Stokes décrivent le mouvement des fluides newtoniens. La méthode des volumes finis repose sur l'intégration des équations de Navier-Stokes sur un volume de contrôle puis à la discrétisation du résultat de cette intégration à l'aide de la méthode des différences finies. Cette technique de discrétisation garantie ainsi le principe de conservation de la masse et de la quantité de mouvement au sein de chaque volume de contrôle. Les détails des schémas numériques sont donnés par Ferziger et Peric (2012) et Versteeg et Malalasekera (2007).

Cette méthode numérique est la plus utilisée en hydrologie urbaine pour comprendre le fonctionnement des déversoirs d'orages *in situ* en temps de pluie (Isel et al. 2014b ; Lipeme Kouyi et al. 2011, 2005). Elle est couramment employée pour obtenir des modèles réduits 1D du débit déversé en fonction de la hauteur d'eau dans une région du déversoir d'orage (e.g. Fach et al. 2009 ; Isel et al. 2014b ; Lipeme Kouyi et al. 2011, 2005 ; Maté Marín et al. 2018). La hauteur d'eau *in situ* est utilisée pour ce type de relations due à la simplicité d'installation et la robustesse du capteur (Isel et al. 2014b ; Lipeme Kouyi et al. 2011, 2005).

Néanmoins, tous ces travaux numériques 3D n'ont jamais validé, à notre connaissance, (i) les modèles numériques employés ou (ii) les modèles réduits 1D proposés par rapport aux données expérimentales des déversoirs d'orages *in situ* étudiés (Ahm et al. 2016 ; Fach et al. 2009 ; Isel et al. 2014b ; Larsen et al. 2008 ; Lipeme Kouyi et al. 2011, 2005). Seuls les travaux numériques de Van Daal-Rombouts et al. (2017), sur l'entrée d'un bassin de décantation des eaux pluviales à Eindhoven, Pays-Bas, ont validé le débit d'entrée en fonction de la hauteur d'eau par rapport aux données expérimentales *in situ*. Cependant, l'ouvrage étudié ne correspond pas un déversoir d'orage *in situ*.

La méthode des volumes finis a été aussi employée pour étudier le fonctionnement hydraulique global de différents types de déversoirs latéraux à échelle réduite (Aydin 2012 ; Aydin et Emiroglu 2013 ; Azimi et al. 2014 ; Lipeme Kouyi et al. 2003 ; Y. Wang et al. 2018). Ces ouvrages ont un intérêt particulier en hydrologie urbaine, car ils sont les plus communs en réseau d'assainissement (Hager 2010). Les différents travaux numériques 3D ont été validés uniquement par rapport aux mesures expérimentales globales :

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2020LYSEI083/these.pdf
© [A. Claro Barreto], [2020], INSA Lyon, tous droits réservés

la répartition du débit et la forme de la surface libre au niveau du déversement (Aydin 2012 ; Aydin et Emiroglu 2013 ; Azimi et al. 2014 ; Lipeme Kouyi et al. 2003 ; Y. Wang et al. 2018). Seuls les travaux numériques de Azimi et al. (2018) ont réussi à reproduire les champs de vitesses mesurés par Bagheri et Heidarpour (2012) dans un déversoir latéral rectangulaire à paroi mince en régime fluvial. Aucune étude expérimentale ou numérique n'a encore mesuré ou simulé, à notre connaissance, le champ de contraintes de Reynolds d'un déversoir latéral. Et ce, bien que ces contraintes, qui désignent l'état de turbulence de l'écoulement, soient la principale source d'énergie responsable du transport de sédiments en suspension (Pal et Ghoshal 2017).

La méthode de Boltzmann sur réseaux

Une autre méthode numérique, apparue dans les années 80, permet d'obtenir une solution approchée des équations de Navier-Stokes en se basant sur l'équation du transport de Boltzmann (Perumal et Dass 2015 ; Sauro Succi 2001). Cette méthode (i) est nommée la méthode de Boltzmann sur réseaux (LBM, en anglais) et (ii) repose sur le traitement statistique de l'équation de Boltzmann (initialement utilisée pour modéliser la cinétique des gaz). L'approche LBM considère le mouvement et la collision de plusieurs particules fluides et/ou solides à l'échelle mésoscopique (i.e. l'échelle intermédiaire entre les échelles microscopique et macroscopique). Cette méthode suit l'équation cinématique de la fonction de distribution de particules. Les grandeurs macroscopiques, telles que la vitesse et la pression, sont obtenues en calculant les moments de la distribution de particules (X. He et Luo 1997). La précision de cette méthode est de deuxième ordre dans le temps et l'espace (S. Chen et Doolen 1998). Cette précision numérique est suffisante pour la majorité des applications en hydrologie urbaine.

Les principaux avantages de l'approche LBM par rapport aux autres méthodes numériques de type CFD « classiques » sont (S. Chen et Doolen 1998 ; Perumal et Dass 2015 ; Sauro Succi 2001) : (i) la représentation des phénomènes physiques (e.g. les réactions chimiques, la floculation, etc.) est incorporée plus facilement du fait de la prise en compte de l'interaction entre les particules à l'échelle mésoscopique ; (ii) la parallélisation du calcul est plus efficace parce que l'équation discrète de Boltzmann est explicite et résolue localement ; et (iii) la simplicité de traitement des conditions limites et des géométries complexes.

L'approche LBM a été testée et validée pour différentes applications telles que le clapotage d'un fluide dans un bassin (Janßen et al. 2013a), la rupture du barrage (Janßen et al. 2013b), le ressaut hydraulique en 2D (i.e. le profil de la surface libre - Janßen et Krafczyk 2011a), etc. Seuls les travaux numériques de Fernandino et al. (2009) ont simulé l'écoulement à surface libre et à faible nombre de Reynolds dans un canal rectangulaire. Les champs de vitesses et de contraintes de Reynolds ont été validés à l'aide des travaux numériques de Broglia et al. (2003) et Gavrilakis (1992). Cependant, l'approche LBM n'a jamais été testée et validée, à notre connaissance, pour les écoulements turbulents (à fort nombre de Reynolds) à surface libre et chargés en polluants, observés au niveau des déversoirs d'orage.

La méthode de phase discrète - DPM

Une fois le comportement hydrodynamique de l'ouvrage connu en détail, la pollution particulaire peut être étudiée à l'aide d'un modèle numérique de transport de particules. Le transport de particules, au sein d'un déversoir d'orage *in situ*, peut être simulé avec une approche Eulérienne-Eulérienne ou bien Eulérienne-Lagrangienne (Van Wachem et Almstedt 2003). L'approche Eulérienne-Eulérienne simule l'écoulement et les particules comme des milieux continus, c'est-à-dire, le mouvement des particules est assimilé à celui d'un fluide. L'écoulement et les particules interagissent via des coefficients de transfert de masse, de quantité de mouvement et d'énergie. L'approche Eulérienne-Lagrangienne simule, au contraire, l'écoulement depuis un référentiel Eulérien et le transport des particules depuis un référentiel Lagrangien (Brennen 2005 ; Van Wachem et Almstedt 2003). L'approche Eulérienne-Lagrangienne est la plus utilisée en hydrologie urbaine (e.g. Claro Barreto et al. 2015 ; Dufresne et al. 2010, 2009a,b ; Isenmann 2016 ; Lipeme Kouyi 2004 ; Yan 2013 ; Zhu et al. 2016)

L'approche Eulérienne-Lagrangienne est couramment employée à l'aide de la méthode de phase discrète (DPM, en anglais), car le volume occupé par les particules (i.e. la fraction volumique) en réseaux

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2020LYSEI083/these.pdf
© [A. Claro Barreto], [2020], INSA Lyon, tous droits réservés

d'assainissement est inférieur à 10% (Isenmann 2016 ; Lipeme Kouyi 2004 ; Yan 2013). Le modèle DPM ne considère pas les collisions entre particules parce qu'elles sont statistiquement dérisoires.

L'approche CFD couplée à la méthode DPM a été employée pour différents ouvrages, à échelle réduite ou réelle, du système de collecte (e.g. Adamsson et al. 2003 ; Dufresne et al. 2010, 2009b ; Pathapati et Sansalone 2009a ; Pollert et Stránský 2003 ; Stovin et Saul 2000). La plupart des travaux numériques correspond à des bassins de décantation à l'échelle réduite (e.g. Dufresne et al. 2009a). Les travaux numériques sur des déversoirs latéraux et/ou frontaux à échelle réduite ont été validés uniquement par rapport à la répartition massique expérimentale de particules inertes (e.g. Dufresne et al. 2010, 2009b). Au contraire, l'ensemble des études numériques des déversoirs d'orage *in situ* en temps de pluie n'est pas validé par rapport aux données expérimentales en raison des difficultés opérationnelles inhérentes (Z. Chen et al. 2013 ; Dutta et al. 2014 ; Pollert et Stránský 2003). Enfin, la plupart des études numériques sur les déversoirs à échelle réduite ou réelle (i) ont utilisé un seul diamètre et une seule densité de particules à cause du manque d'informations expérimentales et (ii) ont injecté uniformément les particules dans toute la section transversale de l'écoulement parce que la distribution spatiale de la concentration expérimentale à l'entrée du système est souvent inconnue (e.g. Z. Chen et al. 2013 ; Dufresne et al. 2010, 2009a ; Pollert et Stránský 2003).

1.2 Problématique

Le projet de thèse essaie de répondre aux enjeux opérationnels et scientifiques présentés auparavant à l'aide de la problématique suivante :

Comment caractériser l'écoulement tridimensionnel porteur de polluants et le flux de pollution déversé, en particulier les grandeurs responsables de la dispersion des polluants et le suivi de la demande biochimique en oxygène à 5 jours (DBO_5), au niveau d'un déversoir d'orage latéral in situ en temps de pluie ?

1.3 Objectifs

1.3.1 Opérationnels

- Déterminer le critère de conformité réglementaire le mieux adapté au fonctionnement du système de collecte en temps de pluie.

- Concevoir une méthodologie de suivi de la pollution déversée en temps de pluie par un déversoir d'orage.

- Comprendre le fonctionnement hydrodynamique global et la dispersion de polluants particulaires du principal déversoir d'orage du système de collecte.

1.3.2 Scientifiques

- Choisir et évaluer le type de modélisation numérique capable de reproduire l'écoulement au sein d'un déversoir d'orage latéral, notamment la répartition des débits, la surface libre, le champ de vitesses, le champ d'énergie cinétique turbulente et le champ de contraintes de Reynolds. Cela passe par le choix d'un type de modélisation (e.g. la méthode de Boltzmann sur réseaux, la méthode des volumes finis, etc.) et d'un modèle de turbulence, et ensuite par la validation de ces choix en échelles réduite (pilote) puis réelle (terrain).

- Déterminer la répartition massique des particules inertes en suspension au sein d'un déversoir latéral à échelle réduite en conditions contrôlées.

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2020LYSEI083/these.pdf
© [A. Claro Barreto], [2020], INSA Lyon, tous droits réservés

- Évaluer la masse annuelle de DBO_5 (demande biochimique en oxygène sur 5 jours) rejetée en temps de pluie par un déversoir d'orage à l'aide de relations empiriques (*in situ*) entre la DBO_5 et les différents paramètres de qualité physico-chimiques (e.g. les matières en suspension - MES).

1.4 Structure du manuscrit

La structure du présent document est composée de trois parties principales : (i) la présente introduction générale, (ii) l'hydrodynamique des déversoirs latéraux et (iii) le transport particulaire au sein de ces ouvrages. Les enjeux scientifiques sont divisés en deux parties : la mesure et la simulation du flux de pollution déversé.

La partie consacrée à l'hydrodynamique des déversoirs latéraux présente les études expérimentales et numériques effectuées pour un déversoir latéral à échelle réduite et un autre *in situ*. Cette partie commence (Chapitre 2) avec l'étude hydraulique 1D du déversoir d'orage *in situ* afin de vérifier le fonctionnement des capteur *in situ* et de déterminer le régime d'écoulement attendu en temps de pluie. Afin de simuler l'écoulement d'un déversoir d'orage *in situ*, la méthode de volumes finis est employée et validée pour un déversoir latéral à échelle réduite (Chapitre 3) et un déversoir d'orage *in situ* (Chapitre 4). Le Chapitre 3 présente la performance des modèles de turbulence RNG k-ϵ et SST k-ω vis-à-vis des champs expérimentaux de vitesses et de l'énergie cinétique turbulente d'un déversoir latéral rectangulaire à paroi mince en régime fluvial. Le Chapitre 4 présente l'utilisation de cette approche numérique pour simuler le fonctionnement hydraulique du déversoir d'orage *in situ* en temps de pluie. Le modèle numérique de cet ouvrage est (i) validé par rapport aux données *in situ* et (ii) utilisé pour étudier le temps de séjour dans l'ouvrage et la répartition de la pollution dissoute à l'aide d'un suivi des lignes de courant. Enfin, le Chapitre 5 présente la capacité de la méthode numérique de Boltzmann sur réseaux (LBM, en anglais) pour simuler des écoulements turbulents confinés à fort nombre de Reynolds. Les principales limitations de la méthode LBM, pour reproduire les écoulements rencontrés en réseau d'assainissement, sont également évoquées.

La troisième partie, relative au transport particulaire au sein des déversoirs latéraux, présente (i) la mesure et la simulation de la répartition massique des particules inertes au sein d'un déversoir latéral à échelle réduite (Chapitre 6) et (ii) la mesure des flux de pollution déversés en temps de pluie au sein du déversoir d'orage *in situ* (Chapitre 7).

La Chapitres 8 et 9 présentent respectivement les conclusions et perspectives générales du projet de recherche.

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2020LYSEI083/these.pdf
© [A. Claro Barreto], [2020], INSA Lyon, tous droits réservés

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2020LYSEI083/these.pdf
© [A. Claro Barreto], [2020], INSA Lyon, tous droits réservés

Première partie

L'hydrodynamique au sein d'un déversoir latéral

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2020LYSEI083/these.pdf
© [A. Claro Barreto], [2020], INSA Lyon, tous droits réservés

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2020LYSEI083/these.pdf
© [A. Claro Barreto], [2020], INSA Lyon, tous droits réservés

L'autosurveillance du déversoir d'orage « Gambetta »

Life is like a sewer - what you get out
of it depends on what you put into it.

An Evening (Wasted) With Tom Lehrer - 1959
"Henry" quoted by Tom Lehrer

2.1 Introduction

Comme indiqué dans l'introduction générale, la communauté d'agglomération Valence Romans Agglo est le maître d'ouvrage du système d'assainissement de la ville de Valence. Depuis l'Arrêté du 21 juillet 2015, ce système d'assainissement (ou collecte) est évaluée en temps de pluie à l'aide de 3 critères de conformité réglementaire définis dans le Commentaire Technique de l'Arrêté du 21 juillet 2015 - Partie 3. Dès 2018, les deux premiers critères de conformité permis, avec (i) un nombre de déversements de certains ouvrages supérieur au seuil de 20 fois par an et (ii) un volume annuel déversé en temps de pluie supérieur à 5% du volume annuel des eaux usées, apparaissent inadaptés au fonctionnement de ce système d'assainissement. Afin de rendre son système conforme, Valence Romans Agglo prévoit de construire un bassin d'orage de 10 000 m^3 pour réduire le nombre de déversement du principal DO, d'après les recommandations du schéma directeur de 2011(Egis eau 2011). Ce bassin d'orage représente pour l'agglomération un investissement d'environ 10 millions d'euros.

Avant la construction du bassin d'orage à l'amont du principal déversoir d'orage, le service d'assainissement de Valence Romans Agglo souhaite évaluer si le flux de pollution déversé en temps de pluie est le critère de conformité réglementaire le mieux adapté au fonctionnement du système de collecte. Ce critère de conformité réglementaire est évalué dans un premier temps au niveau du principal déversoir d'orage, le DO « Gambetta », car cet ouvrage contribue à un peu plus de 50% du volume annuel déversé en temps de pluie par le système de collecte (Valence Romans Agglo 2018).

Comme déjà évoqué dans le Chapitre 1, le calcul ou l'estimation du flux de pollution, sous la forme dissoute et particulaire, au sein d'un déversoir d'orage exige la connaissance du fonctionnement hydraulique et de la pollution *in situ* en temps de pluie. Le flux de pollution dissoute est généralement estimé en s'appuyant uniquement sur l'hydrodynamique parce qu'il est censé suivre l'écoulement. Par contre, le flux de pollution particulaire est principalement affecté par le champ de vitesses et la turbulence de l'écoulement (Verbanck 2000). L'intensité de la turbulence de l'écoulement (lié au nombre de Reynolds Re) influence la stratification de la pollution particulaire dans l'axe vertical de l'écoulement (Pal et Ghoshal 2017; Verbanck 2000). Ainsi, il s'avère nécessaire de connaître en premier lieu le fonctionnement hydraulique avant de pouvoir estimer ou calculer le flux de pollution déversé par un déversoir d'orage en temps de pluie.

Le présent chapitre correspond à la pré-étude hydraulique du principal déversoir d'orage (DO) du système de collecte de la ville de Valence, le DO « Gambetta » , afin d'analyser le comportement global de

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2020LYSEI083/these.pdf
© [A. Claro Barreto], [2020], INSA Lyon, tous droits réservés

l'ouvrage en temps de pluie. Également, les données *in situ* au niveau des différents points de mesure du DO seront vérifiées et validées lors des différentes périodes de déversement. Les données *in situ* retenues serviront à définir (i) les conditions limites et (ii) les données de validation du modèle 3D du DO présenté en détail dans le Chapitre 4. Cette pré-étude est ainsi une étape indispensable pour commencer à comprendre le fonctionnement hydraulique du DO « Gambetta » en temps de pluie.

2.2 Matériel et méthodes

Une vue globale du système de collecte de la ville de Valence est présentée dans la Section 2.2.1. Ensuite, la géométrie et le principe de fonctionnement global du déversoir d'orage « Gambetta » sont abordés dans la Section 2.2.2. L'autosurveillance associée à ce DO et mise en place par l'Unité d'Assainissement est présentée dans la Section 2.2.3.

Les méthodologies de pré-traitement des données *in situ* et d'extraction des événements pluvieux sont présentées dans les Sections 2.2.4-2.2.5. Les approches numériques utilisées pour réaliser la pré-étude hydraulique des conduites d'entrée et de déversement sont présentées dans la Section 2.2.6. En particulier, l'approche 1D basée sur la courbe de remous est présentée dans Section 2.2.7. L'incertitude des données expérimentales et grandeurs dérivées (e.g. le débit déversé) est calculée selon la méthode GUM (ISO/IEC Guide 98-1 2009), comme présentée dans la Section 4.2.5.

2.2.1 Le système de collecte de la ville de Valence

Le maître d'ouvrage et l'exploitant du système de collecte de la ville de Valence est le service d'assainissement de la communauté d'agglomération Valence Romans Agglo. Ce système d'assainissement collecte les eaux du temps sec et du temps de pluie d'un bassin versant d'environ 145 427 équivalent habitants (Valence Romans Agglo 2018). Ce réseau unitaire dispose de 10 déversoirs d'orages qui rejettent l'excédent des eaux collectées vers le Rhône, par temps de pluie. Parmi ces ouvrages de déversement, seulement 3 déversent plus de 10 fois par an et reçoivent une charge supérieure à 600 Kg de DBO_5 par jour. Ces ouvrages ont fait l'objet d'une instrumentation métrologique afin de mesurer le débit déversé et d'estimer le flux de pollution déversé en temps de pluie.

Le système de collecte de Valence n'est pas conforme vis-à-vis de la réglementation en vigueur, car le volume total déversé est supérieur au seuil réglementaire de 5% par rapport au volume collecté (Valence Romans Agglo 2018). Parmi les 3 principaux déversoirs d'orage, le DO « Gambetta » est la principale source de pollution du système de collecte de la ville de Valence. Le DO « Gambetta » contribue à un peu plus de 50% du volume total déversé à l'année en temps de pluie (Tableau 2.1). En outre, ce DO a une fréquence annuelle de déversement supérieure au seuil réglementaire de 20 fois par an (Valence Romans Agglo 2017, 2018). Ces caractéristiques font du DO « Gambetta » l'ouvrage d'intérêt du présent projet de recherche afin d'évaluer si le flux de pollution déversé en temps de pluie est le mieux adapté au fonctionnement du système de collecte.

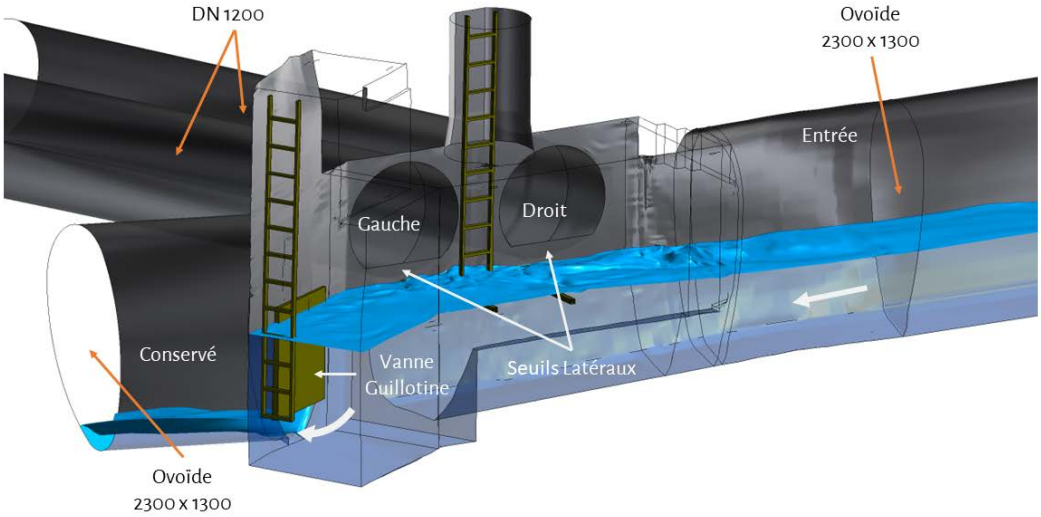
Déversoir d'orage	2013	2014	2015	2016	2017	2018
« Gambetta »	55	53	50	56	53	50
« Barjon »	26	28	33	23	22	22
« Port »	12	13	11	16	15	16
Les autres 7	8	6	7	5	10	12

Tableau 2.1 – Pourcentage du volume annuel déversé par les 3 principaux déversoirs d'orage du système de collecte de la ville de Valence entre l'année 2013 et 2018, d'après les bilans annuels (Valence Romans Agglo 2013b, 2014, 2015, 2016, 2017, 2018).

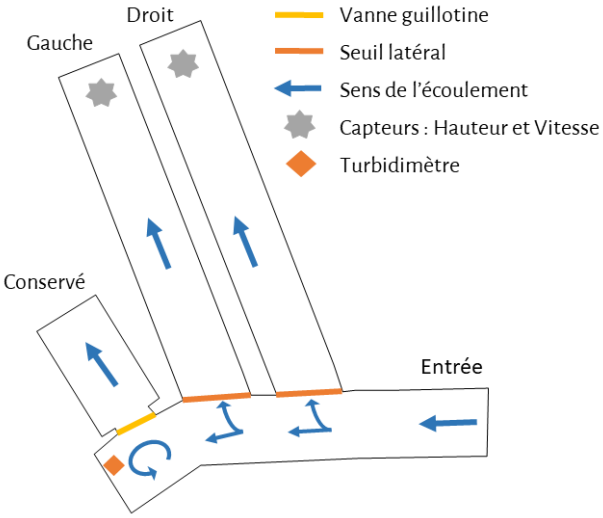
Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2020LYSEI083/these.pdf
© [A. Claro Barreto], [2020], INSA Lyon, tous droits réservés

2.2.2 Le déversoir d'orage « Gambetta »

Le déversoir d'orage (DO) « Gambetta » correspond à un déversoir latéral géré à l'aval par une vanne guillotine, voir Fig. 2.1. La géométrie et le principe de fonctionnement hydraulique en temps sec et temps de pluie sont présentés ci-dessous.



(a) Schéma 3D



(b) Schéma 2D

Figure 2.1 – Schémas 2D (Fig. 2.1b) et 3D (Fig. 2.1b) du déversoir d'orage Gambetta d'après le relevé topographique 3D.

2.2.2.1 Le bassin versant

Le bassin versant à l'amont du déversoir d'orage « Gambetta » (Fig. 2.2) est de type mixte (i.e. résidentiel et industriel) avec réseau de collecte uniquement unitaire. Ce bassin versant dispose d'une surface de 463 ha avec un taux d'imperméabilisation d'environ 40 %. Le nombre d'équivalent habitants est égal à 41 500, ce qui correspond à 24 % du système de collecte de la ville de Valence.

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2020LYSEI083/these.pdf
© [A. Claro Barreto], [2020], INSA Lyon, tous droits réservés

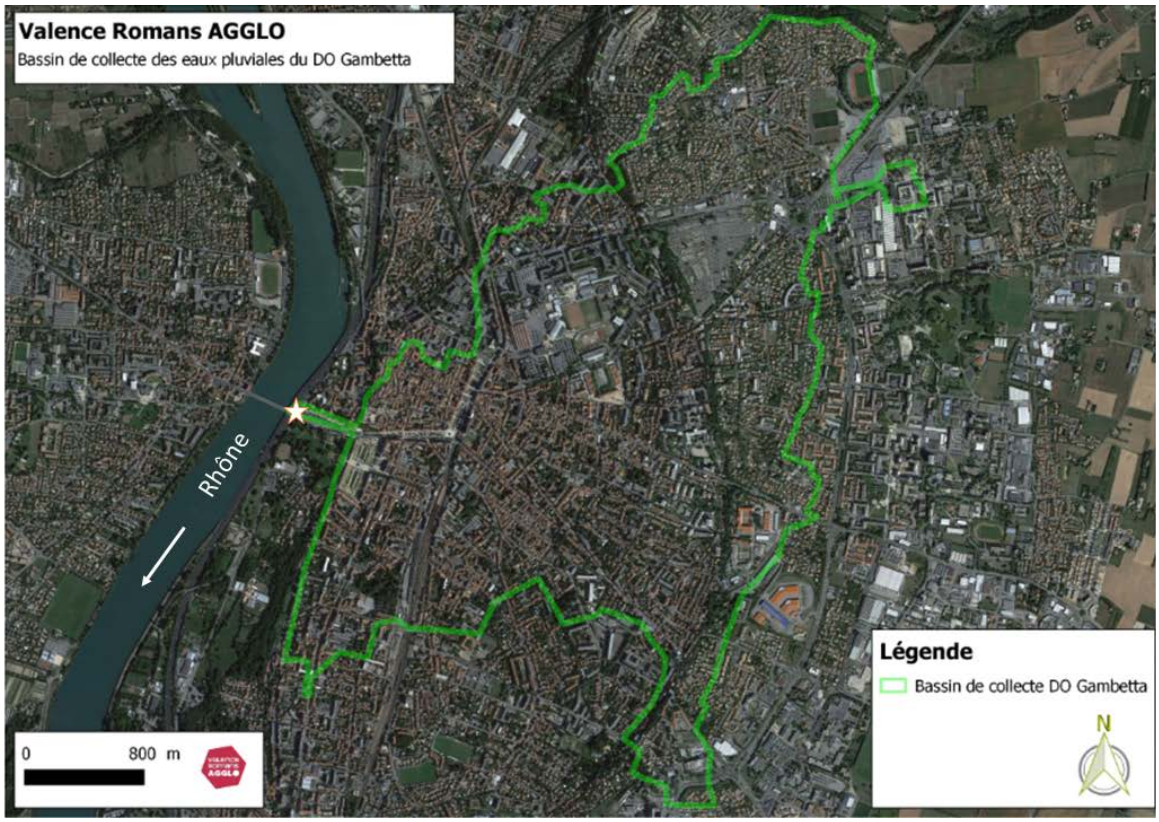


Figure 2.2 – Bassin versant du déversoir d'orage « Gambetta ». L'étoile blanche correspond au déversoir d'orage « Gambetta ».

2.2.2.2 La géométrie

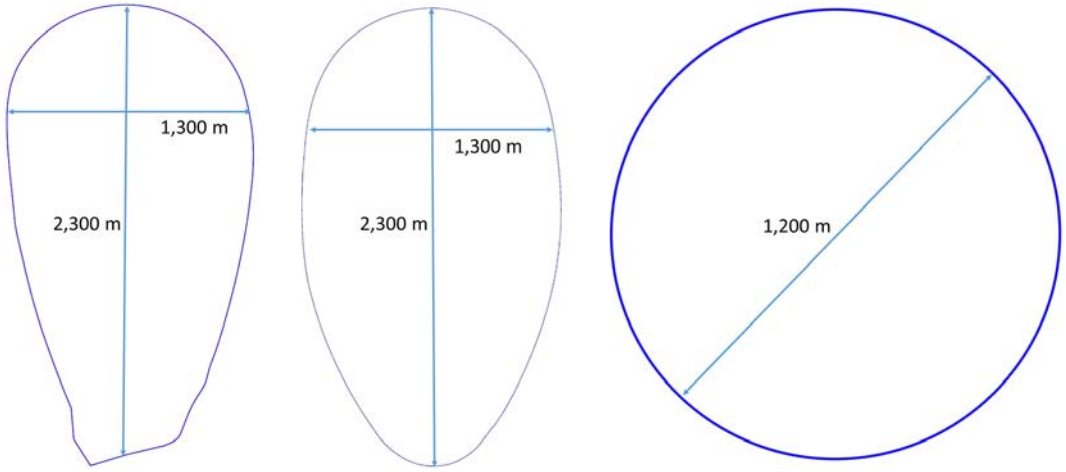
La géométrie du DO « Gambetta » est obtenue à l'aide d'un relevé topographique haute densité par scanner laser 3D, étude réalisée par un prestataire externe. Le relevé laser n'a pas permis d'obtenir le fond de l'ensemble de l'ouvrage parce que l'ouvrage collectait les eaux usées de temps sec lors des mesures *in situ*. La possibilité de mesurer dans une seconde phase le radier par lasergrammétrie a été abandonnée, car les conditions *in situ* rendent très couteux, voire impossible, l'assèchement de l'ouvrage pendant le temps nécessaire au relevé. Le fond de l'ouvrage entre l'entrée jusqu'aux conduites de déversement est ainsi supposé similaire que le fond d'une section transversale à l'entrée relevée par le prestataire externe. Le fond de la chambre du déversoir d'orage au niveau de la vanne guillotine est estimé lors d'une visite *in situ* dans le but de vérifier l'état du radier, il a été constaté que le radier est plat.

Le géométrie 3D, issue du relevé laser et de l'estimation *in situ*, est assemblée sous le logiciel ANSYS ICEM CFD™ (version 16.2) et présentée dans la Fig. 2.1a. Une vue du plan (schéma 2D) de la géométrie du DO « Gambetta » est présentée dans la Fig. 2.1b.

Les sections transversales des conduites d'entrée, sortie et déversement correspondent aux Figs. 2.3a-2.3b-2.3c, respectivement. Le canal ovoïde à l'entrée du DO (Fig. 2.3a) possède une pente moyenne $I = 1,66\%$. Le débit « Conservé » D_C est collecté dans une conduite circulaire avec banquette mais celle-ci a été simplifiée par une section ovoïde comme présenté dans la Fig. 2.3b. Cette simplification est réalisée parce que l'écoulement à l'aval de la vanne guillotine n'influence pas le comportement dans la chambre du DO. Les débits déversés « Gauche » et « Droit » sont collectés par des conduites circulaires de diamètre nominal (DN) 1200 mm ; la pente respective de chacune de ces conduites est égale à 3.13% et 2.3%.

La hauteur du seuil latéral de la conduite « Gauche » varie entre 1.377 m à l'amont et 1.545 m à l'aval. La hauteur du seuil latéral de la conduite « Droit » varie entre 1.314 m à l'amont et 1.347 m à l'aval. L'inclinaison des seuils latéraux par rapport à la verticale est égale à zéro. La variation de la hauteur du seuil des deux conduites est principalement due à la pente de la chambre du déversement. La différence de

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2020LYSEI083/these.pdf
© [A. Claro Barreto], [2020], INSA Lyon, tous droits réservés



(a) Entrée (b) Sortie vers la STEP (c) Conduite de déversement

Figure 2.3 – Les sections transversales du déversoir d'orage « Gambetta ».

hauteur du seuil « Gauche » d'environ 14 cm est due au changement de section ovoïde avec banquette en rectangulaire (voir Fig. 2.4). La longueur des seuils latéraux « Gauche » et « Droit » est 0.859 m et 0.928 m, respectivement.

La vanne guillotine localisée à l'aval de la chambre du déversoir d'orage permet de réguler le débit envoyé à la station d'épuration des eaux usées (STEP) située à l'aval. Cette vanne guillotine est montée de telle sorte que l'eau ne peux passer que par en-dessous dessous, quel que soit le niveau d'eau dans la chambre (pas de déversement par au-dessus. Elle assure toujours un débit vers la STEP, tout en le limitant en temps de pluie. L'ouverture de cette vanne est égale à $0.400\ m$ par rapport au radier. Le système mécanique existant permet uniquement de fixer cette ouverture. On ne dispose d'autres informations sur le dimensionnement de cette vanne, à savoir les études hydrauliques des débits minimal et maximal que ce déversoir d'orage est censé d'envoyer à la STEP en temps de pluie et temps sec.

Les deux échelles et la plateforme présentées dans la Fig. 2.1a permettent d'accéder au DO en sécurité. En effet, c'est une zone à forte risque de chute parce que (i) la paroi de la chambre est en béton très lisse et (ii) la pente du radier au niveau du radier de la conduite semi-ovoïde est forte ($I \approx 3\%$). L'échelle et la plateforme situées au niveau des conduites de décharge « Gauche » et « Droit » permettent d'accéder à ces dernières en temps sec. L'échelle à côté de la vanne guillotine, localisée à l'aval de la chambre du DO, sert de (i) chemin d'accès et (ii) support pour une sonde de turbidité *in situ*.

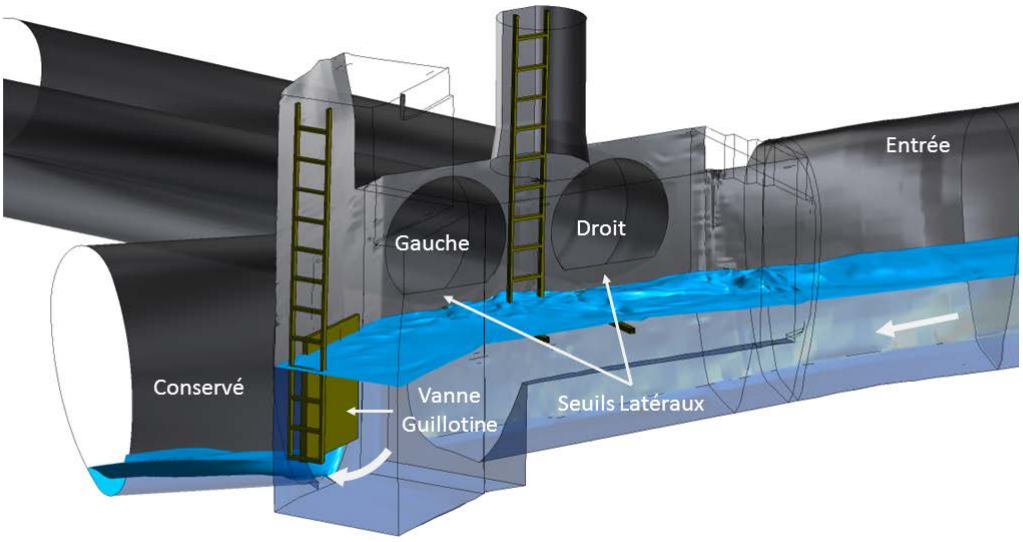
La sonde de turbidité *in situ* est utilisée par l'Unité de Diagnostic Permanent (du service d'Assainissement de Valence Romans Agglo) pour estimer (en interne) la charge en matières en suspension (MES) et en demande chimique en oxygène (DCO) qui transitent dans le DO en temps sec et temps de pluie. A noter que les charges en MES et en DCO sont calculées à l'aide des relations empiriques *in situ* non actualisées depuis l'année 2013 (Valence Romans Agglo 2013a).

2.2.2.3 Principe du fonctionnement hydraulique

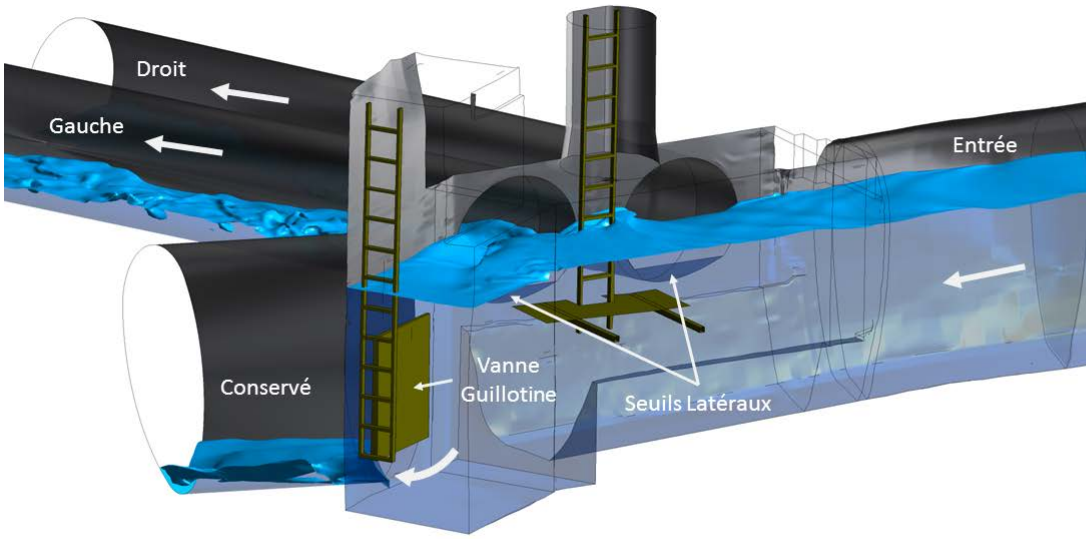
En temps sec, le fonctionnement hydraulique de l'ouvrage correspond à celui de la Fig. 2.4a. L'effluent accède la chambre du DO « Gambetta » par une conduite ovoïde (voir Fig. 2.3a). Le débit « Conservé » D_C est régulé par une vanne guillotine placée à l'aval de la chambre du DO (Fig. 2.4a). Le débit D_C, censé aller vers la station d'épuration des eaux usées (STEP), est véhiculé par une conduite circulaire avec banquette mais simplifiée par une section ovoïde (voir Fig. 2.3b).

En temps de pluie, si la hauteur d'eau dans la chambre du DO dépasse les seuils latéraux « Gauche » et/ou « Droit », une partie du volume est déversée vers les conduites circulaires comme présenté sur la Fig. 2.4b.

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2020LYSEI083/these.pdf
© [A. Claro Barreto], [2020], INSA Lyon, tous droits réservés



(a) Temps sec - $D_E = 2000\,m^3/h$



(b) Temps pluie - $D_E = 7000\,m^3/h$

Figure 2.4 – Schéma 3D du fonctionnement hydraulique du déversoir d'orage « Gambetta » en temps sec (2.4a) et temps de pluie (2.4b).

2.2.3 L'autosurveillance du déversoir d'orage « Gambetta »

Le débit déversé du DO « Gambetta » doit être mesuré parce que cet ouvrage (i) déverse plus de 20 fois par an et (ii) la charge à l'amont du DO est supérieure à 600 Kg de DBO_5 par jour (Arrêté du 24 août 2017). Depuis l'année 2009, le volume déversé par temps de pluie est calculé à l'aide du couplage de deux capteurs : (i) un capteur de hauteur d'eau et (ii) un capteur de vitesse. Le capteur de hauteur d'eau permet d'estimer la surface mouillée dans la section transversale de mesure. Le capteur de vitesse permet de mesurer la vitesse moyenne de l'écoulement. Le principe de mesure et la précision de mesure des capteurs *in situ* sont présentés dans le Tableau 2.2. Les capteurs *in situ* de hauteur et vitesse se trouvent à $13.5\,m$ et à $11.7\,m$ à l'aval du seuil latéral des conduites de décharge « Gauche » et « Droit », respectivement.

L'unité du diagnostic permanent suit depuis 2011 le débit d'entrée au DO « Gambetta » grâce au même couple de capteurs de hauteur d'eau et vitesse. Le point de mesure se situe à $61.87\,m$ à l'amont de la chambre du DO (selon relevé topographique 2D du système de collecte). Le capteur de vitesse a été installé à l'aide d'une plaque inox qui suit la forme inférieure du radier de la conduite ovoïde. Le capteur de

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2020LYSEI083/these.pdf
© [A. Claro Barreto], [2020], INSA Lyon, tous droits réservés

hauteur d'eau est situé à environ 2 m à l'amont du capteur de vitesse. Le Tableau 2.2 présente le principe de mesure et la précision de mesure des capteurs installés dans une conduite à l'amont du DO.

Référence	Type capteur	Fabricant/Produit	Précision*
Amont			
AM-H	Hauteur (US)	Nivus P-6	$\pm 0.25\%$
AM-V	Vitesse (DP)	Nivus OCR-DEKB52000	$\pm 1.00\%$
DO Gauche			
GG-H	Hauteur (US)	Nivus i-3	max$[\pm 0.25\%, 6\,mm]$
GG-V	Vitesse (DP)	Nivus OCR-DEKB52000	$\pm 1.00\%$
DO Droit			
GD-H	Hauteur (US)	Nivus P-3	max$[\pm 0.25\%, 2\,mm]$
GD-V	Vitesse (DP)	Nivus OCR-DEKB52000	$\pm 1.00\%$

Tableau 2.2 – Précision des capteurs installés dans le déversoir d'orage « Gambetta ». * : la précision donnée par le constructeur ; US : ultrason ; DP : Doppler.

2.2.4 La méthodologie de pré-traitement des données *in situ*

L'ensemble des séries temporelles de données *in situ* sur les différents points de mesure du DO « Gambetta » doit être prétraité avant la pré-étude hydraulique. Les séries temporelles brutes des mesures *in situ* sont prétraitées selon la procédure ci-dessous afin de les préparer pour l'extraction des événements pluvieux dans la section 2.2.5. Chaque point de mesure dispose de trois séries temporelles : (i) la hauteur d'eau H, (ii) la vitesse moyenne V et (iii) le débit calculé D (à partir des deux précédentes). Les étapes 1, 2.1 et 3 sont appliquées au point de mesure de la conduite amont. Les étapes 1, 2.2 et 3 sont appliquées aux points de mesure des conduites de décharge. L'étape 2.1 n'est pas appliquée aux conduites de décharge car $H = 0$ et $V = 0$ en temps sec. Toute mesure *in situ* avant l'année 2011 dans les conduites de décharge n'est pas prise en compte car on ne dispose pas des mesures dans la conduite amont du DO « Gambetta ».

Étape 1 : Éliminer toute date qui ne figure pas dans toutes les trois séries temporelles.

Étape 2.1 : Éliminer toute date pour laquelle $H = 0$ ou $V = 0$.

Étape 2.2 : Éliminer toute date pour laquelle $V = 0$ et $H \geq H_{\text{min}}$.

Étape 3 : Éliminer toute date pour laquelle $H < H_{\text{min}}$ selon le Tableau 2.3.

	Point de mesure		
	Amont	*Gauche*	*Droit*
Minimum $[H_{\text{min}}]$	0.300 m	0.125 m	0.125 m
Maximum	6.000 m	3.000 m	3.000 m

Tableau 2.3 – La plage de mesure des sondes ultrasons pour la hauteur d'eau selon le point de mesure.

Les étapes 1 et 2 permettent de nettoyer les données *in situ* et d'obtenir l'ensemble des données du temps sec et temps de pluie. L'application de l'étape 3 permet d'obtenir le pourcentage des données relatives au temps de pluie pour les conduites de décharge. Concernant la conduite amont, le pourcentage obtenu correspond à un mélange du temps sec et du temps de pluie car il est observé *a posteriori* que la hauteur d'eau dans les conduites de décharge est $H_{\text{min}}/2 \leq H_{\text{DO}} \leq H_{\text{min}}$ (H_{min} selon le Tableau 2.3) si la hauteur d'eau dans la conduite amont est $H_{\text{Amont}} \geq 0.400\,m$.

Les pourcentages de données retenues, après application de la méthodologie de pré-traitement, pour les trois points de mesure, dépendent du pas de temps d'enregistrement en temps sec et de la durée et

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2020LYSEI083/these.pdf
© [A. Claro Barreto], [2020], INSA Lyon, tous droits réservés

de la fréquence des événements pluvieux à l'échelle annuelle. Une estimation du pourcentage théorique du temps pluie à l'échelle annuelle est obtenue pour l'amont et le déversement à l'aide des Eqs. 2.2 et de 2.3, respectivement. Ces équations sont définies pour une fréquence de déversement hebdomadaire et un pas de temps d'enregistrement en temps de pluie de 5 minutes (i.e. 12 mesures par heure). La fréquence choisie, 52 jours/année, correspond à la fréquence empirique moyenne de déversement (Valence Romans Agglo 2017). La durée du déversement T_D pour chaque événement pluvieux peut varier entre 0 à 24 heures. On n'a pas considéré de déversements supérieurs à 24 heures en référence à la définition règlementaire où c'est le nombre de jours de déversement qui est comptabilisé (Commentaire Technique de l'Arrêté du 21 juillet 2015).

Les pourcentages théoriques du temps de pluie à l'échelle annuelle pour l'amont PT_{Amont} (Eq. 2.2) et le déversement PT_{DO} (Eq. 2.3) sont égaux au rapport entre le nombre de mesures en temps de pluie et le nombre total de mesures (Eq. 2.1).

$$PT \equiv \frac{\text{No. mesures du déversement}}{\text{No. mesures à l'année}} \tag{2.1}$$

$$PT_{\text{Amont}} = \frac{52\,\text{j/an} \times T_D}{365\,\text{j/an} \times 24\,\text{h}} \tag{2.2}$$

$$PT_{\text{DO}} = \frac{52\,\text{j/an} \times T_D \times 12\text{h}^{-1} + 52\,\text{j/an} \times (24\,\text{h} - T_D) \times 1\text{h}^{-1}}{52\,\text{j/an} \times T_D \times 12\text{h}^{-1} + 52\,\text{j/an} \times (24\,\text{h} - T_D) \times 1\text{h}^{-1} + (365 - 52)\,\text{j/an} \times 24\,\text{h} \times 1\text{h}^{-1}} \tag{2.3}$$

Concernant l'amont, le nombre de mesures à l'amont lié au déversement est égal à la fréquence moyenne de déversement ($52\,\text{j/an}$) fois la durée de déversement T_D.

Concernant le déversement, il est nécessaire de prendre en compte la fréquence de mesure en temps sec (i.e. 1 mesure par heure) lors du calcul des nombres de mesures du temps de pluie et total. Le nombre de mesures en temps de pluie pour le déversement est égal au nombre de mesures du temps de pluie « effectif » ($52\,\text{j/an} \times T_D \times 12\text{h}^{-1}$ - fréquence de 12 mesures par heure) plus le nombres de mesures en temps sec à « l'intérieur » de ces journées de temps de pluie « effectif » ($52\,\text{j/an} \times (24\,\text{h} - T_D) \times 1\text{h}^{-1}$ - fréquence de 1 mesure par heure). Le nombre total de mesures à l'année pour le déversement est égal au nombre de mesures du temps de pluie (i.e. le numérateur de l'Eq. 2.3) plus le nombres de mesures en temps sec ($(365 - 52)\,\text{j/an} \times 24\,\text{h} \times 1\text{h}^{-1}$ - fréquence de 1 mesure par heure).

Le Tableau 2.4 présente les pourcentages théoriques des données retenues en fonction de la durée moyenne du déversement T_D et du point de mesure. Le pourcentage des données du déversement PT_{DO} est toujours supérieur à celui de l'amont PT_{Amont} car on dispose d'un plus grand nombre de mesures collectées pour l'amont. Ceci est dû au pas de temps d'enregistrement en temps sec qui est égal à 5 min pour l'amont tandis qu'il est égal à 1 heure pour le déversement.

Durée du déversement	Point de mesure	
	« Amont »	« Gauche » - « Droit »
3 h	1,8%	28,3%
1 h	0,6%	19,5%
30 min	0,3%	17,0%

Tableau 2.4 – Pourcentage théorique des données retenues pour les points de mesure « Amont », « Gauche » et « Droit » en fonction du temps de déversement pour une fréquence de déversement moyenne hebdomadaire.

2.2.5 La méthodologie d'extraction d'un événement pluvieux

Une fois les séries temporelles de la hauteur d'eau et la vitesse *in situ* sont prétraitées, les différents événements pluvieux sont obtenus selon la méthodologie ci-dessous. La méthode d'extraction des évé-

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2020LYSEI083/these.pdf
© [A. Claro Barreto], [2020], INSA Lyon, tous droits réservés

nements pluvieux d'une série temporelle de données *in situ* est basée sur la pluviométrie et la hauteur d'eau dans les sections de mesure du DO « Gambetta ». Les différentes étapes de cette méthode, présentées ci-dessous, se basent sur les travaux de recherche effectués dans l'équipe notamment dans le cadre de la thèse de Marjolaine Métadier (2011) (voir également Marjolaine Métadier et Bertrand-Krajewski 2011).

La hauteur d'eau correspond à celle mesurée dans les sections de mesure « Amont », « Gauche » et « Droit ». La hauteur d'eau est mesurée avec un pas de temps de 5 min en temps de pluie. En temps sec, le pas d'enregistrement des données dans les conduites de déversement est égal à 1 heure.

Le pluviomètre le plus représentatif du bassin versant du déversoir d'orage « Gambetta » est présenté dans la Fig. 2.5. La distance entre ce pluviomètre et le DO « Gambetta » est d'environ 3,47 km. Le dispositif installé, nommé « Belle Meunière », correspond à un pluviomètre à augets basculants avec pas de mesure et d'enregistrement égal à 6 minutes.

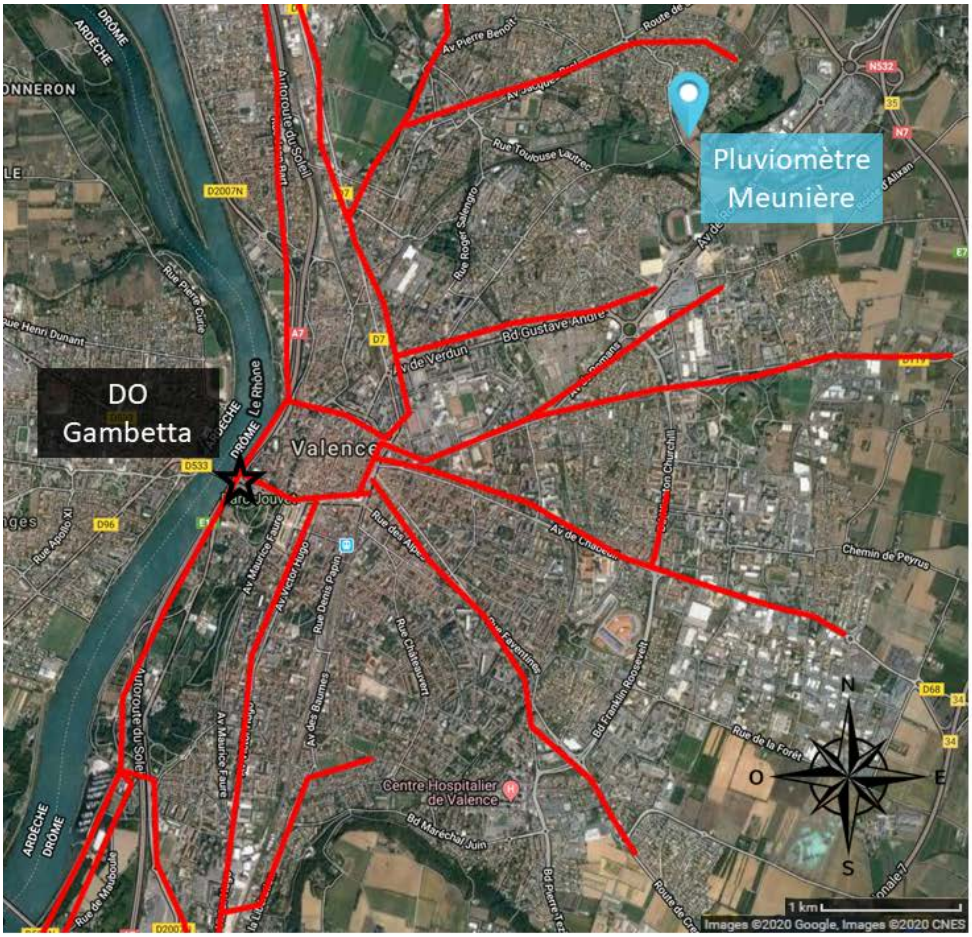


Figure 2.5 – La localisation du pluviomètre « Belle Meunière » (en bleu) dans le système de collecte de la ville de Valence. Les lignes rouges représentent les principaux collecteurs du système de collecte et l'étoile noire correspond au déversoir d'orage « Gambetta ».

L'étape 3 de la méthodologie de pré-traitement n'est pas appliquée au point de mesure « Amont » afin de pouvoir estimer le début et la fin d'un événement pluvieux à l'aide du profil de temps sec (Étape 2). Il est observé que le temps sec dans la conduite amont correspond à une hauteur $H_{\text{Amont}} \leq 0,300\,m$.

1. Un jour de temps de pluie est celui pour lequel la hauteur totale précipitée $H_{\text{p}} > 0\,mm$ sur une fenêtre de 24 heures. Tous les autres jours sont définis comme du temps sec.

2. Calculer le profil de temps sec par saison et par année afin de prendre en compte l'évolution du bassin versant d'une année à l'autre et entre saisons. Le profil est définit par la hauteur d'eau médiane

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2020LYSEI083/these.pdf
© [A. Claro Barreto], [2020], INSA Lyon, tous droits réservés

dans la conduite amont du DO. L'incertitude de la hauteur d'eau est définie par les percentiles à 5% et 95%.

3. Pour chaque jour de temps de pluie de l'étape 1 retenir ceux pour lesquels la mesure de la hauteur d'eau H_{Amont} existe dans la fenêtre du temps de t_{I_0} à $t_{I_d} + 30\,min$, avec t_{I_0} la date de la première intensité $I_p > 0\,mm/h$ et t_{I_d} la date de la dernière intensité $I_p > 0\,mm/h$.

4. Éliminer tous les événements pluvieux, obtenus dans l'étape 3, pour lesquels la durée de la mesure de la hauteur d'eau H_{Amont} est inférieure à la durée $t_{I_d} - t_{I_0}$, car ces événements pluvieux ont été mesurés de manière incomplète.

5. Pour chaque événement pluvieux retenue, le diviser si l'intervalle du temps entre deux hauteurs d'eau $H_{\text{Amont}} \geq H_{\text{TS}^{95\%}}$ est supérieur à 4 heures. Le temps sec correspond à $H_{\text{Amont}} < H_{\text{TS}^{95\%}}$, avec $H_{\text{TS}^{95\%}}$ le percentile à 95% de la hauteur d'eau du profil de temps sec calculé dans l'étape 2.

6. Éliminer tous les événements pluvieux pour lesquels la hauteur d'eau H_{Amont} est toujours inférieure à $H_{\text{TS}^{95\%}}$ dans l'intervalle $[t_{I_0}; t_{I_d} + 4h]$.

7. Éliminer tous les événements pluvieux pour lesquels H_{DO} est toujours inférieure à $H_{\text{min}}/2$, avec H_{DO} la hauteur d'eau de l'une des conduites de déversement et H_{min} la gamme basse de la sonde de hauteur d'eau *in situ* (Tableau 2.2).

2.2.6 Pré-étude du fonctionnement hydraulique global

Après le pré-traitement (Section 2.2.4) et l'obtention du temps de pluie (Section 2.2.5) des séries temporelles *in situ*, les sections de mesure du déversoir d'orage « Gambetta » sont pré-étudiées du point de vue hydraulique.

2.2.6.1 La conduite amont du DO « Gambetta »

Le fonctionnement hydraulique de l'entrée du DO « Gambetta » est basé sur les données *in situ* et la géométrie de la conduite à l'amont du DO. La distance entre l'entrée du DO et le point de mesure à l'amont du DO est d'environ 61.9 m, voir Fig. 2.6. Les deux tronçons qui constituent la conduite amont du DO ont une pente « forte », entre 1.32% et 2.09%, pour une conduite ovoïde en béton. L'écoulement au niveau du point de mesure à l'amont du DO « Gambetta », l'étoile rouge au sud-est de la Fig. 2.6, est censé être torrentiel sauf si un ressaut hydraulique remonte jusqu'à ce niveau. Le ressaut hydraulique serait créé par la vanne guillotine qui contrôle le débit « Conservé » (flèche verte de la Fig. 2.6).

La ligne d'eau entre le point de mesure à l'amont et l'entrée du DO « Gambetta » est simulée à l'aide de la courbe de remous (voir Section 2.2.7). Ce modèle 1D permettra de vérifier si le point de mesure de la conduite amont n'est pas influencé par la vanne guillotine à l'aval de la chambre du DO.

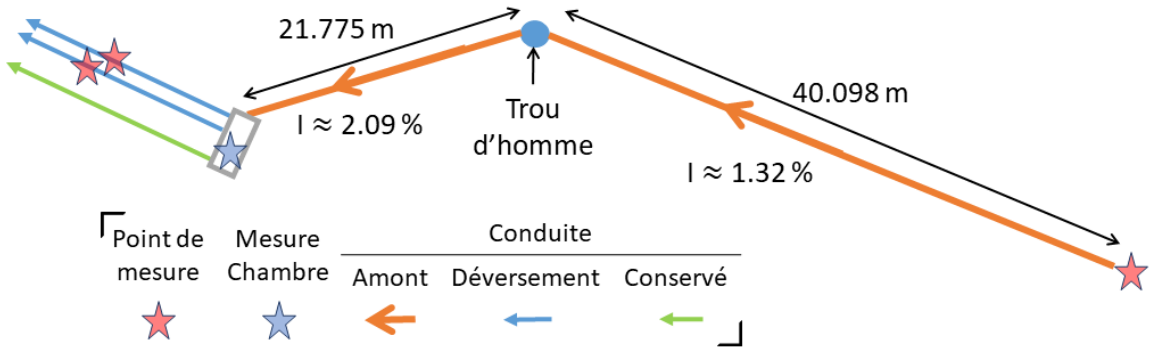


Figure 2.6 – Le schéma 2D de la conduite amont du déversoir d'orage « Gambetta ».

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2020LYSEI083/these.pdf
© [A. Claro Barreto], [2020], INSA Lyon, tous droits réservés

La condition amont de la conduite est définie par la formule de Gauckler-Manning-Strickler (GMS - Eq. 2.4) qui permet de calculer le débit moyen $\overline{D}$ dans une section de contrôle si la hauteur d'eau x au niveau de la section transversale est égale à la hauteur normale H_N.

$$\overline{D} = f(K_s, A, R_h, I) = K_s\, A(x)\, R_h(x)^{2/3}\, I^{1/2}, \tag{2.4}$$

avec K_s le coefficient de rugosité de Strickler ($m^{1/3}/s$), I la pente géométrique de la conduite, $A(x)$ la section mouillée et $R_h(x)$ le rayon hydraulique de la section de contrôle.

La surface mouillé $A(x)$ et le rayon hydraulique $R_h(x)$ de la conduite ovoïde amont sont approximés par un polynôme d'ordre 4 qui est en fonction de la hauteur d'eau H_{Amont}. $A(x)$ et $R_h(x)$ sont calculés à l'aide des Eqs. 2.5 et 2.6, respectivement. Les incertitudes-type composées $u_c\left(A(x)\right)$ et $u_c\left(R_h(x)\right)$ sont calculés à l'aide de la méthode GUM décrite dans la Section 4.2.5.

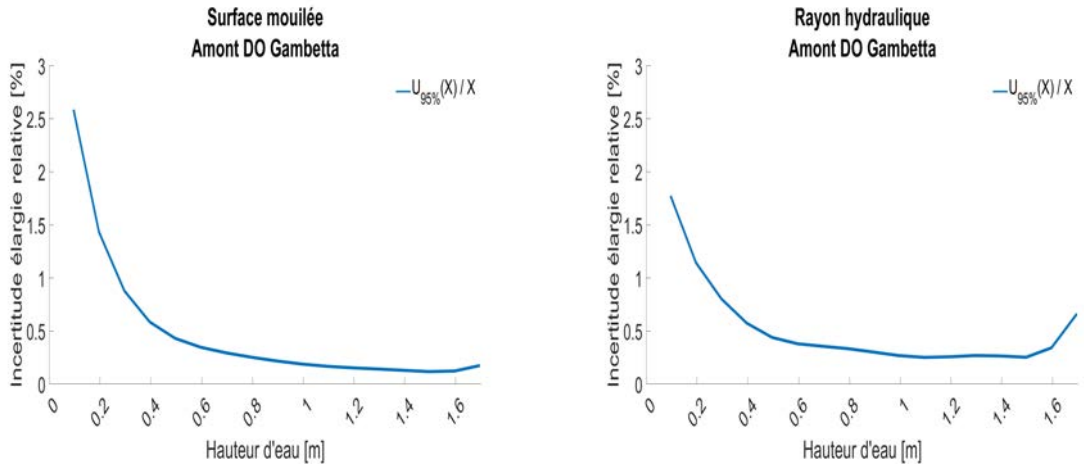
$$A_{\text{Amont}} = p_{1\text{AA}} * H_{\text{Amont}}{}^4 + p_{2\text{AA}} * H_{\text{Amont}}{}^3 + p_{3\text{AA}} * H_{\text{Amont}}{}^2 + p_{4\text{AA}} * H_{\text{Amont}} \tag{2.5}$$

$$p_{1\text{AA}} = 0.04473 \pm 0.02717\, m^{-2} \qquad p_{2\text{AA}} = -0.3531 \pm 0.0686\, m^{-1}$$
$$p_{3\text{AA}} = 0.9369 \pm 0.0680 \qquad p_{4\text{AA}} = 0.2703 \pm 0.0210\, m$$

$$R_{h_{\text{Amont}}} = p_{1\text{AR}} * H_{\text{Amont}}{}^4 + p_{2\text{AR}} * H_{\text{Amont}}{}^3 + p_{3\text{AR}} * H_{\text{Amont}}{}^2 + p_{4\text{AR}} * H_{\text{Amont}} \tag{2.6}$$

$$p_{1\text{AR}} = -0.07158 \pm 0.0234\, m^{-3} \qquad p_{2\text{AR}} = 0.2852 \pm 0.0740\, m^{-2}$$
$$p_{3\text{AR}} = -0.4951 \pm 0,0734\, m^{-1} \qquad p_{4\text{AR}} = 0.6366 \pm 0.0227$$

La Fig. 2.7 présente l'incertitude-type composée relative ($u_c(X)/X$) pour la surface mouillée (Fig. 2.7a) et le rayon hydraulique (Fig. 2.7b). Il est observé que $u_c(X)/X$ de la surface mouillée ($A(x)$) et du rayon hydraulique ($R_h(x)$), dans l'intervalle $H_{\text{Amont}} \in [0.05 - 1.70]$, est toujours inférieure à 2.0% et 1.5%, respectivement.



(a) Surface mouillée - A (b) Rayon hydraulique - R_h

Figure 2.7 – L'incertitude composée relative $\left(u_c(X)/X\right)$ de la surface mouillé A et le rayon hydraulique R_h en fonction de la hauteur d'eau dans la section de contrôle à l'amont du DO « Gambetta » (H_{Amont}).

2.2.6.2 La hauteur d'eau *in situ* dans la chambre du DO « Gambetta »

L'écoulement dans la chambre de l'ouvrage est mesuré à l'aide d'un capteur de hauteur d'eau. Ce capteur a été installé provisoirement dans la chambre du déversoir d'orage (DO) « Gambetta » afin de disposer

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2020LYSEI083/these.pdf
© [A. Claro Barreto], [2020], INSA Lyon, tous droits réservés

de la condition aval de la conduite amont (étoile bleue - Fig. 2.6). L'emplacement de la sonde de hauteur d'eau est présenté dans la Fig. 2.8. La hauteur d'eau *in situ*, H_{chambre} (cube orange - Fig. 2.8), est mesurée par une sonde à ultrasons IJINUS LNU06V03-80. La précision de mesure est égale à $\pm 0.2\%\, H_{\text{chambre}}$ jusqu'à 2.5 m et 5 mm au-delà (IJINUS 2017). H_{chambre} est enregistrée avec un pas de temps de 5 minutes. Les données collectées correspondent à la période des mois de Février à Avril 2019.

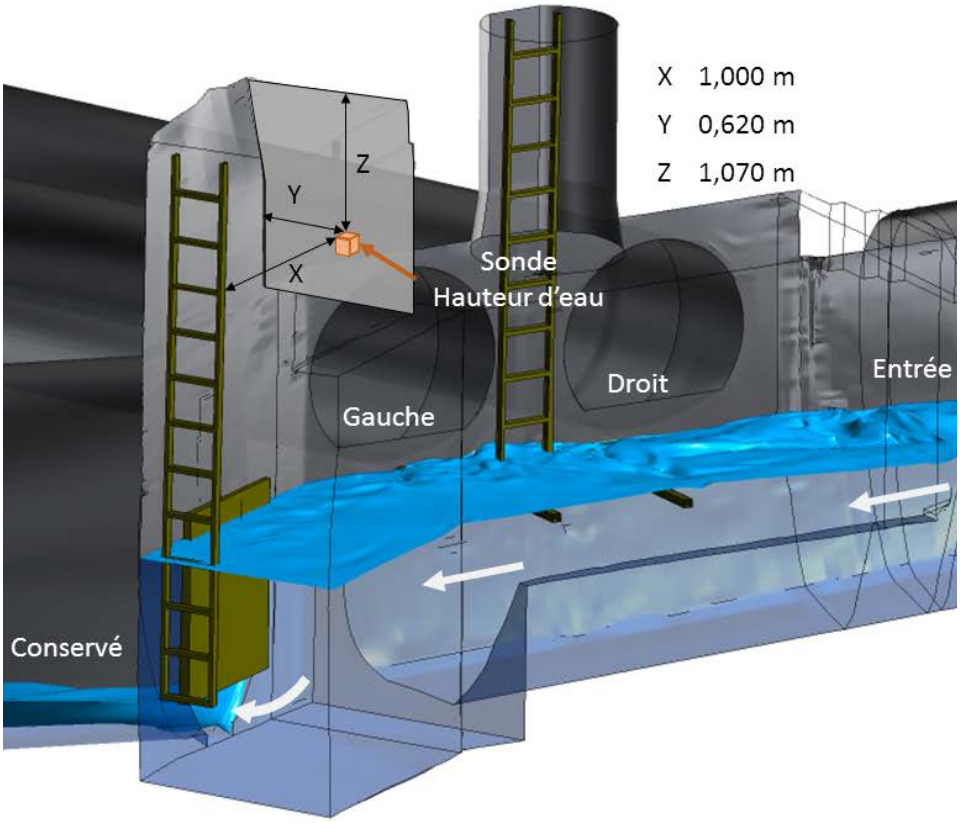


Figure 2.8 – Schéma 3D de l'emplacement de la sonde de hauteur d'eau dans la chambre du déversoir d'orage « Gambetta »

La Fig. 2.9 présente la hauteur d'eau dans la chambre du DO H_{chambre} (cube orange - Fig. 2.8 et étoile bleue - Fig. 2.6) en fonction de la hauteur d'eau dans la conduite amont du DO H_{Amont} (étoile rouge au sud-est de la Fig. 2.6).

2.2.6.3 Le système de décharge du DO « Gambetta »

Le fonctionnement hydraulique du système de décharge du DO « Gambetta » est étudié à l'aide d'une approche numérique 1D. La hauteur d'eau dans le système de décharge du déversoir d'orage « Gambetta » est simulée en 1D par calcul de la courbe de remous (voir Section 2.2.7). Cette étude 1D permet de déterminer le type d'écoulement au niveau des sections de mesure dans les conduites de décharge « Gauche » et « Droit ». La géométrie du système 1D simulé prend en compte la section transversale et la pente de tous les éléments constituant le système de décharge du DO « Gambetta » (Fig. 2.10). La pente est mesurée à l'aide d'un inclinomètre électronique avec une précision de 0.1%.

2.2.7 La courbe de remous

La courbe de remous est utilisée pour calculer la hauteur d'eau dans les conduites amont et de décharge du déversoir d'orage « Gambetta ».

La hauteur d'eau dans un canal prismatique est calculée à l'aide de la courbe de remous (Eq. 2.7).

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2020LYSEI083/these.pdf
© [A. Claro Barreto], [2020], INSA Lyon, tous droits réservés

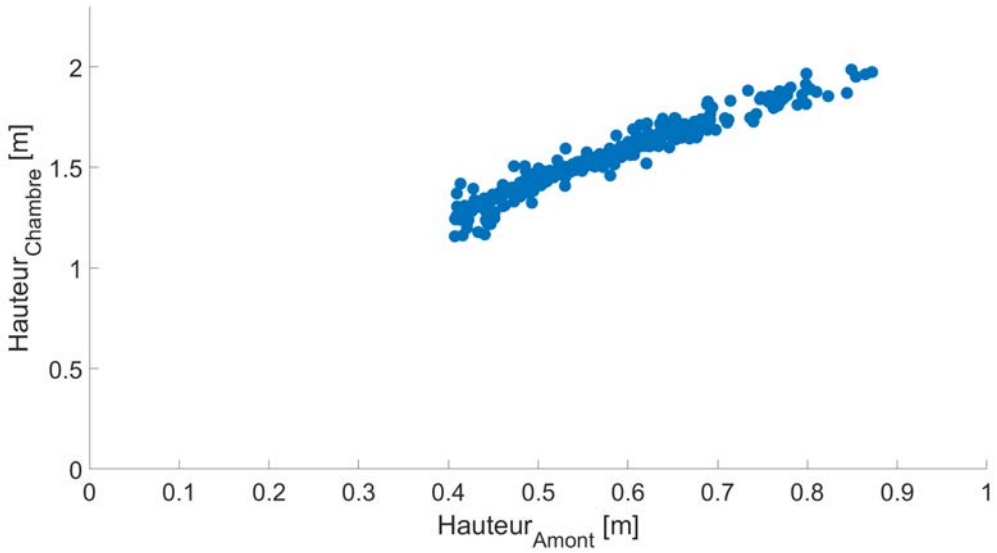


Figure 2.9 – La hauteur d'eau dans la chambre du DO (H_{chambre}) en fonction de la hauteur d'eau dans la conduite amont du DO (H_{Amont}) en temps de pluie.

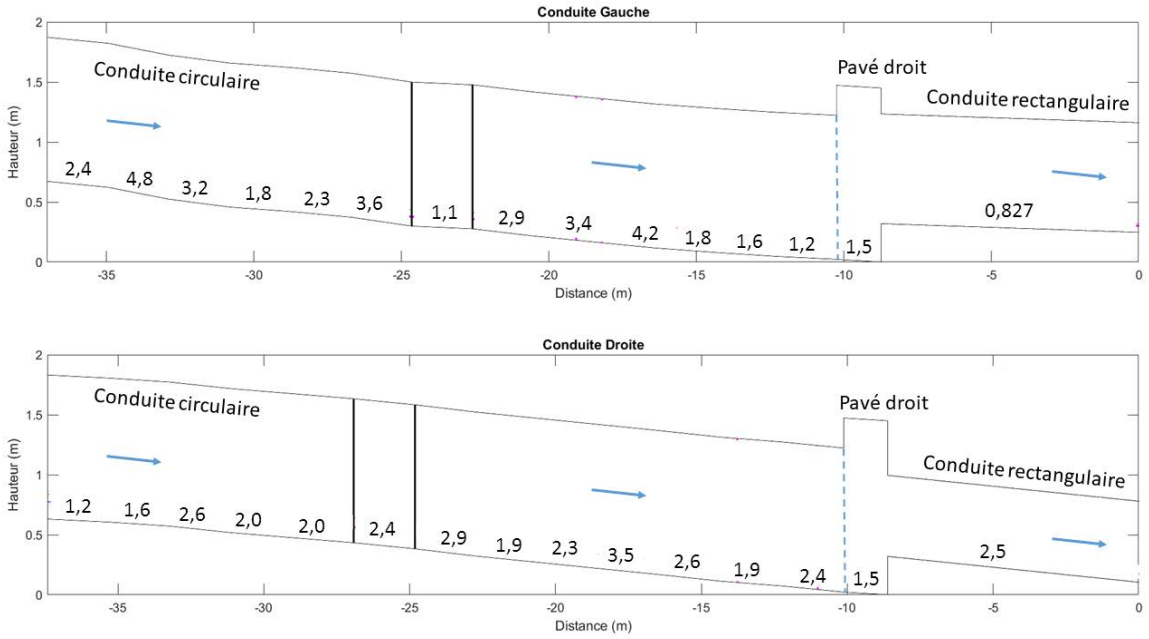


Figure 2.10 – Schéma 2D de la géométrie des conduites de décharges « Gauche » (haut) et « Droit » (bas) du déversoir d'orage « Gambetta ». Les nombres correspondent à la pente du radier en %. Les lignes verticales noires correspondent à l'emplacement des sondes de vitesse et hauteur d'eau.

$$\frac{dh}{dx} = \frac{I - S_f}{1 - \text{Fr}^2} \tag{2.7}$$

avec I la pente du radier, S_f la pente de frottement, Fr le nombre de Froude qui correspond au rapport entre la force d'inertie et la force de pesanteur. S_f est approximée en supposant un écoulement permanent et uniforme (calculée par exemple à l'aide de la formule de Gauckler-Manning-Strickler) sur la distance dx, selon l'hypothèse classique en écoulements graduellement variés. Le nombre de Froude Fr est quant à lui calculé selon l'Eq. 2.8.

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2020LYSEI083/these.pdf
© [A. Claro Barreto], [2020], INSA Lyon, tous droits réservés

$$\mathrm{Fr}^2 = \frac{D^2}{g A^3(h)} \frac{dA(h)}{dh} \tag{2.8}$$

avec D le débit, $g = 9.806\, m/s^2$ l'accélération due à la gravité, $A(h)$ la surface mouillée pour la hauteur d'eau h.

Le coefficient de rugosité de Strickler K_s de conduites en béton est compris entre 70 et 90 $m^{1/3}/s$, d'après des vérifications *in situ*. La hauteur d'eau h dans le pavé droit (entre les lignes pointillées et le changement de hauteur - Fig. 2.10) est supposée être égale à la hauteur d'eau à l'entrée des conduites rectangulaires, car l'écoulement doit dépasser ce seuil avant de pouvoir être rejeté dans le milieu naturel. La hauteur d'eau h à la sortie des conduites rectangulaire correspond à une condition libre.

La localisation du ressaut hydraulique est définie par l'Eq. 2.9 (Chanson 2012) :

$$\frac{A(h_2)}{A(h_1)} = \frac{1}{2} \frac{\sqrt{\left(2 - \frac{B'}{B}\right)^2 + 8 \frac{B'/B}{B_1/B} \mathrm{Fr}_1^2} - \left(2 - \frac{B'}{B}\right)}{B'/B}, \tag{2.9}$$

avec h_1 et h_2 les hauteurs d'eau à l'amont et à l'aval du ressaut hydraulique, respectivement ; B_1 et Fr_1 la largeur au miroir et le nombre de Froude à l'amont du ressaut hydraulique. La largeur au miroir B est

$$B = \frac{A(h_2) - A(h_1)}{h_2 - h_1} \tag{2.10}$$

avec $A(h_2)$ et $A(h_1)$ les surfaces mouillées à l'amont et à l'aval du ressaut hydraulique, respectivement. La largeur au miroir B', liée à la force de pression nette $\rho_{\text{eau}} g(h_2 - h_1)$, est définie selon l'Eq. 2.11.

$$\int_{A(h_1)}^{A(h_2)} \int_{h_1}^{h_2} \rho_{\text{eau}} g(h_2 - y) dA = \frac{1}{2} \rho_{\text{eau}} g (h_2 - h_1)^2 B' \tag{2.11}$$

L'Eq. 2.9 est transcendante et elle est résolue par la méthode d'interpolation «fzero» du logiciel MATLAB, cette méthode est basée dans l'algorithme de T. Dekker (Brent 1973 ; Forsythe et al. 1977).

La longueur du ressaut hydraulique L_{ressaut} est définie empiriquement par l'Eq. 2.12 (Vazquez 2010).

$$5 < \frac{L_{\text{ressaut}}}{h_2 - h_1} < 7 \tag{2.12}$$

2.2.8 L'incertitude expérimentale des grandeurs géométriques et hydrauliques

Les incertitudes du débit déversé de chaque conduite de décharge et de la surface mouillée et du rayon hydraulique de la section amont sont estimées selon la méthode GUM (ISO/IEC Guide 98-1 2009). Cette méthode permet d'estimer l'écart-type $u_c(y)$ et l'incertitude élargie $U(y)$ de l'approximation par moindres carrés de la variable dépendante y (Eq. 2.13)

$$y = f(a_n, a_{n-1}, \cdots, a_0, x_m, x_{m-1}, \cdots, x_0), \tag{2.13}$$

avec a_i et x_j les coefficients et les variables «indépendantes» de la fonction f. Les variables «indépendantes» x_j peuvent être corrélées entre elles $r(x_i, x_i) \geq 0$. Les coefficients de la régression a_i ne sont pas corrélés aux variables «indépendantes» x_j. Le coefficient de corrélation linéaire $r(a_i, x)$ et la covariance $cov(a_i, x)$ sont égaux à zero (Eq. 2.14).

$$r(a_i, x) = 0 \iff cov(a_i, x) = 0 \tag{2.14}$$

La matrice de covariance des coefficients $\mathbf{K}_{a_i a_j}$ de la régression par moindres carrés est

$$\mathbf{K}_{a_i a_j} = s^2 \left(\mathbf{R}^{\mathsf{T}} \mathbf{R}\right)^{-1} \tag{2.15}$$

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2020LYSEI083/these.pdf
© [A. Claro Barreto], [2020], INSA Lyon, tous droits réservés

avec s l'erreur moyenne quadratique de la régression ; $\mathbf{R}^{\mathsf{T}}$ la matrice transposée du facteur $\mathbf{R}$ de la décomposition QR du Jacobien de la régression.

La variance et la covariance des coefficients a_i correspondent respectivement aux valeurs sur la diagonale (Eq. 2.16) et hors diagonale (Eq. 2.17) de la matrice de covariance $\mathbf{K}_{a_i a_j}$.

$$u^2(a_i) = \mathbf{K}_{a_i a_i} \tag{2.16}$$

$$cov(a_i, a_j) = \mathbf{K}_{a_i a_j} \tag{2.17}$$

L'écart-type $u_c(y)$ de la variable y (Eq. 2.13) est

$$u_c^2(y) = \sum_{i=1}^{N} \left(\frac{\partial f}{\partial z_i}\right)^2 u^2(z_i) + 2 \sum_{i=1}^{N-1} \sum_{j=i+1}^{N} \frac{\partial f}{\partial z_i} \frac{\partial f}{\partial z_j} cov(z_i, z_j), \tag{2.18}$$

avec N le nombre de paramètres z_i de la fonction f (Eq. 2.13).

L'incertitude élargie $U(y)$ au niveau de confiance à 95% est donnée par l'Eq. 2.19 (ISO/IEC Guide 98-1 2009).

$$U(y) = 2\, u_c(y) \tag{2.19}$$

2.2.8.1 Le débit déversé *in situ*

Le débit déversé *in situ* D_{DO} est calculé à l'aide de la hauteur d'eau H et la vitesse moyenne V *in situ* selon l'Eq. 2.20

$$D_{\mathsf{DO}} = V \times A(H), \tag{2.20}$$

avec $A(H)$ la surface mouillée dans la conduite circulaire de décharge, celle-ci est définie comme

$$A(H) = \frac{DN^2}{4}\left(\theta - \sin\theta\cos\theta\right), \text{avec } \theta = \cos^{-1}\left(1 - \frac{2H}{DN}\right), \tag{2.21}$$

avec DN le diamètre nominal de la conduite circulaire de décharge.

L'incertitude de la hauteur d'eau *in situ* $u(H)$ est due à l'incertitude de la précision de mesure $u(H_{\mathsf{sonde}})$ (voir Tableau 2.3) et l'incertitude liée à la pente du radier de la conduite de mesure $u(H_{\mathsf{pente}})$ (Eq. 2.23) comme suit

$$u(H) = \sqrt{u^2(H_{\mathsf{sonde}}) + u^2(H_{\mathsf{pente}})} \tag{2.22}$$

$$u(H_{\mathsf{pente}}) = \left(\frac{(\tan\alpha_{\mathsf{H}}\tan I)^2}{1 - (\tan\alpha_{\mathsf{H}}\tan I)^2}\right)(H_{\mathsf{ref}} - H), \tag{2.23}$$

avec $\alpha_{\mathsf{H}} = 10°$ l'angle d'ouverture du cone de mesure de la sonde de hauteur d'eau, I la pente du radier, et H_{ref} distance verticale entre le radier et la sonde de hauteur d'eau.

Les dérivées partielles de l'Eq. 2.20 sont indiquées dans l'Eq. 2.24. La covariance $\mathrm{cov}\big(U, A(H)\big)$ est calculée à l'aide des données *in situ*. L'incertitude sur le débit déversé *in situ* $u(D_{\mathsf{DO}})$ est calculée selon l'Eq. 2.18.

$$\frac{\partial(D_{\mathsf{DO}})}{\partial U} = A(H) \text{ et } \frac{\partial(D_{\mathsf{DO}})}{\partial\big(A(H)\big)} = U \tag{2.24}$$

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2020LYSEI083/these.pdf
© [A. Claro Barreto], [2020], INSA Lyon, tous droits réservés

2.2.8.2 Conduite ovoïde amont : $A(H_{\text{Amont}})$ et $R_h(H_{\text{Amont}})$

La surface mouillée $A(H_{\text{Amont}})$ et le rayon hydraulique $R_h(H_{\text{Amont}})$ de la section ovoïde de la conduite à l'amont du déversoir d'orage « Gambetta » sont approximés par un polynôme d'ordre 4 avec constante zéro (i.e. coefficient $a_0 = 0$ - Eq. 2.25). Les dérivées partielles de l'Eq. 2.25 sont indiquées dans les Eqs. 2.26-2.27.

$$y = f(a_4, a_3, a_2, a_1, x) = a_4x^4 + a_3x^3 + a_2x^2 + a_1x \tag{2.25}$$

$$\frac{\partial f}{\partial a_i} = x^i \tag{2.26}$$

$$\frac{\partial f}{\partial x} = 4a_4x^3 + 3a_3x^2 + 2a_2x + a_1 \tag{2.27}$$

La variance $u^2(z)$ et la covariance $cov(z_i, z_j)$ des coefficients du polynôme sont définies par Eq. 2.16-2.17, respectivement.

L'écart-type $u(x)$ correspond à l'incertitude de mesure du capteur de la hauteur d'eau « AM-H » du Tableau 2.3.

2.3 Résultats

Le pourcentage de données *in situ* retenues après application de la méthodologie de pré-traitement est présenté dans la Section 2.3.1. De l'ensemble de ces données retenues, les caractéristiques des événements pluvieux et plus particulièrement ceux qui ont produit un déversement sont présentées dans la Section 2.3.2.

Les données retenues et relatives au déversement du déversoir d'orage (DO) « Gambetta » sont utilisées pour pré-étudier le fonctionnement hydraulique des conduites à l'amont du DO (Section 2.3.3) et de déversement (Section 2.3.4). Enfin, l'incertitude du débit déversé de chacune des conduites de déversement est calculée en se basant sur l'approche GUM et les données *in situ* retenues (Section 2.3.5).

2.3.1 Pré-traitement des données *in situ*

Les pourcentages des données retenues après application des étapes 1 et 2 sont présentés dans la Fig. 2.11. La quasi-totalité (95%) des données des conduites de décharge sont retenues après les étapes 1 et 2.2. L'élimination d'environ 5% des données est liée au capteur de vitesse qui mesure une vitesse nulle en temps du déversement (i.e. Étape 2.2). Au niveau de la conduite amont, seulement 70% des données collectées sont retenues après l'application des étapes 1 et 2.1. Une analyse détaillée a montré que les étapes 1 et 2.1 éliminent respectivement 10% et 20% des données collectées.

La méthodologie de pré-traitement est capable de retenir les données relatives au temps de pluie pour les trois points de mesure. Le pourcentage de données retenues, après application des trois étapes de la méthodologie de pré-traitement, est présenté dans la Fig. 2.12a pour les trois points de mesure. Le pourcentage lié au point de mesure « Amont » est recalculé en utilisant le seuil empirique de hauteur d'eau $H_{\text{Amont}} \approx 0,400\,m$ et il est présenté dans la Fig. 2.12b. Les pourcentages des données retenues pour les points de mesure « Amont », « Gauche » et « Droit » sont respectivement 0,6%, 10,7% et 11,2%. Comme expliqué dans la section 2.2.4 : (i) la différence des pourcentages entre l'amont et le déversement est due au pas de temps d'enregistrement en temps sec et (ii) ces faibles pourcentages sont dus au nombre et à la durée des événements pluvieux à l'échelle annuelle.

Les pourcentages des données *in situ* retenues, après application de la méthodologie de pré-traitement, correspondent à une durée théorique moyenne de déversement (i) de 30 minutes à 1 heure pour le point de mesure « Amont » et (ii) inférieur à 30 minutes pour les points de mesure dans les conduire de décharge (voir Tableau 2.4). La durée théorique du déversement pour le point « Amont » est supérieure à celles des conduites de décharge « Gauche » et « Droit » car la méthodologie de pré-traitement n'élimine pas toutes les mesures sur le point « Amont » pour lesquelles $H_{\text{DO}} < H_{\text{min}}$. Si l'on applique la contrainte

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2020LYSEI083/these.pdf
© [A. Claro Barreto], [2020], INSA Lyon, tous droits réservés

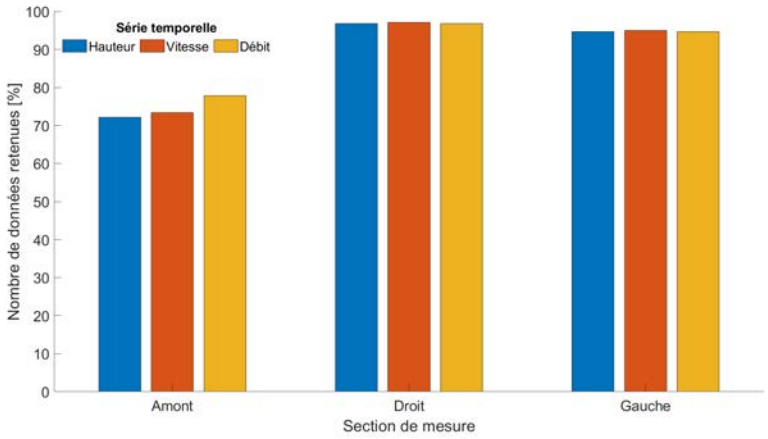
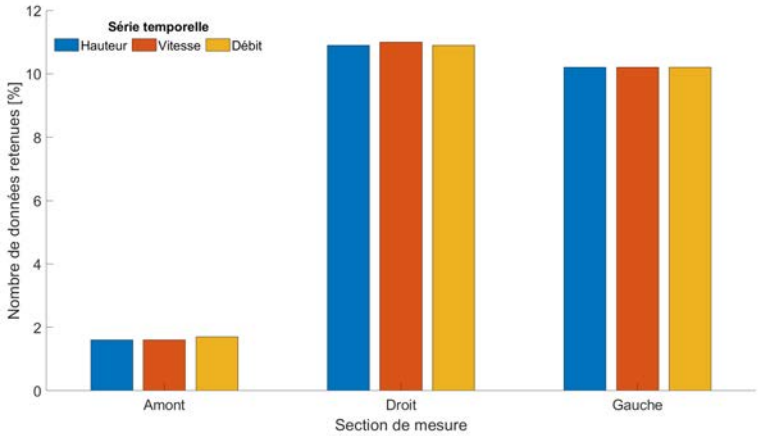
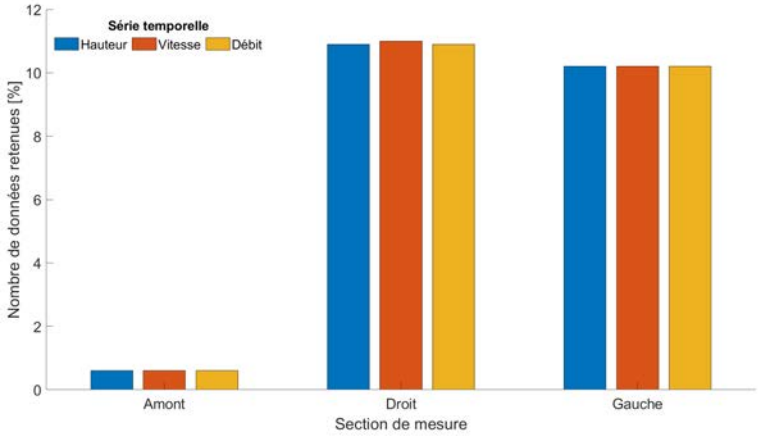


Figure 2.11 – Le pourcentage des données *in situ* retenues après application des étapes 1, 2.1 et 2.2 sur les points de mesure « Amont », « Gauche » et « Droit ».



(a) Toutes les étapes



(b) La hauteur d'eau seuil à l'amont $H_{\text{min}} = 0.400\,m$

Figure 2.12 – Le pourcentage des données *in situ* retenues après application (2.12a) des trois étapes et (2.12b) de l'étape 3 avec la hauteur d'eau seuil à l'amont $H_{\text{min}} = 0.400\,m$.

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2020LYSEI083/these.pdf
© [A. Claro Barreto], [2020], INSA Lyon, tous droits réservés

$H_{DO} \geq H_{min}$ aux données « Amont » seulement 0,3% des données sont retenues. Ce dernier pourcentage correspond à une durée moyenne de déversement de moins de 30 minutes (Tableau 2.4) qui est similaire à celle obtenue pour les points des conduites de décharge.

A noter que la durée théorique de déversement correspond à une information à titre indicatif car les pourcentages de données retenues est influencé par le dysfonctionnement des sondes *in situ* (Etape 2). Une analyse détaillée des données *in situ* a permis d'observer que la sonde de vitesse est responsable d'une perte considérable des données en temps de pluie. Le dysfonctionnement de cette sonde (i.e. $V = 0$) produit une perte de 50%, 34% et 22% des données pour les points de mesure « Amont », « Gauche » et « Droit », respectivement.

2.3.2 Les événements pluvieux depuis l'année 2011

La méthodologie d'extraction des événements pluvieux (Section 2.2.5) a permis d'obtenir tous les événements pluvieux qui ont produit un déversement dans la période 2011 à 2018. Cette méthodologie a permis d'obtenir 244 pluies dans cette période. Le nombre et la durée médiane d'événements pluvieux par année sont présentés dans le Tableau 2.5. L'année 2011 présente seulement 8 déversements car les étapes 1 et 2.1 de la méthodologie de pré-traitement ont éliminé toutes les données avant le 7 septembre 2011. Une erreur dans l'acquisition des données de l'année 2016 fait que cette année n'est pas prise en compte dans l'analyse des données. L'ouvrage déverse en moyenne 40 fois par année dans la période de 2012 à 2018. Cette fréquence de déversement dépasse le seuil de déversement réglementaire égal à 20 fois par année (Arrêté du 24 août) et elle rend le système de collecte de Valence non-conforme selon le Commentaire Technique de l'Arrêté du 21 juillet.

2011	2012	2013	2014	2015	2017	2018
			Nombre			
8	43	25	58	35	32	43
			Durée [h]			
			Amont			
29.3	11.3	10.3	8.0	10.1	8.4	14.3
(5.7 - 54.8)	(1.8 - 78.8)	(1.2 - 86.8)	(1.6 - 29.3)	(1.2 - 42.5)	(2.7 - 26.3)	(2.7 - 40.6)
			Gauche			
2.6	2.8	2.9	2.6	4.6	1.6	2.3
(1.0 - 43.3)	(0.3 - 51.3)	(0.2 - 29.6)	(0.1 - 21.1)	(0.4 - 15.6)	(0.2 - 8.3)	(0.3 - 20.3)
			Droit			
4.0	3.3	3.1	2.1	4.3	1.5	2.5
(1.2 - 43.5)	(0.1 - 51.5)	(0.1 - 25.9)	(0.2 - 21.2)	(0.1 - 21.6)	(0.0 - 8.4)	(0.3 - 20.3)

Tableau 2.5 – Le nombre et la durée médiane des déversements par année pour les points de mesure « Amont », « Gauche » et « Droit ». Les valeurs en parenthèses correspondent aux valeurs minimale et maximale. L'année 2011 n'est pas prise en compte dû à un problème d'acquisition de données.

La durée médiane de déversement dans la conduite amont varie entre 8,0 et 14,3 heures entre les années 2012 à 2018. Les durées médianes de déversement des conduites de déversement « Gauche » et « Droit » sont du même ordre de grandeur à l'échelle annuelle, car ces deux conduites de décharge sont séparées d'une dizaine de centimètres seulement. La durée du déversement dans la conduite amont est plus élevée qu'au niveau des conduites de décharge parce que la contrainte $H_{Amont} \geq H_{min}$ (Etape 3) n'est pas utilisée lors du calcul des durées du Tableau 2.5. Les durées de déversement maximales sont de l'ordre de 2 jours pour la conduite amont et de 1 jour pour les conduites de décharge. Ces longues durées sont dues principalement à la contrainte de 4 heures pour séparer deux événements pluvieux (Section 2.2.5).

Il est fort probable qu'un intervalle de temps sec moins long pour séparer deux événements pluvieux (i) diminuera la durée de déversement pour la conduite « Amont » et (ii) augmentera le nombre de déversements à l'échelle annuelle. Cependant, cette étude n'a pas été réalisée dans le cadre du projet car

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2020LYSEI083/these.pdf
© [A. Claro Barreto], [2020], INSA Lyon, tous droits réservés

l'intérêt de cette pré-étude est (i) d'estimer le fonctionnement global du DO et (ii) de valider les données *in situ* en temps de pluie.

2.3.2.1 Les pluies qui produisent un déversement

Les événements pluvieux qui créent un déversement au sein du DO « Gambetta » sont illustrés dans la Fig. 2.13. Les deux variables présentées sont l'intensité moyenne maximale sur 12 minutes $\overline{I_{12}}$ et la hauteur totale précipitée H_p. L'intensité $\overline{I_{12}}$ permet d'évaluer la puissance de pluie et la création de pics du débit dans le système de collecte. La hauteur précipitée H_p permet d'évaluer le volume d'eau envoyé dans le système de collecte. Les lignes pointillées en rouge de la Fig. 2.13 correspondent aux percentiles à 75% de l'intensité $\overline{I_{12}}$ et la hauteur précipitée H_p. Le déversement est principalement produit par des événements pluvieux avec une intensité $\overline{I_{12}} \leq 9\,mm/h$ et une hauteur précipitée $H_p \leq 22,3\,mm$, région sud-ouest de la Fig. 2.13. Les événements pluvieux à forte intensité ($\overline{I_{12}} > 9\,mm/h$) et forte hauteur précipitée ($H_p > 22,3\,mm$) représentent seulement 6,6% des données observées. Ces résultats sont en accord avec la fréquence hebdomadaire de déversement présentée dans le Tableau 2.5.

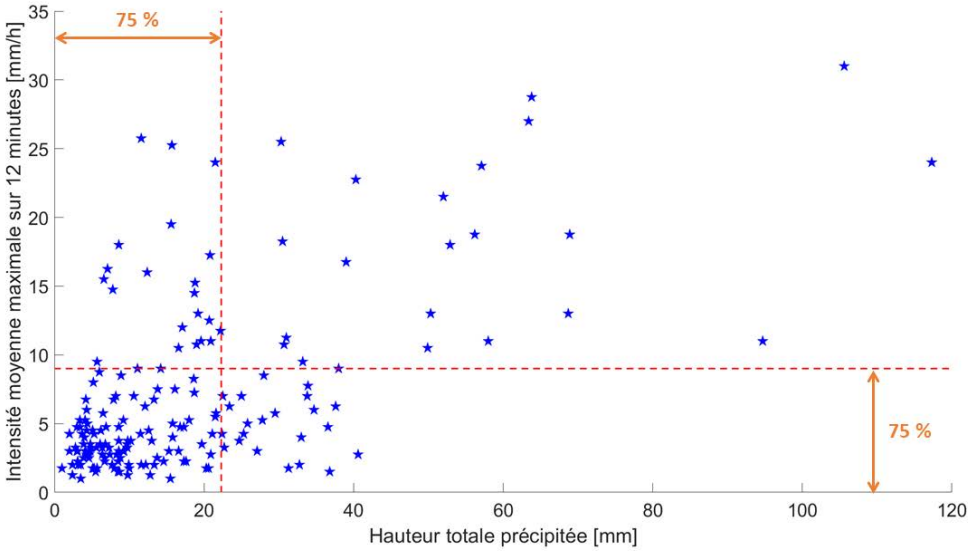
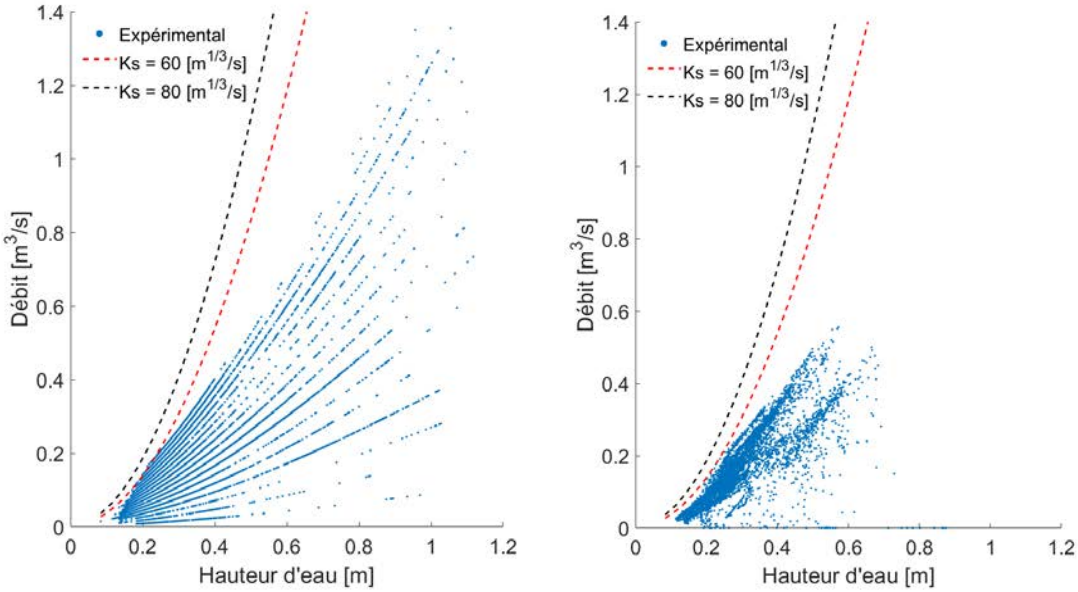


Figure 2.13 – L'intensité moyenne maximale sur 12 minutes $\overline{I_{12}}$ en fonction de la hauteur totale précipitée H_p entre l'année 2011 à 2018. Les lignes pointillées indiquent le percentile à 75% de chacune des variables.

2.3.3 L'écoulement dans la conduite amont

L'ensemble des données *in situ* retenues, après les méthodes de pré-traitement (Section 2.2.4) et d'extraction des événements pluvieux (Section 2.2.5), est validé en fonction du fonctionnement hydraulique attendu dans la section de mesure. Le débit d'entrée *in situ* D_E en fonction de la hauteur d'eau *in situ* H_{Amont} est présenté dans la Fig. 2.14. Les lignes pointillées représentent l'écoulement normal pour les coefficients de rugosité $K_s = 60\,m^{1/3}/s$ (en rouge) et $K_s = 80\,m^{1/3}/s$ (en noir). Il est observé que les données *in situ* avant l'année 2016 ne présentent pas une corrélation entre le débit D_E et la hauteur d'eau H_{Amont} (voir Fig. 2.14a). A partir de l'année 2017, il est observé une relation entre le débit D_E et la hauteur d'eau H_{Amont} (voir Fig. 2.14a). L'année 2016 n'est pas analysée à cause d'un problème d'acquisition des données. Seulement les données *in situ* depuis l'année 2017 sont retenues et étudiées plus en détail ci-dessous afin de vérifier si le débit calculé à l'aide des capteurs de hauteur d'eau et de vitesse est correcte (Eq. 2.20).

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2020LYSEI083/these.pdf
© [A. Claro Barreto], [2020], INSA Lyon, tous droits réservés



(a) Avant l'année 2016 (b) Après l'année 2016

Figure 2.14 – Le débit d'entrée D_E expérimental dans la conduite amont du déversoir d'orage «Gambetta» en temps de pluie.

L'écoulement dans la conduite amont du DO «Gambetta» n'est pas correctement mesuré par le capteur de vitesse submergé. Le capteur de hauteur d'eau est supposé fonctionner correctement en temps sec et temps de pluie car ce type de capteur est non intrusif et présente une faible probabilité de dysfonctionnement (e.g. Isel et al. 2014a,b; Lipeme Kouyi et al. 2005). Le capteur de vitesse indique un écoulement fluvial, $Fr < 1$, en temps de pluie, $H_{\text{Amont}} \geq 0.4\,m$ (voir Fig. 2.15). Le type d'écoulement dans cette conduite devrait être torrentiel et proche de la hauteur normale car il s'agit d'une conduite en béton lisse en bon état et à pente forte $I = 1.3\%$. L'écoulement théorique de la conduite peut être approximé par la formule de Gauckler-Manning-Strickler (Eq. 2.4) en définissant un coefficient de rugosité de Strickler $K_s \in [60{-}80]\,m^{1/3}/s$. Le nombre de Froude Fr obtenus avec $K_s = 60\,m^{1/3}/s$ et $K_s = 80\,m^{1/3}/s$ sont présentés dans la Fig. 2.15 par les lignes pointillées rouge et noire, respectivement. Il est observé que l'écoulement théorique reste toujours torrentiel ($Fr > 1$) pour l'intervalle $H_{\text{Amont}} \in [0,1{-}1,0]\,m$. L'écoulement dans cette conduite serait fluvial ($Fr < 1$) si le coefficient de rugosité de Strickler $K_s \leq 40\,m^{1/3}/s$, ce qui n'est pas physiquement possible car il s'agit d'une conduite en béton lisse (voir Section 2.2.6.1).

L'hypothèse d'écoulement torrentiel et proche de la hauteur normale est seulement valable si la section de mesure n'est pas influencée par l'aval. Afin de vérifier cette hypothèse, la courbe de remous dans la conduite amont du DO est calculée en fonction du débit d'entrée $D_E = f\,(H_{\text{Amont}}, K_s)$ (Eq. 2.4) et de la hauteur à l'aval de la conduite amont (i.e. à l'entrée de la chambre du DO; Section 2.2.6.1). La présence d'un ressaut hydraulique dans la conduite est due à la vanne guillotine à l'aval de la chambre du DO (voir Fig. 2.1a).

La localisation du ressaut hydraulique varie selon le débit d'entrée D_E et le coefficient de rugosité de Strickler K_s (voir Fig. 2.16). Le ressaut hydraulique peut se situer entre 2,4 m (Fig. 2.16g) et 35,0 m (Fig. 2.16f) à l'aval de la section de mesure en temps de pluie. Le ressaut hydraulique remonte au maximum jusqu'au 2,4 m à l'aval de la section de mesure pour le coefficient de rugosité $K_s = 60\,m^{1/3}/s$ et la hauteur normale $H_{\text{Amont}} = 1,0\,m$ (voir Fig. 2.16g). Cependant, la rugosité de la paroi *in situ* correspond à une paroi en béton en état moyen-bon ($K_s \in [65-85]\,m^{1/3}/s$; Chow 1959 - d'après Hager 2010) ou à une paroi en béton avec plâtre de ciment lisse sans crépi - lisse intact ($K_s \in [65-90]\,m^{1/3}/s$; Naudascher 1987 - d'après Hager 2010). Ainsi, Le ressaut hydraulique est censé être localisé à partir de 20,0 m à l'aval de la section de mesure pour $K_s \geq 70\,m^{1/3}/s$, voir Fig. 2.16b-2.16e-2.16h. La trop faible vitesse, et le

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2020LYSEI083/these.pdf
© [A. Claro Barreto], [2020], INSA Lyon, tous droits réservés

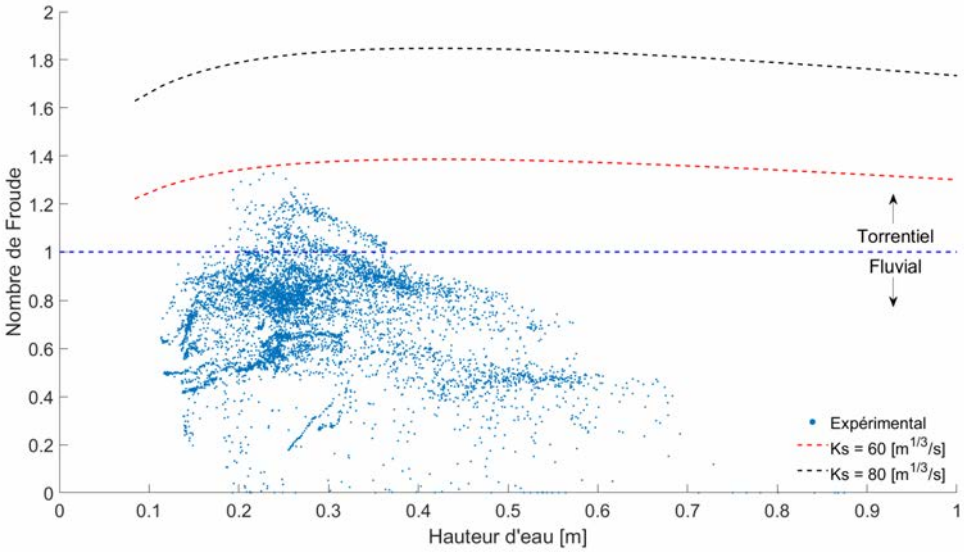


Figure 2.15 – Le nombre de Froude Fr expérimental dans la conduite amont du déversoir d'orage « Gambetta » en temps de pluie.

régime fluvial mesuré, ne peuvent être attribuées qu'à un dysfonctionnement du capteur de vitesse.

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2020LYSEI083/these.pdf
© [A. Claro Barreto], [2020], INSA Lyon, tous droits réservés

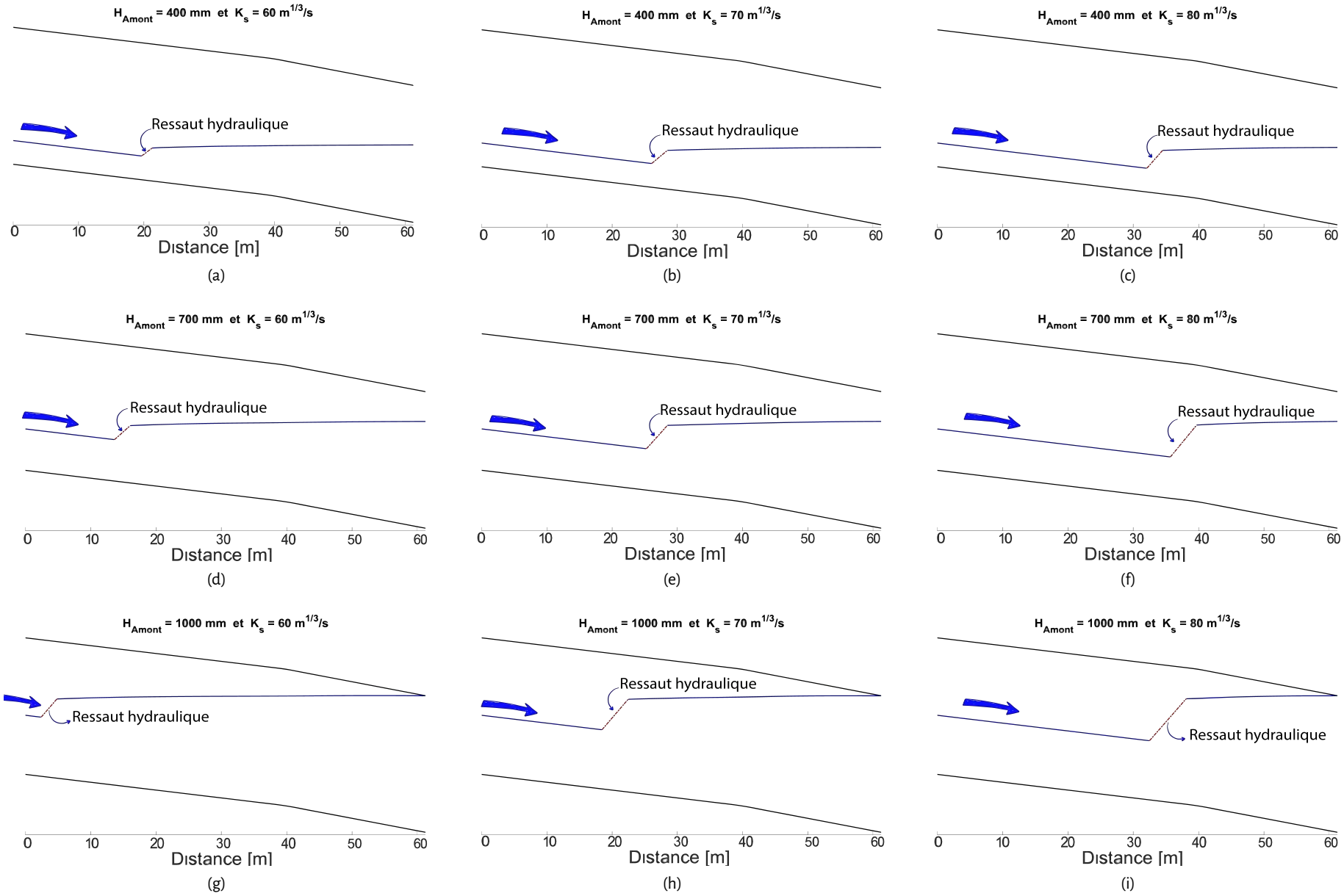


Figure 2.16 – La courbe de remous dans la conduite amont du DO « Gambetta » en fonction de la hauteur d'eau à l'amont H_{Amont} (sens horizontal) et du coefficient de rugosité de Strickler K_s (sens vertical).

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2020LYSEI083/these.pdf
© [A. Claro Barreto], [2020], INSA Lyon, tous droits réservés

2.3.4 L'écoulement dans les conduites de déversement

L'ensemble des données *in situ* retenues, après les méthodes de pré-traitement (Section 2.2.4) et d'extraction des événements pluvieux (Section 2.2.5), est validée en fonction du fonctionnement hydraulique attendu dans les sections de mesure « Gauche » et « Droit ». Les données *in situ* avant l'année 2017 ne sont pas étudiées parce qu'on ne dispose pas de données fiables dans la conduite amont du DO (Fig. 2.14b). Le débit déversé total relatif D_T/D_E en fonction du débit d'entrée D_E est présenté dans la Fig. 2.17. Le débit D_E est calculé à l'aide de la formule de GMS (Eq. 2.4) avec la hauteur d'eau H_{Amont} et un coefficient de rugosité de Strickler $K_s = 70\, m^{1/3}/s$, ce coefficient est choisi selon la paroi *in situ* (Section 2.3.3). Les barres verticales et horizontales représentent l'intervalle de confiance à 95% (voir Section 2.3.5).

Le débit expérimental D_T de l'année 2017 (cercle bleu, Fig. 2.17) est jugé incorrect car (i) le débit déversé relatif $D_T/D_E \geq 100\%$ pour $D_E \geq 5000 m^3/h$ et (ii) le débit expérimental D_T de l'année 2018 (étoile rouge dans la Fig. 2.17) est systématiquement inférieur dans l'intervalle $D_E \in [3000 – 10000]\, m^3/h$. Seulement les données *in situ* de l'année 2018 sont retenues pour être comparées aux résultats numériques du Chapitre 4.

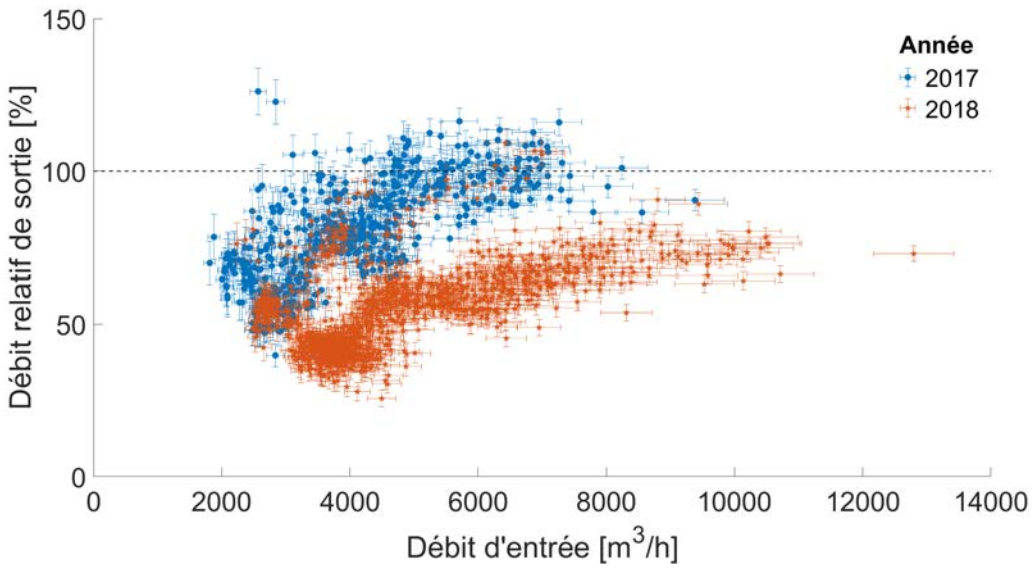


Figure 2.17 – Le débit *in situ* déversé « Total » relatif D_T/D_E pour les années 2017 (cercle bleu) et 2018 (étoile rouge) en fonction du débit d'entrée D_E. Les barres d'erreur correspondent à l'intervalle de confiance à 95%.

Le type d'écoulement attendu dans les conduites de décharge est étudié à l'aide de la courbe de remous (Section 2.2.7). La forme de surface de l'eau dans les conduites de décharge « Gauche » et « Droit » pour différents débits déversés totaux est présentée dans la Fig. 2.18. Il est supposé que le débit de décharge soit reparti équitablement entre les deux conduites (i.e $\alpha_D = 0.5$), car la distance de séparation entre ces deux conduites est égale à 20 cm. La rugosité des conduites du système $K_s = 70\, m^{1/3}/s$, d'après des observations *in situ*. La présence d'un ressaut hydraulique (lignes pointillées en rouge) est observée si le débit total déversé $D_T \leq 2000\, m^3/h$. La formation du ressaut hydraulique est principalement liée (i) au changement de pente au début et (ii) au seuil de déversement frontal à l'aval du pavé droit (voir Fig. 2.10). Le ressaut hydraulique se situe toujours à l'aval des zones de mesure *in situ* (lignes verticales en noir), à environ 3 diamètres à l'aval pour $D_T = 800\, m^3/h$. Les sections de mesure des conduites de déversement « Gauche » et « Droit » ne subissent aucune influence aval pour la gamme de débits total déversé $D_T \in [800 – 11000]\, m^3/h$.

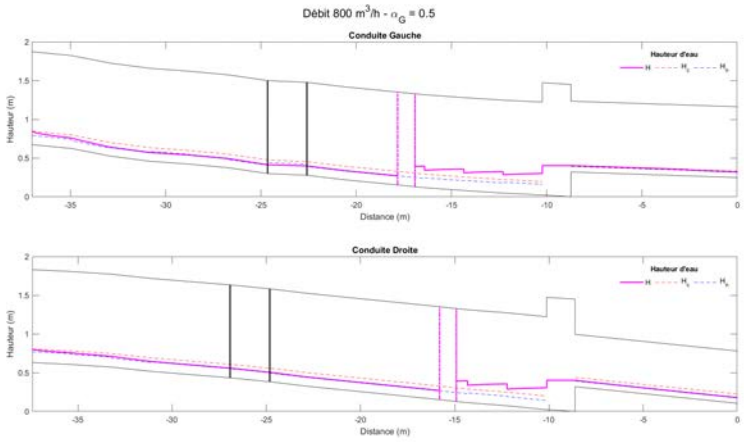
Cette étude 1D a permis aussi d'observer le type de courbe de remous dans les sections de mesure *in situ*. La courbe de remous dans la conduite de décharge « Gauche » est toujours du type « S3 » ($H < H_N$) pour tous les débits simulés. La courbe de remous dans la conduite « Droit » varie entre « S2 » et « S3 » en

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2020LYSEI083/these.pdf
© [A. Claro Barreto], [2020], INSA Lyon, tous droits réservés

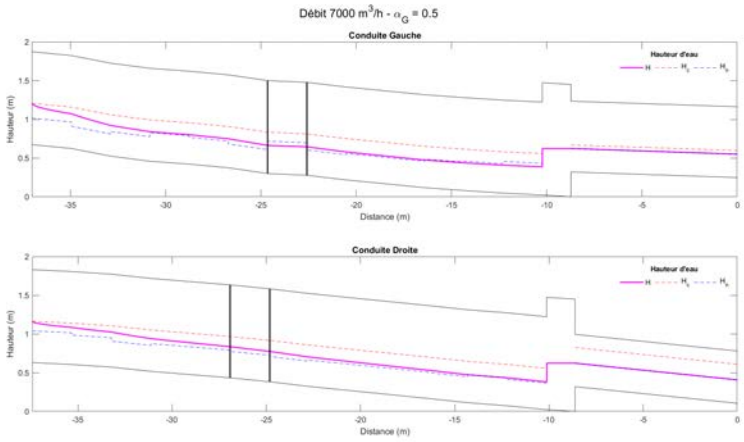
fonction de la hauteur d'eau à l'amont de la conduite (i.e. distance $x = 0m$). Si $H_N < H_{x=0m} < H_C$ la courbe de remous dans la section de mesure *in situ* est du type «S2» tandis que si $H_{x=0m} < H_N$ la courbe de remous observée dans la même section est du type «S3».

En outre, le débit *in situ* risque d'être surestimé par la présence de la sonde de vitesse submergée et localisée à l'amont de la sonde de hauteur d'eau. La sonde de vitesse *in situ* gonfle la hauteur d'eau vers l'aval car l'écoulement dans la conduite est toujours torrentiel ($Fr > 1$). La sonde de hauteur d'eau *in situ* observe une hauteur d'eau supérieure par rapport à l'amont de la sonde de vitesse *in situ*. Celui-ci produit une surface mouillée $A(H)$ supérieure par rapport à l'amont de la sonde de vitesse. Si la courbe de remous à l'amont de la sonde de vitesse est une «S2», la hauteur à l'aval continuera à être une «S2». Si la courbe de remous à l'amont de la sonde de vitesse est une «S3», la hauteur à l'aval peut continuer à être une «S3» ou devenir une «S2». En absence d'une étude détaillée sur l'influence de la sonde de vitesse submergée dans le profil de hauteur d'eau des conduites de décharge, il est supposé que la sonde de vitesse ne surestime pas la courbe de remous.

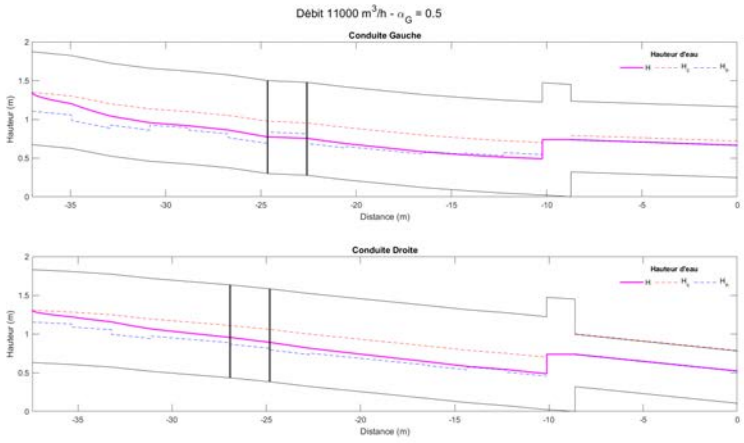
Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2020LYSEI083/these.pdf
© [A. Claro Barreto], [2020], INSA Lyon, tous droits réservés



(a) Débit total déversé $D_{\mathrm{T}} = 800\, m^3/h$



(b) Débit total déversé $D_{\mathrm{T}} = 7000\, m^3/h$



(c) Débit total déversé $D_{\mathrm{T}} = 11000\, m^3/h$

Figure 2.18 – Les courbes de remous des conduites de décharge « Gauche » et « Droit » pour les débits totaux déversés D_{T} 800 m^3/h (2.18a), 7000 m^3/h (2.18b) et 11000 m^3/h (2.18c) avec un partage du débit $\alpha_{\mathrm{D}} = 0.5$ et un coefficient de Strickler $K_s = 70\, m^{1/3}/s$. La localisation et la longueur approximée du ressaut hydraulique est indiqué par les lignes pointillées en rouge. La section de mesure *in situ* de la vitesse et de la hauteur d'eau est indiquée par les lignes noires.

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2020LYSEI083/these.pdf
© [A. Claro Barreto], [2020], INSA Lyon, tous droits réservés

2.3.5 L'incertitude du débit déversé *in situ*

L'incertitude des données *in situ* retenues pour les conduites de déversement est calculée selon la méthode des incertitudes GUM décrite dans la Section 2.2.8.1. L'incertitude élargie relative $U(D_{\text{exp}})/D_{\text{exp}}$ est présentée dans la Fig. 2.19. Le diamètre des conduites de décharge est $DN = 1,200\,m$. La pente du radier des conduites «Gauche» et «Droit» sont $I_{\text{G}} = 1.1\%$ et $I_{\text{G}} = 2.4\%$, respectivement.

L'incertitude élargie relative $U(D)/D$ des débits expérimentaux D_{G} et D_{D} varie entre 15%-5% et 5%-2.5%, respectivement. L'incertitude $U(D)/D$ est inversement proportionnelle au débit à cause de la forme de l'Eq. 2.20. L'incertitude dans la conduite «Droit» $U(D_{\text{D}})/D_{\text{D}}$ est inférieure à l'incertitude de la conduite «Gauche» $U(D_{\text{G}})/D_{\text{G}}$ grâce à une meilleure précision du capteur de hauteur d'eau de la conduite «Droit» (voir Tableau 2.2). L'incertitude sur le débit déversé «Total» D_{T} varie entre 9.5% et 3.5% dans la gamme des débits $D_{\text{T}} \in [1350 - 9640]\,m^3/h$.

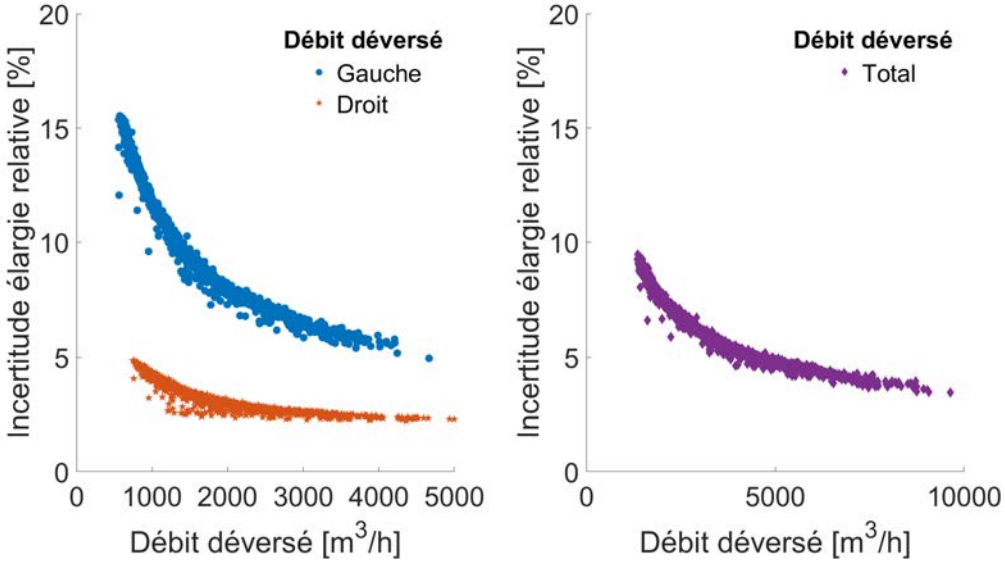


Figure 2.19 – L'incertitude élargie relative $U(D_{\text{exp}})/D_{\text{exp}}$ des débits déversés expérimentaux «Gauche» (cercle bleu), «Droit» (étoile rouge) et «Total» (diamond violet), selon la méthode GUM (voir Section 2.2.8.1).

2.4 Discussion

Les procédures de pré-traitement et séparation des événements pluvieux ont permis d'obtenir toutes les pluies qui créent un déversement au sein du déversoir d'orage (DO) «Gambetta» de manière automatique. La fréquence de déversement obtenue par année confirme, comme attendu, les fréquences déclarées à la Police de l'Eau (Valence Romans Agglo 2018).

L'analyse des données *in situ* a montré que le capteur de vitesse n'est pas une sonde adaptée aux contraintes du DO «Gambetta». Il est observé une perte allant jusqu'à 50% de données en temps de pluie à cause du dysfonctionnement de la sonde de vitesse ($V = 0$). La principale raison du dysfonctionnement de cette sonde semble être les macro déchets qui s'accrochent au niveau du capteur de vitesse, d'après les retours d'expériences des techniciens de l'unité d'exploitation. En outre, le volume déversé est sous-estimé car la sonde de vitesse ne fonctionne pas entre 22% et 34% des fois en temps de pluie.

Au niveau de la conduite amont du DO, la sonde de vitesse sous-estime la vitesse moyenne de l'écoulement en temps de sec et temps de pluie. L'étude 1D de la courbe de remous dans cette conduite a montré que l'écoulement au niveau de la section de mesure est toujours torrentiel en temps sec et temps de pluie. Le débit qui transite dans cette conduite devra être obtenu par calcul en utilisant seulement la sonde de hauteur d'eau *in situ*, car elle fonctionne correctement en temps sec et en temps de pluie.

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2020LYSEI083/these.pdf
© [A. Claro Barreto], [2020], INSA Lyon, tous droits réservés

Concernant les conduites de déversement, l'étude 1D de la courbe de remous a montré que l'écoulement au niveau des sondes *in situ* de hauteur d'eau et de vitesse est en régime torrentiel pour toute la gamme du débit. Ce régime d'écoulement est préservé grâce à la forte pente géométrique des conduites de déversement et la grande distance à aval des capteurs *in situ*.

Malgré la qualité des données *in situ*, seulement les données de l'année 2018 sont retenues pour les points de mesure « Amont », « Gauche » et « Droit ». Cette grande perte des données est due (i) au dysfonctionnement de la sonde de vitesse de la conduite amont et (ii) au dysfonctionnement de l'une des sonde *in situ* des conduites de décharge.

2.5 Conclusion

La pré-étude hydraulique du déversoir d'orage (DO) « Gambetta » en temps de pluie a mis en œuvre de l'instrumentation de terrain, de l'analyse des mesures et des calculs 1D de courbe de remous. Elle a permis, pour les conduites amont et de décharge, (i) de déterminer le type d'écoulement, (ii) d'évaluer la fiabilité des capteurs *in situ* et (iii) de sélectionner les données expérimentales *in situ* valides. Notamment, l'écoulement est torrentiel en temps de pluie dans toutes les sections de mesure (i.e. « Amont », « Gauche » et « Droit »), comme cela a été montré grâce aux calculs 1D de courbe de remous.

La vérification des sondes *in situ* a montré que les capteurs de hauteur d'eau et de vitesse fonctionnent la plupart du temps pour les conduites de décharge. Au contraire, le capteur de vitesse sous-estime la vitesse moyenne de l'écoulement dans la conduite amont du DO. La sonde de hauteur d'eau reste le capteur le plus robuste pour ce type d'ouvrages parce que son taux de dysfonctionnement est proche de zéro.

Les données dans chaque point de mesure ont été filtrées et validées à l'aide de l'analyse 1D de la courbe de remous pour différents débits et en prenant en compte l'influence à l'aval. Cette analyse détaillée a permis de valider seulement les données de l'année 2018.

Cependant, cette pré-étude ne permet pas de comprendre le fonctionnement hydrodynamique responsable du déversement et du transport de la pollution en temps de pluie. La présence d'obstacles (surtout les deux échelles et la plateforme) et sa géométrie non standardisée rendent l'écoulement au sein de cet ouvrage très complexe. Sa caractérisation reposerait sur un grand nombre de mesures de profondeurs et de vitesses : très complexes et coûteuses sur modèles réduits, elle deviennent inenvisageables *in situ* où s'ajoutent des problèmes de sécurité et la nécessité de continuité opérationnelle. La simulation numérique 3D du système apparaît comme le recours le plus adéquat pour disposer en détail du fonctionnement hydrodynamique et du flux de la pollution au sein de l'ouvrage en temps de pluie. Le choix de l'outil de simulation reste cependant délicat du fait de la géométrie complexe, des échelles de l'écoulement, de la présence de la surface libre, de la description désirée du transport de particules.

Avant de simuler le fonctionnement hydraulique 3D du déversoir d'orage « Gambetta », il convient d'évaluer en conditions contrôlées quel modèle de turbulence (élément clé de l'approche numérique) est en mesure de reproduire les grandeurs hydrauliques globales (i.e. la répartition du débit et de la surface libre) et locales (i.e. les champs de vitesses et de l'énergie cinétique turbulente) d'un déversoir latéral. Cette étude est réalisée dans le chapitre suivant.

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2020LYSEI083/these.pdf
© [A. Claro Barreto], [2020], INSA Lyon, tous droits réservés

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2020LYSEI083/these.pdf
© [A. Claro Barreto], [2020], INSA Lyon, tous droits réservés

L'hydrodynamique d'un déversoir latéral en régime fluvial

All models are wrong but some are useful.

Robustness in the strategy of scientific model building - 1979
"George E. P. Box"

3.1 Introduction

Comme déjà évoqué dans le Chapitre 1, le déversoir latéral est l'ouvrage de dérivation le plus fréquent des réseaux d'assainissement unitaires (Hager 2010). La maîtrise du fonctionnement hydraulique de ces ouvrages est vitale afin de connaître le flux déversé et d'estimer ainsi la pollution rejetée au milieu naturel en temps de pluie. A noter que ces deux grandeurs, le volume et la pollution déversés, font partie des trois critères de conformité règlementaire du temps de pluie imposés au maître d'ouvrage des systèmes de collecte (Commentaire Technique de l'Arrêté du 21 juillet 2015).

Le principal déversoir d'orage (DO) du système de collecte de la ville de Valence, le DO « Gambetta », a fait l'objet d'une pré-étude hydraulique au niveau du Chapitre 2. Il a été constaté que son fonctionnement hydraulique global correspond à celui d'un déversoir latéral en régime fluvial sans influence aval au niveau du déversement. Avant de s'attaquer au flux de pollution déversé par ce DO en temps de pluie, il est indispensable de simuler en premier lieu son fonctionnement l'hydrodynamique global (i.e. le débit déversé et le niveau d'eau) et local (i.e. la vitesse et l'énergie cinétique turbulente ou les contraintes de Reynolds). On s'intéresse ainsi à étudier de manière expérimentale et numérique le fonctionnement hydraulique d'un déversoir latéral en conditions contrôlées.

L'écoulement au sein des déversoirs latéraux a fait l'objet de plusieurs études expérimentales et numériques. Dans un premier temps, les études expérimentales se sont intéressées à évaluer le débit déversé et la surface libre en fonction des paramètres géométriques et hydrauliques (e.g. Kallwass 1964 ; Taubmann 1972 - d'après Hager 2010). Ensuite, les différents travaux expérimentaux ont cherché à évaluer le coefficient de décharge en fonction de la section transversale du canal (e.g. Cheong 1991 ; Granata et al. 2016 ; Ranga Raju et al. 1979 ; Uyumaz 1992, 1997 ; Uyumaz et Muslu 1985) ou du régime de l'écoulement (e.g. Borghei et al. 1999 ; Ghodsian 2003 ; Granata et al. 2016 ; Swamee et al. 1994 ; Uyumaz et Muslu 1985). Le coefficient de décharge a été étudié pour différents types de déversoirs latéraux : triangulaire (e.g. Coşar et Agaccioglu 2004), incliné à paroi épaisse (e.g. Aghayari et al. 2009), labyrinthe (e.g. Emiroglu et al. 2009 ; Karimi et al. 2018), touches de piano (e.g. Karimi et al. 2018), trapézoïdal à paroi épaisse (e.g. Y. Wang et al. 2018), rectangulaire double (e.g. Hager 2010 ; Lipeme Kouyi et al. 2003) et rectangulaire (e.g. Bagheri et Heidarpour 2012 ; Emiroglu et al. 2011a ; Karimi et al. 2018 ; Ramamurthy et al. 1978 ; Singh et al. 1994). Le coefficient de débit est ainsi devenu le paramètre d'intérêt de la plupart des études sur les déversoirs latéraux.

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2020LYSEI083/these.pdf
© [A. Claro Barreto], [2020], INSA Lyon, tous droits réservés

A l'inverse, très peu d'études expérimentales ont mesuré les champs de vitesses au sein d'un déversoir latéral. A noter qu'aucun travail expérimental, à notre connaissance, a étudié les contraintes de Reynolds pour ce type de déversoirs. Le champ de vitesses est généralement mesuré à l'aide d'un tube de Pitot (El-Khashab et Smith 1976), de la vélocimétrie acoustique par effet Doppler (Bagheri et Heidarpour 2012 ; Samiee et al. 2016), d'un vélocimètre électromagnétique (Karimi et al. 2018) ou de la vélocimétrie par images de particules (Granata et al. 2016). En particulier, les travaux de Bagheri et Heidarpour (2012), au niveau de la lame déversante d'un déversoir latéral rectangulaire à paroi mince en régime fluvial (**Fr** $\in [0.08 - 0.88]$), ont observé que (i) la vitesse principale est maximale au début du déversement, (ii) la vitesse horizontale est maximale vers la fin du déversement et (iii) la vitesse verticale est ascensionnelle vers le seuil latéral et, en fonction de la hauteur d'eau, descendante proche de la surface libre.

Concernant les études numériques, les premiers travaux ont étudié le coefficient de décharge et la hauteur d'eau par une analyse théorique basée sur l'hypothèse de l'énergie spécifique constante (De Marchi 1934 ; Muslu 2001) ou de l'énergie cinétique (Q. Chen et al. 1979). Cette approche 1D a été implémentée pour des déversoirs latéraux rectangulaires, simples ou doubles, à crête haute ou basse, à crête longue ou courte, et avec ou sans conduite aval d'engouffrement (Hager 2010). Plus récemment, les méthodes de « Machine Learning » sont utilisées afin de prédire les coefficients de débit et/ou les profils de la hauteur d'eau pour une multitude de déversoir latéraux (e.g. Akbari et al. 2019 ; Azamathulla et al. 2016 ; Balouchi et Rakhshandehroo 2018 ; Bilhan et al. 2010 ; Emiroglu et al. 2011b ; Zaji et al. 2018). Ces méthodes permettent d'accéder à des fonctions numériques plus robustes et précises qui prennent en compte toutes les variables en jeu : la géométrie des canaux amont et aval du déversement, la géométrie du déversoir latéral, les propriétés du fluide (la densité, la viscosité et la tension superficielle), la surface de l'eau, le débit d'entrée, etc.

Si l'on s'intéresse aux champs de vitesse et/ou à la turbulence, l'approche numérique 1D ou 2D n'est pas adaptée à cause du caractère tridimensionnel de l'écoulement au niveau du déversement. L'outil numérique ainsi utilisé pour étudier le comportement hydraulique d'un déversoir latéral quelconque correspond à la mécanique des fluides numérique (CFD) en 3D (e.g. Aydin 2012 ; Aydin et Emiroglu 2013 ; Azimi et al. 2018, 2014 ; Lipeme Kouyi et al. 2003 ; Y. Wang et al. 2018). L'écoulement est simulé principalement avec les modèles de turbulence du type k-ϵ (e.g. Azimi et al. 2018, 2014 ; Lipeme Kouyi et al. 2003 ; Y. Wang et al. 2018) tandis que les modèles de turbulence k-ω ou des contraintes de Reynolds (RSM) sont peu employés (Aydin 2012 ; Aydin et Emiroglu 2013). La plupart des simulations numériques 3D sont validées uniquement par rapport aux mesures expérimentales de la hauteur d'eau et de la répartition du débit (e.g. Aydin 2012 ; Aydin et Emiroglu 2013 ; Azimi et al. 2014 ; Lipeme Kouyi et al. 2003 ; Y. Wang et al. 2018). Pour le déversoir latéral à paroi mince, par exemple, l'approche CFD est capable de reproduire la hauteur d'eau (i) avec une erreur inférieure à $5\,mm$ pour un seuil rectangulaire double (Lipeme Kouyi et al. 2003) ou (ii) avec une erreur relative inférieure à 5.63% pour un seuil trapézoïdal (Y. Wang et al. 2018). Concernant la répartition du débit, les travaux numériques de Lipeme Kouyi (2004), sur plusieurs configurations d'un déversoir latéral rectangulaire double avec section transversale circulaire, ont surestimé le débit déversé avec une erreur relative (basée sur le débit d'entrée) d'environ (i) 5.4% en régime fluvial, (ii) 9.0% en régime torrentiel et (iii) 9.4% avec présence d'un ressaut hydraulique au niveau du déversement.

En régime fluvial, seuls les travaux d'Azimi et al. (2018) ont reproduit, à l'aide des modèles de turbulence k-ϵ et RNG k-ϵ, les profils de vitesses longitudinale et transverse (i.e. horizontale) du déversoir latéral rectangulaire ($Fr = 0.256$ à l'entrée) étudié expérimentalement par Bagheri et Heidarpour (2012). Le modèle RNG k-ϵ a reproduit les vitesses longitudinales et transverse avec une précision supérieure au modèle k-ϵ.

Les différents travaux expérimentaux et numériques présentés auparavant montrent l'importance accordée au fonctionnement hydraulique d'un déversoir latéral. Cependant, les courants secondaires ($\overrightarrow{wv} = \langle \overline{w}, \overline{v} \rangle$) et la turbulence de l'écoulement (i.e. l'énergie cinétique turbulente k) pour ce type de déversoirs n'ont pas encore été étudiés expérimentalement. La turbulence est spécialement nécessaire pour l'étude de la pollution déversée en temps de pluie, car cette dernière est transportée principalement en suspension (Ashley et al. 2004). En outre, ces deux grandeurs ($\overrightarrow{wv}$ et k) permettront d'évaluer la précision des

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2020LYSEI083/these.pdf
© [A. Claro Barreto], [2020], INSA Lyon, tous droits réservés

modèles de turbulence utilisés dans l'approche CFD.

Ainsi, la présente étude cherche à évaluer et valider un modèle de turbulence du type « RANS » vis-à-vis de sa capacité à reproduire les champs de vitesse ($\overline{u}$, $\overline{v}$ et $\overline{w}$) et d'énergie cinétique turbulente (k) d'un déversoir latéral en régime fluvial. Même si certains travaux numériques (e.g. Bonakdari et al. 2007a ; Larrarte et al. 2005) ont montré que les modèles de turbulence anisotropes (e.g. le modèle de contraintes de Reynolds - RSM) sont nécessaires pour reproduire correctement les courants secondaires, les modèles de turbulence isotropes à deux équations (e.g. basés sur l'approche k-ϵ ou k-ω) seront utilisés, car ils sont les plus utilisés en industrie et les moins coûteux en ressources informatiques. Cette étude permettra ainsi d'évaluer leurs justesse vis-à-vis du champs de vitesse et de l'énergie cinétique turbulente. Le déversoir latéral rectangulaire à paroi mince a été choisi parce que son fonctionnement hydraulique s'assimile au déversoir d'orage *in situ* du présent projet de recherche mais avec une géométrie plus simple, offrant des accès simples pour les sondes de mesures. Le modèle numérique 3D sera validé par le comportement hydrodynamique global : la répartition du débit. La performance sera évaluée par le comportement local : les champs de vitesses et de l'énergie cinétique turbulente (k). Le comportement local est d'un grand intérêt pour l'étude *a posteriori* du transport de sédiments en suspension (Chapitre 6).

3.2 Matériel et Méthodes

L'écoulement du déversoir latéral en régime fluvial est mesuré en conditions contrôlées (Sections 3.2.1-3.2.2.7) et reproduit numériquement à l'aide de la mécanique des fluides numérique (CFD, en anglais - Section 3.2.3).

La présente section démarre avec la description du déversoir latéral à échelle réduite (Section 3.2.1). Les différentes mesures expérimentales utilisées pour caractériser de manière globale et locale l'écoulement sont présentées dans les Sections 3.2.2.1-3.2.2.3, respectivement. L'ensemble des méthodes utilisées pour traiter les séries temporelles de la vitesse instantanée est présenté dans les Section 3.2.2.4-3.2.2.6. Enfin, l'impact du système d'homogénéisation de l'écoulement sur les profils 2D de la vitesse longitudinale est présenté dans la Section 3.2.2.7.

La Section 3.2.3 démarre avec présentation sommaire de la mécanique des fluides numérique (CFD, en anglais) jusqu'aux équations de Navier-Stokes moyennes dans le temps (Sections 3.2.3.1-3.2.3.4). Ensuite, l'ensemble des phases du projet de simulation numérique réalisées sont : le modèle CAO et maillage (Section 3.2.3.10), l'ensemble des modèles numériques (Sections 3.2.3.5-3.2.3.6-3.2.3.9), les conditions limites et initiales (Sections 3.2.3.7-3.2.3.8), les conditions de convergence (Section 3.2.3.12) et les critères de performance (Section 3.2.3.13). En outre, une nouvelle procédure pour calculer l'incertitude des résultats numériques est présentée dans la Section 3.2.3.11.

3.2.1 Le déversoir latéral

L'installation utilisée est le croisement de canaux disponible dans la halle expérimentale du Laboratoire de Mécanique des Fluides et Acoustique (LMFA) à l'INSA de Lyon. Cette installation a été décrite dans plusieurs publications, par exemple par Rivière et al. (2011).

L'installation est constituée de trois canaux identiques se croisant à angle droit, avec une pente nulle (i.e. le fond des canaux dans un même plan horizontal - Fig. 3.1). Chacun est en verre, de largeur $B_{\text{LMFA}} = 0.3\,m$ et de profondeur $H_{\text{max-LMFA}} = 0.2\,m$. La longueur de chacun des canaux est indiquée dans la Fig. 3.1. L'eau circule en circuit fermé : elle entre par le canal amont (débit total Q_{xi}) à travers un dispositif de tranquillisation avant de passer par un convergent latéral et vertical puis de pénétrer dans le canal de longueur amont $L_{\text{xi}} = 2\,m$. Le dispositif de tranquillisation correspond à un nid d'abeille qui permet de rendre l'écoulement unidirectionnel puis un tampon de grillage pour homogénéiser la turbulence. Le débit se sépare ensuite entre les deux canaux aval qui sont terminés par des extensions en PVC. Les deux canaux aval ont ainsi une longueur totale $L_{\text{xo}} = L_{\text{zo}} = 2,4m$ avec, dans les conditions expérimentales de ce travail, une sortie libre à l'aval du canal latéral.

Le déversoir latéral pour la présente étude correspond à un déversoir à crête mince de pelle $p_{\text{lat}} =$

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2020LYSEI083/these.pdf
© [A. Claro Barreto], [2020], INSA Lyon, tous droits réservés

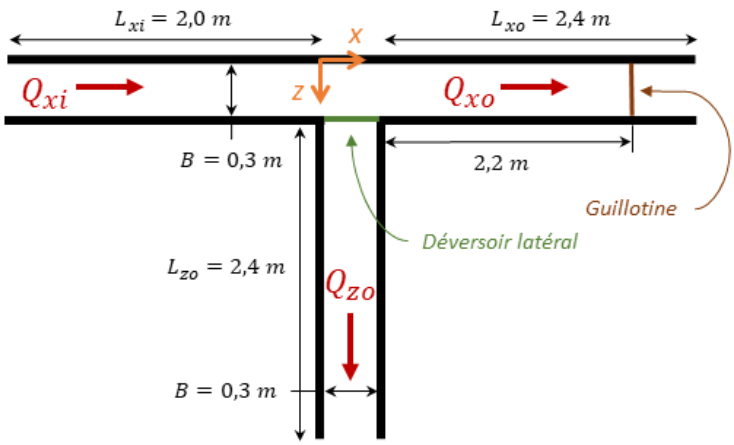


Figure 3.1 – Schéma 2D du déversoir latéral. Q_{xi} : débit d'entrée ; Q_{xo} : débit conservé ; Q_{zo} : débit déversé.

$75\,mm$ en $z/B = 1$ et $x/B \in [0,1]$, c'est à dire à l'entrée du canal de sortie latéral (Fig. 3.2a-3.2b). Un tuyau souple est installé à l'aval du seuil latéral afin d'aérer la lame déversante (Fig. 3.2c).

Pour réguler la profondeur dans l'installation, une vanne guillotine est placée dans le canal du débit conservé Q_{xo} (Fig. 3.3) à une distance de 2.2 m à l'aval du croisement ($x/B = 8.333$). L'ouverture de la vanne, mesurée avec un mètre de classe II, est égale à $0.033\ m$.

3.2.2 Mesures expérimentales

L'hydrodynamique du déversoir latéral est caractérisée via la mesure du débit massique, de la hauteur d'eau et des vitesses instantanées locales (u, v et w) en différents points de l'ouvrage.

3.2.2.1 Le débit massique et la hauteur d'eau

Les débits entrant Q_{xi} et sortant latéral Q_{zo} sont mesurés par des débitmètre électromagnétiques (Promag 50 d'Endress Hauser ; incertitude $0.05\,l/s$), dont est déduit le débit sortant axial Q_{xo}. Les profondeurs sont mesurées à l'aide d'un limnimètre à pointe simple, avec une incertitude estimée à $0.4\,mm$.

Les essais sont effectués avec un débit d'entrée $Q_{xi} = 10.55\,l/s$ et une profondeur dans le canal amont $h_{xi} = 0.10\,m$ (mesurée en en $x/B = -1$) auxquels correspondent un nombre de Reynolds de l'écoulement $Re = 844\,00$ et un nombre de Froude de l'écoulement $Fr = 0.355$, respectivement définis comme :

$$Re = \frac{4Q_{xi}}{(B + 2h_{xi})\,\nu} \tag{3.1}$$

$$Fr = \frac{Q_{xi}}{(B\,h_{xi})\sqrt{g\,h_{xi}}} \tag{3.2}$$

3.2.2.2 Estimation de la hauteur d'eau au début du déversement - $x/B = 0$

Au début du déversement ($x/B = 0$), la hauteur d'eau h_0 est estimée par calcul numérique parce qu'elle n'a pas été mesurée. h_0 est estimée à l'aide de la loi d'ouvrage d'un déversoir latéral (Eq. 3.3), elle est calculée à l'aide des valeurs propres de la matrice compagnon du polynôme d'ordre 3 (Eq. 3.4) issu de l'arrangement de l'Eq. 3.3.

$$Q_{zo} = C_d B\sqrt{2g}\left(\frac{Q_{xi}^2}{2gB^2h_0^2} + h_0 - w\right)^{3/2} \tag{3.3}$$

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2020LYSEI083/these.pdf
© [A. Claro Barreto], [2020], INSA Lyon, tous droits réservés

(a) La lame déversante tout le long du seuil latéral.

(b) La lame déversante au début du seuil latéral ($x/B = 0.00$).

(c) Système pour aérer la lame déversante ($x/B \approx 1.00$).

Figure 3.2 – Le déversoir latéral à crête mince de pelle $p_{\text{lat}} = 75\ mm$.

avec $C_d = 0.402$ le coefficient de décharge latérale d'une pelle à crête mince (Hager 2010), $g = 9.807\ m/s^2$ l'accélération due à la gravité et $w \equiv p_{\text{lat}} = 0.075\ m$ la hauteur de la pelle à crête mince.

$$h_0^3 - \left(\left(\frac{Q_{zo}}{C_d B\sqrt{2g}}\right)^{2/3} + w\right)h_0^2 + \frac{Q_{xi}^2}{2gB^2} = 0 \tag{3.4}$$

L'incertitude de la hauteur h_0 est calculée par une simulation de Monte Carlo avec 1 000 000 d'itérations et en supposant que chacun des paramètres de l'Eq. 3.3 suivent une loi uniforme (Eq. 3.5) et toutes

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2020LYSEI083/these.pdf
© [A. Claro Barreto], [2020], INSA Lyon, tous droits réservés

Figure 3.3 – La vanne guillotine à $0.2\ m$ à l'amont de la sortie du canal du débit conservé Q_{xo}.

covariances sont égales à zéro. La loi de probabilité uniforme est utilisée parce que l'on connaît uniquement la précision de mesure (ISO/IEC Guide 98-1 2009). Notamment, l'incertitude du coefficient C_d est définie égale à 0.01 afin de prendre en compte sa variabilité empirique (e.g. Hager 2010).

$$Q_{zo} \sim U(2.43\,,0.05)\,L/s \quad Q_{xi} \sim U(10.55\,,0.05)\,L/s \quad C_d \sim U(0.402\,,0.01) \tag{3.5}$$
$$B \sim U(0.300\,,0.001)\,m \quad w \sim U(0.075\,,0.001)\,m \quad g \sim U(9.807\,,0.001)\,m/s^2$$

3.2.2.3 Vitesses et turbulence locales mesurées par ADV

Les 3 composantes de la vitesse instantanée sont mesurées à l'aide d'un Vélocimètre Acoustique Doppler (ADV en anglais), en l'occurrence un micro-ADV Vectrino 3D de Nortek avec une sonde «side-looking». La sonde ADV mesure les champs de vitesses instantanées dans un volume de contrôle d'environ 6 mm de diamètre et 7 mm de longueur (sonde type «side looking» - NORTEK 2017). L'incertitude de la sonde est égale à 0.5% de la vitesse mesurée, soit $\pm 0.001\ m/s$. La fréquence de mesure est de 50 Hz.

Pour obtenir une bonne qualité de signal, l'eau est ensemencée avec des particules de polyamide de Dantec™ de $5\,\mu m$ et $1030\,Kg/m^3$, d'après Dantec Dynamics™. La qualité des données expérimentales est assurée par un rapport signal-bruit supérieur à 15% et un index de corrélation supérieur à 70%. Tout point de mesure (i.e. la série temporelle des vitesses u, v et w) qui ne respecte ces seuils pour au moins 75% des mesures effectuée est classé comme donnée aberrante (outlier), voir Tableau 3.1.

En pratique, la vitesse et les contraintes de Reynolds sont mesurées sur des plans transversaux yz comme présenté dans la Fig. 3.4. La présence du fond et/ou de la surface libre empêchent d'effectuer des mesures en-dehors de la plage $z/H \in [0.1 - 0.9]$. Le nombre de points de mesure par plan transversal yz est indiqué dans le Tableau 3.1.

La sonde ADV se déplace selon 3 axes grâce à un charriot de déplacement (Fig. 3.5) avec des incertitudes de positionnement de $\pm 2mm$ sur x, $\pm 0.5mm$ sur y et $\pm 0.2mm$ sur z.

3.2.2.4 Traitement des données de vitesse obtenues par ADV

La détection des pics du signal temporel brut de vitesse est effectuée à l'aide de l'algorithme du seuil de phase-spatiale (PST, en anglais) proposé par Goring et Nikora (2002). L'algorithme PST a été modifié selon les recommandations proposées par Wahl (2003) pour les paramètres de localisation et d'échelle. La localisation est définie égale à la médiane ($\widehat{x}$). L'échelle égale à 1.483 fois la médiane de la déviation médiane absolue $\left(\widehat{\left|x - \widehat{x}\right|}\right)$. Le remplacement des pics détectés est réalisé à l'aide du polynôme d'ordre 3 sur 12 points de mesure proposé par Goring et Nikora (2002). Cette méthode est adaptée aux signaux collectés avec des fréquences d'échantillonnage entre 25 Hz et 100 Hz. Cette méthode de remplacement

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2020LYSEI083/these.pdf
© [A. Claro Barreto], [2020], INSA Lyon, tous droits réservés

Section	$\frac{x}{B}$	Nombre de mesures	Outlier	
			Nombre	%
1	-6.363	40	9	22.5
2	-1.000	41	6	14.6
3	0.000	67	13	19.4
4	0.250	20	5	25.0
5	1.000	61	4	6.6
6	2.000	45	3	6.7
Tous		274	40	14.6

Tableau 3.1 – Nombre de points de mesure de vitesse 3D à l'aide de l'ADV et les valeurs aberrantes (outliers) par section de mesure (Fig. 3.4).

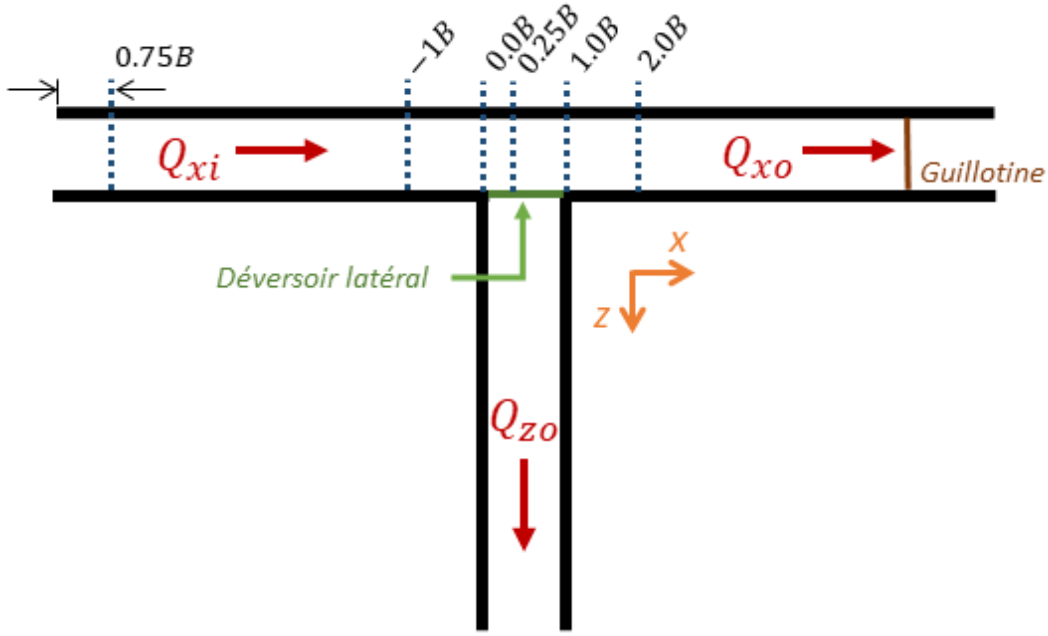


Figure 3.4 – Plans transversaux yz (lignes pointillées en bleu) de mesure des vitesses instantanées avec la sonde ADV.

a été validée et utilisée par différents travaux de recherche (e.g. Jesson et al. 2013), notamment au laboratoire par Maté Marín et al. (2018).

3.2.2.5 Le temps de mesure minimal

Le temps de mesure minimal représente la durée minimale au cours de laquelle la sonde ADV doit mesurer les 3 vitesses instantanées de l'écoulement afin d'estimer les moyennes temporelles des vitesses ($\overline{u_i}$) et contraintes de Reynolds ($\overline{u_i'u_i'}$ et $\overline{u_i'u_j'}$) avec un niveau de convergence situé en dessous ou égal à un seuil prédéfini. Le seuil utilisé dans cette étude correspond à l'erreur relative (en valeur absolue) $|e_a| = \left|\phi_t - \phi_{8\,\text{min}}\right| / \phi_{8\,\text{min}}$, avec ϕ_t et $\phi_{8\,\text{min}}$ les moyennes temporelles de la variable ϕ jusqu'au temps de mesure t et 8 min, respectivement. Le temps de mesure de 8 minutes ($480\,s$) est choisi après une série de tests au sein du déversoir latéral. A titre d'exemple, la Fig. 3.6a présente la convergence de la variance des vitesses ${\sigma_{u_i}}^2$, avec $i = 1, 2, 3$, pour un point de mesure localisé dans la section d'entrée du déversoir latéral ($x/B = 0$, $z/B = 0.513$ et $y/H = 0.660$). Il est observé que le temps de mesure minimal pour ce point de mesure est d'environ 275 secondes, ce temps est inférieur au temps de mesure utilisé (480 secondes).

Une analyse *a posteriori* de tous les signaux temporels de vitesse a montré que le temps de mesure de

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2020LYSEI083/these.pdf
© [A. Claro Barreto], [2020], INSA Lyon, tous droits réservés

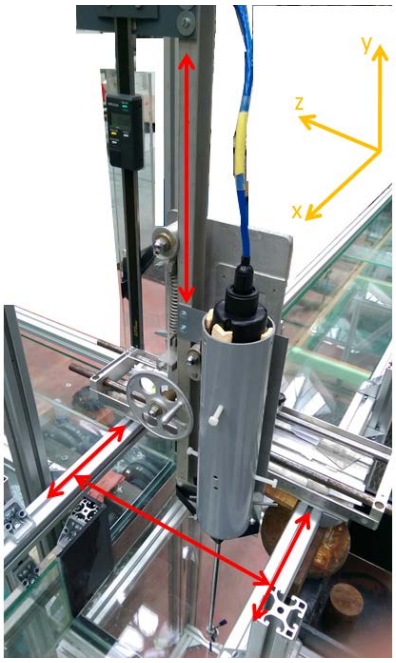


Figure 3.5 – Charriot de déplacement de la sonde ADV dans les 3 axes. Les sens de déplacement sont indiqués par les flèches rouges.

8 minutes est supérieur au temps de mesure minimale pour avoir une erreur relative absolue $|e_a| \leq 1\%$ (voir Fig. 3.6b). Le temps de mesure de 98.9% de points est supérieur au temps minimal médian ($t_{\text{min}} = 360s$) pour une erreur $|e_a| < 1\%$ sur les champs de vitesses et de contraintes de Reynolds. Ce temps de mesure est supérieur à celui utilisé par Weber et al. (2001) lors de leurs expériences de caractérisation de l'écoulement au niveau des jonctions ($t_{min} \approx 60s$). Ainsi, l'erreur liée au temps de mesure sur les champs de vitesses ($\overline{u_i}$) et de contraintes de Reynolds ($\overline{u_i'u_i'}$ et $\overline{u_i'u_j'}$) est inférieure ou égale à 1% pour l'ensemble des points expérimentaux.

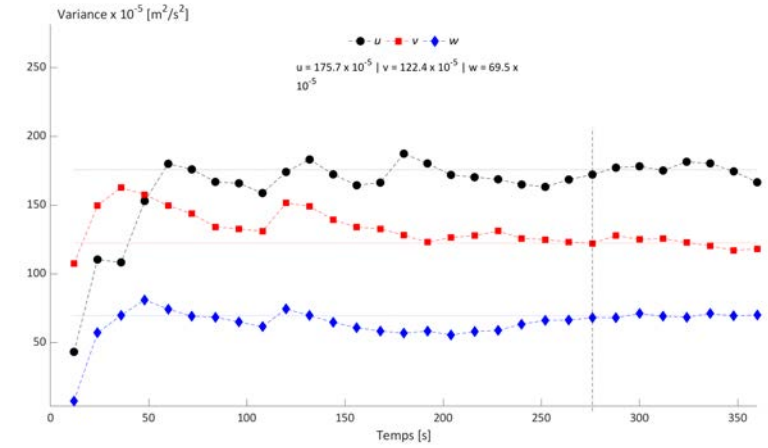
3.2.2.6 L'incertitude liée à l'erreur d'orientation de la sonde ADV

Les signaux temporels après remplacement de pics sont utilisés pour estimer l'incertitude liée à l'erreur d'orientation de la sonde ADV au niveau des plans transversaux yz d'après les travaux de Peltier et al. (2013). L'erreur d'orientation est définie égale à un angle de $\pm 2.5°$ dans les trois axes : x, y et z. L'incertitude de chaque point de mesure est calculée à l'aide d'une simulation de Monte-Carlo avec $1\ 000\ 000$ réalisations. La distribution de probabilité de l'erreur d'orientation est supposée suivre une loi uniforme parce que sa distribution n'est pas connue (ISO/IEC Guide 98-1 2009). La moyenne et l'écart type des 3 vitesses et de l'énergie cinétique turbulente ($k = 1/2\left(\overline{u'u'} + \overline{v'v'} + \overline{w'w'}\right)$) sont calculés à l'aide des réalisations de Monte-Carlo. L'incertitude de l'ensemble des données expérimentales pour chaque vitesse et l'énergie k est caractérisée par le coefficient de variation élargie $2\left|\sigma/\mu\right|$ (Tableau 3.8) .

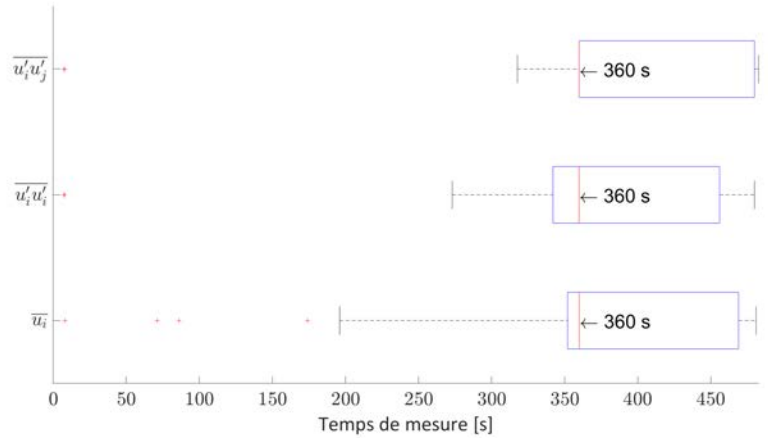
	$\overline{u}$	$\overline{v}$	$\overline{w}$	k
$2\left\|\frac{\sigma}{\mu}\right\|$	0.002	3.593	1.472	0.002
	[0.001 - 0.019]	[0.335 - 39.116]	[0.105 - 13.511]	[0.000 - 0.054]

Tableau 3.2 – Coefficient de variation élargi $2\left|\sigma/\mu\right|$ (médiane) des champs de vitesses $\overline{u}$, $\overline{v}$ et $\overline{w}$, et de l'énergie cinétique turbulente k pour l'ensemble des résultats expérimentaux. Les valeurs entre crochets correspondent aux percentiles à 5% et 95%.

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2020LYSEI083/these.pdf
© [A. Claro Barreto], [2020], INSA Lyon, tous droits réservés



(a) Convergence de la variance des vitesses locales $\overline{u}$, $\overline{v}$ et $\overline{w}$



(b) Temps de mesure minimale pour $|e_r| \leq 1\%$

Figure 3.6 – La convergence de la variance des vitesses locales $\overline{u_i}$, avec $i = 1, 2, 3$, et le temps de mesure minimal pour la vitesse, les contraintes de Reynolds normales ($\overline{u_i'u_i'}$, avec $i = 1, 2, 3$) et de cisaillement ($\overline{u_i'u_j'}$ avec $i \neq j$ et $i = 1, 2, 3$) pour une erreur relative en valeur absolue$|e_r| \leq 1\%$.

3.2.2.7 Impact du système d'homogénéisation de l'écoulement à l'entrée du déversoir latéral

Les champs de vitesse ($\overline{u}$, $\overline{v}$ et $\overline{w}$) et de l'énergie cinétique turbulente k ont été mesurés à l'amont du déversoir latéral (à une distance égale à $0.75B$ par rapport à l'entrée - voir Fig. 3.4) afin d'évaluer si le système d'homogénéisation de l'écoulement utilisé a fonctionné correctement. La distribution spatiale des champs de vitesse et de l'énergie cinétique turbulente sont restreints au centre du canal rectangulaire, car la présence de parois et de la surface libre empêchent la mesure de la vitesse instantanée à l'aide de l'ADV (Section 3.2.2.3). L'analyse *a posteriori* des données expérimentales a montré que le système d'homogénéisation, composé d'un nid d'abeilles suivi d'un convergent vertical et latéral, n'a pas permis d'assurer une répartition « homogène » de l'écoulement en termes de vitesse moyenne principale $\overline{u}/U_o \equiv u/U_o$ (voir Fig. 3.7a).

La vitesse principale adimensionnelle u/U_o n'est pas symétrique dans l'axe horizontal z parce qu'elle présente un décalage des valeurs maximales vers la rive gauche du canal ($z/B \rightarrow 0$ - Fig.3.7), opposée au déversoir. Par contre, la position verticale expérimentale de la vitesse maximale u/U_o, due au phénomène « dip » ($B/H = 3.0$), proche de la hauteur $y/H \approx 0.77$, reste cohérente avec celle obtenue par Yang et al. (2004).

On considère que la présence du seuil latéral et une condition d'entrée non homogène sont les deux

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2020LYSEI083/these.pdf
© [A. Claro Barreto], [2020], INSA Lyon, tous droits réservés

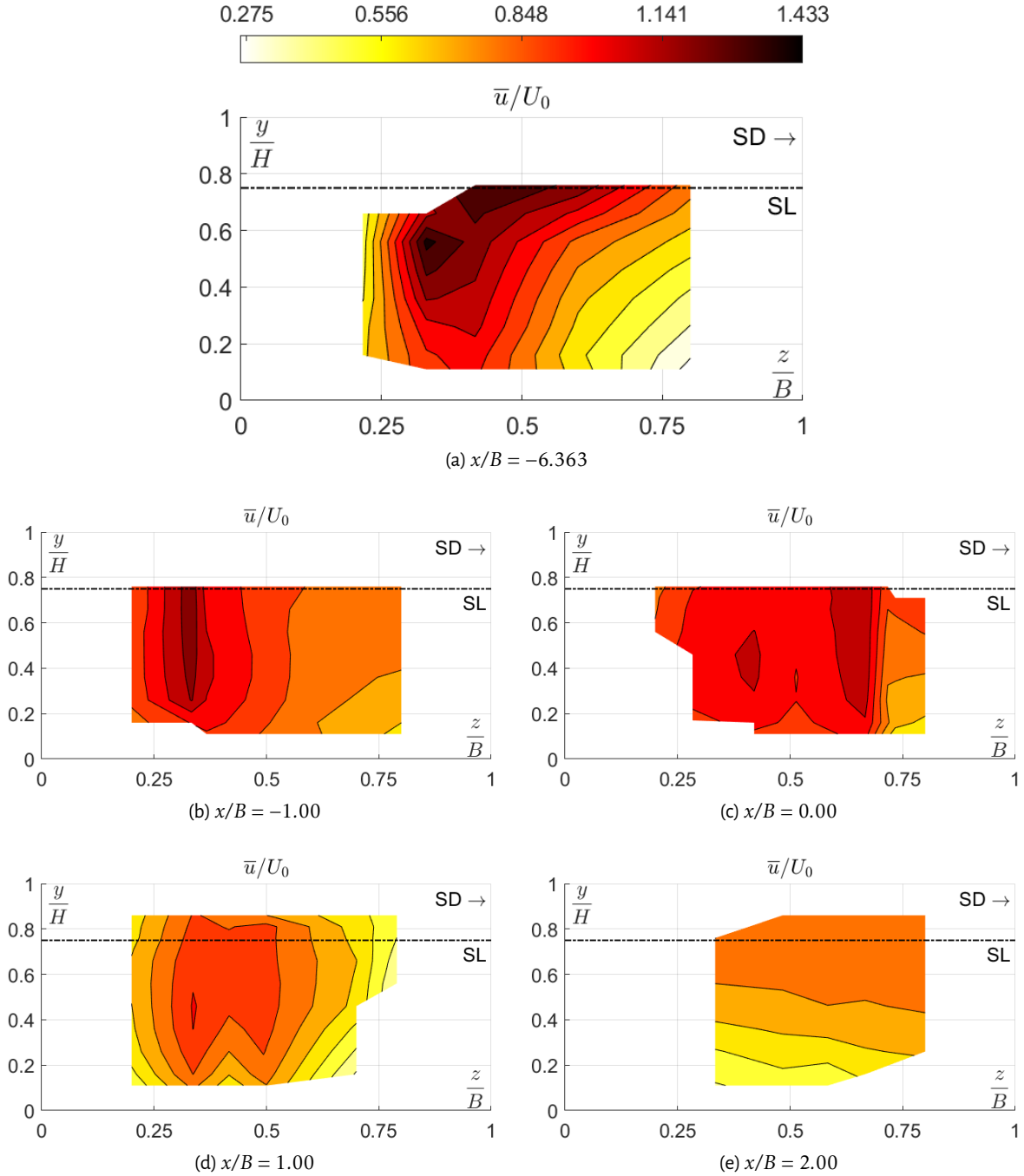


Figure 3.7 – Vue vers l'aval de la distribution spatiale de vitesse longitudinale moyenne $\overline{u}/U_0$ à l'entrée du canal amont (Fig. 3.7a), et à l'amont (3.7b-3.7c) et l'aval (3.7d-3.7e) du déversoir latéral. SD : Sens du déversement. SL : Seuil latéral à $y/H = 0.75$. $H = 0.100\ m$. $B = 0.300\ m$.

principales causes de la dissymétrie du champ de la vitesse u/U_0 observée au niveau de l'entrée du canal amont (Fig. 3.7a). Cette dissymétrie de l'écoulement est observée jusqu'à la section transversale localisée à $1B$ à l'amont du déversement (voir Fig. 3.7b). Le modèle numérique du déversoir latéral permettra de vérifier cette hypothèse. La dissymétrie du champ de la vitesse u/U_o n'est plus observée à partir de la section transversale localisée à $1B$ à l'aval de la fin du déversement (Fig. 3.7e). Le contour de la vitesse u/U_o commence à s'homogénéiser dès la fin du déversement (voir Fig. 3.7d). A noter que ces observations sont basées sur des champs de vitesse loin des parois latérales ($0.25 < z/B < 0.75$) et du fond ($y/H > 0.1$), car la sonde ADV utilisée n'est pas capable de mesurer l'écoulement proche paroi.

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2020LYSEI083/these.pdf
© [A. Claro Barreto], [2020], INSA Lyon, tous droits réservés

3.2.3 Le modèle numérique

L'hydrodynamique du déversoir latéral est simulée numériquement à l'aide de la mécanique des fluides numérique (CFD, en anglais). L'écoulement est étudié à travers les champs de vitesse et l'énergie cinétique turbulente (i.e. la turbulence).

Dans un premier temps, le principe théorique de l'approche numérique employée est décrit dans les Sections 3.2.3.1-3.2.3.4. Ensuite, les modèles de turbulences et l'approche numérique pour reproduire la surface libre employées sont présentés dans les Sections 3.2.3.5-3.2.3.6, les conditions limites et initiales employées sont décrites dans les Sections 3.2.3.7-3.2.3.8, et les schémas de discrétisation spatiale de l'ensemble des équations est présentés dans la Section 3.2.3.9. Les caractéristiques de la géométrie et du maillage utilisés sont présentées dans la Section 3.2.3.10. La méthode de calcul de l'incertitude des résultats numériques est décrite dans la Section 3.2.3.11. Enfin, les conditions de convergence et les critères de performance du modèle numérique sont présentés dans les Sections 3.2.3.12-3.2.3.13.

3.2.3.1 Introduction

Le comportement d'un fluide newtonien est décrit par les équations proposées de manière indépendante par le mathématicien et ingénieur Henri Navier (1822) et le physicien George Gabriel Stokes. Les équations de Navier-Stokes supposent que le fluide d'intérêt se comporte comme un milieu continu, c'est-à-dire qu'il n'est pas considéré comme l'ensemble de particules discrètes. Jusqu'à présent, on ne dispose pas d'une solution générale des équations de Navier-Stokes qui sont aux dérivées partielles non linéaires. La résolution approchée des équations de Navier-Stokes est la méthode généralement utilisée en milieux académique et industriel afin d'étudier les écoulements turbulents.

Il existe 3 grandes familles de résolution approchée : la simulation numérique directe (Direct Numerical Simulation - DNS), la simulation des grandes échelles (Large Eddy Simulation - LES) et la simulation des équation moyennes dans le temps par décomposition de Reynolds (Reynolds-Averanged Navier-Stokes - RANS). L'approche RANS est la plus utilisée en industrie grâce au temps de calcul raisonnable par rapport à la précision requise (e.g. Corson et al. 2009 ; Hanjalic 2005 ; Isenmann 2016 ; Maté Marín et al. 2018). Très récemment, l'approche LES commence à être utilisée de plus en plus en milieu industriel grâce (i) aux nouvelles capacités de calcul disponibles et (ii) aux limitations de l'approche RANS pour certains types d'écoulements (e.g. Aljure et al. 2018 ; Duchaine et al. 2019). Au contraire, l'approche DNS reste utilisée seulement en milieu académique du fait des ressources nécessaires pour simuler des écoulements turbulents rencontrés en milieu industriel (e.g. Jiménez et García-Mayoral 2011).

3.2.3.2 Les équations de Navier-Stokes

Le mouvement d'un fluide incompressible et isotherme peut être décrit grâce à 2 lois physiques : i) la conservation de masse et ii) la conservation de la quantité de mouvement (i.e. la 2ième loi de Newton). La conservation de la masse, écrite en notation de Einstein et en coordonnées cartésiennes, est définie par

$$\frac{\partial \mathbf{u_i}}{\partial x_i} = 0 \,, \tag{3.6}$$

avec $\mathbf{u_i}$ le vecteur de vitesses instantanées et x_i le vecteur de position. La conservation de la quantité de mouvement (la 2ième loi de Newton), dans la même notation et système de coordonnées, est définie par

$$\frac{\partial \mathbf{u_i}}{\partial t} + \frac{\partial \mathbf{u_i u_j}}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho}\frac{\partial \mathbf{p}}{\partial x_i} + \frac{1}{\rho}\frac{\partial \tau_{\mathbf{ij}}}{\partial x_j} + \mathbf{g_i} \,, \tag{3.7}$$

avec $\mathbf{p}$ la pression instantanée ; $\tau_{\mathbf{ij}}$ le tenseur déviateur de contraintes instantanées et $\mathbf{g_i}$ les forces de volume instantanées (e.g. les forces de gravité, centrifuge, corilis, etc.). Le côté gauche de l'Eq. 3.7 représente l'accélération du fluide par unité de volume, celle-ci est la somme de deux termes : i) l'accélération locale où variation temporelle (1^{ier} terme) et ii) l'accélération convective qui indique le flux de la quantité de

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2020LYSEI083/these.pdf
© [A. Claro Barreto], [2020], INSA Lyon, tous droits réservés

mouvement (2ième terme). Le côté droit représente les forces de pression, viscosité et volume, respectivement. Le terme associé à la force de pression présente un signe négatif car celle-ci est une contrainte normale de compression par nature. Les forces de pression et de viscosité, 1^{ier} et 2ième termes du côté droit de l'Eq. 3.7, sont appelées « forces de surface ».

Le tenseur de contraintes visqueuses $\tau_{\mathbf{ij}}$ pour un fluide newtonien et isotrope est proportionnel au tenseur de déformation. D'après l'hypothèse proposée par Stokes (1845), $\lambda = -2\mu/3$, le tenseur $\tau_{\mathbf{ij}}$ est défini comme

$$\begin{aligned} \tau_{\mathbf{ij}} &= \mu\left(\frac{\partial \mathbf{u_j}}{\partial x_i} + \frac{\partial \mathbf{u_i}}{\partial x_j}\right) + \lambda\delta_{ij}\frac{\partial \mathbf{u_k}}{\partial x_k} \\ \tau_{\mathbf{ij}} &= \mu\left(\frac{\partial \mathbf{u_j}}{\partial x_i} + \frac{\partial \mathbf{u_i}}{\partial x_j} - \frac{2}{3}\delta_{ij}\frac{\partial \mathbf{u_k}}{\partial x_k}\right), \end{aligned} \tag{3.8}$$

avec μ la viscosité dynamique de cisaillement ; λ la viscosité dynamique de volume et δ_{ij} le symbole de Kronecker qui vaut 1 si $i = j$ et 0 sinon. Dans un domaine à trois dimensions, le tenseur $\tau_{\mathbf{ij}}$ est composé de six termes indépendants grâce à l'isotropie du fluide : $\tau_{\mathbf{ij}} = \tau_{\mathbf{ji}}$ (Schilichting et Gersten 1979). En appliquant la conservation de la masse pour un fluide incompressible (Eq. 3.6), l'Eq. 3.8) dévient

$$\tau_{\mathbf{ij}} = \mu\left(\frac{\partial \mathbf{u_j}}{\partial x_i} + \frac{\partial \mathbf{u_i}}{\partial x_j}\right) = 2\mu\mathbf{S_{ij}}\,, \tag{3.9}$$

avec $\mathbf{S_{ij}} = 1/2\left(\partial\mathbf{u_j}/\partial x_i + \partial\mathbf{u_i}/\partial x_j\right)$ le tenseur déviateur de contraintes instantanées. En substituant le tenseur de contraintes visqueuses $\tau_{\mathbf{ij}}$ (Eq. 3.9) dans la conservation de la quantité de mouvement (Eq. 3.7), cette dernière devient

$$\frac{\partial \mathbf{u_i}}{\partial t} + \frac{\partial \mathbf{u_i u_j}}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho}\frac{\partial \mathbf{p}}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j}\left(2\nu\mathbf{S_{ij}}\right) + \mathbf{g_i} \tag{3.10}$$

avec $\nu = \mu/\rho$ la viscosité cinématique de cisaillement.

3.2.3.3 La méthode de volumes finis

La solution analytique des équations de Navier-Stokes, la conservation de la masse (Eq. 3.6) et de la quantité de mouvement (Eq. 3.10), est connue seulement pour des écoulements simples tel que l'écoulement de Poiseuille, de Couette et le tourbillon de Taylor-Green (Drazin et Riley 2006). Les courants océaniques, les courants d'air à l'intérieur d'une ville, la confluence de deux (ou plus) rivières, entre autres, correspondent à des écoulements turbulents complexes. En particulier, les écoulements rencontrés en réseau d'assainissement sont caractérisés par des zones de circulation fermées et/ou hélicoïdales, à surface libre et/ou en charge, chargés d'une pollution particulaire et dissoute, et par la présence de discontinuités hydrauliques (Lipeme Kouyi et al. 2011 ; Mignot et al. 2012, 2014 ; Momplot et al. 2017). L'étude numérique de ces écoulements est seulement possible à l'aide d'une solution approchée des équations de Navier-Stokes.

La méthode de volume finis est l'approche numérique la plus utilisée, tant les milieux académiques qu'industriels, pour la résolution de ces équations à dérivées partielles non linéaires (Versteeg et Malalasekera 2007). Cette méthode discrétise les Eqs. 3.6- 3.10 à l'aide de la méthode des différences finies au niveau d'un volume de contrôle. Au sein de chaque volume fini (dans l'espace), les lois de la conservation de la masse et de la quantité de mouvement sont imposées afin de respecter ces deux contraintes dans l'ensemble du domaine de calcul. Le domaine de calcul est ainsi discrétisé (dans l'espace) en plusieurs volumes de contrôle. L'exactitude de la solution approchée au sein de chaque volume de contrôle dépendra, entre autres, de l'ordre des schémas de discrétisations temporelle et spatiale utilisés (Moukalled et al. 2016).

Le lecteur intéressé pour une description plus détaillé de la méthode de volumes finis est invité à consulter les travaux d'Anderson et Wendt (1995), Ferziger et Peric (2012), Moukalled et al. (2016) et Versteeg et Malalasekera (2007).

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2020LYSEI083/these.pdf
© [A. Claro Barreto], [2020], INSA Lyon, tous droits réservés

3.2.3.4 Modélisation de la turbulence par décomposition de Reynolds - RANS

Les écoulements turbulents peuvent être simulés numériquement par une solution approchée des équations de Navier-Stokes (l'Eq. 3.6 et l'Eq. 3.10). L'approche par décomposition de Reynolds permet de moyenner dans le temps toutes les variables présentes dans les équations de Navier-Stokes. Cette décomposition permet de décrire la variation temporelle d'une propriété de l'écoulement α par sa valeur moyenne $\overline{\alpha}$ et sa fluctuation α'. A titre d'exemple, le champ de vitesses $\mathbf{u_i}$ est redéfinie par

$$\mathbf{u_i} \equiv \mathbf{u_i}(t) = \overline{u_i} + u_i' = u_i + u_i' \,, \tag{3.11}$$

avec $u_i \equiv \overline{u_i}$ le champ de vitesses moyenné dans le temps et u_i' et sa fluctuation temporelle avec moyenne temporelle égale à zéro.

La valeur moyenne α et la fluctuation α' varient dans l'espace et le temps pour les écoulements transitoires. La valeur moyenne α, pour ce type d'écoulements, correspond à une moyenne d'ensemble où l'intervalle de temps ΔT est (i) inférieur au pas de temps de la discrétisation temporelle Δt mais (ii) supérieur à l'échelle de temps des variations d'intérêt les plus lentes (i.e. les tourbillons à grandes échelles spatiales). Dans le cadre des écoulements permanents, la valeur moyenne α et sa fluctuation α' sont fonction de l'espace uniquement.

Après l'application de la décomposition de Reynolds, la conservation de la masse (Eq. 3.6) devient

$$\overline{\frac{\partial \mathbf{u_i}}{\partial x_i}} = \frac{\partial \overline{u_i}}{\partial x_i} + \frac{\partial \overline{u_i'}}{\partial x_i} = \frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \tag{3.12}$$

avec u_i le champs de vitesses moyennées dans le temps, et $\partial_i \overline{u_i'} = 0$ due à la décomposition de Reynolds.

La conservation de la quantité de mouvement (Eq. 3.10) après application de la décomposition de Reynolds devient

$$\overline{\left(\frac{\partial \mathbf{u_i}}{\partial t}\right)} + \overline{\left(\frac{\partial \mathbf{u_i u_j}}{\partial x_j}\right)} = -\overline{\left(\frac{1}{\rho}\frac{\partial \mathbf{p}}{\partial x_i}\right)} + \overline{\left(\frac{\partial}{\partial x_j}\left(2\nu \mathbf{S_{ij}}\right)\right)} + \overline{\left(\mathbf{g_i}\right)}$$

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + \frac{\partial u_i u_j}{\partial x_j} + \frac{\partial \overline{u_i' u_j'}}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho}\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j}\left(2\nu S_{ij}\right) + g_i \,, \tag{3.13}$$

avec S_{ij} le tenseur déviateur de contraintes moyennées. L'Eq. 3.13 est similaire à l'Eq. 3.10 une fois les variables instantanées remplacées par les variables moyennées dans le temps sauf pour le 3ième terme, $\overline{u_i' u_j'}$, qui apparaît à cause de la décomposition de Reynolds. Le tenseur $R_{ij} = -\rho \overline{u_i' u_j'}$ a les mêmes unités que le tenseur des contraintes visqueuses $\mu \partial_j u_i$, c'est pour cela qu'il est nommé le tenseur de contraintes de Reynolds. Le tenseur R_{ij} représente les corrélations des fluctuations de vitesse $\overline{u_i' u_j'}$. L'Eq. 3.13 est généralement arrangée de manière suivante à placer le nouveau tenseur du même côté que le tenseur de contraintes visqueuses (2ième terme du côté droit de l'Eq. 3.13) :

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + \frac{\partial u_i u_j}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho}\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j}\left(2\nu S_{ij}\right) + \frac{1}{\rho}\frac{\partial R_{ij}}{\partial x_j} + g_i \tag{3.14}$$

La symétrie du tenseur de Reynolds R_{ij} réduit le nombre de contraintes de Reynolds indépendantes de neuf à six dans un domaine tridimensionnel parce que $R_{ij} = R_{ji}$. Les contraintes normales sont définies par R_{ii} et celles de cisaillement par R_{ij} (avec $i \neq j$).

De manière similaire, l'équation du transport d'une propriété quelconque α, au sein d'un écoulement incompressible et isotherme après l'application de la décomposition de Reynolds devient

$$\frac{\partial \alpha}{\partial t} + \frac{\partial \alpha u_j}{\partial x_j} = +\frac{1}{\rho}\frac{\partial}{\partial x_j}\left(\frac{\partial \Gamma_\alpha \alpha}{\partial x_i}\right) - \frac{\partial \overline{\alpha' u_j'}}{\partial x_j} + S_\alpha \,, \tag{3.15}$$

avec α la valeur moyennée dans le temps, α' la fluctuation temporelle, Γ_α le coefficient de diffusion, $\overline{\alpha' u_j'}$ les termes de transport de α dus à la turbulence et S_α le terme source moyennée dans le temps.

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2020LYSEI083/these.pdf
© [A. Claro Barreto], [2020], INSA Lyon, tous droits réservés

3.2.3.5 Les modèles de turbulence : RNG k-ϵ et SST k-ω

Le système d'équations de Navier-Stokes moyennées dans le temps (RANS, en anglais) (Eq. 3.12 et Eq. 3.14) ne constitue pas un système fermé à cause des 6 termes additionnels $\overline{u_i'u_j'}$, obtenus après la décomposition de Reynolds. En outre, l'équation de transport moyennée dans le temps de la propriété $\alpha_\mathbf{i}$ ajoute les 3 inconnues $\overline{\alpha' u_j'}$ aux systèmes d'équations. Ainsi, il s'avère nécessaire de définir ces nouveaux paramètres via un nouveau modèle numérique qui fermera le système d'équations. Tout modèle qui cherche à simuler ou définir ces paramètres liés à la composante de fluctuation est communément nommé un modèle de turbulence.

Le principal objectif de tout modèle de turbulence est d'avoir une large applicabilité et de prédire le tenseur de Reynolds R_{ij}. Si une variable $\alpha_\mathbf{i}$ est étudiée, il sera nécessaire aussi de modéliser les termes turbulents $\overline{\alpha_i'u_j'}$. Le modèle de turbulence doit aussi être simple et non coûteux en ressources informatiques pour les applications au milieu industriel (Versteeg et Malalasekera 2007).

Le tenseur de Reynolds R_{ij} est généralement calculé à l'aide de l'hypothèse de Boussinesq (1877) : les contraintes de Reynolds sont proportionnelles aux taux de déformation moyennés. Le tenseur R_{ij} est définit par

$$R_{ij} = -\rho\overline{u_i'u_j'} = \mu_\tau\left(\frac{\partial u_j}{\partial x_i} + \frac{\partial u_i}{\partial x_j}\right) - \frac{2}{3}\rho k\delta_{ij} = 2\mu_\tau S_{ij} - \frac{2}{3}\rho k\delta_{ij}\,, \tag{3.16}$$

avec μ_τ la viscosité dynamique turbulence de cisaillement et $k = Tr\left(R_{ij}\right) = R_{ii}/3$ l'énergie cinétique turbulente. La viscosité cinématique turbulente est définie de manière similaire à son homologue moléculaire ν : $\nu_\tau = \mu_\tau/\rho$. L'Eq. 3.14 avec l'hypothèse de Boussinesq (Eq. 3.16) devient

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + \frac{\partial u_i u_j}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho}\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j}\left(2\nu S_{ij}\right) + \frac{\partial}{\partial x_j}\left(2\nu_\tau S_{ij} - \frac{2}{3}k\,\delta_{ij}\right) + g_i$$

$$\frac{\partial u_i}{\partial t}) + \frac{\partial u_i u_j}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho}\frac{\partial \check{p}}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j}\left(2\left(\nu + \nu_\tau\right)S_{ij}\right) + g_i\,, \tag{3.17}$$

avec $\check{p} = p + 2k/3$.

L'Eq. 3.17 exige de connaître la viscosité dynamique turbulente μ_τ qui a pour dimensions L^2/T. Les échelles turbulentes de longueur L et du temps T qui peuvent être calculées à l'aide de l'énergie cinétique turbulente k et du taux de dissipation turbulente ϵ ou spécifique ω de l'énergie k. Les modèles de turbulence qui suivent $k-\epsilon$ ou $k-\omega$, via l'équation de transport (Eq. 3.15), appartient à la famille des modèles de turbulence à deux équations. Les modèles type $k-\epsilon$ sont les plus utilisés et validés dans les milieux académique et industriel (Ferziger et Peric 2012; Versteeg et Malalasekera 2007). Les modèles type $k-\omega$ sont principalement utilisés pour des écoulements à faible nombre de Reynolds. Seulement le modèle de turbulence SST k-ω est capable de simuler des écoulements à fort nombre de Reynolds.

Le modèle RNG k-ϵ

Le modèle de turbulence RNG k-ϵ proposé par Yakhot et al. (1992) est établi grâce à l'application de la technique statistique du groupe de rénormalisation (RNG, en anglais) sur l'équation de Navier-Stokes (Eq. 3.7). Cette technique permet de filtrer les petites échelles de l'écoulement de manière analogue à la décomposition de Reynolds. Ce modèle de turbulence permet de palier aux limites du modèle standard k-ϵ proposé par B. E. Launder et Spalding (1983). Le modèle k-ϵ est valide seulement pour les écoulements à haut nombre de Reynolds : les effets de la viscosité moléculaire μ sont négligeables. Le modèle RNG k-ϵ possède une forme similaire que le modèle standard k-ϵ.

Le modèle RNG k-ϵ est applicable pour les écoulements en proche paroi sans besoin d'aucune loi de parois d'amortissement ad hoc pour l'énergie cinétique turbulente k et son taux de dissipation ϵ. En outre, ce modèle est adapté pour les écoulements (i) avec zones de recirculation, (ii) rapidement cisaillés

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2020LYSEI083/these.pdf
© [A. Claro Barreto], [2020], INSA Lyon, tous droits réservés

et (iii) avec une large gamme de Reynolds. Enfin, toutes les constantes du modèle sont calculées de manière analytique. Ces caractéristiques font du modèle RNG k-ϵ un modèle plus précis et fiable que le modèle standard k-ϵ. Le lecteur intéressé pour une explication plus détaillée du modèle et la dérivation des équations présentées ci-dessous est invité à consulter les travaux de Orszag et al. (1993).

Les équations du transport de l'énergie cinétique turbulente k et le taux de dissipation ϵ sont

$$\frac{\partial k}{\partial t} + \frac{\partial\left(k\,u_j\right)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j}\left(\left(\nu + \frac{\nu_\tau}{Pr_k}\right)\frac{\partial k}{\partial x_i}\right) + \frac{1}{\rho}P_k - \epsilon + S_k \tag{3.18}$$

$$\frac{\partial \epsilon}{\partial t} + \frac{\partial\left(\epsilon\,u_j\right)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j}\left(\left(\nu + \frac{\nu_\tau}{Pr_\epsilon}\right)\frac{\partial \epsilon}{\partial x_i}\right) + C_{\epsilon_1}\frac{\epsilon}{k}\frac{1}{\rho}P_k - C_{\epsilon_2}\frac{\epsilon^2}{k} - R_\epsilon + S_\epsilon\,, \tag{3.19}$$

avec P_k le taux de production de l'énergie cinétique turbulente, R_ϵ le taux de destruction de ϵ, Pr_k et Pr_ϵ les nombres de Prandlt et S_k et S_ϵ les termes de source de k et ϵ, respectivement. C_{ϵ_1} et C_{ϵ_2} sont des constantes analytiques du modèle.

Le 3ième terme du côté gauche des Eq. 3.18 et Eq. 3.19 correspond au taux de destruction de k et ϵ, respectivement. La destruction de l'énergie cinétique turbulente k due aux effets de compressibilité pour les écoulements au nombre de Mach (Ma) élevé n'est pas applicable pour les écoulements rencontrés en réseau d'assainissement.

Le taux de production P_k est dû aux gradients de vitesse moyennées et aux effets de flottabilité. La flottabilité correspond à la présence simultanée d'un champ de gravité non nul, $g_i \neq 0$, et d'un gradient de température. Cet effet n'existe pas pour les écoulements étudiés expérimentalement (en laboratoire et sur le terrain) parce qu'ils sont supposés isothermes $\left(\partial T/\partial x_i = 0\right)$. Ainsi, la production de l'énergie cinétique turbulente P_k due aux gradients de la vitesse moyennée est définie par

$$P_k = R_{ij}\frac{\partial u_i}{\partial x_j} = \mu_\tau \mathrm{S}^2\,, \tag{3.20}$$

avec $\mathrm{S} = \sqrt{2S_{ij}S_{ij}}$ le module du tenseur de contraintes moyennées $\left(S_{ij}\right)$. A noter que le tenseur de contraintes de Reynolds R_{ij} a été exprimé selon l'hypothèse de Boussinesq (Eq. 3.16).

Le terme R_ϵ représente la destruction du taux de dissipation turbulente ϵ et permet de prendre en compte les zones de déformation rapide et de courbature. Ce taux de destruction est défini par

$$R_\epsilon = \frac{C_\mu \eta^3\left(1 - \frac{\eta}{\eta_0}\right)}{1 + \beta\eta^3}\frac{\epsilon^2}{k}\,, \tag{3.21}$$

avec $C_\mu = 0.0845$, $\eta = \sqrt{2S_{ij}S_{ij}}\,k/\epsilon$, $\eta_0 = 4.38$ et $\beta = 0.012$. Toutes ces constantes ont été déterminées analytiquement grâce à la technique RNG.

Les nombres de Prandtl Pr_k et Pr_ϵ sont calculés selon l'Eq. 3.22 qui est dérivée analytiquement par la technique RNG (Orszag et al. 1993) :

$$\left|\frac{\frac{1}{Pr} - 1.3929}{\frac{1}{Pr_0} - 1.3929}\right|^{0.6321}\left|\frac{\frac{1}{Pr} + 2.3929}{\frac{1}{Pr_0} + 2.3929}\right|^{0.6379} = \frac{\mu_{\text{mol}}}{\mu_{\text{eff}}}\,, \tag{3.22}$$

avec $Pr_0 = 1.0$. Ces nombres de Prandtl sont $Pr_k = Pr_\epsilon \approx 1.393^{-1}$ à des nombres de Reynolds élevé $\left(\frac{\mu_{\text{mol}}}{\mu_{\text{eff}}} \ll 1\right)$.

La viscosité effective ν_{eff} obtenue par la procédure du filtrage d'échelles de la technique RNG est définie par l'équation différentielle suivante

$$\frac{d\left(\frac{\rho^2 k}{\sqrt{\epsilon\mu}}\right)}{d\hat{\nu}} = 1.72\frac{\hat{\nu}}{\sqrt{\hat{\nu}^3 - 1 + C_\nu}}\,, \tag{3.23}$$

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2020LYSEI083/these.pdf
© [A. Claro Barreto], [2020], INSA Lyon, tous droits réservés

avec $\hat{\nu} = \mu_{\text{eff}}/\nu$ et $C_\nu \approx 100$. A des nombres de Reynolds élevés, l'Eq. 3.23 devient

$$\mu_\tau = \rho C_\mu \frac{k^2}{\epsilon}\,, \tag{3.24}$$

expression égale à celle proposée par le modèle de turbulence standard k-ϵ.

Les constantes du modèle, obtenues analytiquement, sont

$$C_{\epsilon_1} = 1.42 \text{ et } C_{\epsilon_2} = 1.68 \tag{3.25}$$

Modèle de transport des contraintes de cisaillement de Reynolds SST k-ω

Le modèle de transport des contraintes de cisaillement SST k-ω (SST pour « shear stress transport ») développé par Menter (1994) est applicable pour une large gamme des écoulements : présence de gradients de pression négatifs, ondes de choc transsoniques, etc. L'énergie cinétique turbulente k et le taux de dissipation spécifique ω sont les deux variables transportées par le modèle de turbulence SST k-ω. Le taux de dissipation spécifique $\omega \equiv k/\epsilon$.

Le modèle SST k-ω impose une transition progressive du modèle standard $k-\omega$ (Wilcox 1998) dans la région interne de couche limite au modèle $k-\epsilon$ pour de grands nombres de Reynolds dans la région externe de la couche limite (Menter et al. 2003). En outre, la viscosité turbulente prend en compte les effets du transport des contraintes de cisaillement de Reynolds ($\overline{u_i' u_j'}$, avec $i \neq j$). Ce modèle de turbulence a été choisi parce qu'il est une amélioration du modèle RNG k-ϵ et il est simple à faire converger, contrairement au modèle RSM (Reynolds Stress model, à 7 équations et difficile à faire converger).

Les équations du transport de l'énergie cinétique turbulente k et du taux de dissipation spécifique ω sont

$$\frac{\partial k}{\partial t} + \frac{\partial\left(k\,u_j\right)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j}\left(\left(\nu + \frac{\nu_\tau}{Pr_k}\right)\frac{\partial k}{\partial x_i}\right) + \frac{1}{\rho}P_k - \frac{1}{\rho}Y_k - \epsilon + S_k \tag{3.26}$$

$$\frac{\partial \omega}{\partial t} + \frac{\partial\left(\omega\,u_j\right)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j}\left(\left(\nu + \frac{\nu_\tau}{Pr_\omega}\right)\frac{\partial \omega}{\partial x_i}\right) + \frac{\alpha\alpha^\star}{\nu_\tau}\frac{1}{\rho}P_k - \frac{1}{\rho}Y_\omega + D_\omega - C_{\epsilon_2}\frac{\epsilon^2}{k} - R_\epsilon + S_\epsilon\,, \tag{3.27}$$

avec P_k le taux de production de l'énergie cinétique turbulente k, D_ω la modification de la diffusion transversale, Y_k et Y_ω la dissipation de k et ω due à la turbulence, respectivement. Pr_i et S_i sont le nombre de Prandlt turbulent et le terme de source de l'énergie ($i = k$) et du taux de dissipation spécifique ($i = \omega$).

Les nombres de Prandtl turbulent Pr_k et Pr_ω de l'énergie k et le taux ω, respectivement, sont

$$Pr_k = \frac{1}{\dfrac{F_1}{Pr_{k,1}} + \dfrac{1-F_1}{Pr_{k,2}}} \tag{3.28}$$

$$Pr_\omega = \frac{1}{\dfrac{F_1}{Pr_{\omega,1}} + \dfrac{1-F_1}{Pr_{\omega,2}}}\,, \tag{3.29}$$

avec la fonction de mélange (ou de transition) F_1 définie comme

$$F_1 = \tanh\left(\left(\min\left[\max\left[\frac{\sqrt{k}}{0.09\omega y}\,,\frac{500\mu}{\rho\omega y^2}\right],\frac{4\rho k}{Pr_{\omega,2}D_\omega^+ y^2}\right]\right)^4\right) \tag{3.30}$$

$$D_\omega^+ = \max\left[\frac{D_\omega}{1-F_1}\,,10^{-10}\right]\,, \tag{3.31}$$

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2020LYSEI083/these.pdf
© [A. Claro Barreto], [2020], INSA Lyon, tous droits réservés

avec y la distance à la paroi. La modification de la diffusion transversale D_ω, due à la transformation du modèle standard $k-\epsilon$ dans le cadre $k-\omega$, est définie comme

$$D_\omega = 2\left(1-F_1\right)\frac{\rho}{\omega Pr_{\omega,2}}\frac{\partial k}{\partial x_j}\frac{\partial \omega}{\partial x_j}\,, \tag{3.32}$$

Le taux de production de l'énergie cinétique turbulente P_k est égal au modèle RNG k-ϵ (Eq. 3.20). Les constantes α et $\alpha^\star$ sont définies comme

$$\alpha = \frac{\alpha_\infty}{\alpha^\star}\left(\frac{\frac{1}{9}+\frac{\mathrm{Re}_\tau}{2.95}}{1+\frac{\mathrm{Re}_\tau}{2.95}}\right) \tag{3.33}$$

$$\alpha^\star = 1.0\left(\frac{\frac{0.072}{3}+\frac{\mathrm{Re}_\tau}{6}}{1+\frac{\mathrm{Re}_\tau}{6}}\right), \tag{3.34}$$

avec

$$\mathrm{Re}_\tau = \frac{k}{\nu\omega} \tag{3.35}$$

et

$$\alpha_\infty = F_1\alpha_{\infty,1} + \left(1-F_1\right)\alpha_{\infty,2} \tag{3.36}$$

$$\alpha_{\infty,1} = \frac{0.075}{\beta^\star_\infty} - \frac{\kappa^2}{Pr_{\omega,1}\sqrt{\beta^\star_\infty}} \tag{3.37}$$

$$\alpha_{\infty,2} = \frac{0.0828}{\beta^\star_\infty} - \frac{\kappa^2}{Pr_{\omega,2}\sqrt{\beta^\star_\infty}}\,, \tag{3.38}$$

avec $\kappa = 0.41$.

Les dissipations dues à la turbulence de l'énergie k et du taux de dissipation ω, Y_k et Y_ω respectivement, sont

$$Y_k = \rho\beta^\star k\omega \tag{3.39}$$

$$Y_\omega = \rho\left(0.075F_1 + 0.0828\left(1-F_1\right)\right)\omega^2\,, \tag{3.40}$$

avec

$$\beta^\star = 0.09\left(\frac{\frac{4}{15}\left(\frac{\mathrm{Re}_\tau}{8}\right)^4}{1+\left(\frac{\mathrm{Re}_\tau}{8}\right)^4}\right) \tag{3.41}$$

Les constants du modèle $\beta^\star_\infty = 0.09$, $Pr_{k,1} = 1.176$, $Pr_{\omega,1} = 2.0$, $Pr_{k,2} = 1.0$ et $Pr_{\omega,2} = 1.168$.

La viscosité turbulente $\nu_\tau = \mu_\tau/\rho$ est calculée à l'aide d'une fonction limiteur F_2 afin d'éviter sa surestimation,

$$\nu_\tau = \frac{k}{\omega}\frac{1}{\max\left[\frac{1}{\alpha^\star}, \frac{\mathrm{S}F_2}{0.31\omega}\right]}\,, \tag{3.42}$$

avec S le module du tenseur des contraintes moyennées $\left(S_{ij}\right)$ (comme celui de l'Eq. 3.20) et $\alpha^\star$ selon l'Eq. 3.34. La fonction limiteur F_2 est définie comme

$$F_2 = \tanh\left(\left(\max\left[2\frac{\sqrt{k}}{0.09\omega y}, \frac{500\nu}{\omega y^2}\right]\right)^2\right), \tag{3.43}$$

avec y la distance à la paroi.

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2020LYSEI083/these.pdf
© [A. Claro Barreto], [2020], INSA Lyon, tous droits réservés

3.2.3.6 Modélisation de la surface libre - Méthode « VOF »

La méthode du volume de fluide ou « Volume Of Fluid » (VOF) proposée par Hirt et Nichols (1981) permet de simuler les écoulements avec deux ou plus fluides non-miscibles. La méthode suit chaque fluide dans le domaine de calcul à l'aide d'une variable numérique appelée la « fraction volumique » et notée α_i, avec i le nom de chacun des fluides simulés. Dans le cadre du projet de recherche, seuls l'eau et l'air sont présents dans les expériences en laboratoire et sur le terrain.

La fraction volumique α_{VOF} respecte la contrainte suivante

$$\alpha_{\text{VOF}} = \sum_{i=1}^{n} \alpha_i = \alpha_{\text{air}} + \alpha_{\text{eau}} = 1 \tag{3.44}$$

Cette contrainte permet d'assurer la conservation de la méthode dans l'ensemble du domaine de calcul. Toutes les mailles de calcul présentent l'une des trois conditions suivantes

$$\alpha_{eau} = \begin{cases} 0 & \text{maille remplie d'air} \\ (0,1) & \text{l'interface d'eau-air} \\ 1 & \text{maille remplie d'eau} \end{cases}, \tag{3.45}$$

et de manière opposée pour α_{air} due à la contrainte de conservation (Eq. 3.44).

L'interface eau-air est suivie à l'aide de l'équation de continuité appliquée à la fraction volumique de l'eau α_{eau} qui a la forme suivante :

$$\frac{\partial\left(\alpha_{\text{eau}}\,\rho_{\text{eau}}\right)}{\partial t} + \frac{\partial\left(\alpha_{\text{eau}}\,\rho_{\text{eau}}\,u_j\right)}{\partial x_j} = S_{\alpha_{\text{eau}}} + \left(\hat{m}_{\text{air,eau}} - \hat{m}_{\text{eau,air}}\right), \tag{3.46}$$

avec $S_{\alpha_{\text{eau}}}$ le terme source généralement égal à zéro, $\hat{m}_{\text{air,eau}}$ le transfert de masse de l'air vers l'eau et $\hat{m}_{\text{eau,air}}$ le transfert de masse de l'eau vers l'air. Ces deux derniers termes, $\hat{m}_{\text{air,eau}}$ et $\hat{m}_{\text{eau,air}}$, sont égaux à zéro pour les écoulements en réseau d'assainissement car aucun échange massique est supposé avoir lieu. L'équation (3.46) est discrétisée de manière implicite pour calculer α^n_{eau} en fonction de $\alpha^{n-1}_{\text{eau}}$, avec n l'itération actuelle.

La présence de la force de gravité et les forces de tension surfacique (i.e. forces de volume) dans un écoulement polyphasique créent une faible convergence de la solution approchée par algorithmes séparés (e.g. SIMPLE, PISO, etc.) car le gradient de pression et les forces de volume sont presque égaux. Ce problème est surmonté à l'aide d'une hypothèse d'équilibre partiel du gradient de pression avec les forces de volume. Celui-ci se traduit par une augmentation du facteur de correction dans le calcul du flux de face entre deux cellules de calcul voisines. Cette hypothèse permet d'avoir une convergence plus robuste et rapide (ANSYS 2015b).

La méthode VOF utilise les mêmes champs de vitesse, turbulence et pression pour tous les fluides ou phases simulées. Cette approximation peut impacter de manière défavorable le calcul des vitesses au niveau de la surface libre s'il existe une grande différence de vitesses entre les différentes phases. Seules la densité et la viscosité dynamique sont fonction de la fraction volumique α.

La densité ρ et la viscosité dynamique μ au niveau de la surface libre, $\alpha_{\text{eau}} \in (0,1)$, sont calculées à l'aide des équations (3.47) et (3.48), respectivement.

$$\rho = \alpha_{eau}\,\rho_{eau} + (1-\alpha_{eau})\,\rho_{air} \tag{3.47}$$

$$\mu = \alpha_{eau}\,\mu_{eau} + (1-\alpha_{eau})\,\mu_{air} \tag{3.48}$$

3.2.3.7 Les conditions limites

Le domaine de calcul est composé des conditions limites qui permettent de le réduire dans l'espace et d'imposer les configurations à étudier. L'ensemble des conditions limites utilisées pour l'écoulement au sein du déversoir latéral en régime fluvial est présenté dans le Tableau 3.3. Toutes les conditions limites du Tableau 3.3 sont présentées ci-dessous.

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2020LYSEI083/these.pdf
© [A. Claro Barreto], [2020], INSA Lyon, tous droits réservés

		Entrée		Sortie	
		Virtuelle	Seuil latéral	Déversement	Conservé
Type		Débit massique	Pression d'entrée	Pression de sortie	Pression de sortie
Intensité turbulente (%)		5	5	5	5
Diamètre hydraulique (m)		24e-02	4.08e-02	6.56e-02	5.95e-02
Hauteur d'eau (m)		0.103	-	-	-
Hauteur radier (m)		0	-	0	0
Méthode	d'interpolation de la densité	Surface libre	-	-	-
	de spécification de la pression	-	Maille voisine		

Tableau 3.3 – Conditions limites du modèle numérique 3D du déversoir latéral.

La condition limite amont : Débit massique

La condition d'entrée du système est simulée à l'aide d'une entrée de type « flux massique ». Le flux massique pour un écoulement à surface libre est défini par

$$\frac{d\,m_{\text{phase}}}{dt} = \rho_{\text{phase}} \cdot A_{\text{phase}} \cdot u_{\text{entrée}}\,, \tag{3.49}$$

avec A_{phase} l'aire relatif à la phase donnée : l'eau ou l'air, $u_{\text{entrée}}$ la vitesse moyenne à l'entrée.

Si l'écoulement au niveau de l'entrée est en régime fluvial ($Fr < 1$), le profil de la fraction volumique α_{eau} est calculé via une interpolation des volumes de contrôle voisins. Si l'écoulement est en régime torrentiel ($Fr > 1$), le profil est fonction de la hauteur d'eau définie comme condition limite, cette valeur doit être connue a priori.

La condition limite aval : Pression de sortie

La condition limite de sortie est simulée à l'aide d'une sortie de type pression. La pression statique de sortie pour un écoulement à surface libre est définie par

$$p_s = \left(\rho - \rho_o\right)\left|\vec{g}\right|\left(\frac{\vec{g}}{\left|\vec{g}\right|} \cdot \left(\vec{b} - \vec{a}\right)\right) = \left(\rho - \rho_o\right)\left|\vec{g}\right|\left(\left(\frac{\vec{g}}{\left|\vec{g}\right|} \cdot \vec{b}\right) + z_{\text{locale}}\right)\,, \tag{3.50}$$

avec ρ_o la densité de référence (i.e. la densité de l'air), $\vec{g}$ le vecteur d'accélération due à la gravité, $\vec{b}$ le vecteur de position du barycentre de la face (du volume de contrôle), $\vec{a}$ le vecteur de position d'un point dans la surface libre. La surface libre est supposée horizontale et perpendiculaire (normale) à la gravité $\vec{g}$. Le paramètre z_{locale} correspond à la distance entre la surface libre et la position de référence.

L'imposition d'une lame déversante aérée : Pression d'entrée

L'aération de la nappe (Fig. 3.2c), formée par l'écoulement au-dessus du déversoir latéral, est assurée dans les expériences - de facon classique - par un tuyau permettant la communication avec la pression atmosphérique. Cette communication est reproduite ici en imposant une condition de pression d'entrée sur la face aval (du seuil latéral) à l'aide d'une surface « virtuelle » localisée tout le long du déversoir latéral et à une hauteur $0.50 \geq y/H \leq 0.60$.

La condition limite de paroi : Paroi fixe - Vitesse

Le profil de pression est celui du volume de contrôle voisin à la condition de sortie pour les écoulements en régime torrentiels ($Fr > 1$). Si l'écoulement est en régime fluvial ($Fr < 1$), le profil de pression sera défini par un profil défini *a priori* ou par celui du volume de contrôle voisin.

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2020LYSEI083/these.pdf
© [A. Claro Barreto], [2020], INSA Lyon, tous droits réservés

L'écoulement proche paroi est simulé à l'aide de la loi de paroi «standard» proposée par B. E. Launder et Spalding (1983). La vitesse principale u proche paroi est définie par

$$u^* = \begin{cases} \frac{1}{\kappa} ln\left(Ey^*\right) & \text{if } y* > 11.225 \\ y* & \text{if } y* <= 11.225 \end{cases} \tag{3.51}$$

avec u^* la vitesse sans dimension et y^* la distance à la paroi sans dimension. La vitesse non dimensionnelle u^* est définie par

$$u^* = \frac{u_o C_\mu^{1/4} k_o^{1/2}}{u_\tau^2} = \frac{u_o C_\mu^{1/4} k_o^{1/2}}{\tau_w/\rho} \tag{3.52}$$

et la distance y^* est définie par

$$y^* = \frac{C_\mu^{1/4} k_o^{1/2} y_o}{\nu}\,, \tag{3.53}$$

avec $\kappa = 0.4187$ la constante de von Kármán, $E = 9.793$ une constante empirique, u_o la vitesse moyenne de la maille adjacente à la paroi (au niveau du barycentre), k_o l'énergie cinétique turbulente de la maille adjacente à la paroi, y_o la distance entre la paroi et le barycentre de la maille adjacente à la paroi, τ_w la contrainte de cisaillement à la paroi. Le seuil $y^* = 11.225$ correspond à la position de croisement entre les fonctions logarithmique et linéaires (Eq. 3.51).

La condition limite de paroi fixe pour le modèle k-ϵ

L'énergie cinétique turbulence à la paroi respecte la contrainte suivante

$$\frac{\partial k}{\partial n} = 0 \tag{3.54}$$

avec n la coordonnée normale à la paroi.

Le taux de production de l'énergie cinétique turbulence P_k (Eq. 3.18) et le taux de dissipation ϵ proche de la paroi sont calculés en supposant une condition d'équilibre local. Cette hypothèse impose que la production de k et sa dissipation ϵ soient égales (en équilibre) au niveau de la maille adjacente à la paroi. Le taux de production P_k dans la maille adjacente à la paroi est calculé à l'aide la loi de paroi standard comme suit

$$P_k \approx \tau_w \frac{\partial u}{\partial y} = \tau_w \frac{\tau_w/\rho}{\kappa C_\mu^{1/4} k_o^{1/2} y_o} \tag{3.55}$$

et le taux de dissipation ϵ est définie par

$$\epsilon = \frac{C_\mu^{3/4} k_o^{3/2}}{\kappa\, y_o} \tag{3.56}$$

La condition limite de paroi fixe pour le modèle k-ω

L'énergie cinétique turbulente k proche de la paroi respecte les contraintes imposées par les Eq. 3.54 et Eq. 3.55. Le taux de dissipation spécifique ω est définie comme

$$\omega_{\text{paroi}} = \frac{u^{*2}}{\nu}\omega^+ \tag{3.57}$$

La valeur analytique du taux non dimensionnel ω^+ dans la région visqueuse est

$$\omega^+ = \frac{6}{(0.075F_1 + 0.0828(1 - F_1))\, y^{+2}}\,, \tag{3.58}$$

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2020LYSEI083/these.pdf
© [A. Claro Barreto], [2020], INSA Lyon, tous droits réservés

et dans la région logarithmique est

$$\omega^+ = \frac{1}{\sqrt{0.09}} \frac{du^+}{dy^+} , \tag{3.59}$$

avec $y^+ = u_\tau y/\nu$ la distance non dimensionnelle à la paroi basée sur la vitesse de cisaillement $u_\tau = \sqrt{\tau_{\text{paroi}}/\rho}$, et $u^+ = u/u_\tau$ la vitesse non dimensionnelle.

3.2.3.8 Les conditions initiales

L'écoulement au sein du déversoir latéral est simulé en régime permanent (i.e. $\partial/\partial t = 0$). Au sein de ce domaine, les conditions initiales servent (i) à diminuer le temps de calcul pour obtenir une solution convergée et (ii) à assurer une convergence « tranquille » au début du calcul. La hauteur initiale est définie égale à $H_{\text{ini}} = 0.100\ m$. La vitesse initiale U est fonction du débit $Q_{\text{xi}} = 10.55\ L/s$, la hauteur H_{ini} et la largeur du canal rectangulaire $B = 0.300\ m$.

L'énergie cinétique turbulente k initiale est définie à l'aide de l'intensité turbulente I_τ et du diamètre hydraulique D_H selon l'Eq. 3.60.

$$k = \frac{3}{2} (U\, I_\tau)^2 , \tag{3.60}$$

avec U la vitesse moyenne de l'écoulement, et I_τ définie par

$$I_\tau \approx 0.16 \left(\frac{U\, D_h}{\nu} \right)^{-1/8} \tag{3.61}$$

Le taux de dissipation de l'énergie cinétique turbulente ϵ initial est calculé selon l'Eq. 3.62.

$$\epsilon = \frac{k^{3/2}}{l} , \tag{3.62}$$

avec l l'échelle de longueur turbulente définie par

$$l \approx \frac{0.07\, D_h}{C_\mu^{3/4}} \tag{3.63}$$

Le taux de dissipation spécifique ω initial est calculé selon l'Eq. 3.64.

$$\omega = \frac{\epsilon}{k} \tag{3.64}$$

3.2.3.9 Les schémas et méthodes de discrétisation numérique

La méthode d'estimation de la pression (i.e. le couplage Pression-Vitesse) et les schémas de discrétisation spatiales pour les variables macroscopiques et ses gradients sont présentés dans le Tableau 3.4. L'ensemble des variables est résolu avec un facteur de relaxation égale à 0.05.

Concernant la méthode VOF, celle-ci ne suit pas directement l'interface de l'écoulement mais la fraction volumique de chaque phase α_i. Dans le cadre d'écoulements à deux phases (e.g. l'air et l'eau), seulement l'une des phases (α_{eau}) est suivie via l'équation (Eq. 3.46) et l'autre phase (α_{air}) est calculée via l'équation (3.44).

La convection de la fraction volumique α_{eau} à travers la façade d'un volume de contrôle est calculée à l'aide du schéma de Capture d'Interface à Haute Résolution (HRIC, en anglais) proposé par Muzaferija et al. (1999) et amélioré par Park et al. (2009). Le schéma HRIC combine de manière non linéaire les schémas de différentiation à pas vers l'amont et l'aval en se basant sur le schéma composé de Variable Normalisée Diminuant (NVD, en anglais). Le schéma vers l'aval apporte les propriétés de compression tandis que le schéma vers l'aval apporte la stabilité. Ce schéma est plus précis que les schémas QUICK et de deuxième ordre, et moins coûteux en ressources informatiques que le schéma de reconstruction géométrique (ANSYS 2015a).

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2020LYSEI083/these.pdf
© [A. Claro Barreto], [2020], INSA Lyon, tous droits réservés

	Méthode / Schéma	Facteur de relaxation
Couplage Pression-Vitesse	SIMPLE	-
Discrétisation spatiale		
Gradient	Moindre carrés de la maille	0.05
Pression	Force de volume pondérée	
Quantité de mouvement	Décentré avant - 2^{ime} ordre	
Fraction volumique α_{eau}	HRIC modifié	⋮
Énergie cinétique turbulente		
Taux de dissipation turbulent $[k-\epsilon]$	Décentré avant - 2^{ime} ordre	
Taux de dissipation spécifique $[k-\omega]$		0.05

Tableau 3.4 – Méthodes de solution, schémas de discrétisation spatiale et facteurs de relaxation utilisés pour les différentes grandeurs macroscopiques.

Le lecteur intéressé dans les équations du schéma HRIC utilisées dans le logiciel de calcul numérique (Fluent version 16.2) est invité à consulter le chapitre « 20.3.1.9. Modified HRIC Scheme » dans ANSYS (2015a).

3.2.3.10 La géométrie et le maillage

Le déversoir latéral est représenté numériquement à échelle réelle selon le schéma 2D de la géométrie présentée dans la Fig. 3.8. Une longueur virtuelle d'environ $12D_H$ est ajoutée à l'amont de l'entrée réelle pour assurer un écoulement complètement développée à l'entrée réel du système (canal bleu clair - Fig. 3.8) selon les recommandations de la littérature (MENTOR 2011). Le canal de déversement est représenté par les couleurs verte et orange. Le canal du débit conservé est représenté par les couleurs violette et rose. La vanne guillotine se situe à $2.785\,m$ du début du déversement latéral. La hauteur de crête et l'ouverture de la vanne guillotine sont égales aux conditions expérimentales.

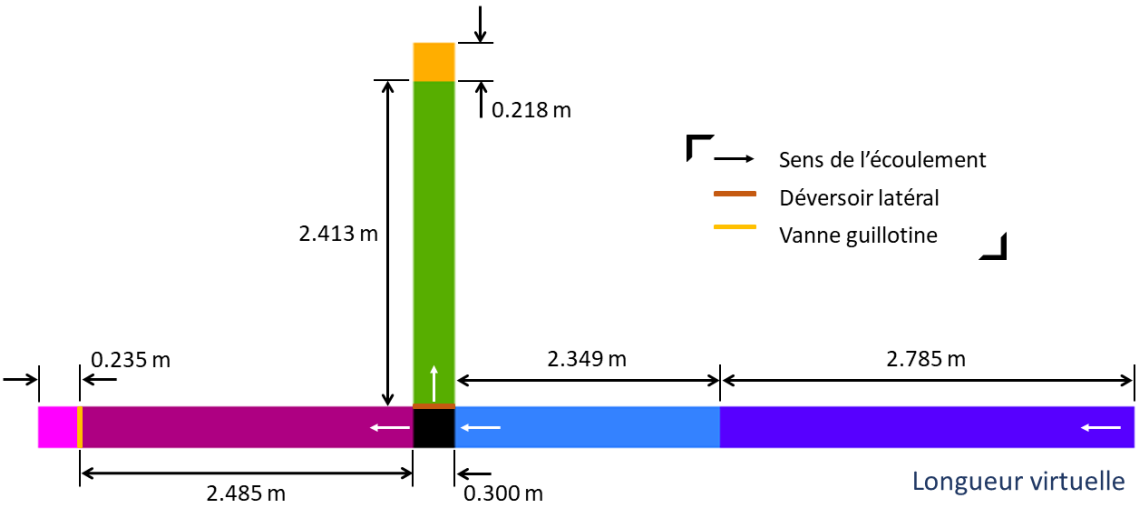


Figure 3.8 – Schéma 2D de la géométrie du modèle numérique du déversoir latéral.

La géométrie du modèle numérique est discrétisée spatialement à l'aide d'un maillage structuré et composée uniquement d'hexaèdres. Trois maillages différents sont construits et utilisées afin de quantifier l'incertitude liée au maillage et vérifier l'indépendance au maillage des résultats numériques (Section 3.2.3.11). Une vue en plan des trois maillages au niveau de la section du déversement du déversoir latéral est présentée dans la Fig. 3.9. Le nombre total de mailles hexaèdres et la résolution moyenne dans les trois directions (i.e. x, y et z) des trois maillages sont indiqués dans le Tableau. 3.5.

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2020LYSEI083/these.pdf
© [A. Claro Barreto], [2020], INSA Lyon, tous droits réservés

Résolution		Nombre de mailles	Discrétisation spatiale (mm)		
			x	y	z
N°1	Grossier	1 207 353	10	6.7	9.7
N°2	Médium	2 757 045	7.7	4.3	7.5
N°3	Fin	6 468 714	5.9	3.3	5.8

Tableau 3.5 – Caractéristiques des maillages grossier, médium et fin employés pour le déversoir latéral expérimental.

3.2.3.11 L'incertitude liée au maillage

L'indice de convergence du maillage (GCI)

La robustesse de la solution approchée φ_{num} des équations de Navier-Stokes dépend, entre autres, du nombre de mailles (N) et de l'ordre du schéma de discrétisation ($\dot{p}$) utilisés lors du calcul numérique. Il est généralement supposé que l'erreur E entre la solution approchée φ_{num} et la solution exacte φ_{exacte} est inversement proportionnelle à N et $\dot{p}$ (Eq. 3.65). A noter que la taille moyenne d'une maille $h \to 0$ si le nombre de mailles $N \to \infty$.

$$E \propto \frac{1}{N} \text{ ou } E \propto \frac{1}{\dot{p}} \tag{3.65}$$

La principale difficulté dans le calcul de l'erreur E est la méconnaissance de la solution exacte φ_{exacte} due (i) à la complexité des équations de Navier-Stokes et (ii) au type d'écoulements rencontrés en réseau d'assainissement. Cette difficulté peut être contournée à l'aide d'une étude de sensibilité au maillage.

L'étude de sensibilité au maillage permet de vérifier que la solution approchée φ_{num} ne dépend pas de la discrétisation spatiale. Cette procédure est basée sur des mailles de plus en plus fines ($N \to \infty$ ou $h \to 0$) afin de vérifier que la solution numérique s'approche d'une valeur unique. Ce type d'étude a été formalisée et standardisée par Roache (1998) en se basant sur le critère d'extrapolation de Richardson (Richardson 1911 ; Richardson et Gaunt 1927). Roache (1998) a proposé l'indice de convergence lié au maillage (en anglais, Grid Convergence Index - GCI). Le critère GCI peut être appliqué à partir de 2 maillages mais il est conseillé d'en utiliser 3 au minimum. Le critère GCI peut être estimé selon la procédure recommandée par Celik et al. (2008).

Étape 1 : Définir une dimension caractéristique h_{m} représentative de la taille moyenne du maillage.

$$h_{\text{m}} = \left(\frac{1}{N} \sum_{i=1}^{N} (\Delta \mathcal{V}_i) \right)^{1/3} , \tag{3.66}$$

avec $\Delta \mathcal{V}_i$ le volume de la maille i, N le nombre total de mailles utilisées.

Étape 2 : Simuler le même cas d'étude sur deux ou trois maillages différents qui ont un facteur de raffinement $r_{ij} > 1.3$, cette constante empirique est proposée par Roache (1998).

$$r_{ij} = \frac{h_{\text{m,i}}}{h_{\text{m,j}}} , \tag{3.67}$$

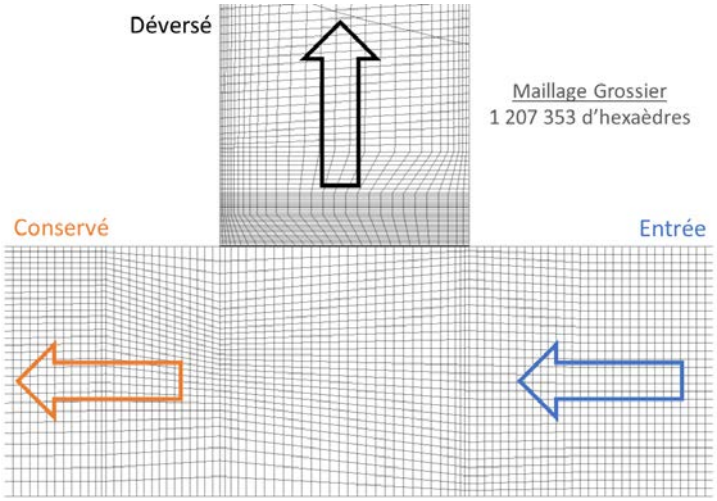
avec $h_{\text{m,j}} < h_{\text{m,i}}$ les dimensions caractéristiques des maillages i et j.

Étape 3 : Calculer l'ordre apparent de la méthode de discrétisation spatiale $\dot{p}$ à l'aide des maillages fin ($h_{\text{m,1}}$), intermédiaire ($h_{\text{m,2}}$) et grossier ($h_{\text{m,3}}$).

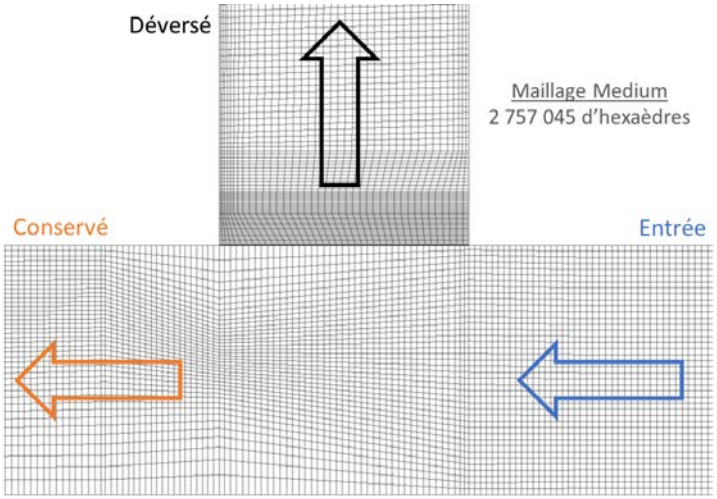
$$\dot{p} = \frac{1}{\ln r_{21}} \left| \ln \left| \frac{\varepsilon_{32}}{\varepsilon_{21}} \right| + q(\dot{p}) \right| \tag{3.68}$$

$$\varepsilon_{ij} = \varphi_i - \varphi_j \, , \, q(\dot{p}) = \ln \left(\frac{r_{21}^{\dot{p}} - s}{r_{32}^{\dot{p}} - s} \right) , \, s = 1 \cdot \text{sign} \left(\frac{\varepsilon_{32}}{\varepsilon_{21}} \right) ,$$

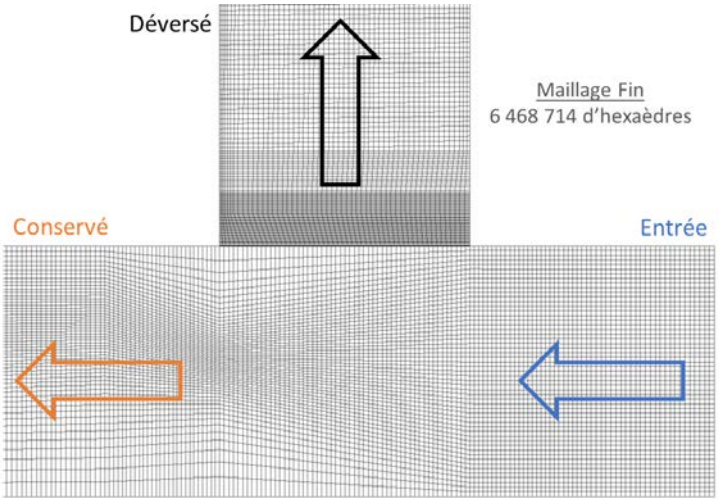
Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2020LYSEI083/these.pdf
© [A. Claro Barreto], [2020], INSA Lyon, tous droits réservés



(a) Résolution N°1 - Grossier



(b) Résolution N°2 - Medium



(c) Résolution N°3 - Fin

Figure 3.9 – Vue en plan des maillages grossier (Fig. 3.9a), medium (Fig. 3.9b) et fin (Fig. 3.9c) au niveau de la section de dérivation du déversoir latéral.

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2020LYSEI083/these.pdf
© [A. Claro Barreto], [2020], INSA Lyon, tous droits réservés

avec φ_i la solution approchée avec le maillage h_i, $\varepsilon_{32} = \varphi_3 - \varphi_2$ et $\varepsilon_{21} = \varphi_2 - \varphi_1$, la fonction $\mathrm{sign} = -1$ si $\varepsilon_{32}/\varepsilon_{21} < 0$, autrement $\mathrm{sign} = 1$. A noter que la solution approchée φ_i dans le cadre du présent chapitre correspond au débit déversé Q_{zo} et les vitesses moyennes ($\overline{u}$, $\overline{v}$ et $\overline{w}$) et l'énergie cinétique turbulente k locales.

L'équation implicite (3.68) peut être résolue avec l'hypothèse $q(\dot{p}) = 0$ pour la première itération. Si $\varepsilon_{32}/\varepsilon_{32} < 0$ la solution approchée entre les différents maillages oscille autour d'une valeur donnée et la procédure ici présentée n'est pas applicable. Une procédure spéciale pour traiter ce genre de comportement est proposée par Celik et al. (2005). Si $\varepsilon_{32} \approx 0$ ou $\varepsilon_{21} \approx 0$ la procédure GCI n'est pas applicable et un nouveau maillage doit être utilisé.

Étape 4 : Estimer la solution exacte φ_{exacte} à l'aide d'une extrapolation qui prendre en compte les solutions approchées φ_{num}.

$$\varphi_{\text{exacte}} \approx \varphi_{\text{ext}}^{ij} = \frac{r_{ij}^{\dot{p}} \varphi_j - \varphi_i}{r_{ij}^{\dot{p}} - 1} \tag{3.69}$$

Étape 5 : Calculer les erreurs relatives d'approximation et extrapolées. L'erreur relative d'approximation (Eq. 3.70) correspond à l'écart entre deux solutions approchées quelconques. L'erreur relative extrapolée (Eq. 3.71) correspond à l'écart entre la valeur extrapolée $\varphi_{\text{ext}}^{ij}$ et la solution approchée φ_j.

$$e_a^{ij} = \left| \frac{\varphi_j - \varphi_i}{\varphi_j} \right| \tag{3.70}$$

$$e_{\text{ext}}^{ij} = \left| \frac{\varphi_{\text{ext}}^{ij} - \varphi_j}{\varphi_{\text{ext}}^{ij}} \right| \tag{3.71}$$

Étape 6 : Calculer le critère GCI qui permet d'estimer l'incertitude liée au maillage.

$$E = \left| \frac{\varphi_{\text{exacte}} - \varphi_{\text{num}}}{\varphi_{\text{num}}} \right| \approx \mathrm{GCI}_j^{ij} = \frac{1.25\, e_a^{ij}}{r_{ij}^{\dot{p}} - 1} \tag{3.72}$$

Le facteur de pondération de 1.25 permet d'obtenir un intervalle de confiance à 95% (Roache 2003 ; Schwer 2008 ; Slater 2008). En milieu industriel et académique, le critère GCI lié au maillage intermédiaire GCI_2^{32} est le plus utilisé car son utilisation représente un bon compromis entre temps de calcul et précision des résultats numériques (e.g. Momplot et al. 2017 ; Yan et al. 2014).

L'indice de convergence du maillage - GCI - modifiée

La procédure du calcul du critère GCI présentée auparavant est seulement applicable (i) en absence de résultats oscillatoires ($\varepsilon_{32}/\varepsilon_{21} < 0$) et (ii) si la différence entre deux maillages $\varepsilon_{ij} \gg 0$ (Celik et al. 2008, 2005). D'une part, si les résultats moyens obtenues sont très similaires entre le maillage grossier ($\overline{\varphi_3}$) et l'intermédiaire ($\overline{\varphi_2}$) ou l'intermédiaire ($\overline{\varphi_2}$) et le fin ($\overline{\varphi_1}$), les différences $\varepsilon_{32} \approx 0$ et $\varepsilon_{21} \approx 0$, respectivement. Cependant, si $\varepsilon_{ij} \approx 0$, ceci signifie que la solution obtenue entre deux maillages $\overline{\varphi_i}$ et $\overline{\varphi_j}$ est effectivement indépendante mais le critère GCI n'est pas capable d'estimer l'incertitude liée au maillage. D'autre part, si la solution moyenne des trois maillages oscille autour d'une valeur ($\varepsilon_{32}/\varepsilon_{21} < 0$) le critère GCI ne doit pas être utilisé même si les intervalles de confiance à 95% des différentes solutions se chevauchent.

Dans le présent projet de recherche, une nouvelle méthode de calcul est conçue afin de rendre le critère GCI applicable même si ces deux cas sont présents. Cette nouvelle méthode prend en compte l'incertitude de la solution approchée $\sigma_{\text{iter}} \equiv u\left(\varphi_i\right)$ lors du calcul du critère GCI afin de le rendre plus robuste. L'incertitude de la solution approchée σ_{iter} correspond à la variation inhérente du calcul numérique utilisé pour résoudre les équations de Navier-Stokes. L'incertitude de la solution approchée σ_{iter} est calculée

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2020LYSEI083/these.pdf
© [A. Claro Barreto], [2020], INSA Lyon, tous droits réservés

à l'aide d'un nombre fini d'itérations une fois la solution respecte les critères de convergence (voir Section 3.2.3.12).

Le critère GCI modifié peut être estimé selon la procédure ci-dessous.

Etape 1 : Échantillonner n_i valeurs de l'ensemble de solutions approchées $E\left(\varphi_i\right)$ de la variable d'intérêt φ_i pour chacun des maillages utilisés : grossier n_3, intermédiaire n_2 et fin n_1. Cet échantillonnage est réalisée à l'aide de la méthode Monte Carlo.

Les n_i valeurs peuvent être obtenues soit (i) par un échantillonnage direct de l'ensemble $E\left(\varphi_i\right)$ avec pas d'échantillonnage $\Delta_{\text{itérations}}$ constant ou variable, ou (ii) par une méthode de rééchantillonnage du type « bootstrap ». La méthode « Bootstrap » permet de construire un sous-ensemble de taille définie selon un tirage aléatoire avec remise de l'ensemble $E\left(\varphi_i\right)$. Dans les deux cas de figure, il est nécessaire de disposer de l'ensemble des solutions approchées $E\left(\varphi_i\right)$, qui correspond à un nombre fini d'itérations sauvegardées une fois la solution convergée.

Concernant la méthode bootstrap, elle peut être paramétrique si l'on connaît la loi de distribution de probabilité de la variable φ_i, en général il est supposé que l'ensemble $E\left(\varphi_i\right)$ suit une loi normale $N(\overline{\varphi_i}, \sigma_{\varphi_i})$, ou non paramétrique si l'on dispose d'un ensemble $E\left(\varphi_i\right)$ qui ne suit aucune distribution de probabilité paramétrique.

Étape 2 : Calculer le nombre total de combinaisons possibles N_{T}

$$N_{\text{T}} = n_1 \times n_2 \times n_3\,, \tag{3.73}$$

avec n_1, n_2 et n_3 le nombre d'échantillons pour les maillages fin, intermédiaire et grossier, respectivement.

Étape 3 : Enlever toutes les combinaisons oscillatoires $\varepsilon_{32}/\varepsilon_{21} < 0$ et calculer la probabilité de non oscillation P_{NO}.

$$P_{\text{NO}} = \left(1 - \frac{N_{\text{O}}}{N_{\text{T}}}\right) * 100, \tag{3.74}$$

avec N_{O} le nombre d'oscillations ($\varepsilon_{32}/\varepsilon_{21} < 0$) obtenues avec la méthode de Monte Carlo.

Étape 4 : Calculer l'ordre de convergence apparent minimal $\dot{p}^{ij}_{\text{min}}$ de toutes les erreurs relatives d'approximation e^{ij}_a.

$$\dot{p}^{ij}_{\text{min}} = \frac{ln\left(1,25\, e^{ij}_a + \text{GCI}^{ij}_{\text{max}}\right) - ln\left(\text{GCI}^{ij}_{\text{max}}\right)}{ln\left(r_{ij}\right)}, \tag{3.75}$$

avec $\text{GCI}^{ij}_{\text{max}}$ la valeur maximale acceptée sur l'erreur relative absolue (Eq. 3.72).

Étape 5 : Calculer l'ordre apparente $\dot{p}$ (Eq. 3.68) de toutes les combinaisons non oscillantes et enlever toutes les combinaisons pour lesquelles $\dot{p}^{ijk} < \dot{p}^{ij}_{\text{min}}$.

Étape 6 : Calculer la valeur moyenne et l'écart-type de solution extrapolée $\varphi^{ij}_{\text{ext}}$ et du critère GCI^{ij}_{j}, ainsi que la probabilité de non oscillation finale P_{NOF}.

$$P^{ij}_{\text{NOF}} = P_{\text{NO}} \times \frac{N^{ij}_{\text{PM}}}{N_{\text{T}} - N_{\text{O}}}, \tag{3.76}$$

avec N^{ij}_{PM} le nombre de combinaisons non oscillantes pour lesquelles $\dot{p}^{ijk} \geq \dot{p}^{ij}_{\text{min}}$.

Étape 7 : Calculer l'écart-type des résultats numériques obtenus seulement avec le maillage intermédiaire φ_2.

$$\frac{\sigma_{\varphi_2}}{\overline{\varphi_2}} = max\left[\frac{1}{\dot{n}}\sum_i\left(\frac{\sigma_{\varphi^{32}_{\text{ext,i}}}}{\overline{\varphi^{32}_{\text{ext,i}}}}\right), \frac{\sigma_{\varphi_2}}{\overline{\varphi_2}}\right], \tag{3.77}$$

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2020LYSEI083/these.pdf
© [A. Claro Barreto], [2020], INSA Lyon, tous droits réservés

avec n le nombre de cas de simulation étudiés à l'aide des trois maillages.

Étape 8 : Calculer l'incertitude au IC à 95% due au maillage et à la solution approchée σ_{GCI} .

$$\sigma^{ij}_{\text{GCI},95\%} = 2\,\sigma_{\text{GCI}^{ij}_{j}} \approx 2\,\sigma_{\varphi^{ij}_{\text{ext}}} \tag{3.78}$$

3.2.3.12 Les conditions de convergence

La convergence du modèle numérique est atteinte si la conservation de la masse présente une erreur relative $E_{\text{CM}}/D_{\text{E}}$ qui respecte la condition $-2.5\% < E_{\text{CM}}/D_{\text{E}} < 2.5\%$, avec E_{CM} l'erreur sur la conservation de la masse et D_{E} le débit d'entrée. L'erreur E_{CM} correspond à la somme de tous les flux massiques d'entrée et de sortie du modèle numérique. L'incertitude de l'erreur E_{CM} est calculée à l'aide d'environ 1 000 itérations après que les résidus des vitesses (u, v et w) et de la turbulence (i.e. k, ϵ ou ω) deviennent stables.

3.2.3.13 Les indices d'évaluation de performance d'un modèle numérique

La performance du modèle numérique est évaluée à l'aide de l'erreur quadratique moyenne (RMSE, en anglais) et du pourcentage de chevauchement des données (ψ_{IC}). L'erreur RMSE calcule la différence entre les données expérimentales et numériques (Bennett et al. 2013).

L'erreur quadratique moyenne (RMSE) est définie par

$$\textbf{RMSE} = \sqrt{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\left(y_i^{\text{Exp}} - y_i^{\text{Num}}\right)^2}\,, \tag{3.79}$$

avec y_i^{Exp} la valeur expérimentale, y_i^{Num} le résultat numérique et n le nombre de données expérimentales de comparaison. Cette erreur peut être biaisée si des erreurs importantes se produisent lors du calcul.

Le pourcentage de chevauchement ψ_{IC} permet de quantifier le nombre de données expérimentales qu'un modèle numérique est capable de reproduire en prenant en compte les incertitudes expérimentales et numériques. Le pourcentage de chevauchement ψ_{IC} est défini par

$$\psi_{IC} = \frac{1}{N}\sum_{i}^{N}\psi_i\,, \tag{3.80}$$

avec N le nombre de données expérimentales et $\psi_i = 1$ si $\exists\alpha_i : \mu_i^{\text{Exp}} - 2\sigma_i^{\text{Exp}} \leq \alpha_i \leq \mu_i^{\text{Exp}} + 2\sigma_i^{\text{Exp}}$ et $\mu_i^{\text{Num}} - 2\sigma_i^{\text{Num}} \leq \alpha_i \leq \mu_i^{\text{Num}} + 2\sigma_i^{\text{Num}}$ sinon $\psi_i = 0$. L'intervalle de confiance (IC) à 95% est défini par $\mu \pm 2\sigma$.

L'élimination des données aberrantes

Avant de calculer les indicateurs de performance RMSE et ψ_{IC}, il est nécessaire d'éliminer les données expérimentales aberrantes à l'aide d'une inspection visuelle des profils verticaux. A titre d'exemple, la Fig. 3.10 présente une valeur aberrante qui sera éliminée de l'ensemble de données expérimentales avant calcul des critères de performance.

L'estimation de l'écart-type de l'erreur RMSE

L'écart-type de l'erreur RMSE est estimé à l'aide d'une simulation de Monte-Carlo qui utilise les écart-types des données expérimentales et numériques. Il est supposé que chacune des données expérimentales et numériques suit une loi normale ($N(\mu, \sigma)$). L'écart-type de l'erreur RMSE est estimé à l'aide de 1 000 000 de simulations.

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2020LYSEI083/these.pdf
© [A. Claro Barreto], [2020], INSA Lyon, tous droits réservés

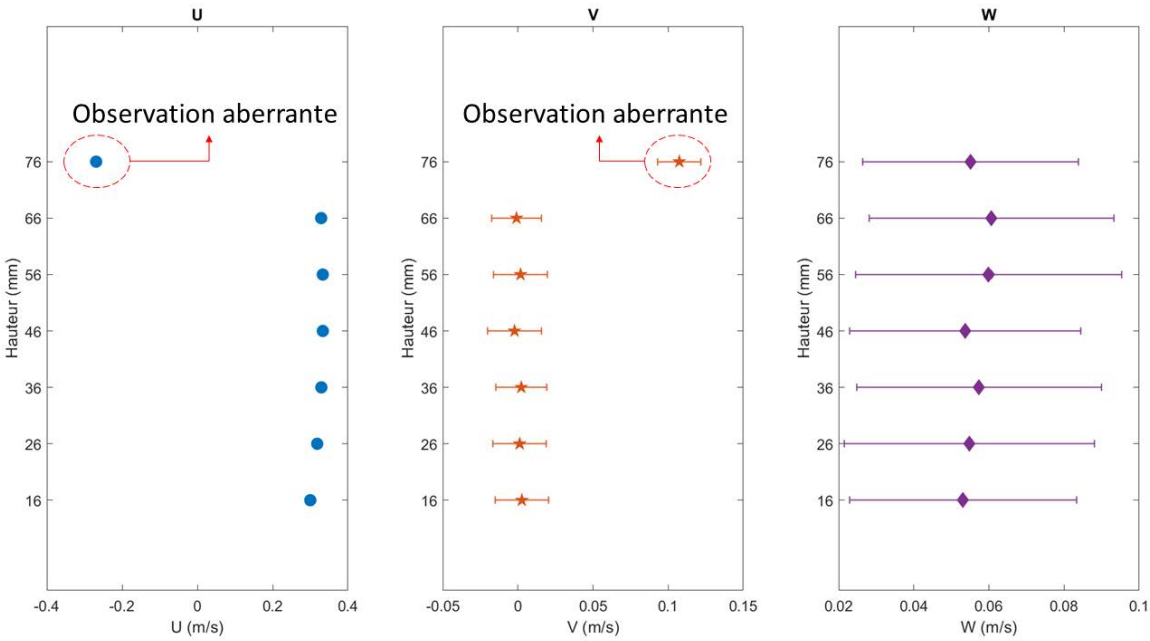


Figure 3.10 – Exemple d'une valeur expérimentale aberrante après inspection visuel des profils verticaux.

3.3 Vérification et validation du modèle numérique

3.3.1 Vérification : la convergence des résultats

La convergence des résultats numériques est évaluée à l'aide de la conservation de la masse. La Fig. 3.11 présente l'erreur relative de la conservation de la masse (E_{CM}/D_E) pour les modèles de turbulence RNG k-ϵ et SST k-ω. Les erreurs relatives moyennes de ces deux modèles de turbulence sont inférieures au seuil de convergence $\pm 2.5\%$ (Section 3.2.3.12). L'incertitude du modèle SST k-ω est inférieure à celle obtenue avec le modèle RNG k-ϵ parce que l'intervalle de confiance (IC) à 95% du modèle SST k-ω est inférieur à celle du modèle RNG k-ϵ. L'ensemble des résultats numériques est jugé convergé vis-à-vis de la conservation de la masse parce que l'erreur relative moyenne E_{CM}/D_E est localisée dans la bande de convergence à $\pm 2.5\%$.

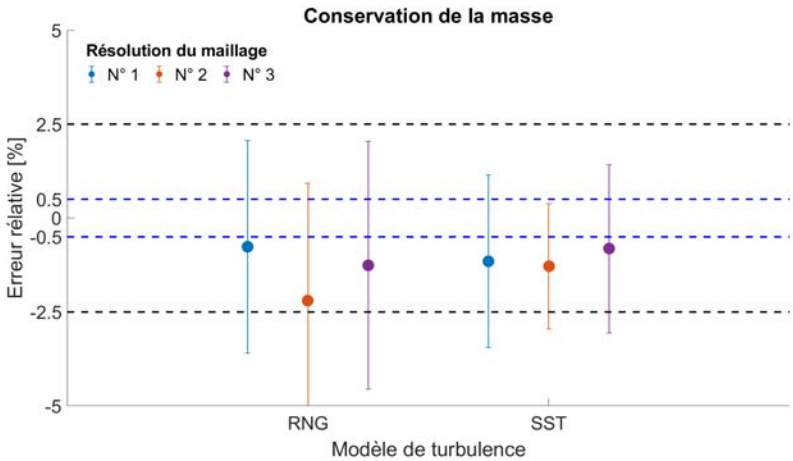


Figure 3.11 – Erreur relative de la conservation de la masse E_{CM}/D_E en fonction des modèles de turbulence RNG k-ω et SST k-ω. Les barres verticales correspondent à l'intervalle de confiance à 95%.

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2020LYSEI083/these.pdf
© [A. Claro Barreto], [2020], INSA Lyon, tous droits réservés

3.3.2 Vérification : résultats numériques avec oscillation - $P_{\text{NOF}} = 0$

La procédure modifiée GCI (Section 3.2.3.11) est appliquée à chaque modèle de turbulence et à l'ensemble de 273 points de mesuré par ADV. Seul le modèle de turbulence SST k-ω présente des probabilités de non oscillation $P_{\text{NOF}} = 0$ pour environ 0,7% des points ADV (i.e. 2 points sur 273). Ces points ne seront pas pris en compte lors du calcul des performances du modèle numérique de la Section 3.4, car ces points correspondent à des résultats réellement oscillatoires. Ces pourcentages égaux ou proches de zéro de P_{NOF} montrent que les résultats numériques de chaque modèle de turbulence sont indépendants de la résolution spatiale utilisée (i.e. du maillage).

	$\overline{u}$	$\overline{v}$	$\overline{w}$	k
RNG k-ϵ	0	0	0	0
SST k-ω	0	0	0	0.7

Tableau 3.6 – Pourcentage total de points avec une probabilité finale de non oscillation $P_{\text{NOF}} = 0$ en fonction des champs de vitesses et de l'énergie cinétique turbulente pour les modèles de turbulence RNG k-ω et SST k-ω.

3.3.3 Validation : le débit déversé

Une fois la convergence des résultats numériques atteinte, l'évaluation de la qualité des calculs numériques se base sur le débit déversé expérimental. Les débits déversés expérimental et numériques, pour les deux modèles de turbulence (i.e. RNG k-ϵ et SST k-ω) et les trois résolutions utilisées, sont présentés dans la Fig. 3.12. Le débit moyen déversé obtenu avec les modèles RNG k-ω et SST k-ω est légèrement inférieur au débit expérimental. Cependant, le débit expérimental (étoile noire - Fig. 3.12) est compris dans l'intervalle de confiance (IC) à 95% de toutes les résolutions des modèles de turbulence RNG k-ω et SST k-ω. En outre, l'erreur relative $\left|Q_{\text{zo}}^{\text{exp}} - Q_{\text{zo}}^{\text{num}}\right| / Q_{\text{xi}}^{\text{exp}}$ des modèles RNG k-ϵ et SST k-ω sont respectivement 1.1% et 1.3%, qui restent du même ordre de grandeur que d'autres travaux numériques de la littérature (e.g. Lipeme Kouyi 2004, - surestimation d'environ 5.4%). Malgré cette sous-estimation du débit déversé par les deux modèles de turbulence, l'ensemble des résultats numériques est jugé valide parce que le débit moyen déversé est du même ordre de grandeur entre les trois résolutions pour chaque modèle de turbulence.

3.3.3.1 La hauteur d'eau au début du déversement - $x/B = 0$ - h_0

Au début du déversement ($x/B = 0$), la hauteur d'eau h_0 obtenue par les deux modèles numériques de turbulence (RNG k-ϵ et SST k-ω) et leurs trois maillages (N°1, N°2 et N°3) est similaire (Tableau 3.7). L'incertitude de l'ensemble des résultats numériques est d'environ 1 mm. Les deux modèles numériques sous-estiment d'environ 7 mm la hauteur d'eau expérimentale (calculée selon la Section 3.2.2.2), qui correspond à une erreur relative de 7.4%. Ces résultats sont en accord avec la sous-estimation du débit déversé observée précédemment.

3.3.4 L'incertitude globale des résultats numériques et expérimentaux

L'incertitude des données numériques et expérimentales est évaluée à l'aide du coefficient de variation élargi $2\left|\sigma/\mu\right|$. L'incertitude globale est caractérisée à l'aide de la médiane et les percentiles à 5% et 95% (en crochets) du coefficient de variation élargi $2\left|\sigma/\mu\right|$ des résultats numériques et expérimentaux (Tableau 3.8).

L'incertitude des résultats numériques avec le modèle SST k-ω est inférieure à celle du modèle RNG k-ω. La médiane de l'incertitude relative élargie ($2\left|\sigma/\mu\right|$) pour les champs de vitesses et l'énergie cinétique turbulente du modèle SST k-ω est toujours inférieure au modèle RNG k-ω. En outre, la dispersion de l'incertitude (i.e. la différence entre les percentiles 95% et 5%) est plus prononcée pour le modèle RNG k-ω que

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2020LYSEI083/these.pdf
© [A. Claro Barreto], [2020], INSA Lyon, tous droits réservés

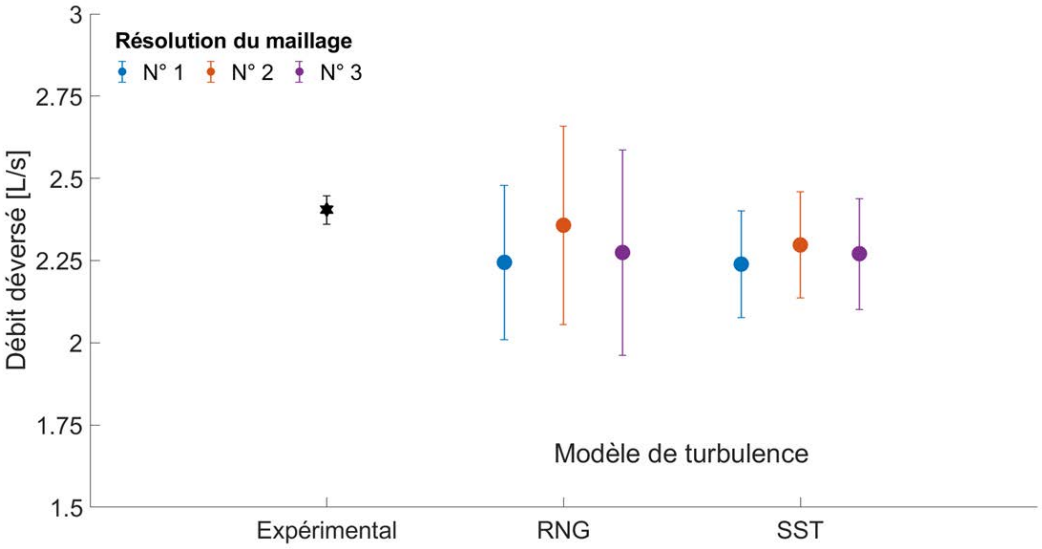


Figure 3.12 – Les débits déversés expérimental et numériques. Les données numériques correspondent aux trois résolutions des modèles de turbulence RNG k-ω et SST k-ω. Les barres verticales représentent l'intervalle de confiance à 95%.

		z/B		
		0.1	0.5	0.9
RNG k-ϵ	N°1	0.088 [0.087 - 0.090]	0.088 [0.087 - 0.090]	0.087 [0.086 - 0.089]
	N°2	0.088 [0.087 - 0.089]	0.088 [0.087 - 0.089]	0.087 [0.086 - 0.088]
	N°3	0.088 [0.087 - 0.089]	0.087 [0.087 - 0.089]	0.087 [0.086 - 0.088]
SST k-ω	N°1	0.088 [0.087 - 0.089]	0.088 [0.087 - 0.089]	0.087 [0.086 - 0.088]
	N°2	0.088 [0.087 - 0.088]	0.088 [0.087 - 0.088]	0.087 [0.087 - 0.087]
	N°3	0.087 [0.087 - 0.088]	0.087 [0.087 - 0.088]	0.087 [0.086 - 0.087]
EXP			0.096 [0.094 - 0.097]	

Tableau 3.7 – Hauteur d'eau h_0 (en m) au début du déversement ($x/B = 0$). La hauteur « EXP » est obtenue selon la Section 3.2.2.2. L'intervalle de confiance à 95% est indiqué entre crochets. $B = 0.300\ m$.

pour le modèle SST k-ω. Ces résultats sont en adéquation avec les intervalles de confiance à 95% observés pour la conservation de la masse (Fig. 3.11) et le débit déversé (Fig. 3.12).

L'incertitude des résultats numériques est inférieure ou égale à celles des mesures en laboratoire. Les modèles RNG k-ω et SST k-ω présentent des incertitudes médianes (i) inférieures aux résultats expérimentaux pour les vitesses verticale $\overline{v}$ et horizontale $\overline{w}$, et (ii) supérieures aux résultats expérimentaux pour la vitesse longitudinale $\overline{u}$ et l'énergie cinétique turbulente k. Les vitesses verticale $\overline{v}$ et horizontale $\overline{w}$ présentent les incertitudes relatives élargies $2\left|\sigma/\mu\right|$ les plus élevées parce que la valeur moyenne est proche de zéro pour les points de mesure éloignés du déversement.

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2020LYSEI083/these.pdf
© [A. Claro Barreto], [2020], INSA Lyon, tous droits réservés

$2\left\lvert\frac{\sigma}{\mu}\right\rvert$	$\overline{u}$	$\overline{v}$	$\overline{w}$	k
RNG k-ϵ	0.031 [0.013 - 0.069]	1.916 [0.338 - 32.204]	0.288 [0.078 - 13.202]	0.780 [0.028 - 0.164]
SST k-ω	0.009 [0.005 - 0.026]	0.715 [0.162 - 19.468]	0.079 [0.028 - 1.372]	0.021 [0.006 - 0.119]
ADV	0.002 [0.001 - 0.019]	3.593 [0.335 - 39.116]	1.472 [0.105 - 13.511]	0.002 [0.000 - 0.054]

Tableau 3.8 – Coefficient de variation élargi $2\left|\sigma/\mu\right|$ (médiane) des champs de vitesses $\overline{u}$, $\overline{v}$ et $\overline{w}$, et de l'énergie cinétique turbulente k pour l'ensemble des résultats expérimentaux et numériques (i.e. les modèles de turbulence RNG k-ω et SST k-ω). Les valeurs entre crochets correspondent aux percentiles à 5% et 95% de $2\left|\sigma/\mu\right|$.

3.4 Résultats et discussions

Les résultats présentés ci-dessous correspondent à l'évaluation quantitative globale des modèles de turbulence RNG $k-\epsilon$ et SST $k-\omega$ par rapport aux mesures expérimentales, selon les critères de performance de la Section 3.2.3.13. Ensuite, une analyse qualitative des profils verticaux et les courants secondaires au niveau du déversement permettra d'évaluer les performances des modèles numériques. Enfin, les lignes de courant liées au déversement permettent d'observer la probabilité de déversement au niveau d'une section transversale localisée à l'amont du déversoir.

3.4.1 La performance globale des modèles de turbulence

La performance globale des modèles de turbulence RNG k-ϵ et SST k-ω est évaluée à l'aide du pourcentage de chevauchement ψ_{IC} et de l'erreur moyenne quadratique (RMSE) entre les données expérimentales et numériques pour les vitesses $\overline{u}$, $\overline{v}$, $\overline{w}$ et l'énergie cinétique turbulente k.

3.4.1.1 Le pourcentage de chevauchement - ψ_{IC}

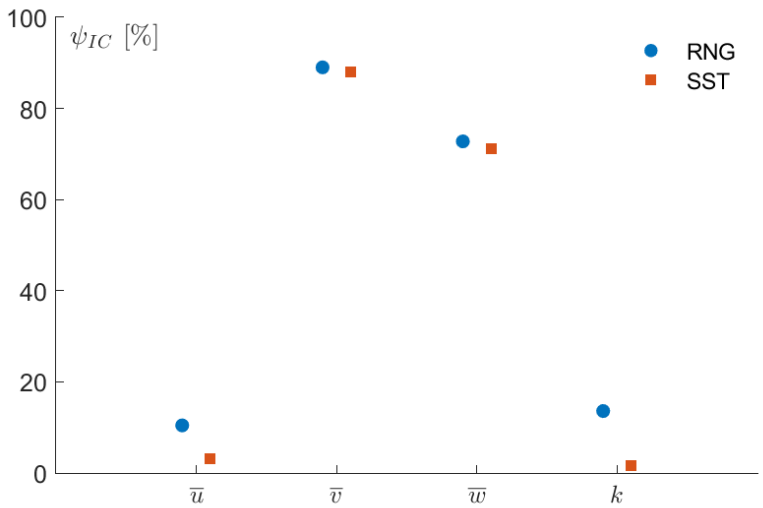
La quantité de données expérimentales que chaque modèle numérique est capable de reproduire, en prenant en compte les incertitudes expérimentale et numérique, est évaluée à l'aide du pourcentage de chevauchement ψ_{IC}. L'incertitude correspond à l'intervalle de confiance à 95%.

Les ψ_{IC} des modèles de turbulence RNG k-ϵ et SST k-ω sont du même ordre de grandeur pour l'ensemble des vitesses ($\overline{u}$, $\overline{v}$ et $\overline{w}$) et l'énergie cinétique turbulente k (Fig. 3.13a). Néanmoins, les ψ_{IC} du modèle SST k-ω sont inférieurs au modèle RNG k-ϵ parce que l'incertitude numérique du modèle SST k-ω est inférieure au modèle RNG k-ϵ (Tableau 3.8). Pour les deux modèles de turbulence, le ψ_{IC} des vitesses verticale $\overline{v}$ et horizontale $\overline{w}$ est supérieur à 70% tandis qu'il est inférieur à 20% pour la vitesse longitudinale $\overline{u}$ et l'énergie cinétique turbulente k. Le chevauchement entre les données expérimentales et numériques est supérieur pour les vitesses verticale $\overline{v}$ et horizontale $\overline{w}$ parce que l'incertitude expérimentale est supérieure à l'incertitude numérique (Tableau 3.8).

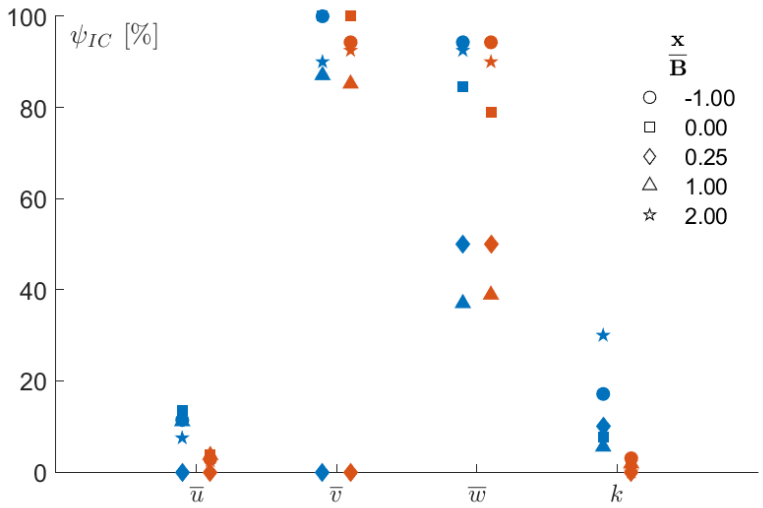
Le ψ_{IC} de chaque modèle de turbulence par section transversale yz est présenté dans le Fig. 3.13b. Le début du déversement correspond à la section $x/B = 0$ (symbole carré) et la fin du déversement à la section $x/B = 1$ (symbole triangle). Le ψ_{IC} des modèles SST k-ω (en rouge) et RNG k-ϵ (en bleu) est similaire pour l'ensemble des vitesses ($\overline{u}$, $\overline{v}$ et $\overline{w}$) et de l'énergie cinétique turbulente k dans de section de mesure (Fig. 3.13b). Le chevauchement (ψ_{IC}) est inférieur au niveau du déversement ($x/B \in [0.00\,,1.00]$) pour l'ensemble des vitesses et de k. La vitesse verticale $\overline{v}$ à $x/B = 0.25$ présente un $\psi_{\text{IC}} = 0$ pour les deux modèles de turbulence. Les ψ_{IC} plus élevés sont observés pour les section transversales à l'amont ($x/B = -1.00$ - cercle) et à l'aval ($x/B = 2.00$ - pentagramme) du déversement.

Il est ainsi observé que les deux modèles de turbulence sont capables de reproduire les vitesse longitudinale $\overline{u}$, verticale $\overline{v}$, horizontale $\overline{w}$ et l'énergie cinétique turbulente k avec un pourcentage de chevau-

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2020LYSEI083/these.pdf
© [A. Claro Barreto], [2020], INSA Lyon, tous droits réservés



(a) Global



(b) Par section de mesure yz

Figure 3.13 – Pourcentage de chevauchement des intervalles de confiance à 95% $\left(\psi_{\text{IC}}\right)$ entre les données expérimentales et numériques (RNG en bleu et SST en rouge) (i) pour l'ensemble des mesures depuis $x/B \geq -1.00$ (Fig. 3.13a) et (ii) par section de mesure yz dans le domaine $x/B \in [-1.00, 2.00]$ (Fig. 3.13b).

chement ψ_{IC} global de 10%, 90%, 75% et 10%, respectivement. Aussi, les champs de vitesses ($\overline{u}$, $\overline{v}$ et $\overline{w}$) et l'énergie cinétique turbulente k sont mieux reproduit à l'amont et à l'aval du déversement latéral.

3.4.1.2 L'erreur moyenne quadratique - RMSE

La performance globale des modèles de turbulence RNG k-ϵ et SST k-ω est évaluée à l'aide de l'erreur moyenne quadratique (RMSE) sur l'ensemble de points pour lesquels les intervalles de confiance (IC) à 95% des données expérimentales et numériques ne se chevauchent pas (Fig. 3.14), car il existe une probabilité que l'erreur soit nulle lorsque les IC à 95% se chevauchent et ceci pourra réduire la valeur du RMSE et ainsi surestimer la performance du modèle numérique. L'erreur RMSE est calculée selon la section transversale yz (Figs. 3.14a-3.14d-3.14g-3.14j), la position horizontale relative z/B (Figs. 3.14b-3.14e-

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2020LYSEI083/these.pdf
© [A. Claro Barreto], [2020], INSA Lyon, tous droits réservés

3.14h-3.14k) et la hauteur relative y/H (Figs. 3.14c-3.14f-3.14i-3.14l) pour l'ensemble des vitesses ($\overline{u}/U_0$, $\overline{v}/U_0$ et $\overline{w}/U_0$) et l'énergie cinétique turbulente k/U_0^2 (Fig. 3.14). Notons que les barres des IC à 95% des erreurs RMSE paraissent démesurées pour certains cas mais elles sont dues à l'énergie cinétique turbulente k et aux vitesses verticale $\overline{v}$ et horizontale $\overline{w}$ proches de zéro.

L'erreur RMSE des sections transversales yz (1ère colonne - Fig. 3.14) est du même ordre de grandeur pour toutes les sections de mesure et l'ensemble des variables d'intérêt ($\overline{u}/U_0$, $\overline{v}/U_0$, $\overline{w}/U_0$) et k/U_0^2) sauf au niveau de la fin du déversoir latéral ($x/B = 1$). L'erreur RMSE des vitesses longitudinale $\overline{u}/U_0$, verticale $\overline{v}/U_0$ et horizontale $\overline{w}/U_0$, et de l'énergie cinétique turbulente k/U_0^2 est d'environ 7.0%, 2.5%, 2.0% et 0.05%, respectivement. L'erreur RMSE maximale observée pour ces mêmes variables est d'environ 10%, 20%, 4% et 0.35%, respectivement.

L'erreur RMSE selon la position horizontale relative z/B (i) augmente vers le côté du déversement ($z/B \rightarrow 1$) pour la vitesse longitudinale $\overline{u}/U_0$ (Fig. 3.14b) et horizontale $\overline{w}/U_0$ (Fig. 3.14h), et (ii) reste constante pour la vitesse verticale $\overline{v}/U_0$ (Fig. 3.14e) et l'énergie cinétique turbulente k/U_0^2 (Fig. 3.14k), sauf pour la région $z/B \in [0.50\,,0.75)$.

Selon la hauteur relative y/H (3ième colonne - Fig. 3.14), l'erreur RMSE sur les vitesses longitudinale $\overline{u}/U_0$, verticale $\overline{v}/U_0$ et horizontale $\overline{w}/U_0$, et l'énergie cinétique turbulente k/U_0^2 pour $y/H \leq 0.75$ est d'environ 6.0%, 1.0%, 3.0% et 0.1%, respectivement. L'erreur RMSE est maximale si $y/H > 0.75$ pour l'ensemble des vitesses et de l'énergie cinétique turbulente, qui correspond à l'écoulement au-dessus du seuil latéral. L'erreur maximale sur les vitesses longitudinale $\text{RMSE}_{\overline{u}}^{\text{max}} \approx 13\%$, verticale $\text{RMSE}_{\overline{v}}^{\text{max}} \approx 40\%$ et horizontale $\text{RMSE}_{\overline{w}}^{\text{max}} \approx 5\%$, et sur l'énergie cinétique turbulente $\text{RMSE}_{k}^{\text{max}} \approx 0.9\%$. L'erreur RMSE maximale sur la vitesse longitudinale ($\text{RMSE}_{\overline{u}}^{\text{max}} \approx 13\%$) et horizontale ($\text{RMSE}_{\overline{w}}^{\text{max}} \approx 5\%$) est inférieure aux résultats numériques d'Azimi et al. (2018), obtenus avec le modèle de turbulence RNG k-ϵ sur un déversoir latéral ($p_{\text{lt}} = 0.150\,m$) en régime fluvial ($Fr_{x/B=0} = 0.256, B = 0.400\,m, Q_{xi} = 43.5\,L/s$), pour les vitesses longitudinale et horizontale de $\text{RMSE}_{\overline{u}}^{\text{max - Azami}} \approx 20\%$ et $\text{RMSE}_{\overline{w}}^{\text{max - Azami}} \in (9\%\,,20\%)$, respectivement.

Il est ainsi observé que l'erreur RMSE augmente (i) vers la surface libre ($y/H \rightarrow 1$) pour l'ensemble des vitesses et l'énergie cinétique turbulente et (ii) vers le côté du déversement ($z/B \rightarrow 1$) pour les vitesses longitudinale $\overline{u}/U_0$ et horizontale $\overline{w}/U_0$. Par contre, l'erreur RMSE de chacune des variables d'intérêt reste constante pour les différentes sections transversales de mesure yz sauf pour la section $x/B = 1.0$, où elle est maximale. L'erreur RMSE des modèles RNG k-ϵ et SST k-ω est similaire pour chacune des variables d'intérêt dans les différentes directions d'évaluation (x/B, z/B et y/H).

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2020LYSEI083/these.pdf
© [A. Claro Barreto], [2020], INSA Lyon, tous droits réservés

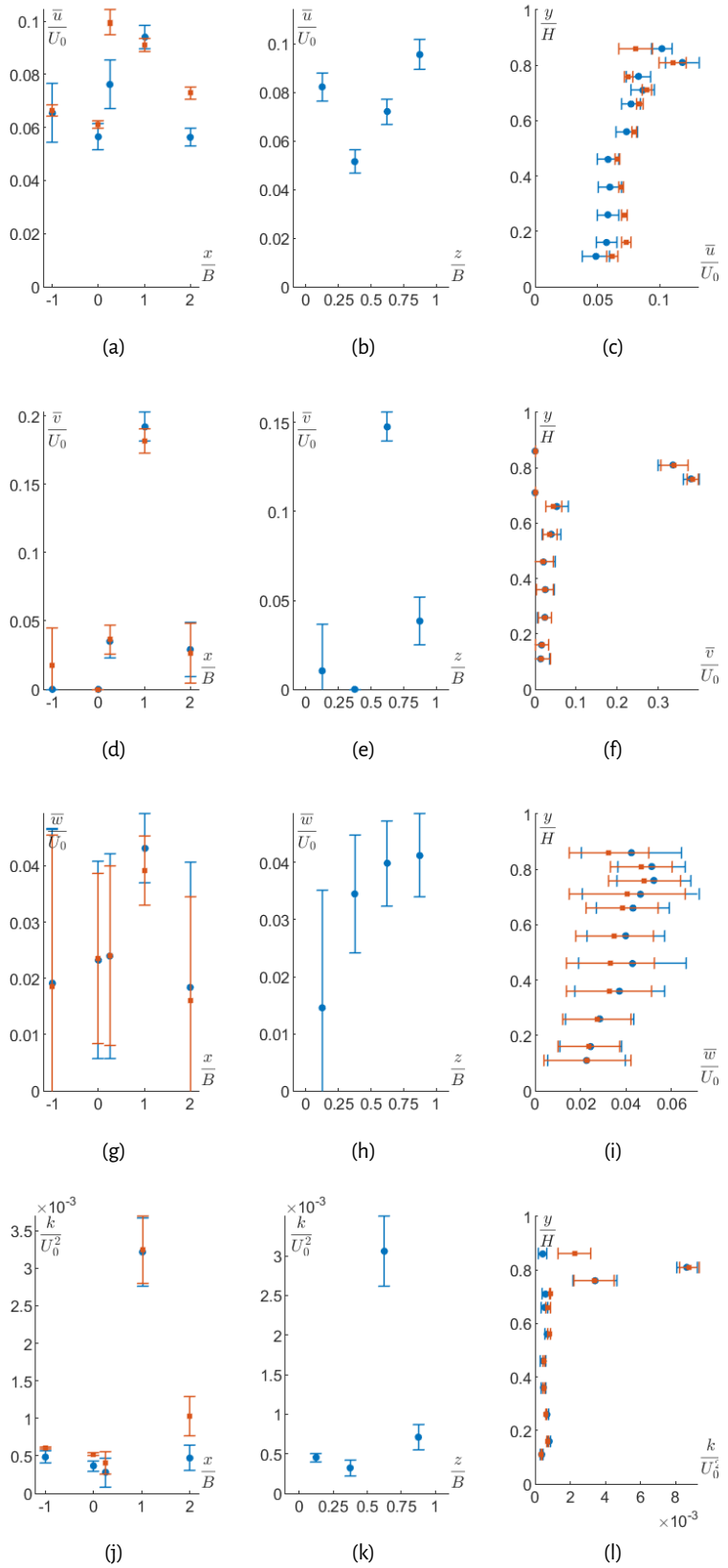


Figure 3.14 – Erreur moyenne quadratique (RMSE) des modèles de turbulence RNG (bleu) et SST (rouge) en fonction des sections transversales yz (Fig. 3.14a-3.14d-3.14g-3.14j), xy (Fig. 3.14b-3.14e-3.14h-3.14k) et zx (Fig. 3.14c-3.14f-3.14i-3.14l) pour les vitesses $\overline{u}/U_0$ (Fig. 3.14a-3.14b-3.14c), $\overline{v}/U_0$ (Fig. 3.14d-3.14e-3.14f) et $\overline{w}/U_0$ (Fig. 3.14g-3.14h-3.14h) et l'énergie cinétique turbulente k/U_0^2 (Fig. 3.14j-3.14k-3.14l). Les barres verticales et horizontales correspondent à l'intervalle de confiance à 95% de l'erreur RMSE.

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2020LYSEI083/these.pdf
© [A. Claro Barreto], [2020], INSA Lyon, tous droits réservés

3.4.2 La performance locale des modèles de turbulence

La performance des modèles de turbulence RNG k-ϵ et SST k-ω est évaluée par sa capacité à reproduire localement les profils verticaux des variables d'intérêt ($\overline{u}$, $\overline{v}$, $\overline{w}$ et k) et les courants secondaires ($\overrightarrow{\overline{w}\overline{v}} = \langle \overline{w}, \overline{v} \rangle$) au niveau du déversement.

3.4.2.1 Les profils verticaux

La performance locale des modèles de turbulence RNG k-ϵ et SST k-ω est étudiée à l'aide des profils verticaux des vitesses $\overline{u}/U_0$, $\overline{v}/U_0$, et $\overline{w}/U_0$, et de l'énergie cinétique turbulente $\overline{k}/U_0^2$ selon les coordonnées du Tableau 3.9. L'erreur moyenne quadratique (RMSE) de chaque profil vertical par variable d'intérêt (i.e. $\overline{u}$, $\overline{v}$, $\overline{w}$ et k) et par modèle de turbulence est présentée dans le Tableau 3.10. Les Figs. 3.15-3.16-3.17-3.18 présentent respectivement l'ensemble des profils verticaux pour les vitesses $\overline{u}/U_0$, $\overline{v}/U_0$, et $\overline{w}/U_0$, et l'énergie cinétique turbulente $\overline{k}/U_0^2$, selon les coordonnées du Tableau 3.9.

	x/B				
	-1.00	0.00	0.25	1.00	2.00
$\frac{z}{B}$	0.333	0.283		0.337	0.333
	0.600	0.513	0.667	0.493	0.483
	0.800	0.800	0.783	0.790	0.800

Tableau 3.9 – Coordonnées horizontale (z/B) et longitudinale (x/B) des profils verticaux du Tableau 3.10 et les Figs. 3.15-3.16-3.17-3.18.

Il est observé que les profils de vitesse longitudinale $\overline{u}/U_0$ proche du côté du déversement ($z/B \equiv 2/3$ - Fig. 3.15k-3.15l-3.15m) et au niveau du déversement ($x/B = 0.25$ - Fig. 3.15g-3.15l) sont surestimés par les deux modèles de turbulence. Cependant, le modèle RNG k-ϵ reproduit légèrement mieux la vitesse longitudinale locale que le modèle SST k-ω, car l'erreur moyenne quadratique $\text{RMSE}_{\text{RNG}} < \text{RMSE}_{\text{SST}}$ pour 64% des profiles verticaux (Tableau 3.10). L'erreur RMSE maximale des deux modèles de turbulence est $\text{RMSE}_{\text{RNG}}^{max} = 16.3\%$ et $\text{RMSE}_{\text{SST}}^{max} = 17.7\%$, elle est obtenue pour le profil vertical localisé à $x/B = 1.00$ et $z/B = 0.790$ (Fig. 3.15m).

Concernant la vitesse verticale locale $\overline{v}/U_0$, les deux modèles de turbulence reproduisent la plupart des profils verticaux sauf ceux localisés au niveau du déversement ($x/B = 0.25$ - Fig. 3.16g-3.16l), où la vitesse $\overline{v}/U_0$ est sous-estimée. Le modèle SST k-ω a une performance supérieure ($\text{RMSE}_{\text{SST}} < \text{RMSE}_{\text{RNG}}$) au modèle RNG k-ϵ pour 71% des profiles verticaux, mais cette performance est faible car la moyenne de $\left|\text{RMSE}_{\text{SST}} - \text{RMSE}_{\text{RNG}}\right| \approx 0.002$. L'erreur RMSE maximale des deux modèles de turbulence est $\text{RMSE}_{\text{RNG}}^{max} = 4.6\%$ et $\text{RMSE}_{\text{SST}}^{max} = 4.8\%$, elle est obtenue pour le profil vertical localisé à $x/B = 0.25$ et $z/B = 0.783$ (Fig. 3.16l).

Concernant la vitesse horizontale locale $\overline{w}/U_0$, les modèles de turbulence RNG k-ϵ et SST k-ω la reproduisent assez bien dans les sections amont ($x/B = -1.00$ - Fig. 3.17a-3.17e-3.17j) et aval ($x/B = 2.00$ - Fig. 3.17d-3.17i-3.17n) du déversoir latéral, avec une erreur RMSE $\approx 0.010U_0$. La plus faible performance est observée au niveau de la fin du déversement ($x/B = 1.00$ - Fig. 3.17c-3.17h-3.17m), où la vitesse locale $\overline{w}/U_0$ est sous-estimée par les deux modèles numériques. Les modèles RNG k-ϵ et SST k-ω sous-estiment également la vitesse locale $\overline{w}/U_0$ proche de la surface libre ($y/H \rightarrow 1.00$) au niveau du déversement ($x/B = 0.25$ - Fig. 3.17g-3.17l). L'erreur RMSE maximale des deux modèles de turbulence est $\text{RMSE}_{\text{RNG}}^{max} = 4.7\%$ et $\text{RMSE}_{\text{SST}}^{max} = 4.1\%$, elle est obtenue pour le profil vertical localisé à $x/B = 1.00$ et $z/B = 0.790$.

Concernant l'énergie cinétique turbulente locale k/U_0^2, les deux modèles de turbulence sous-estiment la plupart des profils verticaux localisés vers l'axe du canal principal ($z/B \equiv 1/2$ - Fig. 3.18e-3.18f-3.18g-3.18h). Cependant, le modèle RNG k-ϵ reproduit mieux k/U_0^2 que le modèle SST k-ω, car l'erreur $\text{RMSE}_{\text{RNG}} < \text{RMSE}_{\text{SST}}$ pour 100% des profiles verticaux (Tableau 3.10). L'erreur RMSE maximale est observée pour le profil vertical localisé à $x/B = 1.00$ et $z/B = 0.790$ (Fig. 3.18m), $\text{RMSE}_{\text{RNG}}^{max} = 0.13\%$ et $\text{RMSE}_{\text{SST}}^{max} = 0.17\%$.

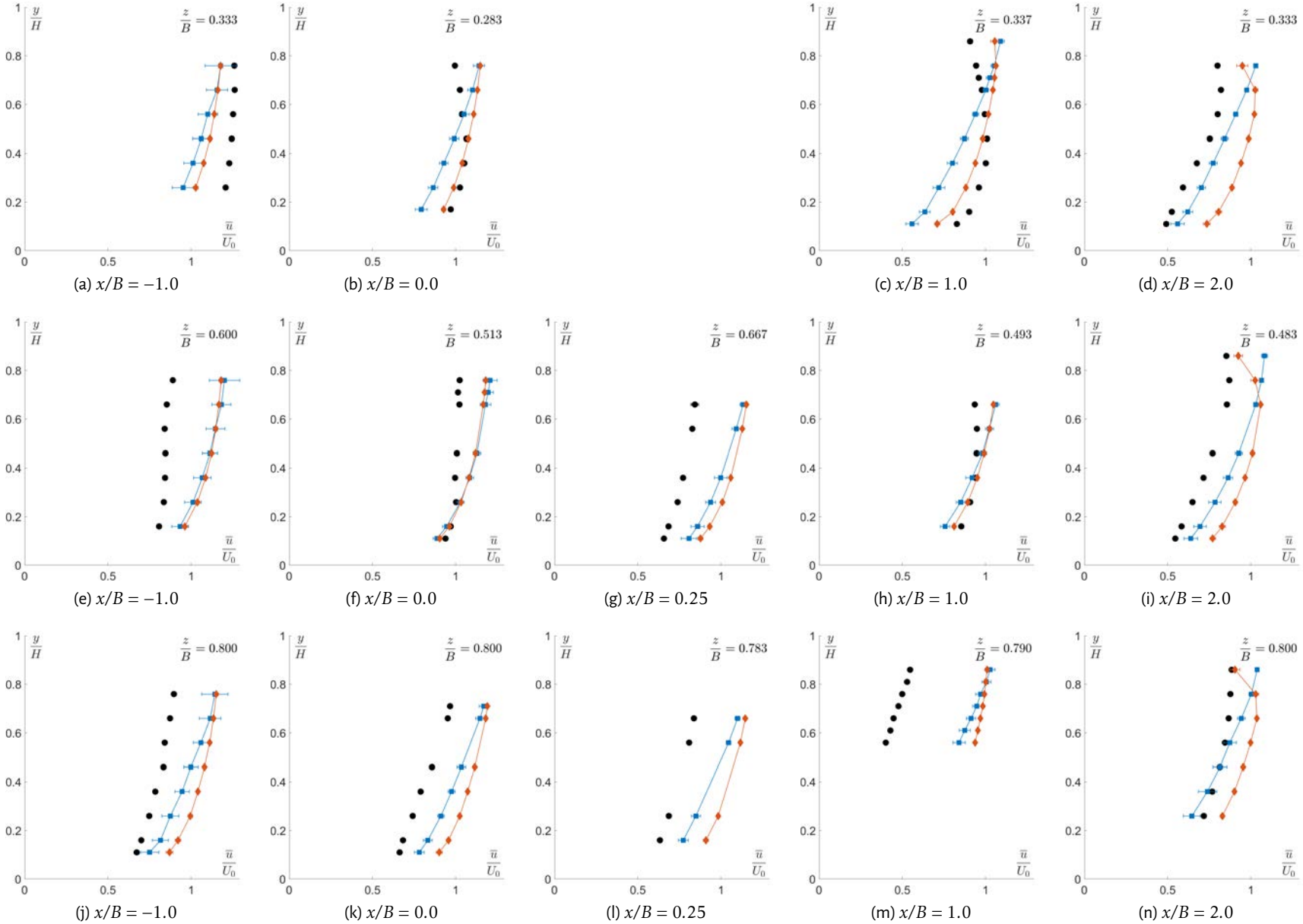
Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2020LYSEI083/these.pdf
© [A. Claro Barreto], [2020], INSA Lyon, tous droits réservés

	z/B	x/B				
		-1.00	0.00	0.25	1.00	2.00
$\frac{\overline{u}}{U_0}$ (Fig. 3.15)	« 1/3 »	0.063	0.043		0.062	0.045
		0.046	*0.028*		*0.032*	*0.085*
	« 1/2 »	0.091	0.043	0.078	0.027	0.056
		0.092	*0.038*	*0.096*	*0.022*	*0.075*
	« 2/3 »	0.063	0.061	0.073	0.163	0.031
		0.086	*0.090*	*0.105*	*0.177*	*0.047*
$\frac{\overline{v}}{U_0}$ (Fig. 3.16)	« 1/3 »	0.017	0.011		0.008	0.006
		0.013	*0.010*		*0.008*	*0.007*
	« 1/2 »	0.016	0.013	0.025	0.007	0.006
		0.011	*0.011*	*0.026*	*0.007*	*0.008*
	« 2/3 »	0.017	0.009	0.046	0.005	0.024
		0.014	*0.009*	*0.048*	*0.004*	*0.020*
$\frac{\overline{w}}{U_0}$ (Fig. 3.17)	« 1/3 »	0.016	0.019		0.036	0.007
		0.016	*0.020*		*0.032*	*0.007*
	« 1/2 »	0.014	0.018	0.016	0.040	0.008
		0.013	*0.016*	*0.014*	*0.038*	*0.007*
	« 2/3 »	0.009	0.009	0.020	0.047	0.008
		0.008	*0.012*	*0.023*	*0.041*	*0.009*
$\frac{k}{U_0^2}\left[10^{-3}\right]$ (Fig. 3.18)	« 1/3 »	0.137	0.143		0.318	0.564
		0.394	*0.355*		*0.428*	*0.868*
	« 1/2 »	0.862	0.694	0.295	0.328	0.098
		1.033	*0.835*	*0.408*	*0.462*	*1.076*
	« 2/3 »	0.060	0.146	0.220	1.288	0.482
		0.192	*0.319*	*0.396*	*1.678*	*1.108*

Tableau 3.10 – Erreur moyenne quadratique (RMSE) non dimensionnelle des modèles de turbulence RNG (en bleu) et SST (en rouge et en italique) pour chaque profil vertical des vitesses $\overline{u}/U_0$, $\overline{v}/U_0$ et $\overline{w}/U_0$ et de l'énergie cinétique turbulente k/U_0^2 selon les coordonnées du Tableau 3.9. $U_0 = 0.353\,m/s$ - $B = 0.300\,m$.

Il est ainsi observé que le modèle RNG k-ϵ possède une performance supérieure au modèle SST k-ω pour les vitesses longitudinale $\overline{u}$ et horizontale $\overline{w}$, et l'énergie cinétique turbulente k. Cependant les résultats des deux modèles restent assez proches, car l'erreur RMSE de chacun est similaire par profil vertical et par variable d'intérêt (i.e. $\overline{u}, \overline{v}, \overline{w}$ et k). Au niveau et à la fin du déversement ($x/B = 0.25$ et $x/B = 1.00$, respectivement), les deux modèles de turbulence (i) surestiment la vitesse longitudinale $\overline{u}$, et (ii) sous-estiment l'énergie cinétique turbulente k et les vitesses vertical $\overline{v}$ et horizontale $\overline{w}$. Ce comportement est dû en partie à la sous-estimation du débit déversé (Q_{z0} - Fig. 3.12), car la vitesse longitudinale $u \propto 1/Q_{z0}$ et la vitesse longitudinale $w \propto Q_{zo}$.

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2020LYSEI083/these.pdf
© [A. Claro Barreto], [2020], INSA Lyon, tous droits réservés



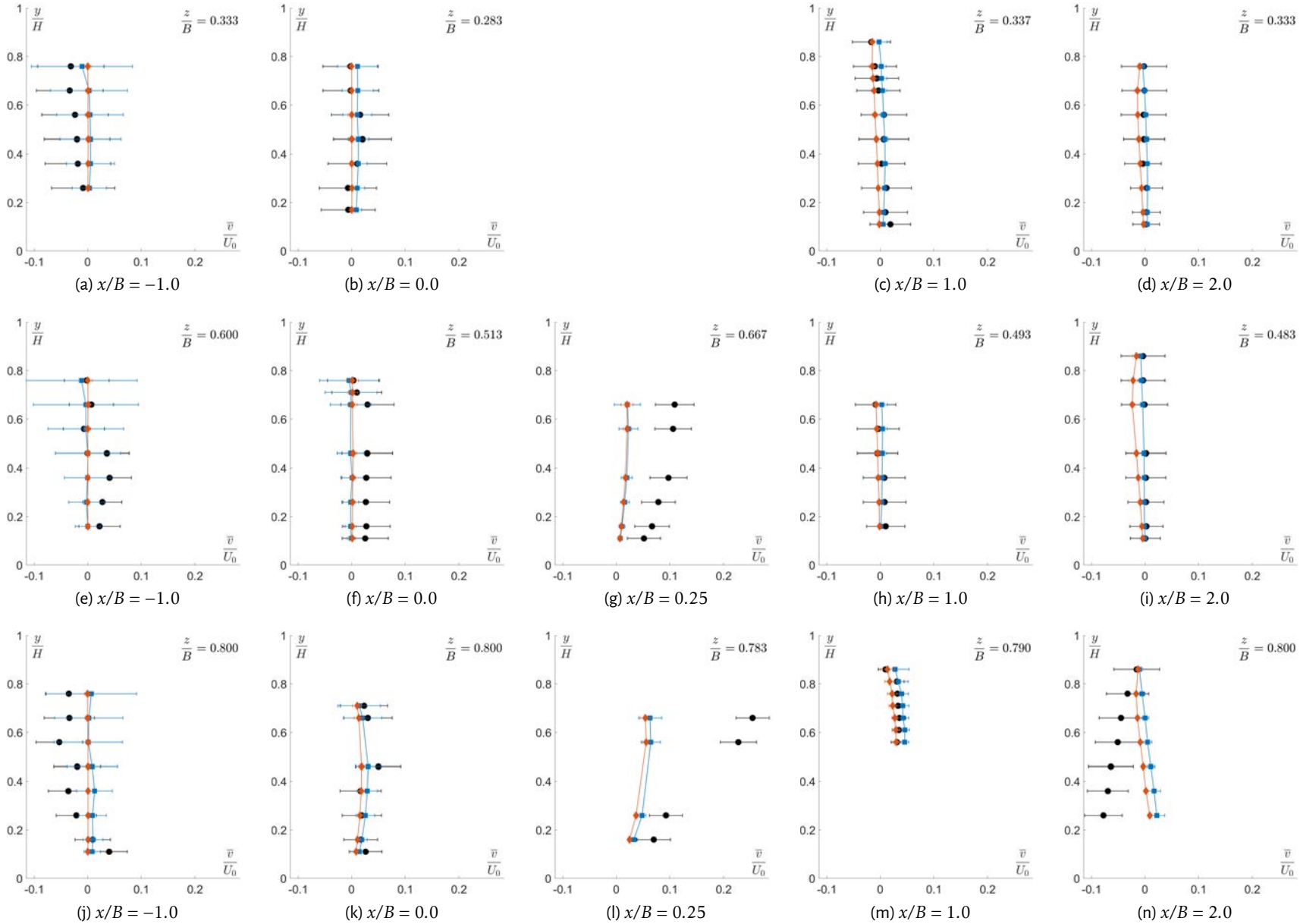
(a) $x/B = -1.0$ (b) $x/B = 0.0$ (c) $x/B = 1.0$ (d) $x/B = 2.0$

(e) $x/B = -1.0$ (f) $x/B = 0.0$ (g) $x/B = 0.25$ (h) $x/B = 1.0$ (i) $x/B = 2.0$

(j) $x/B = -1.0$ (k) $x/B = 0.0$ (l) $x/B = 0.25$ (m) $x/B = 1.0$ (n) $x/B = 2.0$

Figure 3.15 - Profils verticaux de la vitesse longitudinale u/U_0 selon les coordonnées du Tableau 3.9. Expérimental - Noir, RNG k-ϵ - Bleu, SST k-ω - Rouge

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2020LYSEI083/these.pdf
© [A. Claro Barreto], [2020], INSA Lyon, tous droits réservés



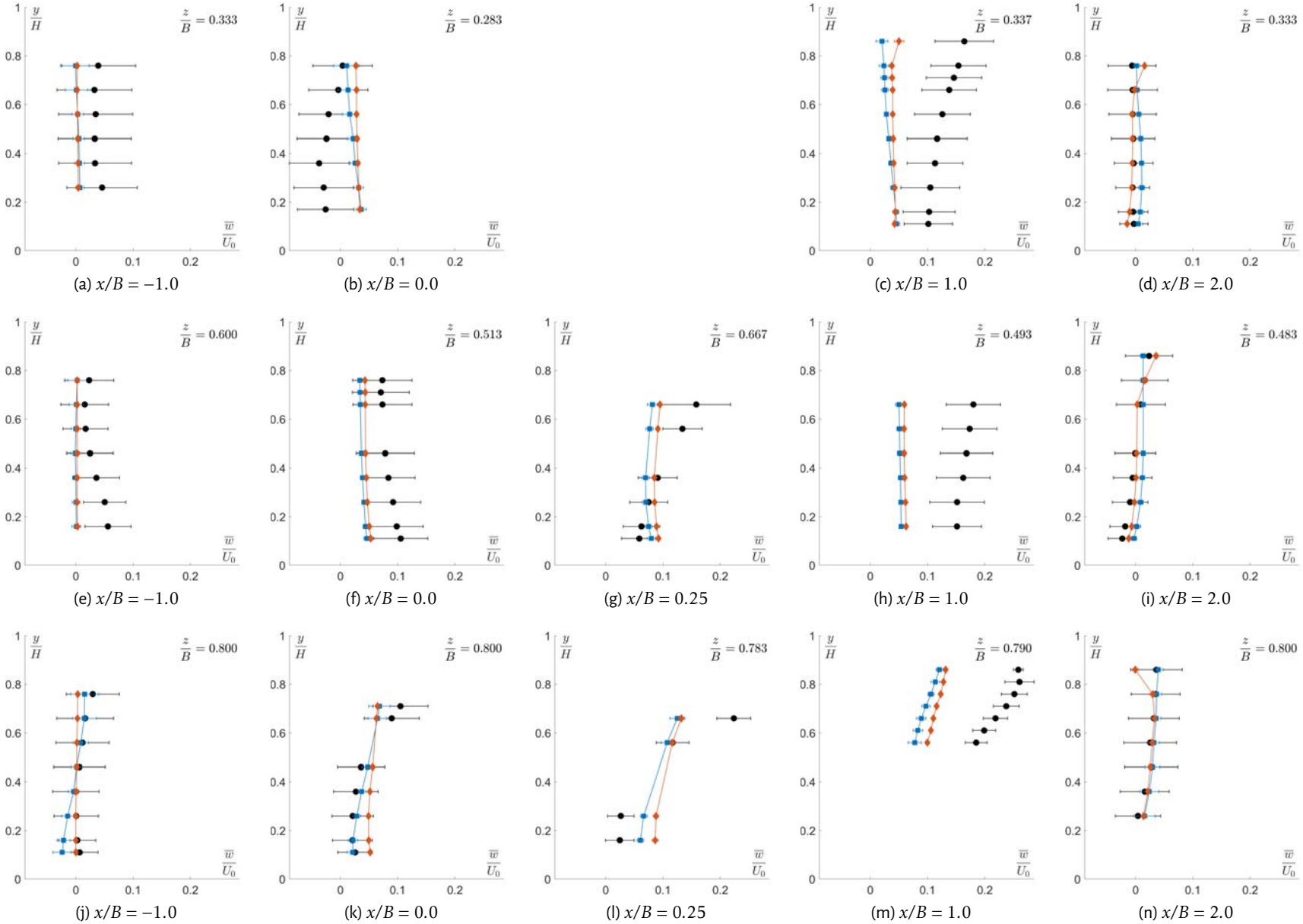
(a) $x/B = -1.0$ (b) $x/B = 0.0$ (c) $x/B = 1.0$ (d) $x/B = 2.0$

(e) $x/B = -1.0$ (f) $x/B = 0.0$ (g) $x/B = 0.25$ (h) $x/B = 1.0$ (i) $x/B = 2.0$

(j) $x/B = -1.0$ (k) $x/B = 0.0$ (l) $x/B = 0.25$ (m) $x/B = 1.0$ (n) $x/B = 2.0$

Figure 3.16 – Profils verticaux de la vitesse verticale $\overline{v}/U_0$ selon les coordonnées du Tableau 3.9. Expérimental - Noir, RNG k-ϵ - Bleu, SST k-ω - Rouge.

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2020LYSEI083/these.pdf
© [A. Claro Barreto], [2020], INSA Lyon, tous droits réservés



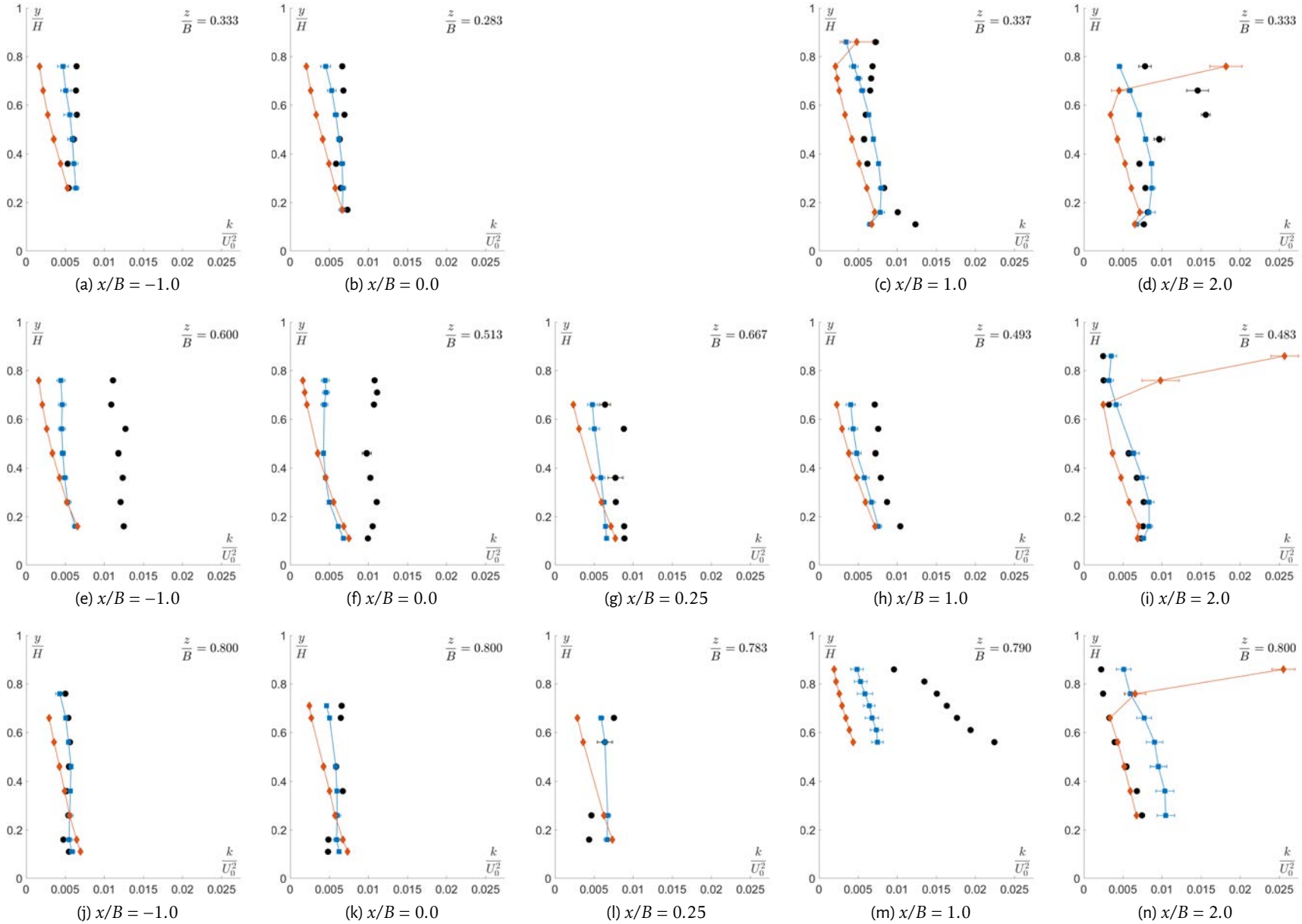
(a) $x/B = -1.0$ (b) $x/B = 0.0$ (c) $x/B = 1.0$ (d) $x/B = 2.0$

(e) $x/B = -1.0$ (f) $x/B = 0.0$ (g) $x/B = 0.25$ (h) $x/B = 1.0$ (i) $x/B = 2.0$

(j) $x/B = -1.0$ (k) $x/B = 0.0$ (l) $x/B = 0.25$ (m) $x/B = 1.0$ (n) $x/B = 2.0$

Figure 3.17 - Profils verticaux de la vitesse horizontale w/U_0 selon les coordonnées du Tableau 3.9. Expérimental - Noir, RNG k-ϵ - Bleu, SST k-ω - Rouge.

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2020LYSEI083/these.pdf
© [A. Claro Barreto], [2020], INSA Lyon, tous droits réservés



(a) $x/B = -1.0$ (b) $x/B = 0.0$ (c) $x/B = 1.0$ (d) $x/B = 2.0$

(e) $x/B = -1.0$ (f) $x/B = 0.0$ (g) $x/B = 0.25$ (h) $x/B = 1.0$ (i) $x/B = 2.0$

(j) $x/B = -1.0$ (k) $x/B = 0.0$ (l) $x/B = 0.25$ (m) $x/B = 1.0$ (n) $x/B = 2.0$

Figure 3.18 – Profils verticaux de l'énergie cinétique turbulente k/U_0^2 selon les coordonnées du Tableau 3.9. Expérimental - Noir, RNG k-ϵ - Bleu, SST k-ω - Rouge.

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2020LYSEI083/these.pdf
© [A. Claro Barreto], [2020], INSA Lyon, tous droits réservés

3.4.2.2 Les courants secondaires au niveau du déversement

Les modèles de turbulence RNG k-ϵ et SST k-ω produisent des courants secondaires ($\overrightarrow{wv} = (\overline{w}, 0) + (0, \overline{v})$) similaires, en termes de magnitude et direction, au niveau du déversement (Fig. 3.19-3.20-3.21). Le sens moyen de l'écoulement présente les caractéristiques observées de manière expérimentale par Bagheri et Heidarpour (2012) et numérique par Azimi et al. (2018) : (i) la vitesse verticale $\overline{v}$ est ascensionnelle proche de la crête et (ii) la vitesse longitudinale $\overline{u}$ est maximale au début du déversement.

Au début du déversement ($x/B = 0.00$ - Fig.3.19), si $z/B > 0.5$ le sens moyen de l'écoulement mesuré (flèche bleue) est assez bien reproduit par les deux modèles numériques mais la magnitude du courant moyen expérimental est légèrement sous-estimée. Seulement pour $z/B \approx 0.67$, le sens moyen de l'écoulement expérimental (flèche bleue) n'est pas correctement reproduit par les deux modèles de turbulence (flèches rouge et violet), mais les intervalles de confiance (IC) à 95% de $\overrightarrow{wv}$ des données expérimentales et numériques se chevauchent pour l'ensemble des points. Au contraire, si $z/B < 0.5$ le sens moyen de l'écoulement simulé est contraire à l'écoulement mesuré, mais les IC à 95% de $\overrightarrow{wv}$ des données expérimentales et numériques se chevauchent pour environ 65% des données.

Au niveau de la section transversale localisée à $0.25B$ à l'aval du début du déversement (Fig. 3.20), les modèles numériques sous-estiment la vitesse verticale $\overline{v}$ du vecteur vitesse $\overrightarrow{wv}$ expérimentale. Pour $y/H > 0.50$, la magnitude du vecteur $\overrightarrow{wv}$ expérimental est sous-estimée parce que les modèles numériques sous-estiment les vitesses verticale $\overline{v}$ et horizontale $\overline{w}$, comme déjà observé dans la Section 3.4.2.1.

Au niveau de la fin du déversement $x/B = 1.00$, si $z/B > 0.3$ le sens moyen de l'écoulement est correctement reproduit mais la magnitude moyenne de $\overrightarrow{wv}$ des données expérimentales est sous-estimée par les deux modèles de turbulence. Si $z/B < 0.3$, le sens moyen de l'écoulement est parfois inverse mais l'IC à 95% des résultats expérimentaux et numériques se chevauchent.

Les différences observées entre les données expérimentales et numériques sont (i) en accord avec les erreurs calculées dans les Sections 3.4.1.2-3.4.2.1 et (ii) liées à la dissymétrie du contour de la vitesse $\overline{u}/U_0$ observée expérimentalement (Section 3.2.2.7 et les Figs. 3.22a-3.22d) mais non reproduite numériquement (Fig. 3.22). En outre, la magnitude des courants secondaires est sous-estimée par les modèles numériques en raison de la légère sous-estimation du débit déversé Q_{z0} (Fig. 3.12).

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2020LYSEI083/these.pdf
© [A. Claro Barreto], [2020], INSA Lyon, tous droits réservés

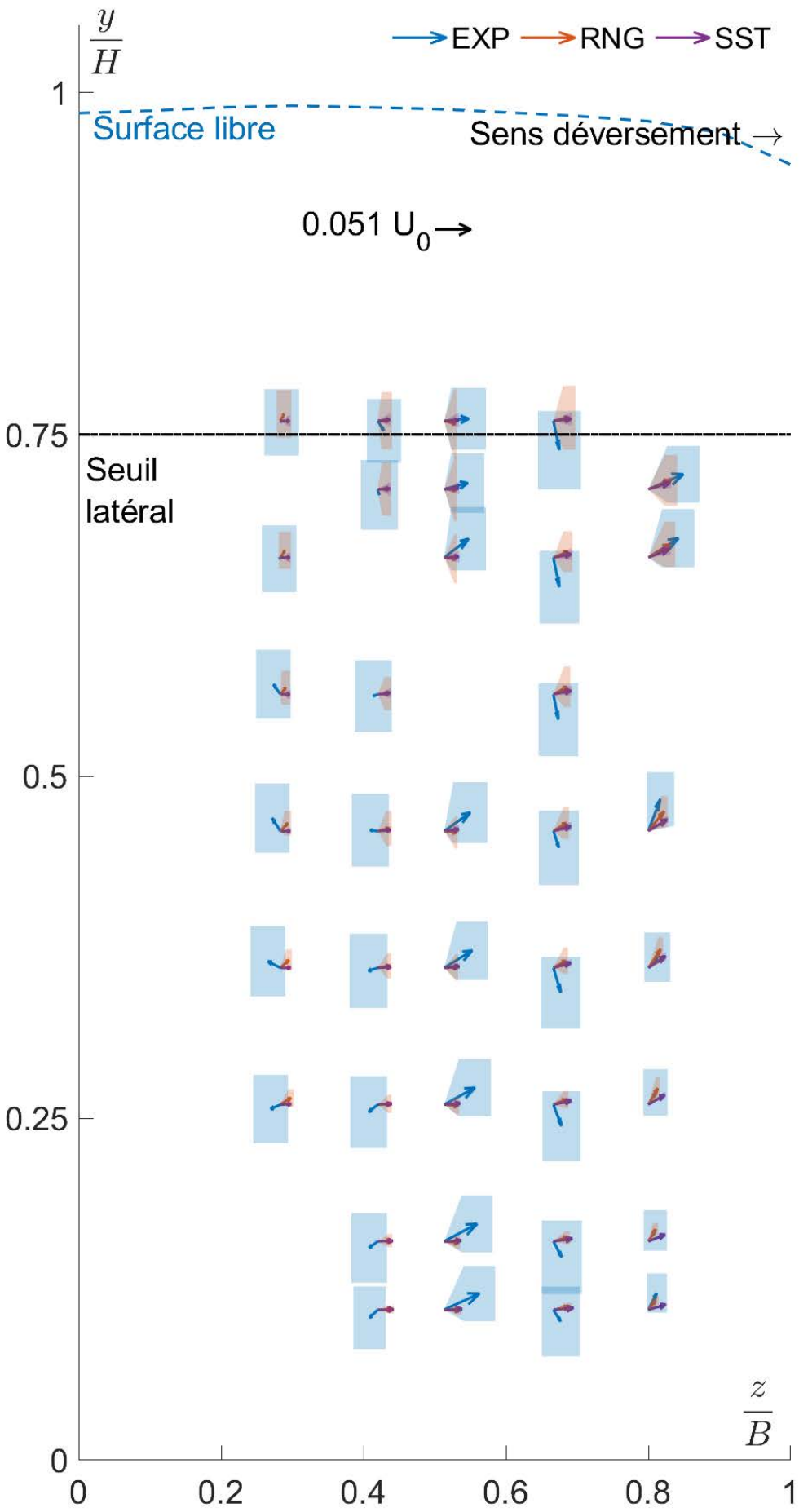


Figure 3.19 – Courants secondaires expérimentaux (EXP) et numériques (RNG et SST) au niveau de la section transversale yz à $x/B = 0.0$. La surface bleue autour de chaque vecteur correspond à l'intervalle de confiance à 95% du vecteur $\overrightarrow{u'v'} = (\overline{u'}, \overline{v'})$.

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2020LYSEI083/these.pdf
© [A. Claro Barreto], [2020], INSA Lyon, tous droits réservés

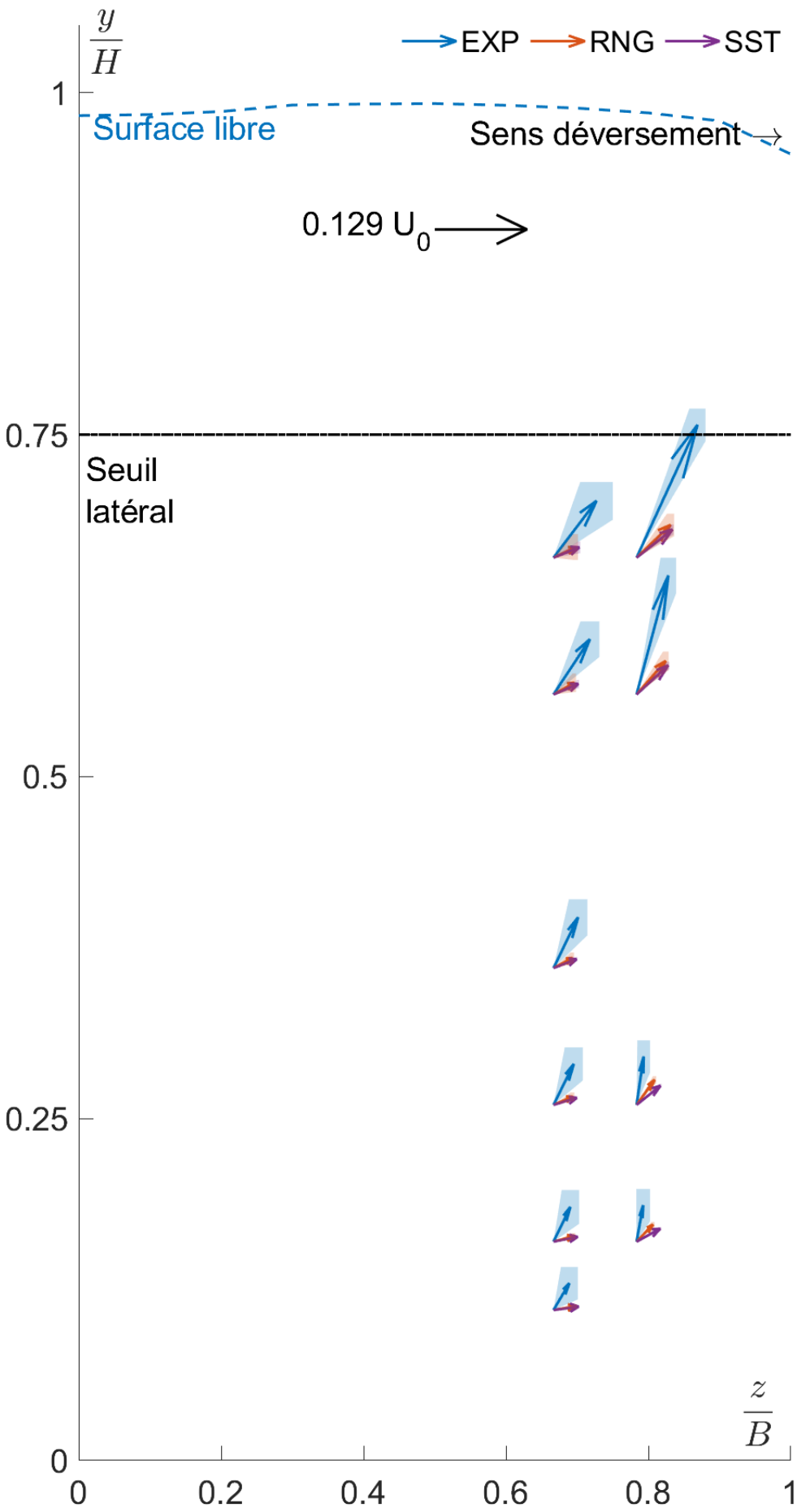


Figure 3.20 – Courants secondaires expérimentaux (EXP) et numériques (RNG et SST) au niveau de la section transversale yz à $x/B = 0.25$. La surface bleue autour de chaque vecteur correspond à l'intervalle de confiance à 95% du vecteur $\overline{uv} = \langle u', v' \rangle$.

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2020LYSEI083/these.pdf
© [A. Claro Barreto], [2020], INSA Lyon, tous droits réservés

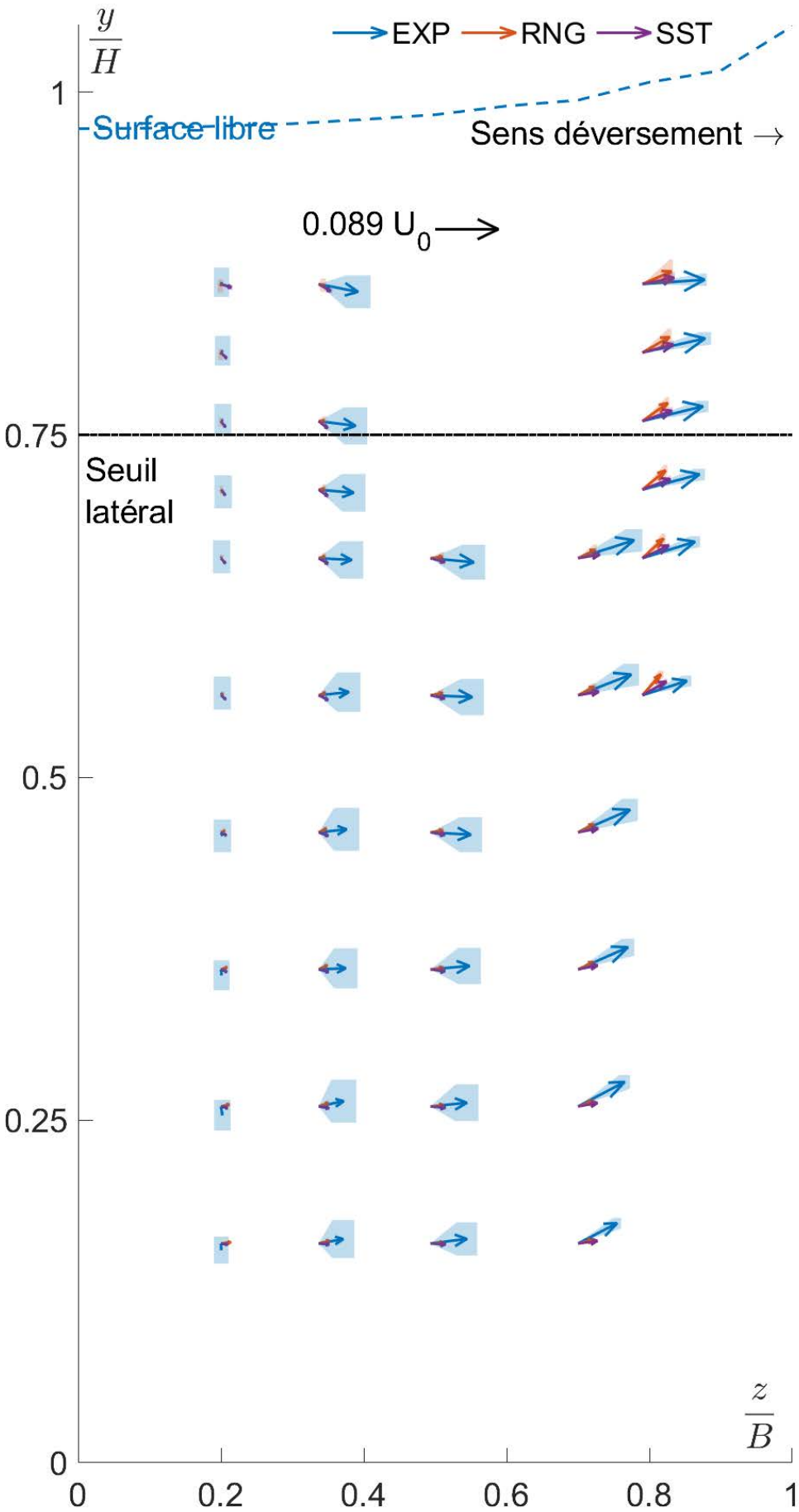
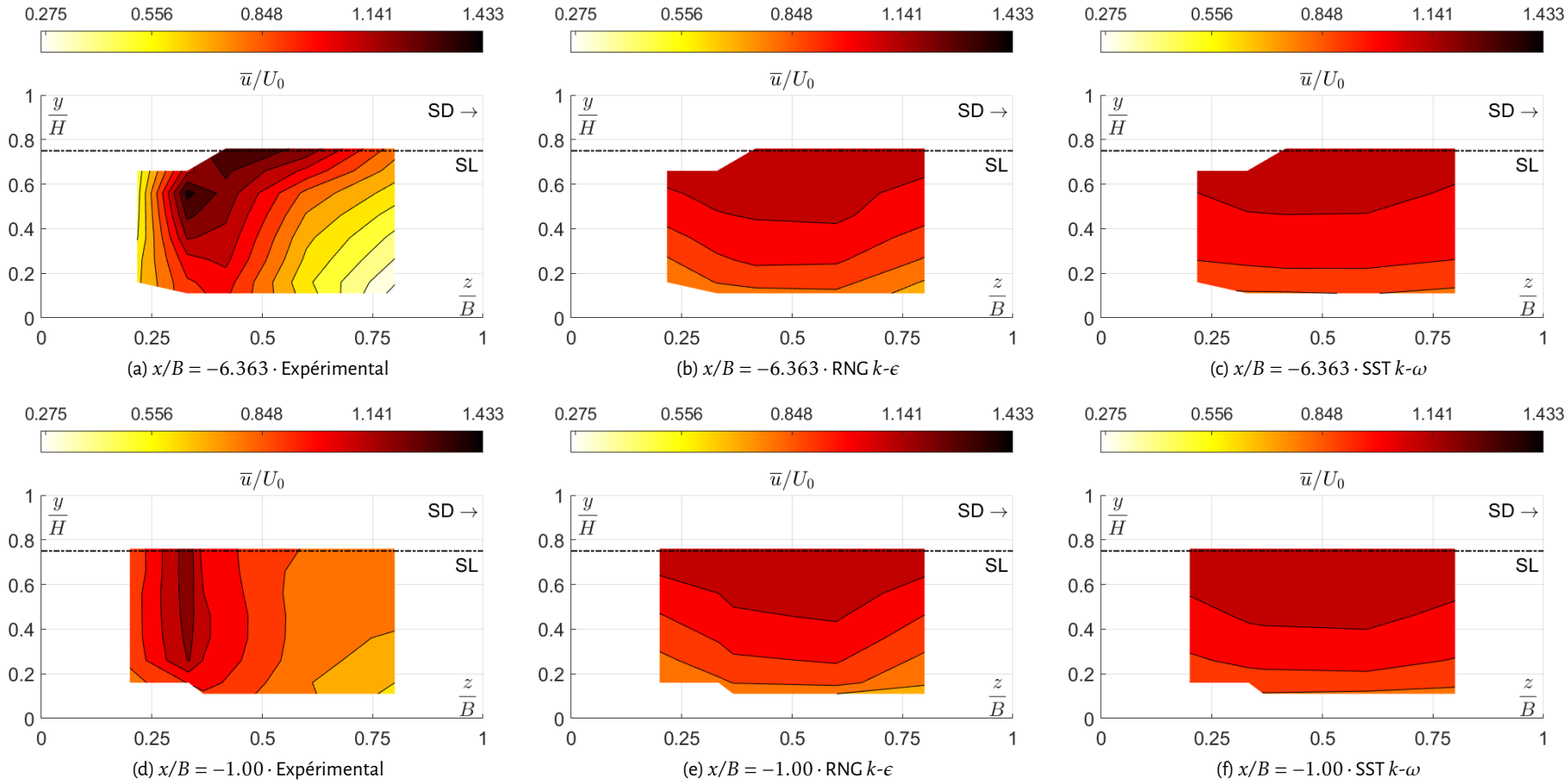


Figure 3.21 – Courants secondaires expérimentaux (EXP) et numériques (RNG et SST) au niveau de la section transversale yz à $x/B = 1.00$. La surface bleue autour de chaque vecteur correspond à l'intervalle de confiance à 95% du vecteur $\overrightarrow{u'v'} = (\overline{u'}, \overline{v'})$.

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2020LYSEI083/these.pdf
© [A. Claro Barreto], [2020], INSA Lyon, tous droits réservés



(a) $x/B = -6.363$ · Expérimental (b) $x/B = -6.363$ · RNG k-ϵ (c) $x/B = -6.363$ · SST k-ω

(d) $x/B = -1.00$ · Expérimental (e) $x/B = -1.00$ · RNG k-ϵ (f) $x/B = -1.00$ · SST k-ω

Figure 3.22 – Vue vers l'aval de la distribution spatiale de vitesse longitudinale moyenne $\overline{u}/U_0$ expérimentale et numérique (RNG k-ϵ et SST k-ω) à l'entrée du canal amont (Fig. 3.22a-3.22b-3.22c) et à l'amont (3.22d-3.22e-3.22f) du déversoir latéral. SD : Sens du déversement. SL : Seuil latéral à $y/H = 0.75$. $H = 0.100\,m$. $B = 0.300\,m$.

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2020LYSEI083/these.pdf
© [A. Claro Barreto], [2020], INSA Lyon, tous droits réservés

3.4.3 La répartition spatiale des lignes de courant liées au déversement latéral

La répartition spatiale 2D et 3D des lignes de courant liées au déversement latéral est étudiée à l'aide du modèle numérique. La répartition 2D est étudiée au niveau d'une section transversale perpendiculaire à la vitesse principale $\overline{u}$ et localisée à $6.4B$ à l'amont du début du déversoir latéral. Cette section transversale est la même que celle utilisée pour l'injection des particules inertes au Chapitre 6. La répartition 2D permet d'estimer le pourcentage (ou probabilité) qu'une ligne de courant se dirige vers le déversement en fonction du point d'injection.

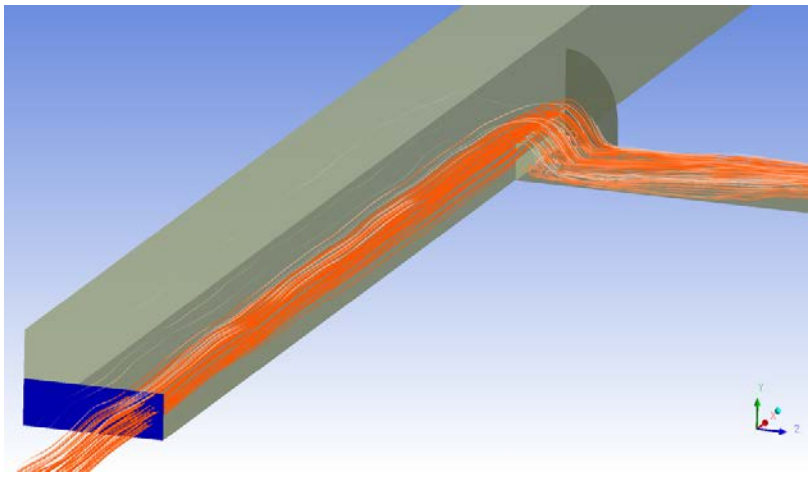
Les résultats présentés dans cette section ont été calculés avec le modèle de turbulence RNG k-ϵ et le maillage le plus fin (i.e. la résolution N°3). Ce modèle de turbulence est choisi parce qu'il a une performance supérieure ou égale au modèle SST k-ω (voir Section 3.4.1.2). Le lecteur intéressé par les autres répartitions spatiales 2D, obtenues pour les deux autres maillages du modèle RNG k-ϵ et les trois maillages du modèle SST k-ω, est invité à consulter l'Annexe C.

La répartition spatiale 3D des lignes de courants montre que seul la rive droite de la section transversale, à l'amont du déversement (Fig. 3.23a - en bleue), est seule responsable du déversement latéral. En effet, les lignes de courant injectées à $z/B \geq 0.6$ représentent la principale source du débit déversé (Fig. 3.23b). En outre, les lignes de courant initialement en dessous de la hauteur du seuil latéral ($y/H \leq 0.75$) sont susceptibles de se diriger au déversement, très probablement à cause de la vitesse verticale $\overline{v}$ créée par le déversoir latéral à l'aval (voir les vecteurs de vitesse des Figs. 3.19-3.20). Aussi, il est observé que certaines lignes de courant localisées à $0 \leq z/B < 0.6$ et $0.5 \leq y/H \leq 1.0$ se dirigent vers le déversement latéral (Fig. 3.23b). Cependant, leur probabilité de déversement est inférieure ou égale à 10% (Fig. C.1c).

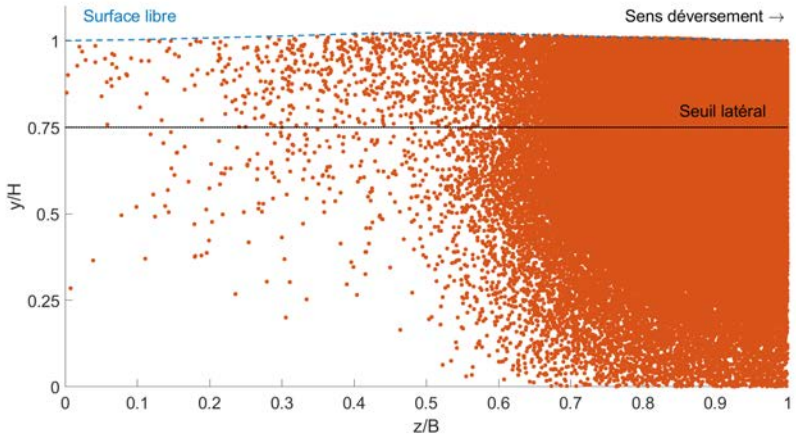
La probabilité de déversement des lignes de courant (Fig. C.1c) permet d'observer deux phénomènes : (i) cette probabilité augmente vers la surface libre et en direction du déversoir et (ii) la diffusion verticale est le principal mécanisme de dispersion des lignes de courants. Le premier phénomène semble logique parce que les lignes de courant proches de la surface libre et du côté du déversement ont plus de probabilité d'être déversées. En particulier, les lignes de courant au-dessus du seuil latéral, $y/H \geq 0.75$, et localisées à $z/B > 0.7$ présentent les probabilités de déversement les plus élevées.

Le deuxième phénomène, la dispersion des lignes de courant causée par la diffusion verticale, est observé numériquement (i) par des isovaleurs très verticales de la probabilité de déversement de 10% à 40% et (ii) la probabilité de déversement de 40% à 70% dans la région $y/H \leq 0.5$. Pour rappel, le modèle DPM permet de prendre en compte la dispersion liée à la turbulence sur le calcul des lignes de courant. D'une part, la probabilité de déversement inférieure à 40% montre qu'une ligne de courant proche du fond du canal a la même probabilité d'être déversée qu'une ligne de courant proche de la surface libre. Ceci est possible en grande partie par la diffusion verticale $\overline{v'v'}$ parce que la vitesse transversale simulée $\overrightarrow{wv} = \langle \overline{w}, \overline{v} \rangle$ est principalement horizontale ($\overline{v} \approx 0$) pour $z/B \approx 0.7$ au début du déversement latéral (Fig. 3.19). D'autre part, les bandes de probabilité entre 40% et 70% dans la région $y/H \leq 0.5$ sont dues à l'action combinée de la vitesse transversale simulée $\overrightarrow{wv}$ et la diffusion verticale $\overline{v'v'}$. La vitesse transversale simulée $\overrightarrow{wv}$ permet d'orienter les lignes de courant vers le déversoir latéral (Fig. 3.19). La diffusion verticale permet de mieux disperser l'ensemble des lignes de courant sur la vertical.

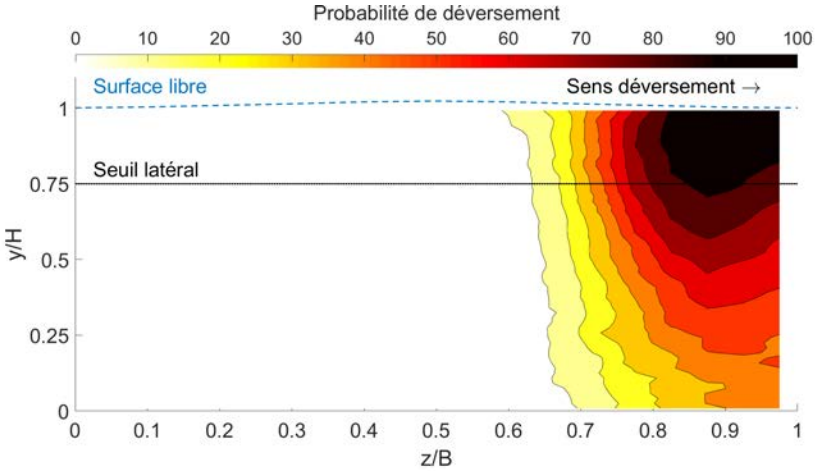
Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2020LYSEI083/these.pdf
© [A. Claro Barreto], [2020], INSA Lyon, tous droits réservés



(a) Les lignes de courant liées au déversement



(b) Lieu de passage à l'entrée du canal des lignes de courant liées au déversement.



(c) Probabilité de déversement

Figure 3.23 – La trajectoire des particules d'eau en 3D (Fig. 3.23a), le lieu de passage des particules d'eau à l'entrée du canal (Fig.3.23b) et la probabilité de déversement en 2D (Fig. C.1c). Modèle de turbulence RNG k-ϵ et résolution N°3.

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2020LYSEI083/these.pdf
© [A. Claro Barreto], [2020], INSA Lyon, tous droits réservés

3.5 Conclusions

La présente étude a permis d'évaluer les performances des modèles de turbulence RNG k-ϵ et SST k-ω comme outil permettant de reproduire l'écoulement turbulent à surface libre au sein d'un déversoir latéral en régime fluvial. Ces performances ont été évaluées notamment par comparaison avec les mesures expérimentales des champs de vitesses ($\overline{u}$, $\overline{v}$ et $\overline{w}$) et de l'énergie cinétique turbulente (k) obtenues par vélocimètrie acoustique Doppler dans un déversoir à échelle réduite et de géométrie simple. L'incertitude des résultats numériques a été calculée à l'aide d'une nouvelle approche basée sur le critère GCI qui permet d'élargir le champ d'application du critère GCI pour des résultats oscillatoires autour d'une moyenne.

La répartition des débits est bien reproduite, avec une erreur relative sur le débit déversé d'environ 1.3% du débit incident. Ceci est cohérent avec le fait que les deux modèles restituent assez correctement les profils verticaux de vitesse longitudinale, tout du moins avec des écarts comparables à d'autres études de la littérature (e.g. Azimi et al. 2018). L'observation plus détaillée des profils verticaux a permis de constater que (i) la vitesse longitudinale $\overline{u}$ est sur-estimée et (ii) l'énergie k et les vitesses vertical $\overline{v}$ et transversale $\overline{w}$ sont sous-estimées. Les deux principales raisons sont (i) la dissymétrie du profil de la vitesse longitudinale $\overline{u}$ au niveau de l'entrée du canal et (ii) la légère sous-estimation du débit déversé Q_{zo}. Le profil dissymétrique expérimental sur la vitesse longitudinale $\overline{u}$ au niveau de l'entrée du canal n'est pas reproduit par les deux modèles de turbulence parce qu'il est imposé un profil turbulent complètement développé pour la vitesse longitudinale $\overline{u}$ au niveau de cette section.

La comparaison est un peu moins flatteuse pour des données plus locales. En effet, les modèles RNG k-ϵ et SST k-ω sont capables de reproduire localement environ 10%, 10%, 90% et 75% (quantifiés par le pourcentage de chevauchement ψ_{IC}) des données expérimentales relatives à l'énergie cinétique turbulente k et aux vitesses longitudinale $\overline{u}$, verticale $\overline{v}$ et longitudinale $\overline{w}$, respectivement. L'erreur moyenne quadratique (RMSE) médiane des deux modèles de turbulence sur les vitesses locales $\overline{u}$, $\overline{v}$ et $\overline{w}$, et l'énergie locale k est d'environ $0.10U_0$, $0.07U_0$, $0.11U_0$ et $0.0042U_0^2$, respectivement ; avec U_0 la vitesse moyenne de la section à l'amont du déversoir latéral.

La performance des deux modèles de turbulence décroit vers la surface libre ($y/H \rightarrow 1$). La performance décroit également dans la direction du déversoir ($z/B \rightarrow 1$) pour les vitesses locales longitudinale $\overline{u}$ et horizontale $\overline{w}$.

Le modèle numérique 3D du déversoir latéral a permis d'établir une cartographie de la probabilité de déversement au niveau d'une section transversale localisée à l'entrée de l'ouvrage. Cette étude numérique a montré que la dispersion verticale liée à la turbulence ($\overline{v'v'}$) et les courants secondaires ($\overrightarrow{\overline{wv}}$) sont les deux principales grandeurs hydrauliques qui définissent la forme du contour de la probabilité de déversement.

Ainsi, l'étude du présent chapitre a permis d'évaluer la performance des modèles de turbulence RNG k-ϵ et SST k-ω et de discerner quelles variables modélisées peuvent être considérées avec confiance. Le modèle RNG k-ϵ apparaît plus performant, tant sur les critères d'évalution liés au RMSE qu'au pourcentage de chevauchement ψ_{IC} avec les résultats expérimentaux. En cohérence avec différents travaux de la littérature (e.g. Fach et al. 2009 ; Larsen et al. 2008 ; Lipeme Kouyi et al. 2011, 2005), le modèle RNG k-ϵ est ainsi choisi afin d'évaluer la capacité à reproduire la surface libre et la répartition du débit pour un déversoir d'orage réel en temps de pluie.

3.6 Perspectives

Le dispositif d'homogénéisation de l'écoulement et la présence du déversoir latéral, lors des essais expérimentaux, ont modifié le champ de vitesses jusqu'au niveau du déversement. Afin de mieux évaluer la performance des modèles de turbulence, la condition limite d'entrée du modèle numérique devra être modifiée (i) en imposant les champs de vitesses et l'énergie cinétique turbulente (ou les contraintes de Reynolds) expérimentaux ou (ii) en modélisant également le dispositif d'homogénéisation et le bac d'eau à l'amont du dispositif de tranquillisation.

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2020LYSEI083/these.pdf
© [A. Claro Barreto], [2020], INSA Lyon, tous droits réservés

Modélisation hydraulique du déversoir d'orage « Gambetta »

> We have no idea about the "real" nature of things … The function of modeling is to arrive at descriptions which are useful.
>
> *Frogs into Princes: Neuro Linguistic Programming - 1979*
> *"Richard Bandler and John Grinder"*

4.1 Introduction

Suite à la pré-étude hydraulique du déversoir d'orage (DO) « Gambetta » (Chapitre 2) et à l'étude expérimentale et numérique approfondie de l'hydrodynamique d'un déversoir latéral en régime fluvial (Chapitre 3), on s'intéresse maintenant au fonctionnement hydraulique du DO « Gambetta » en temps de pluie. Pour rappel, la pré-étude hydraulique du DO « Gambetta » (Chapitre 2) a permis de définir les conditions limites de l'ouvrage et la gamme de fonctionnement, et l'étude hydraulique approfondie au niveau du Chapitre 3 a permis de déterminer le modèle numérique (i.e. le modèle de turbulence) le mieux adapté pour reproduire l'écoulement au sein de ces ouvrages.

Comme indiqué dans les Chapitres 2 et 3, l'étude du flux de pollution (i.e. la masse de pollution annuelle) en temps de pluie au sein d'un DO *in situ* exige une connaissance détaillée du fonctionnement hydraulique de l'ouvrage. Le comportement hydraulique d'un DO *in situ* (i.e. sur le terrain) n'est pas identique à celui d'un déversoir standardisé (Fach et al. 2009) parce que l'écoulement est tridimensionnel, transitoire, à surface libre et/ou en charge (i.e. le déversoir à crête haute), turbulent, avec des discontinuités (e.g. le ressaut hydraulique), et chargé en polluants particulaires et dissous (Lipeme Kouyi et al. 2011 ; Mignot et al. 2012, 2014). Très récemment, certaines études ont proposé des ouvrages standardisés et adaptés à la métrologie pour un suivi hydraulique et de la qualité en temps de pluie (e.g. Maté Marín et al. 2018). Cependant, la quasi-totalité des DO *in situ* en France et du présent système de collecte ne sont pas standardisés et adaptés à la métrologie (e.g. Ahm et al. 2016 ; Bertrand-Krajewski et al. 2000 ; Hager 2010).

Comme déjà évoqué dans le Chapitre 1, la mécanique des fluides numérique (CFD, en anglais) est l'un des outils généralement utilisés en recherche et développement pour comprendre le fonctionnement hydraulique des DO complexes en temps de pluie (e.g. Isel et al. 2014b ; Lipeme Kouyi et al. 2011, 2005). La connaissance détaillée du comportement hydraulique 3D pour différentes conditions de fonctionnement permet de concevoir des modèles alternatifs simplifiés du fonctionnement hydraulique de l'ouvrage (e.g. Isel et al. 2014b ; Maté Marín et al. 2018). Ces modèles permettent, par exemple, de calculer le débit déversé en fonction du débit amont, de sortie ou d'une ou plusieurs hauteurs d'eau dans la chambre du DO (e.g. Fach et al. 2009 ; Isel et al. 2014b ; Lipeme Kouyi et al. 2011, 2005). L'utilisation de la mesure de la hauteur d'eau est préférée par les opérationnels, car elle est facile à installer et à entretenir (Isel et al.

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2020LYSEI083/these.pdf
© [A. Claro Barreto], [2020], INSA Lyon, tous droits réservés

2014b ; Lipeme Kouyi et al. 2011, 2005). Aussi, l'approche CFD permet de valider l'emplacement des capteurs *in situ* (e.g. Mignot et al. 2012) ou de vérifier l'instrumentation *in situ*.

Comme déjà mentionné dans le Chapitre 3, la capacité de l'approche CFD à reproduire la surface libre et la répartition du débit des déversoirs à échelle réduite en conditions contrôlées a été validée par différentes études (e.g. C. He et J. Marsalek 2009 ; C. He et al. 2006 ; Larsen et al. 2008 ; Lipeme Kouyi 2004 ; Lipeme Kouyi et al. 2003 ; Maté Marín et al. 2018 ; Van Daal-Rombouts et al. 2017 ; Vazquez et al. 2006).

Concernant les déversoirs d'orages (DO) *in situ* (i.e. sur le terrain), l'écoulement a été étudié numériquement par Fach et al. (2009), Larsen et al. (2008) et Lipeme Kouyi et al. (2011, 2005) afin de proposer des relations numériques entre le débit déversé et la hauteur d'eau dans la chambre du DO, communément nommées lois H-Q (pour Hauteur-Débit). Les travaux de Isel et al. (2014a) ont proposé une méthodologie pour construire ces lois de déversement H-Q avec la prise en compte des différentes sources d'incertitude (e.g. la précision du capteur de hauteur d'eau, la simulation 3D, etc.). Ahm et al. (2016) ont estimé le volume total déversé d'un déversoir latéral complexe à double crêtes de déversement avec une erreur moyenne (sur 5 événements) de 0.24%. Le volume numérique est calculé à l'aide d'une loi H-Q issue de la simulation numérique 3D de l'ouvrage en régime permanent (i.e. débit d'entrée constant). Cependant, toutes ces études sur les DO *in situ* (i.e. sur le terrain) n'ont pas comparé et validé les lois de déversement H-Q proposées par rapport aux données expérimentales *in situ*.

Jusqu'à présent, seuls les travaux de Van Daal-Rombouts et al. (2017) ont validé une loi H-Q pour un seuil frontal à l'aval une cloison siphoïde sur site réel par rapport aux données expérimentales. Cependant, il faut noter que cette loi H-Q ne correspond pas à une loi de déversement, car l'ouvrage est constitué d'une seule entrée et sortie ; le seuil frontal est situé à l'entrée d'un bassin de décantation des eaux pluviales à Eindhoven (Pays-Bas). En outre, le débit expérimental *in situ* est estimé par la variation temporelle de la hauteur d'eau à l'aval du seuil frontal parce que le système de conduites aval se comporte comme un bassin de rétention au début de l'événement pluvieux. Le débit *in situ* est supposé égal à la variation temporelle du volume stocké selon la hauteur d'eau mesurée ; le volume est calculé à l'aide des levés topographiques 2D de l'ouvrage. La principale source d'incertitude du calcul du débit correspond à l'hypothèse d'un plan d'eau horizontal dans l'ensemble du système des conduites aval pour chaque hauteur d'eau mesurée. Par ailleurs, les résultats numériques n'ont pas fait l'objet d'une étude de convergence et d'indépendance au maillage parce qu'un seul maillage a été utilisé. Ainsi, l'ouvrage simulé par Van Daal-Rombouts et al. (2017) ne peut pas être considéré comme un déversoir d'orage *in situ* et donc la loi de fonctionnement hydraulique H-Q obtenue ne correspond pas à une loi de déversement H-Q.

A notre connaissance, l'étude numérique présentée dans ce chapitre représente la première validation d'une loi de déversement H-Q d'un DO latéral *in situ* (i.e. sur le terrain) élaborée par simulation CFD par rapport aux données *in situ* en temps de pluie.

Le DO réel choisi, le DO « Gambetta », correspond au principal DO du système d'assainissement de la ville de Valence. Le comportement hydraulique de cet ouvrage en temps de pluie est étudié numériquement en 3D. Le modèle de turbulence RNG k-ϵ déjà testé et vérifié pour le cas du déversoir latéral à échelle réduite est maintenant validé vis-à-vis des données expérimentales *in situ* en temps de pluie : les débits déversés et la hauteur d'eau dans la chambre du DO. Ensuite, les résultats des simulations numériques 3D sont exploités pour concevoir des lois de déversement pour les deux conduites de décharge et le débit total déversé. Il s'agit également de mieux comprendre le fonctionnement globale de l'ouvrage, notamment : (i) d'identifier les secteurs de l'écoulement dans une section droite amont qui contribuent au déversement, (ii) d'estimer le temps de séjour dans l'ouvrage et (iii) de vérifier si l'emplacement actuel du turbidimètre installé *in situ* pourrait permettre de suivre la pollution déversée.

4.2 Matériel et méthodes

Toute étude numérique menée à l'aide de la CFD doit faire l'objet des 3 étapes principales (e.g. Lipeme Kouyi et al. 2011 ; MENTOR 2011 ; Versteeg et Malalasekera 2007) : (i) le pré-traitement, (ii) la résolution numérique et (iii) le post-traitement. Le pré-traitement consiste à reproduire la géométrie 2D/3D et à créer les différents maillages (i.e. la discrétisation spatiale du domaine de calcul). L'étape de réso-

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2020LYSEI083/these.pdf
© [A. Claro Barreto], [2020], INSA Lyon, tous droits réservés

lution numérique correspond à la mise en œuvre de tous les modèles mathématiques et les conditions limites utilisés pour simuler l'écoulement étudié (i.e. le modèle de turbulence, le modèle de capture de la surface libre, les schémas numériques de discrétisation des équations de Navier Stokes, etc.). Le post-traitement permet de visualiser les résultats obtenus (champ de vitesse, forme de la surface libre, etc.). Il est nécessaire de s'assurer de la convergence des résultats avant de les exploiter, ainsi que de mener une étude de sensibilité ou d'indépendance au maillage et d'estimer les incertitudes associées aux des résultats numériques. Ces trois étapes ont été appliquées au modèle numérique 3D du DO « Gambetta ».

Les résultats de simulation numérique du DO « Gambetta » sont vérifiés vis-à-vis des données expérimentales de débits déversés et de hauteur d'eau dans la chambre du DO en temps de pluie. Concernant la hauteur d'eau dans la chambre du DO, la durée de la campagne de mesure et la localisation du capteur sont présentées dans la Section 4.2.1.2.

L'incertitude sur les lois de fonctionnement hydraulique est calculée à l'aide de la méthode GUM (Section 4.2.5).

4.2.1 Le déversoir d'orage « Gambetta »

L'écoulement accède au DO par à une conduite ovoïde 1300x2300 mm (largeur x hauteur). Le débit conservé est régulé par une vanne guillotine à l'aval de la chambre du DO. En temps de pluie, le volume excédentaire est collecté par deux conduites circulaires de diamètre nominal 1200 mm (Fig. 4.1).

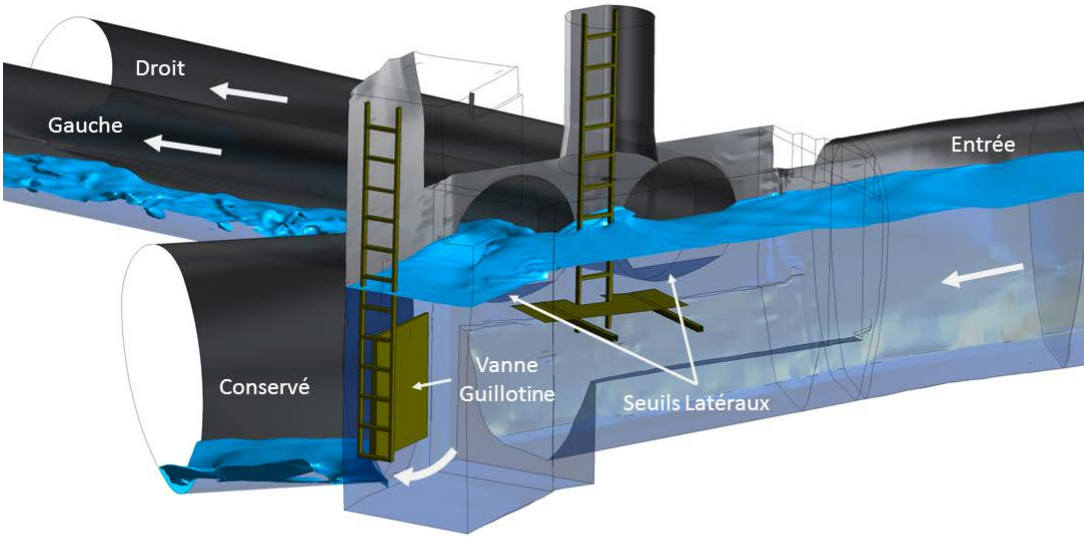


Figure 4.1 – Schéma 3D du fonctionnement hydraulique du déversoir d'orage « Gambetta » en temps de pluie, d'après Chapitre 2 - Section 2.2.2.3.

4.2.1.1 La géométrie

Un schéma 2D de toute la géométrie numérique du DO « Gambetta » est présenté dans la Fig. 4.2. La section en rouge correspond à la longueur « fictive » employée afin d'assurer un champ de vitesses établi au niveau de l'entrée « réelle » du système. La condition limite d'entrée du modèle numérique se situe à 7.305 m à l'amont de l'entrée « réelle » du DO. Cette longueur varie entre 6.532 à 5.810 fois le diamètre hydraulique D_h au niveau de l'entrée « réelle » pour les débits d'entrée D_E compris entre 2500 et 7000 m^3/h, respectivement. Cette longueur « fictive » est légèrement inférieure à la longueur proposée dans la littérature (5 à 6 fois la hauteur d'eau initiale Bonakdari et al. 2007b ; Lipeme Kouyi 2004 ; Lipeme Kouyi et al. 2005) afin d'avoir un domaine de calcul en adéquation aux ressources informatiques disponibles et réduire le temps de calcul nécessaire.

Les deux échelles et la plateforme (Fig. 4.1) font partie du domaine de calcul simulé afin de prendre en compte leur influence sur le fonctionnement hydraulique de l'ouvrage. En outre, ces dispositifs d'accès

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2020LYSEI083/these.pdf
© [A. Claro Barreto], [2020], INSA Lyon, tous droits réservés

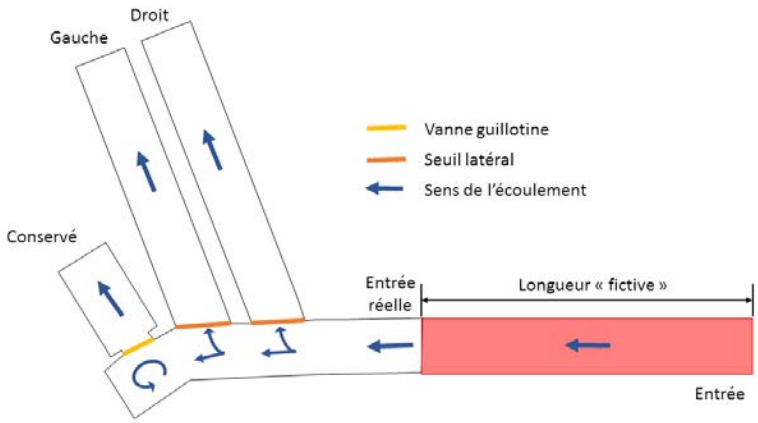


Figure 4.2 – Schéma 2D du DO « Gambetta »

peuvent jouer un rôle non négligeable dans le transport des polluants particulaires en temps de pluie. Par exemple, la plateforme installée au niveau des deux conduites de déversement pourrait empêcher le déversement des sédiments si ceux-ci se trouvent en dessous de la plateforme.

4.2.1.2 La hauteur d'eau *in situ* dans la chambre du DO « Gambetta »

Un capteur de hauteur d'eau a été installé provisoirement dans la chambre du DO « Gambetta » afin de vérifier si le modèle numérique 3D du DO est capable de reproduire cette hauteur en temps de pluie (Fig. 2.8 - Chapitre 2).

4.2.1.3 Le maillage

L'ouvrage est maillé uniquement à l'aide d'éléments hexaèdres sous le logiciel ANSYS ICEM CFD™ (version 16.2). En raison de la complexité de l'ouvrage, celui-ci est décomposé en 5 sous-volumes différents afin d'optimiser la qualité du maillage et de diminuer le nombre d'éléments (Fig. 4.3). Les différents blocs de maillage ainsi obtenus sont assemblés à l'aide de l'approche « non-conformal » pour former l'ensemble du DO « Gambetta ». L'approche « non-conformal » permet d'assembler des maillages qui ne possèdent pas le même nombre de mailles (ou nœuds) au niveau des interfaces de connectivité (ou assemblage).

Le volume du modèle numérique du DO « Gambetta » est $60.4\ m^3$. Ce volume a été maillé avec trois résolutions différentes (Tableau 4.1) afin d'évaluer l'incertitude liée au maillage. A titre d'exemple, le maillage au niveau de la chambre du DO pour ces trois résolutions est présenté dans la Fig. 4.4.

Résolution	N° 1	N° 2	N° 3
Nombre mailles	2 776 585	6 910 082	15 901 386
Taille moyenne de maille (en m - Eq. 3.66)	0.028	0.021	0.016
Facteur de raffinement (Eq. 3.67)	-	1.33	1.31

Tableau 4.1 – Caractéristiques des maillages élaborés pour le DO « Gambetta ». Toutes les mailles sont des hexaèdres.

4.2.2 Les modèles numériques

L'écoulement au sein (Section 4.2.1) du DO « Gambetta » est résolu à l'aide de la mécanique de fluides numérique (CFD, en anglais). La CFD permet d'obtenir une solution approchée des équations de Navier-

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2020LYSEI083/these.pdf
© [A. Claro Barreto], [2020], INSA Lyon, tous droits réservés

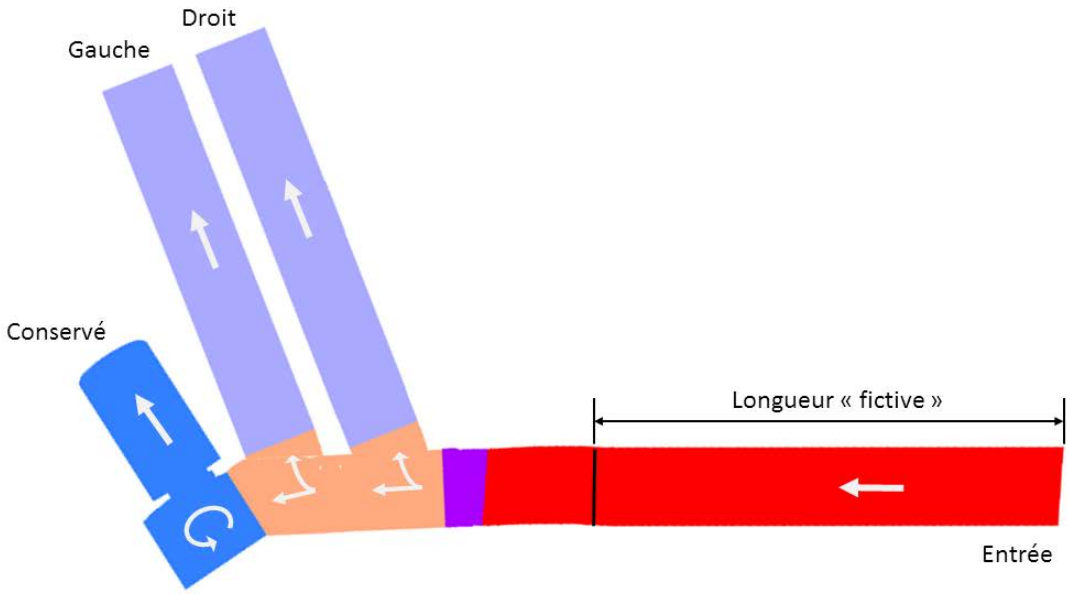


Figure 4.3 – Décomposition volumétrique de la géométrie du DO « Gambetta »

Stokes : conservation de la masse (Eq. 3.12) et de la quantité de mouvement (Eq. 3.14), voir Section 3.2.3.4. Les équations sont discrétisées dans l'espace selon la méthode des Volumes Finis (Section 3.2.3.3). Cette méthode Eulérienne permet de conserver la masse et la quantité de mouvement au sein de chacun des volumes de contrôle (i.e. les mailles).

Le schéma de discrétisation du couplage Vitesse-Pression et les schémas de discrétisation spatiale de la quantité de mouvement, des gradients, de la pression, de l'énergie cinétique turbulente k, du taux de dissipation de l'énergie cinétique turbulente ϵ, et de la fraction volumique α_{eau} sont présentés dans la Tableau 4.2. L'ensemble des variables est résolu avec un facteur de 'sous-relaxation égale à 0.05.

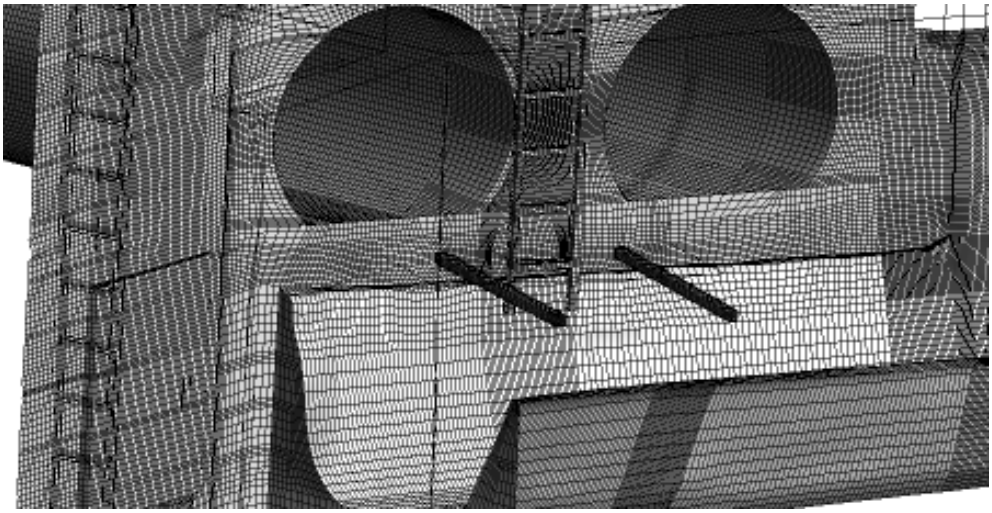
	Méthode / Schéma	Référence
Couplage Vitesse-Pression	SIMPLE	Patankar et Spalding 1983
Discrétisation spatiale		
Gradient	Moindres carrés de la maille	ANSYS 2015a, Section 20.3.3
Pression	Force de volume pondérée	
Quantité de mouvement	Décentré avant 2ème ordre	
Fraction volumique - α_{eau}	HRIC modifié	Park et al. 2009
L'énergie cinétique turbulente - k	Décentré avant 2ème ordre	
Le taux de dissipation de k - ϵ		

Tableau 4.2 – Méthodes de solution et les schémas de discrétisation spatiale pour les différentes grandeurs macroscopiques.

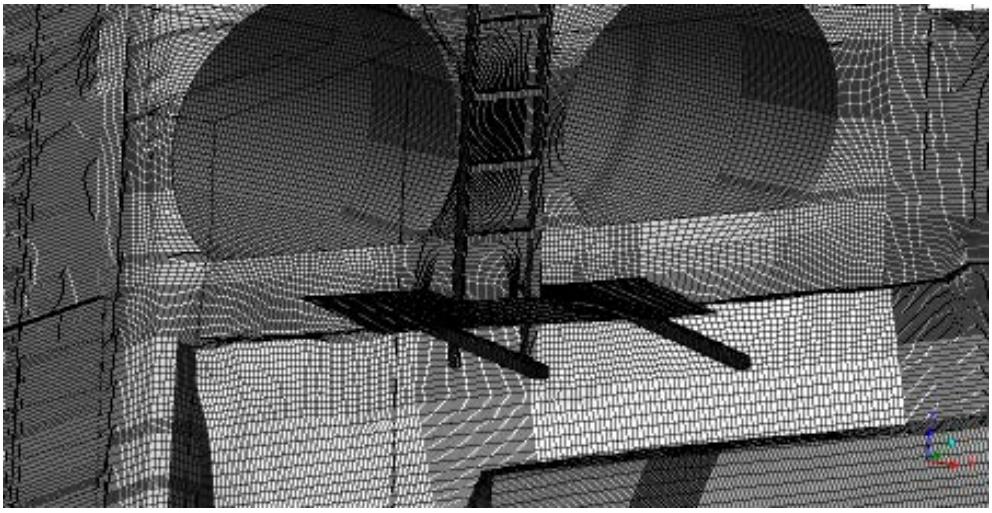
4.2.2.1 Le modèle de turbulence

La turbulence de l'écoulement est simulée à l'aide du modèle de turbulence RNG $k-\epsilon$ proposé par Yakhot et al. (1992). Ce modèle de turbulence filtre les petites échelles des fluctuations de vitesse de l'écoulement de manière analogue à la décomposition de Reynolds. Le modèle RNG $k-\epsilon$ est particulièrement utile pour des écoulements avec des zones de circulation, rapidement cisaillés et avec une large gamme

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2020LYSEI083/these.pdf
© [A. Claro Barreto], [2020], INSA Lyon, tous droits réservés



(a) Résolution N° 1



(b) Résolution N° 2

(c) Résolution N° 3

Figure 4.4 – Les résolutions N°1 (4.4a), N°2 (4.4b) et N°3 (4.4c) du maillage hexaèdre « non-conformal » au niveau de la chambre du DO « Gambetta ».

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2020LYSEI083/these.pdf
© [A. Claro Barreto], [2020], INSA Lyon, tous droits réservés

de Reynolds. Ce modèle permet de calculer l'énergie cinétique turbulent k (Eq. 3.18) et son taux de dissipation ϵ (Eq. 3.19) dans le domaine de calcul à l'aide de l'équation de transport (Eq. 3.15). Une présentation plus détaille du modèle est présenté dans la Section 3.2.3.5 - Chapitre 3. La capacité du modèle RNG $k-\epsilon$ à reproduire les champs de vitesses et de contraintes de Reynolds a été étudiée pour un déversoir latéral rectangulaire en régime fluvial (Chapitre 3 - Section 3.4). Les champs de vitesses et de contraintes de Reynolds sont obtenus avec une erreur moyenne quadratique (RMSE, anglais) d'environ $0.071\ m/s$ et $4.09\times10^{-3}\ m^2/s^2$, respectivement, par rapport aux données expérimentales. En outre, c'est l'un de modèles de turbulence les plus utilisés pour simuler le comportement hydraulique des déversoirs d'orage *in situ* (e.g. Dufresne et al. 2010 ; Isel et al. 2014a,b ; Lipeme Kouyi et al. 2011, 2005).

4.2.2.2 La surface libre

La surface libre (i.e. interphase eau-air) est simulée à l'aide du modèle « Volume-Of-Fluid » (VOF) proposé par Hirt et Nichols (1981), voir Section 3.2.3.6. La fraction volumique de l'eau α_{eau} est calculée à l'aide de l'équation de transport (Eq. 3.46). La surface libre est définie à $\alpha_{\text{eau}} = 0.5$ (Lipeme Kouyi et al. 2003).

4.2.2.3 Les conditions limites

Les conditions limites utilisées dans le modèle numérique sont indiquées dans le Tableau 4.3. Les conditions limites de sortie du modèle (i.e. débit « Conservé », débit déversé « Gauche » et débit déversé « Droit ») sont définies à l'aide d'une pression de sortie (définie égale à la pression atmosphérique), car on ne connaît pas à l'avance le débit volumique qui traverse chacune des sorties. La condition de sortie « Conservé » ne subisse pas une influence à l'aval parce que la pente *in situ* de cette conduite est d'environ 1,5%. Concernant les conduites de décharge « Gauche » et « Droit », les conditions limites de sortie du type « pression » sont validées à l'aide d'une étude 1D des courbes de remous qui se développent au sein de ces conduites de décharge en temps de pluie (voir, Section 2.3.3). Cette étude a montré que l'écoulement est toujours torrentiel et sans influence aval dans chacune des conduites de déversement. Le profil de pression au niveau de chaque sortie est calculé en extrapolant la pression de la maille voisine à l'amont de la condition limite.

A l'entrée du modèle, la hauteur d'eau est définie en fonction du débit d'entrée D_{E} qui est calculé à l'aide de la formule de Manning-Strickler. Le coefficient de rugosité de Stickler de cette formule est calibrée à l'aide d'un modèle 3D de la conduite amont du DO « Gametta » qui a permis de prendre en compte la rugosité variable du système (voir Annexe D). Une fois la solution convergée, la hauteur d'eau à l'entrée est redéfinie en fonction de la hauteur d'eau au niveau de l'entrée « réelle » (Fig. 4.2) afin d'éviter la création d'un ressaut hydraulique proche de la condition d'entrée. Ce ressaut hydraulique est dû à la vanne guillotine située à l'aval de la chambre du DO (Fig. 4.2).

L'écoulement de proche paroi est simulé à l'aide de la loi de parois « Standard » proposée par B. Launder et Spalding (1974), voir le Chapite 3 - Section 3.2.3.7 pour plus de détails. Le champ de vitesse est défini par l'Eqs. 3.51 ; l'énergie cinétique turbulente k et son taux de dissipation ϵ sont définis par les Eq. 3.54-3.55 et l'Eq. 3.56, respectivement.

4.2.2.4 Les conditions initiales

Bien que les calculs soient réalisés en régime permanent, la définition des conditions initiales est essentielle. Il s'agit dans ce cas des conditions de démarrage du calcul. Cette condition de démarrage joue un rôle important sur la rapidité de convergence des calculs.

L'ouvrage est initialement rempli d'eau selon la hauteur d'eau fixée dans la condition d'entrée. Le profil de pression dans l'ensemble de l'ouvrage est égal aux profils hydrostatiques en fonction du fluide (i.e. l'air et l'eau). Le champ de vitesse est initialisé égal à zero dans l'ensemble du modèle et les champs de turbulence des paramètres k et ϵ sont égaux aux constantes définies par les Eq. 3.60 et Eq. 3.62, respectivement.

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2020LYSEI083/these.pdf
© [A. Claro Barreto], [2020], INSA Lyon, tous droits réservés

		Entrée	Sortie		
		Virtuelle	Déversement Gauche	Déversement Droit	Conservé
Type		Débit massique	Pression de sortie	Pression de sortie	Pression de sortie
Intensité turbulente (%)		5	5	5	5
Diamètre hydraulique (m)		$R_h(h_{\text{EV}})$	1.200	1.200	1.6124
Hauteur d'eau (m)		$h_{\text{EV}} \rightarrow h_{Fr<1}$	-	-	-
Méthode	d'interpolation de la densité	Maille voisine	-	-	-
	de spécification de la pression	-	Maille voisine		

Tableau 4.3 – Conditions limites du modèle numérique 3D du déversoir latéral. h_{EV} est la hauteur d'eau normale de la section d'entrée virtuelle ($K_s = 70.99\ m^{1/3}/s$ - Annexe D). $h_{Fr<1}$ est la hauteur d'eau de l'écoulement en régime fluvial ($Fr < 1$) à l'aval de la condition d'entrée. $R_h(h_{\text{EV}})$ est le rayon hydraulique du canal ovoïde d'entrée (Eq. 2.6 - Chapitre 2)

4.2.3 La campagne de simulation

L'ouvrage est initialement simulé pour le débit minimum jusqu'à obtenir un résultat convergé, selon les critères du Tableau 4.5. Ensuite, un débit plus élevé est simulé en partant de la solution convergée précédente jusqu'à attendre à nouveau la convergence. Cette procédure est répétée jusqu'à atteindre le débit maximum. Les débits minimum et maximum simulées sont présentés dans le Tableau 4.4. Les débit d'entrée (en m^3/h) simulées sont indiqués dans le Tableau 4.4.

	DO « Gambetta »
Minimum	2 000
	2 500
	3 000
	3 500
	3 750
	4 000
	4 250
	4 500
	4 750
	5 000
	5 500
	6 000
	6 500
Maximum	7 000

Tableau 4.4 – Le débit d'entrée $D_{\text{E}}\left(m^3/h\right)$ minimum et maximum du déversoir d'orage « Gambetta ».

L'ensemble des débits d'entrée, définis *a priori*, est simulé avec le maillage intermédiaire (i.e. la résolution N°2). Ensuite, les champs des vitesses, des contraintes de Reynolds, de la pression et de la fraction volumique sont interpolés dans les maillages grossier et fin (i.e. les résolutions N°1 et N°3, respectivement) afin de diminuer le temps de calcul nécessaire à l'obtention d'une solution convergée. Cette méthodologie d'interpolation est réalisée pour certains débits d'entrée afin (i) de vérifier l'indépendant au maillage et (i) de quantifier l'incertitude liée au maillage et à la solution approchée.

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2020LYSEI083/these.pdf
© [A. Claro Barreto], [2020], INSA Lyon, tous droits réservés

4.2.4 La vérification et validation

La convergence de chacun des résultats numériques, pour chaque maillage et chaque débit d'entrée D_{E}, est évaluée selon les critères de la Section 4.2.4.1. Ensuite, l'incertitude liée au maillage et à la solution approchée (i.e. le calcul itératif) est calculée comme indiqué dans la Section 4.2.4.2. Enfin, la validité des résultats numériques est évaluée selon les critères présentés dans la Section 4.2.4.3.

4.2.4.1 Critères de convergence

Chaque simulation est jugée convergée selon les seuils du bilan de masse présentés dans le Tableau 4.5. La conservation globale de la masse (i.e. bilan de masse) E_{D} correspond à la somme algébrique des débits massiques de la phase liquide (i.e. $\alpha_{\mathrm{eau}} \geq 0.5$) de l'entrée et de toutes les sorties. La valeur moyenne $\overline{E_{\mathrm{D}}}$, l'écart-type σ_x et le coefficient de variation CV $= \sigma_x/\overline{x}$ sont calculés à l'aide des $N = 2000$ dernières itérations avec un intervalle d'échantillonnage $\Delta N = 100$.

	$\overline{E_{\mathrm{D}}}/D_{\mathrm{E}}$	CV	σ_x/D_{E}
Globale	5%	0.1	2.5%
Sortie	-	0.1	2.5%

Tableau 4.5 – Les critères de convergence sur le bilan de masse de la simulation numérique 3D.

4.2.4.2 L'incertitude modifiée liée au maillage

L'incertitude liée au maillage et à la solution approchée est évaluée selon l'approche GCI modifiée et déjà présentée dans le Chapitre 3 - Section 3.2.3.11. L'incertitude due au maillage (i.e. la discrétisation spatiale) σ_{maille} est évaluée à l'aide du critère GCI (ASME 2008). L'incertitude due à la solution approchée σ_{iter} est estimée en prenant en compte la distribution de probabilité des résultats numériques.

Le résultat final ϕ pour chaque simulation (i.e. le débit d'entrée D_{E}) est calculé comme suit :

$$\phi = \begin{cases} \phi_{\mathrm{ext}}^{21} & \text{3 maillages utilisés} \\ \phi_2 & \text{sinon} \end{cases}, \tag{4.1}$$

avec ϕ_{ext}^{21} la solution extrapolée du maillage fin $\left(\phi_1\right)$, et ϕ_2 la solution obtenue avec le maillage intermédiaire.

L'incertitude modifiée liée au maillage σ_{GCI} est calculée comme suit :

$$\sigma_{\mathrm{GCI}} \equiv u\left(\phi\right) = \begin{cases} \sigma_{\phi_{\mathrm{ext}}^{21}} & \text{3 maillages utilisés} \\ \max\left[CV_2, \overline{CV}_{GCI}\right] & \text{sinon} \end{cases}, \tag{4.2}$$

avec $\sigma_{\phi_{\mathrm{ext}}^{21}}$ l'écart-type de la solution extrapolée ϕ_{ext}^{21}, CV_2 l'incertitude relative de la solution obtenue avec le maillage intermédiaire $\left(\phi_2\right)$, et $\overline{CV}_{GCI}$ l'incertitude relative moyenne de l'ensemble des solutions extrapolées ϕ_{ext}^{21}. Si $CV_2 > \overline{CV}_{GCI}$ signifie que l'incertitude liée à la solution itérative σ_{iter} est supérieure à l'incertitude modifiée σ_{GCI}.

4.2.4.3 Les critères d'évaluation de la performance numérique

Les débits déversés et la hauteur d'eau dans la chambre du DO sont les variables utilisées pour évaluer la performance du modèle numérique. Cette performance est définie à l'aide d'une méthode de résidus : calcul de la différence entre les données expérimentales et numériques (Bennett et al. 2013). Le critère utilisé pour quantifier la performance est l'erreur moyenne quadratique (RMSE, en anglais) définie comme

$$\mathrm{RMSE} = \sqrt{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\left(y_i^{\mathrm{num}} - y_i^{\mathrm{exp}}\right)^2}, \tag{4.3}$$

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2020LYSEI083/these.pdf
© [A. Claro Barreto], [2020], INSA Lyon, tous droits réservés

avec n le nombre des débits d'entrée D_E simulés, y_i^{num} et y_i^{exp} les résultats numériques et expérimentaux, respectivement.

4.2.5 L'incertitude élargie selon la méthode GUM

Comme déjà présenté dans la Section 4.2.5 du Chapitre 2, l'incertitude élargie des lois de fonctionnement hydraulique du déversoir d'orage *in situ* sont calculées selon la méthode GUM (ISO/IEC Guide 98-1 2009).

4.2.5.1 Loi de déversement D_{DO} vs. D_E

Le débit déversé D_{DO} est relié au débit d'entrée D_E selon :

$$D_{DO} = f(a_1, a_2, a_3, D_E) = a_1(D_E - a_2)^{a_3} \tag{4.4}$$

La forme de l'Eq. 4.4 permet de préserver la forme de base des équations de débit des déversoirs latéraux (e.g. Hager 2010, Chapitre 18). La Fig. 4.5 illustre l'évolution du débit déversé relatif (par rapport au débit d'entrée) en fonction du débit d'entrée.

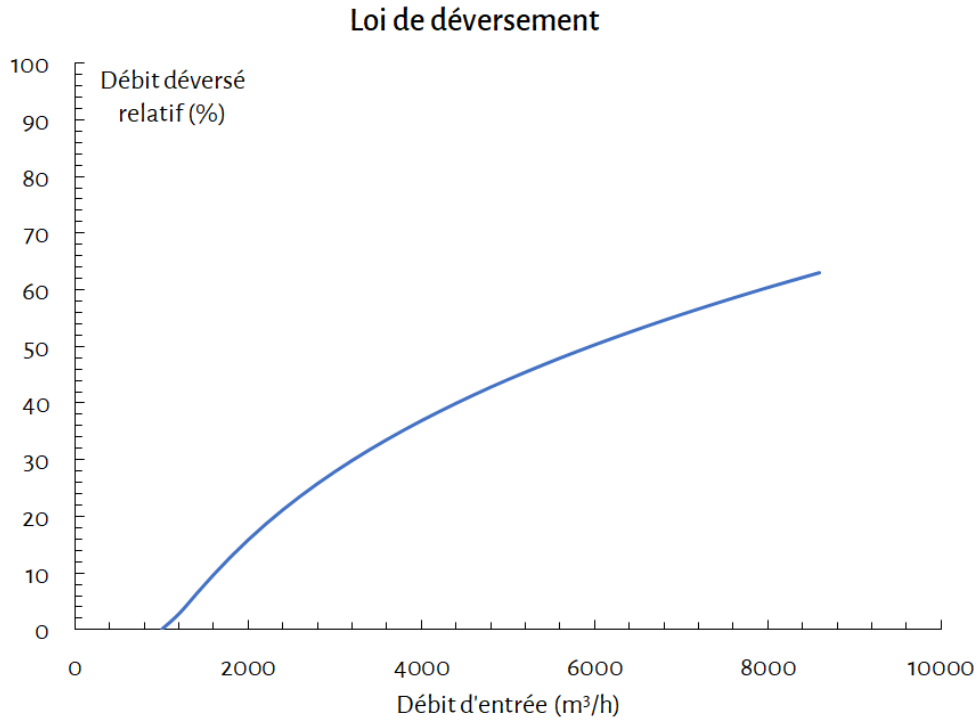


Figure 4.5 – Exemple d'une loi de déversement d'un déversoir d'orage en temps de pluie.

Le coefficient a_1 peut être traduit comme le coefficient de débit ; le coefficient a_2 est utilisé pour indiquer un déversement au-delà d'un certain débit d'entrée (e.g. $a_2 = 1000$ dans la Fig. 4.5) ; et le coefficient a_3 permet d'ajuster l'allure et la courbure de l'Eq. 4.4 devant traduire l'évolution du débit déversé D_{DO} en fonction du débit amont D_E. Ce type de relation permet de caractériser le fonctionnement hydraulique de l'ouvrage étudié.

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2020LYSEI083/these.pdf
© [A. Claro Barreto], [2020], INSA Lyon, tous droits réservés

Les dérivées partielles de l'Eq. 4.4 sont

$$\frac{\partial f}{\partial a_1} = (D_\mathrm{E} - a_2)^{a_3} \tag{4.5}$$

$$\frac{\partial f}{\partial a_2} = -a_1 a_3 (D_\mathrm{E} - a_2)^{a_3 - 1} \tag{4.6}$$

$$\frac{\partial f}{\partial a_3} = a_1 (D_\mathrm{E} - a_2)^{a_3} \ln(D_\mathrm{E} - a_2) \tag{4.7}$$

$$\frac{\partial f}{\partial D_\mathrm{E}} = a_1 a_3 (D_\mathrm{E} - a_2)^{a_3 - 1} \tag{4.8}$$

L'écart-type du coefficient a_i est calculé par l'Eq. 2.16. La covariance des paramètres de la fonction f est définie par l'Eq. 2.17.

L'écart-type du débit d'entrée $u_c(D_\mathrm{E})$ est défini selon la méthode de calcul suivante : si D_E est estimé d'après la hauteur d'eau de la conduite à l'amont du DO « Gambetta » H_Amont, l'écart-type correspond à l'Eq. 2.18 pour la formule GMS (Annexe D - Section D.2.4.1) ; sinon, $u_c(D_\mathrm{E}) = 0$, si D_E correspond au débit numérique injecté dans la condition d'entrée.

4.2.6 Méthode de vérification d'emplacement d'un capteur de qualité

Le comportement de la pollution particulaire très fine et la pollution dissoute peut être simulé par les lignes de courant, car cette pollution est censée suivre l'écoulement comme un scalaire passif. La pollution particulaire très fine vue par la sonde de turbidité *in situ* correspondrait aux lignes de courant qui traversent un cylindre d'observation vertical (diamètre de la sonde *in situ* - 60 mm) localisé en dessous de la sonde de turbidité *in situ* (voir Fig. 4.6).

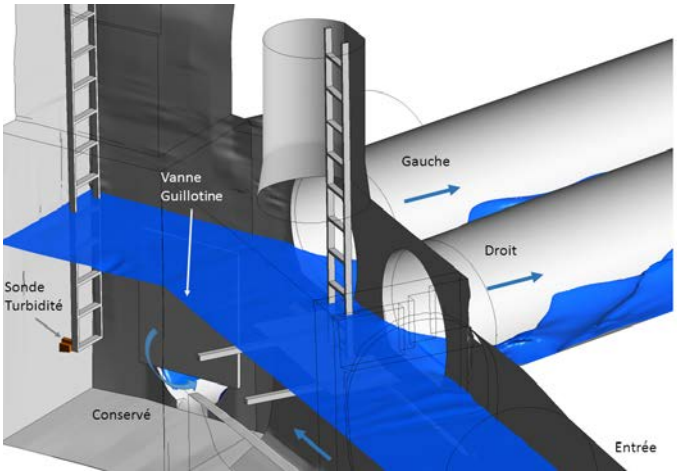


Figure 4.6 – Schéma 3D de la localisation de la sonde de turbidité à l'aval du DO « Gambetta ».

4.3 La vérification des résultats numériques

La vérification ici signifie l'examen des résultats numériques vis-à-vis des critères de convergence, notamment la conservation de la masse. Les incertitudes sur les résultats numériques sont également évaluées pour juger de la robustesse de ces derniers, en particulier vis-à-vis du maillage et du processus itératif utilisé dans l'approche CFD. La validation correspond à la confrontation des résultats numériques aux données expérimentales et sera présentée à la Section 4.4.

Les résultats obtenus avec le modèle numérique du DO « Gambetta » sont (i) vérifiés vis-à-vis de la conservation de la masse et (ii) validés vis-à-vis des mesures in-situ en temps de pluie du débit déversé

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2020LYSEI083/these.pdf
© [A. Claro Barreto], [2020], INSA Lyon, tous droits réservés

et de la hauteur d'eau dans la chambre du DO. La conservation de la masse est vérifiée selon les critères de convergence du Tableau 4.5. La méthode GCI (Chapitre 3 - Section 3.2.3.11) est appliquée aux résultats numériques vérifiés afin de prendre en compte l'incertitude des données numériques lors de la phase de validation.

4.3.1 Vérification de la conservation de la masse

La conservation de la masse du modèle numérique pour les différents débits d'entrée (ou amont) simulés et les trois maillages utilisés est présentée dans la Fig. 4.7. La barre d'erreur correspond à l'intervalle de confiance (IC) à 95% et le symbole représente la valeur moyenne.

L'erreur relative moyenne $\overline{E_{\mathrm{CM}}/D_{\mathrm{E}}}$ de toutes les simulations du maillage grossier « N°1 » est dans la bande de convergence (i.e. $E_{\mathrm{CFD}}/D_{\mathrm{E}} = \pm 5\%$ - Tableau 4.5). L'erreur $\overline{E_{\mathrm{CM}}/D_{\mathrm{E}}}$ des mailles intermédiaire « N°2 » et fine « N°3 » dépasse légèrement la bande de convergence pour quelques débits amont simulés. La plupart des erreurs relatives moyennes $\overline{E_{\mathrm{CM}}/D_{\mathrm{E}}}$ des trois résolutions respectent le critère de convergence $E_{\mathrm{CFD}}/D_{\mathrm{E}}$ mais leur IC à 95% dépasse le seuil de convergence $\sigma_{\mathrm{CFD}}/D_{\mathrm{E}} = 2,5\%$ (Tableau 4.5).

Les simulations sont donc jugées convergées vis-à-vis de la conservation de la masse, même si certaines valeurs maximales de l'erreur relative absolue $|E_{\mathrm{CM}}/D_{\mathrm{E}}|$ (d'après l'IC à 95%) dépassent le seuil de convergence $|E_{\mathrm{CFD}}/D_{\mathrm{E}}| = 5\%$ pour l'ensemble de simulations. Une analyse détaillée sur l'étendue des IC à 95% de l'erreur $E_{\mathrm{CM}}/D_{\mathrm{E}}$ est présentée dans la section suivante.

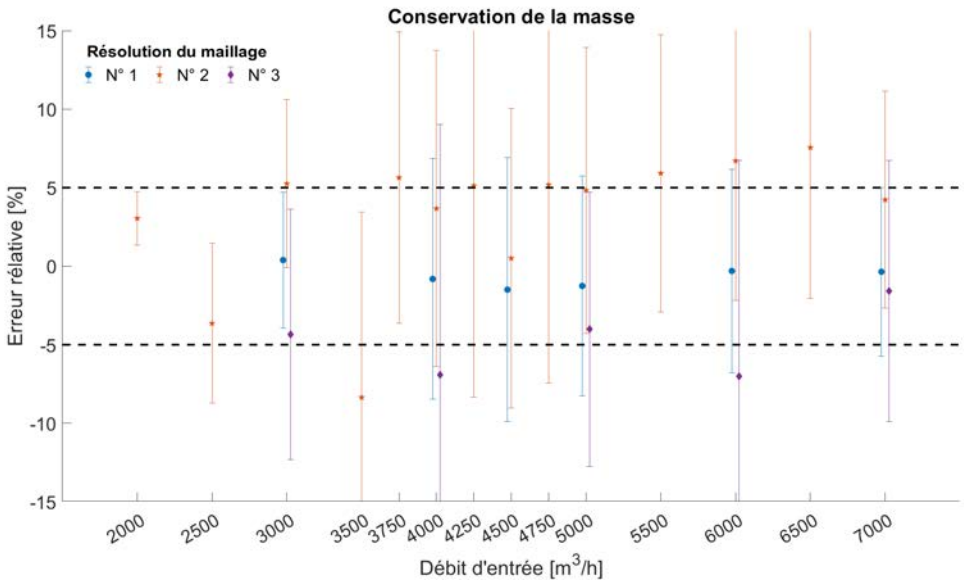


Figure 4.7 – L'erreur relative de la conservation globale de la masse des trois résolutions du modèle hydraulique du DO « Gambetta ».

4.3.1.1 L'influence des conditions limites de sortie

Afin de mieux cerner la cause des oscillations importantes sur la conservation de la masse pour l'ensemble de simulations $\left(|E_{\mathrm{CM}}/D_{\mathrm{E}}|^{95\%} > 5\%\right)$, la contribution de chaque condition limite à l'écart-type relatif de la conservation de la masse ($\sigma_{\mathrm{CM}}/D_{\mathrm{E}}$) est calculée en fonction du débit d'entrée D_{E} et de la résolution utilisée (voir Fig. 4.8). L'écart-type relatif $\sigma_{\mathrm{CM}}/D_{\mathrm{E}}$ permet de quantifier la dispersion de l'erreur relative $E_{\mathrm{CM}}/D_{\mathrm{E}}$. Cet écart-type est fonction des débits d'entrée et sortie (Eq. 4.10), car l'erreur relative de la conservation de la masse $E_{\mathrm{CM}}/D_{\mathrm{E}}$ est définie comme étant la différence entre le débit d'entrée et la somme des débits de sortie du système (voir Eq. 4.9).

$$E_{\mathrm{CM}} = D_{\mathrm{E}} - D_{\mathrm{G}} - D_{\mathrm{G}} - D_{\mathrm{C}}, \tag{4.9}$$

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2020LYSEI083/these.pdf
© [A. Claro Barreto], [2020], INSA Lyon, tous droits réservés

avec D_C le débit « Conservé » ; et D_G et D_D les débits déversés des conduites « Gauche » et « Droit », respectivement.

$$\sigma_{CM}^2 = \begin{bmatrix} \sigma_E^2 & -2r(D_E, D_C)\sigma_E\sigma_C & -2r(D_E, D_D)\sigma_E\sigma_D & -2r(D_E, D_G)\sigma_E\sigma_G \\ & \sigma_C^2 & -2r(D_C, D_D)\sigma_C\sigma_D & -2r(D_C, D_G)\sigma_C\sigma_G \\ & & \sigma_D^2 & -2r(D_D, D_G)\sigma_D\sigma_G \\ & & & \sigma_G^2 \end{bmatrix} \tag{4.10}$$

avec σ_i l'écart-type du débit D_i ; $r(D_i, D_j)$ le coefficient de corrélation linéaire entre le débit D_i et D_j.

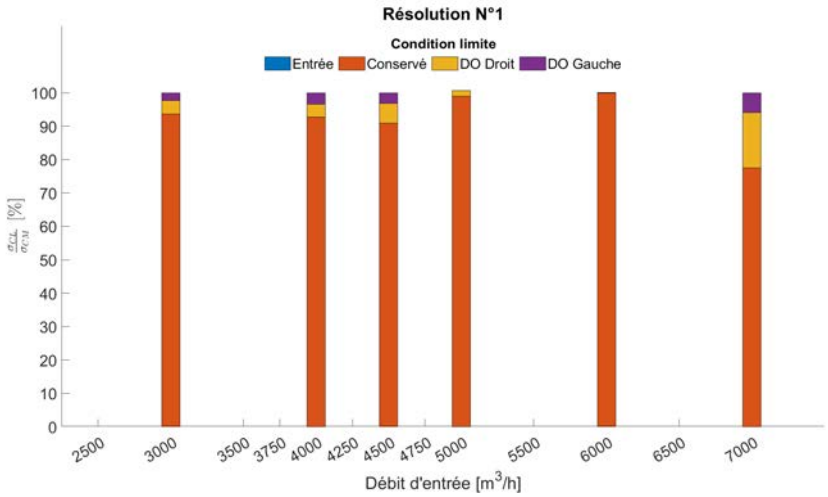
L'écart-type relatif de la conservation de la masse (σ_{CM}/D_E) pour l'ensemble des résultats varie entre 0,87% et 8,14%, tous maillages confondus. La Fig. 4.8 montre la contribution de chaque condition limite sur la variance de la conservation de la masse σ_{CM}^2. La contribution est définie comme le rapport entre la variance de la condition limite σ_{CL}^2 (Eq. 4.11) et la variance de la conservation de la masse σ_{CM}^2.

$$\sigma_{CL}^2 = \sigma_i^2 - \sum_j \left(r(D_i, D_j)\sigma_i\sigma_j \right), \text{avec } i \neq j \tag{4.11}$$

La condition limite de sortie « Conservé » est la principale source de contribution de la variance de la conservation de la masse pour les trois maillages utilisés (voir Fig. 4.8). La sortie « Conservé » correspond à la conduite qui collecte le débit envoyé à la station d'épuration des eaux usées. En effet, cette condition limite représente entre 70% à 100% de l'écart-type relatif σ_{CM}/D_E pour l'ensemble des maillages et débits d'entrée D_E (Fig. 4.9). La contribution de la condition d'entrée est très proche de zéro car l'écart-type pour l'ensemble des simulations $\sigma_E \approx 0$. Les conditions de sortie « Gauche » et « Droit » oscillent entre 0% à 30% en fonction du débit d'entrée D_E et du maillage.

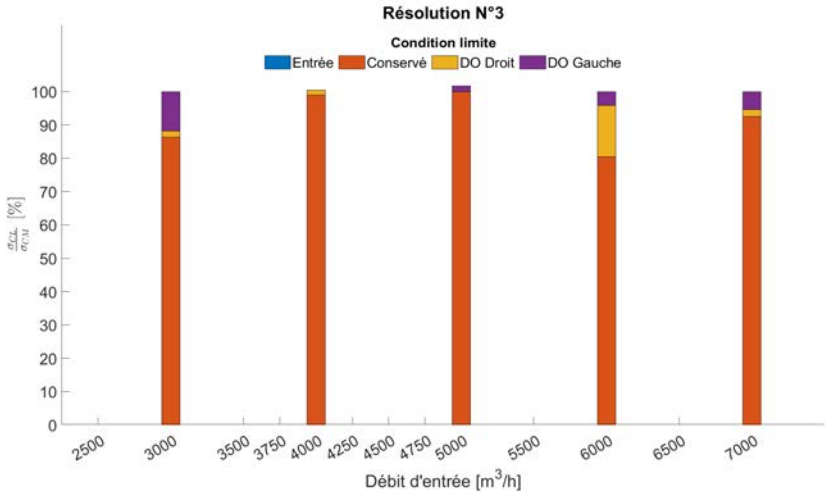
La forte contribution de la condition limite « Conservé » sur l'écart-relatif de la conservation de masse σ_{CM}/D_E est causée par la longueur de la conduite utilisée pour l'ensemble de simulations. Cette longueur est d'environ 2 m après la vanne à l'amont, celle-ci correspond à seulement 0,87 fois la hauteur de la conduite (égale à 2,300 m). Cette affirmation est corroborée par la forme du profil d'eau (de la dernière itération) au niveau de la sortie « Conservé » pour l'ensemble de résolutions (N°1, N°2 et N°3) et les débits d'entrée D_E égaux à 3000, 5000 et 7000 m^3/h (Fig. 4.10). Le profil d'eau est distinct entre les trois résolutions pour un même débit d'entrée (e.g. les Fig. 4.10b, Fig. 4.10e et Fig. 4.10h). Aussi, la forme du profil de profondeur hydraulique indique que l'écoulement fluctue fortement. Ce qui ne correspond pas à l'hypothèse d'écoulement permanent utilisée pour toutes les simulations.

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2020LYSEI083/these.pdf
© [A. Claro Barreto], [2020], INSA Lyon, tous droits réservés



(a) Résolution N° 1

(b) Résolution N° 2



(c) Résolution N° 3

Figure 4.8 – La contribution de chaque condition limite à l'écart-type de l'erreur sur la conservation de la masse (σ_{CM}) en fonction du débit d'entrée dans le DO « Gambetta » et du maillage utilisé.

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2020LYSEI083/these.pdf
© [A. Claro Barreto], [2020], INSA Lyon, tous droits réservés

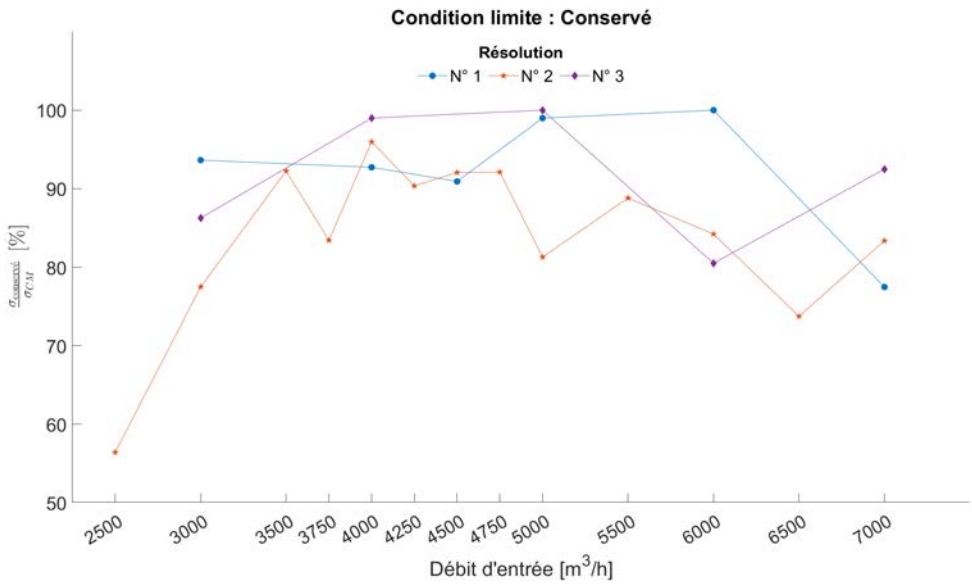


Figure 4.9 – La contribution de la condition de sortie « Conservé » sur l'écart-type de l'erreur sur la conservation de la masse (σ_{CM}) en fonction du débit d'entrée dans le DO « Gambetta ».

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2020LYSEI083/these.pdf
© [A. Claro Barreto], [2020], INSA Lyon, tous droits réservés

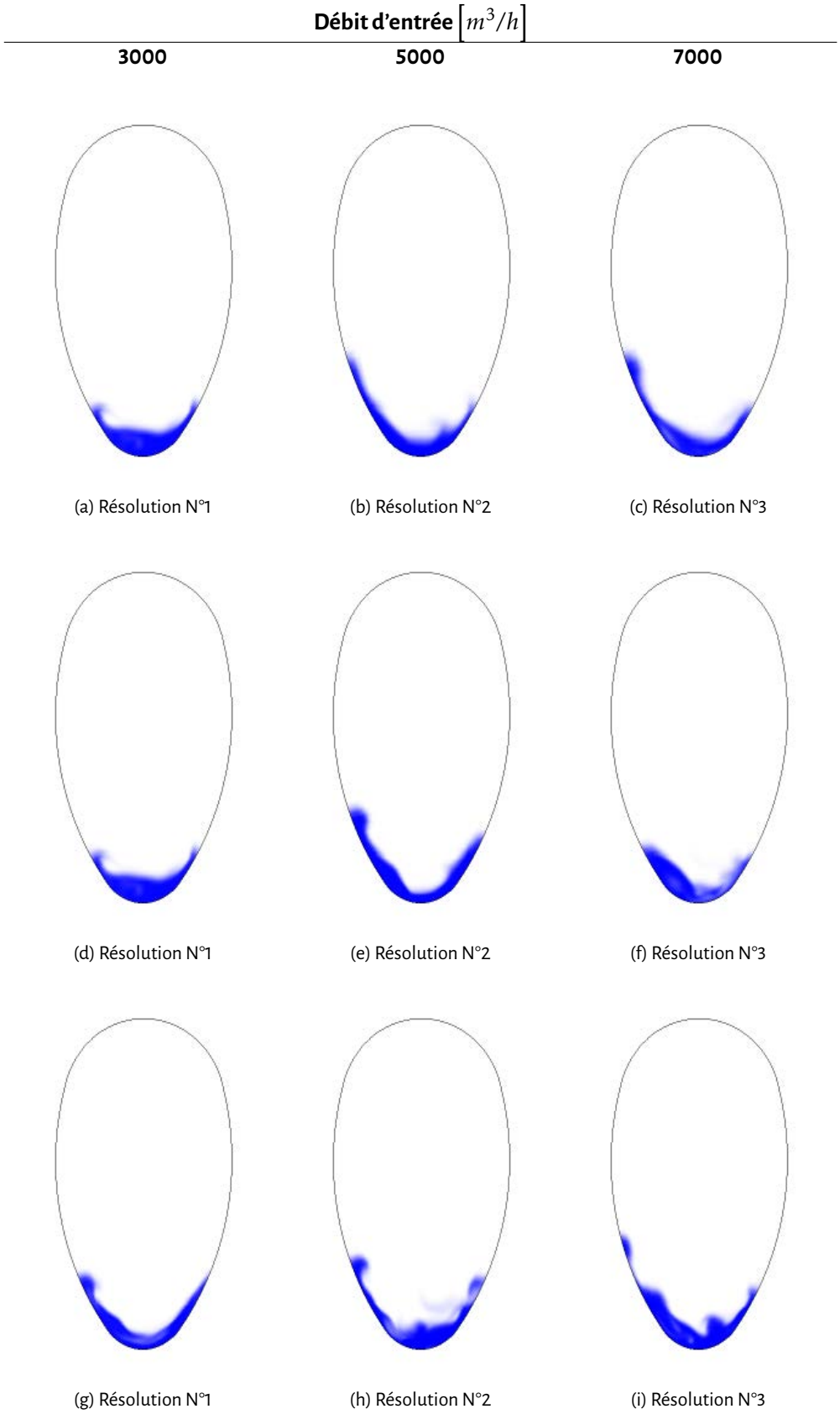


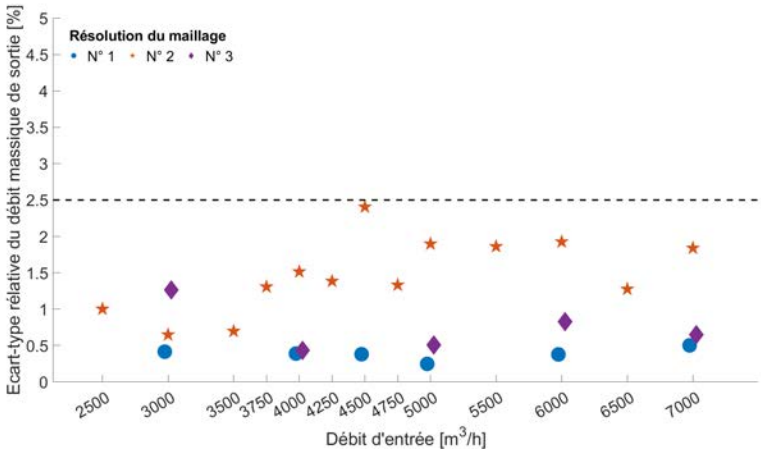
Figure 4.10 – Profil de profondeur (en bleu) au niveau de la sortie « Conservé » pour les débits d'entrée 3000, 5000 et 7000 $[m^3/h]$ et les trois résolutions N°1, N°2 et N°3.

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2020LYSEI083/these.pdf
© [A. Claro Barreto], [2020], INSA Lyon, tous droits réservés

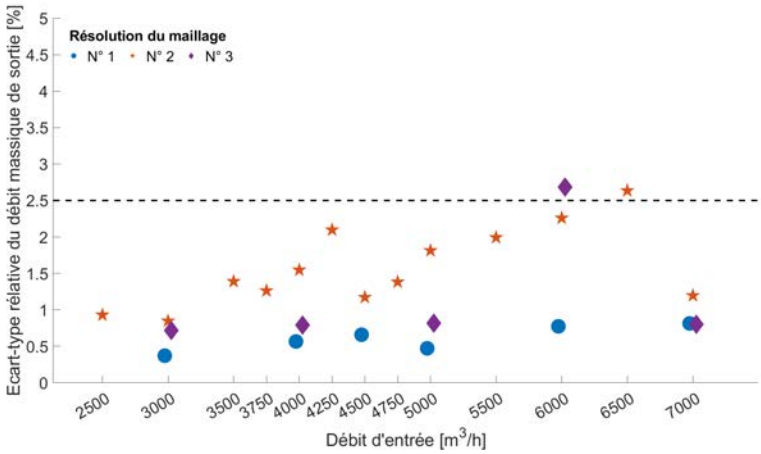
4.3.1.2 Le débit déversé : vérification de la convergence

Afin de vérifier si les résultats numériques ont convergé, l'écart-type relatif des débits déversés $\sigma_{\mathrm{RD}} = \sigma_{\mathrm{D}}/D_{\mathrm{E}}$ est évalué au niveau des conduites de décharge « Gauche » et « Droit ». L'écart-type σ_{RD} permet de quantifier et de vérifier si le débit déversé est constant et stable au cours des itérations. La Fig. 4.11 présente σ_{RD} pour les conduites de déversement « Gauche » (Fig. 4.11a) et « Droit » (Fig. 4.11b) en fonction du débit d'entrée D_{E}.

Tous les σ_{RD} des conduites « Gauche » et « Droit » pour les trois résolutions sont inférieurs au seuil de convergence $\sigma_{\mathrm{CFD}} = 2.5\%$. La convergence des débits déversés (i.e. D_{G} et D_{D}) est jugée atteinte pour toutes les simulation grâce au respect du seuil de convergence σ_{CFD} (Tableau 4.5). Nous pouvons considérer les résultats numériques comme convergés, car les débits déversés sont stables ($\sigma_{\mathrm{RD}} < 2.5\%$), malgré des fortes oscillations observées au niveau de la conservation de la masse $\left(|E_{\mathrm{CM}}/D_{\mathrm{E}}|^{95\%} > 5\%\right)$ - notamment liées à la condition limite de sortie du débit « Conservé ».



(a) Condition de sortie « Gauche »



(b) Condition de sortie « Droit »

Figure 4.11 – L'écart-type relatif du débit déversé ($\sigma_{\mathrm{RD}} = \sigma_{\mathrm{D}}/D_{\mathrm{E}}$) en fonction du débit d'entrée dans le DO « Gambetta ».

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2020LYSEI083/these.pdf
© [A. Claro Barreto], [2020], INSA Lyon, tous droits réservés

4.3.2 L'incertitude relative des résultats numériques - GCI modifiée

L'application de la procédure modifiée de l'indice de convergence du maillage (GCI, en anglais - Section 4.2.4.2) aux débits déversés «Gauche» D_G, «Droit» D_D et «Total» D_T a permis de prendre en compte l'incertitude liée au calcul itératif σ_{iter} et aux maillages utilisés σ_{maille}. Le débit déversé «Total» D_T est égal à la somme des débits déversés «Gauche» D_G, «Droit» D_D. L'analyse de probabilité de non oscillation P_{NO} (Eq. 3.74) pour les débits déversés en fonction du débit d'entrée D_E est présenté en annexe (Annexe E).

$\overline{D_E}$	GCI		$\phi_{ext} \equiv D_{Gauche}$	
	N°2	N°3	N°2	N°3
(m^3/h)			(m^3/h)	
3000	0 (0.108)	0 (0.119)	420.902 (39.351)	486.673 (51.860)
4000	0 (0.090)	0 (0.091)	861.138 (62.671)	896.965 (63.573)
4500	0 (0.086)	0 (0.086)	1 083.704 (78.778)	1 085.994 (86.120)
5000	0 (0.095)	0 (0.096)	1 307.734 (104.106)	1 301.566 (113.476)
7000	0 (0.097)	0 (0.095)	2 226.311 (164.557)	2 221.112 (174.884)

Tableau 4.6 – L'erreur relative liée au maillage (i.e. GCI) et les valeurs extrapolées $\left(\phi_{ext}\right)$ en fonction du débit d'entrée $\left(\overline{D_E}\right)$ et des résolutions N°2 et N°3 (i.e. maillages intermédiaire et fin, respectivement) pour le débit déversé «Gauche» (D_{Gauche}). L'écart-type correspond aux valeurs en parenthèse.

$\overline{D_E}$	GCI		$\phi_{ext} \equiv D_{Droit}$	
	N°2	N°3	N°2	N°3
(m^3/h)			(m^3/h)	
3000	0 (0.094)	0 (0.103)	432.562 (35.431)	495.004 (37.405)
4000	0 (0.122)	0 (0.122)	846.770 (88.042)	859.020 (102.419)
4500	0 (0.141)	0 (0.146)	986.521 (105.039)	944.764 (121.734)
5000	0 (0.125)	0 (0.127)	1209.349 (126.103)	1175.445 (133.770)
6000	0 (0.121)	0 (0.130)	1785.381 (187.285)	2001.382 (258.949)
7000	0 (0.118)	0 (0.119)	2078.801 (201.103)	2028.123 (205.505)

Tableau 4.7 – L'erreur relative liée au maillage (i.e. GCI) et les valeurs extrapolées $\left(\phi_{ext}\right)$ en fonction du débit d'entrée $\left(\overline{D_E}\right)$ et des résolutions N°2 et N°3 (i.e. maillages intermédiaire et fin, respectivement) pour le débit déversé «Droit» (D_{Droit}). L'écart-type correspond aux valeurs en parenthèse. Les résultats aberrants sont indiqués en couleur rouge $\left(\overline{D_E} = 6000\ m^3/h\right)$.

Les erreurs relatives GCI_{ij} et les valeurs extrapolées $\left(\phi_{exacte} \approx \phi_{ext}^{ij}\right)$ des maillages intermédiaire $(ij = 32)$ et fin $(ij = 21)$ pour les débits déversés «Gauche», «Droit» et «Total» sont présentés dans les Tableaux 4.6, 4.7 et 4.8, respectivement. L'écart-type de ces variables correspond aux nombres entre paren-

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2020LYSEI083/these.pdf
© [A. Claro Barreto], [2020], INSA Lyon, tous droits réservés

$\overline{D_E}$	GCI		$\phi_{ext} \equiv D_{Total}$	
	N°2	N°3	N°2	N°3
(m^3/h)			(m^3/h)	
3000	0	0	853.153	975.870
	(0.098)	(0.107)	(72.905)	(74.462)
4000	0	0	1656.331	1723.156
	(0.029)	(0.029)	(38.600)	(55.298)
4500	0	0	2 039.994	2 015.363
	(0.102)	(0.102)	(169.493)	(176.328)
5000	0	0	2459.167	2434.280
	(0.119)	(0.118)	(231.571)	(240.311)
7000	0	0	4371.764	4302.252
	(0.090)	(0.092)	(320.656)	(324.381)

Tableau 4.8 – L'erreur relative liée au maillage (i.e. GCI) et les valeurs extrapolées $\left(\phi_{ext}\right)$ en fonction du débit d'entrée $\left(\overline{D_E}\right)$ et des résolutions N°2 et N°3 (i.e. maillages intermédiaire et fin, respectivement) pour le débit déversé « Total » (D_{Total}). L'écart-type correspond aux valeurs en parenthèse.

thèses.

La valeur moyenne du GCI, des maillages intermédiaire et fin, est égale à zéro pour tous les débits d'entrée et déversés. L'écart-type du maillage intermédiaire GCI_{32} est parfois inférieur à celui lié au maillage fin GCI_{21} (e.g. $\overline{D_E} = 3000\, m^3/h$ des Tableaux 4.6 et 4.7), car la procédure de calcul du GCI décrite dans la section (4.2.4.2) dépend de la largeur de l'IC à 95% et de la valeur moyenne obtenue pour chaque résolution. Cependant, les écart-types du GCI obtenus pour la résolution « N°2 » et « N°3 » sont très similaires. La borne supérieure de l'intervalle de confiance à 95% du critère GCI_{ij} pour l'ensemble des débits déversés varie entre 9,0% et 15,0%. Ces pourcentages correspondent à l'incertitude relative du modèle numérique sur le débit déversé.

Les valeurs extrapolées $\left(\phi_{exacte} \approx \phi_{ext}^{ij}\right)$ entre les maillages intermédiaire $\left(\phi_{ext}^{32}\right)$ et fin $\left(\phi_{ext}^{21}\right)$ sont similaires vis-à-vis de la valeur moyenne et de l'écart-type. Les résultats montrent que la procédure de calcul du GCI (Section 4.2.4.2) permet d'obtenir des résultats équivalents même en cas d'une forte probabilité d'oscillation (i.e. $P_{NO} < P_{NO,T}$).

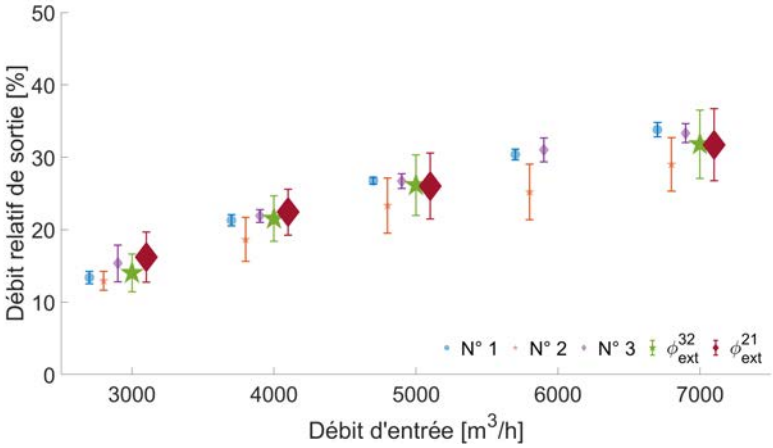
Enfin, l'écart-type des débits déversés « Gauche » $(\sigma_{\overline{D_G}})$, « Droit » $(\sigma_{\overline{D_D}})$ et « Total » $(\sigma_{\overline{D_T}})$ est calculé selon la procédure GCI (Section 4.2.4.2) pour l'ensemble des débits d'entrée simulés uniquement avec le maillage intermédiaire (i.e. Résolution N°2). Les Tableaux 4.9, 4.10 et 4.11 présentent la moyenne et l'écart-type en fonction du débit d'entrée D_E pour les débits déversés « Gauche » D_G, « Droit » D_D et « Total » D_T, respectivement. Pour l'ensemble des simulations réalisées uniquement avec le maillage intermédiaire (i.e. la résolution N°2), on observe que l'incertitude relative CV_2 est inférieure à l'incertitude relative moyenne $\overline{CV}_{GCI}$ de l'ensemble des solutions extrapolées ϕ_{ext}^{21}. Celui-ci indique que l'incertitude de la procédure GCI σ_{GCI} est supérieure que celle liée au calcul itératif σ_{iter}. Aussi, ce résultat montre que la procédure GCI (Section 4.2.4.2) permet de prendre en compte l'incertitude liée au calcul itérative σ_{iter} et à la discrétisation spatiale σ_{maille}.

4.4 La validation des résultats numériques

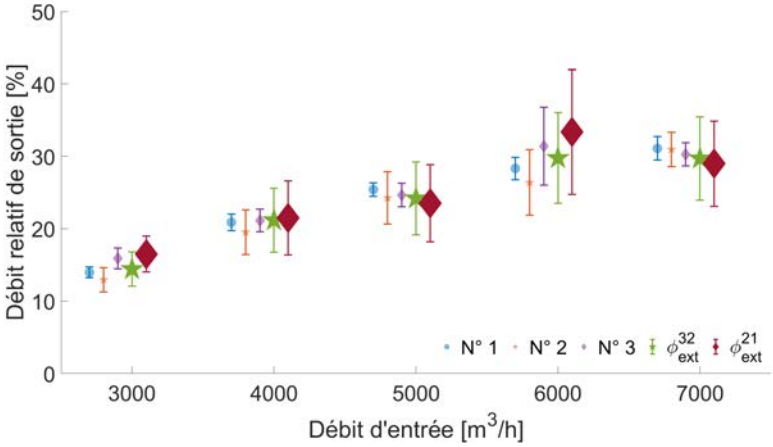
Une fois les résultats numériques vérifiés (Section 4.3.1.2) et leur incertitudes calculées (Section 4.3.2), il est nécessaire de les valider vis-à-vis des mesures *in situ*. Les résultats obtenus à l'aide du modèle numérique 3D du DO « Gambetta » sont comparés par rapport aux débits déversés observés et aux hauteurs d'eau mesurées dans la chambre du DO « Gambetta » en temps de pluie.

Pour rappel, la vanne guillotine localisée à l'aval de chambre du déversoir d'orage est le dispositif de régulation de l'écoulement (i.e. les débits conservé et déversé) pour cet ouvrage, mais on ne dispose pas

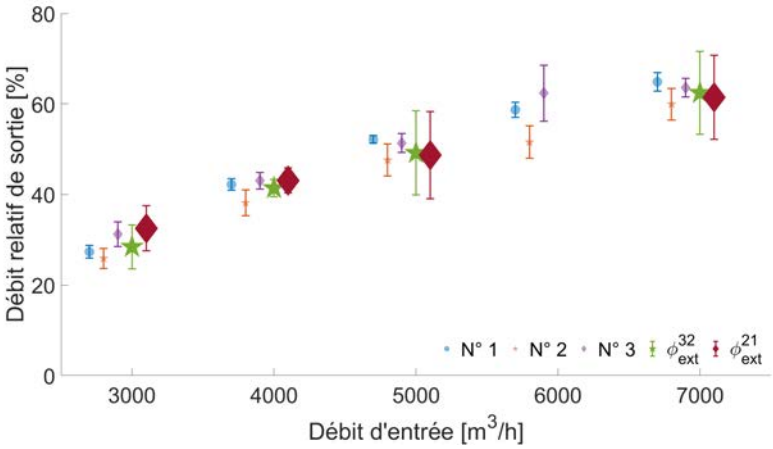
Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2020LYSEI083/these.pdf
© [A. Claro Barreto], [2020], INSA Lyon, tous droits réservés



(a) Débit déversé «Gauche»



(b) Débit déversé «Droit»



(c) Débit déversé «Total»

Figure 4.12 – Le débit déversé relatif des sorties «Gauche» (4.12a), «Droit» (4.12b) et «Total» (4.12c) pour les résolutions N°1 (ϕ_3), N°2 (ϕ_2) et N°3 (ϕ_1) et les valeurs extrapolées ϕ_{ext}^{32} et ϕ_{ext}^{21} (selon la procédure GCI - Section 4.2.4.2) en fonction du débit d'entrée D_{E} dans le DO «Gambetta». Les barres d'erreur correspondent à l'intervalle de confiance à 95%. A noter que les résultats pour chaque D_{E} ne sont pas superposés pour des raisons de lisibilité.

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2020LYSEI083/these.pdf
© [A. Claro Barreto], [2020], INSA Lyon, tous droits réservés

$\overline{D_E}$ (m^3/h)	$\sigma_{\overline{D_E}}$ (m^3/h) x 10^{-3}	$\overline{D_G}$ (m^3/h)	$\sigma_{\overline{D_G}}$	$CV_2 > \overline{CV}_{GCI}$
2500	$< 10^{-3}$	252.172	49.262	Non
3000	3.626	486.673	51.860	
3500	$< 10^{-3}$	727.259	142.070	Non
3750	$< 10^{-3}$	632.240	123.508	Non
4000	4.964	896.965	63.573	
4250	$< 10^{-3}$	834.537	163.027	Non
4500	6.172	1027.837	200.788	Non
4750	$< 10^{-3}$	994.704	194.315	Non
5000	34.368	1301.566	113.476	
5500	$< 10^{-3}$	1348.771	263.482	Non
6500	$< 10^{-3}$	1771.326	346.028	Non
7000	55.929	2221.112	174.884	

Tableau 4.9 – Le débit d'entrée D_E moyen avec son écart-type et le débit déversée « Gauche » D_G moyen avec son écart-type au sein du DO « Gambetta ».

$\overline{D_E}$ (m^3/h)	$\sigma_{\overline{D_E}}$ (m^3/h) x 10^{-3}	$\overline{D_D}$ (m^3/h)	$\sigma_{\overline{D_D}}$	$CV_2 > \overline{CV}_{GCI}$
2500	0	275.482	63.824	Non
3000	3.626	495.004	37.405	
3500	0	727.471	168.541	Non
3750	0	672.883	155.894	Non
4000	4.964	859.020	102.419	
4250	0	820.275	190.042	Non
4500	6.172	1067.204	247.250	Non
4750	0	1056.684	244.813	Non
5000	34.368	1175.445	133.770	
5500	0	1404.087	325.300	Non
6500	0	1810.559	419.471	Non
7000	55.929	2028.123	205.505	

Tableau 4.10 – Le débit d'entrée D_E moyen avec son écart-type et le débit déversée « Droit » D_D moyen avec son écart-type au sein du DO « Gambetta ».

des informations complémentaires sur son dimensionnement hydraulique. On connaît seulement, après visite *in situ*, qu'il s'agit d'une vanne à ouverture fixe. Cette ouverture est telle que les déversoirs d'orage commencent à déverser lorsque le débit d'entrée devient supérieur à 2000 m^3/h, que nous avons caractérisé par les mesures *in situ*.

4.4.1 Le débit déversé en temps de pluie

Les résultats numériques sont comparés seulement par rapport aux données expérimentales de l'année 2018 parce que les données *in situ* des années précédentes ne sont pas jugées assez fiables (voir Chapitre 2 - Section 2.3.4).

Les débits déversés relatifs « Total » D_T/D_E, « Gauche » D_G/D_E et « Droit » D_D/D_E expérimentaux et numériques sont présentés dans la Fig. 4.13. La valeur moyenne et l'écart-type de chaque donnée expérimentale sont estimés dans l'intervalle $\Delta D_E = U(D_E)$ en prenant en compte l'incertitude du débit *in situ*

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2020LYSEI083/these.pdf
© [A. Claro Barreto], [2020], INSA Lyon, tous droits réservés

$\overline{D_E}$ (m^3/h)	$\sigma_{\overline{D_E}}$ (m^3/h) x 10^{-3}	$\overline{D_T}$ (m^3/h)	$\sigma_{\overline{D_T}}$	$CV_2 > \overline{CV}_{GCI}$
2500	0	527.653	88.482	Non
3000	3.626	975.870	74.462	
3500	0	1454.729	243.942	Non
3750	0	1305.123	218.855	Non
4000	4.964	1723.156	55.298	
4250	0	1654.811	277.493	Non
4500	6.172	2095.042	351.315	Non
4750	0	2051.388	343.995	Non
5000	34.368	2434.280	240.311	
5500	0	2752.858	461.624	Non
6500	0	3581.885	600.642	Non
7000	55.929	4302.252	324.381	

Tableau 4.11 – Le débit d'entrée D_E moyen avec son écart-type et le débit déversée « Total » D_T moyen avec son écart-type au sein du DO « Gambetta ».

$U(D_{exp})$ (Section 2.3.5 - Chapitre 2). Les résultats numériques correspondent aux valeurs extrapolées $\overline{D_i}$ des Tableaux 4.9-4.11. L'intervalle de confiance à 95% des données numériques est égal à $2\sigma_{\overline{D_i}}$.

Par exemple, pour un débit d'entrée $D_E = 4\,000\,m^3/h$, on observe que le débit déversé par les conduites « Gauche » et « Droit » correspond à 22.4% et 21.5% du débit d'entrée, respectivement. On observe également que le débit total déversé augmente de manière non-linéaire par rapport au débit d'entrée (Fig. 4.13a), avec un rapport maximal $D_T/D_E \approx 61.5\%$ pour $D_E = 7\,000\,m^3/h$.

La simulation numérique du DO « Gambetta » est capable de reproduire le débit déversé « Total » D_T. Les résultats numériques (étoile rouge) sont compris dans l'IC à 95% des résultats expérimentaux (en bleu), voir Fig. 4.13a. Le modèle numérique (étoile rouge) sous-estime légèrement le débit expérimental (cercle bleu) dans l'intervalle $D_E \in [2500 - 7000]\,m^3/h$. L'erreur quadratique moyenne (RMSE) du modèle numérique sur le débit relatif moyen D_T/D_E est égale à 14.8% (Fig. 4.13a). Cette erreur est inférieure à l'incertitude relative moyenne (ou coefficient de variation) liée aux données expérimentales $\overline{u(D_T)/D_T} = 20.6\%$.

Le modèle numérique 3D du DO « Gambetta » reproduit le fonctionnement hydraulique de la conduite de décharge « Gauche » D_G. Le débit numérique déversé « Gauche » est compris dans l'IC à 95% des données expérimentales (Fig. 4.13b). Le modèle numérique sous-estime légèrement le débit moyen expérimental avec une RMSE est égale à 7.4%. Cette erreur est inférieure à l'incertitude relative moyenne liée aux données expérimentales $\overline{u(D_G)/D_G} = 21.0\%$.

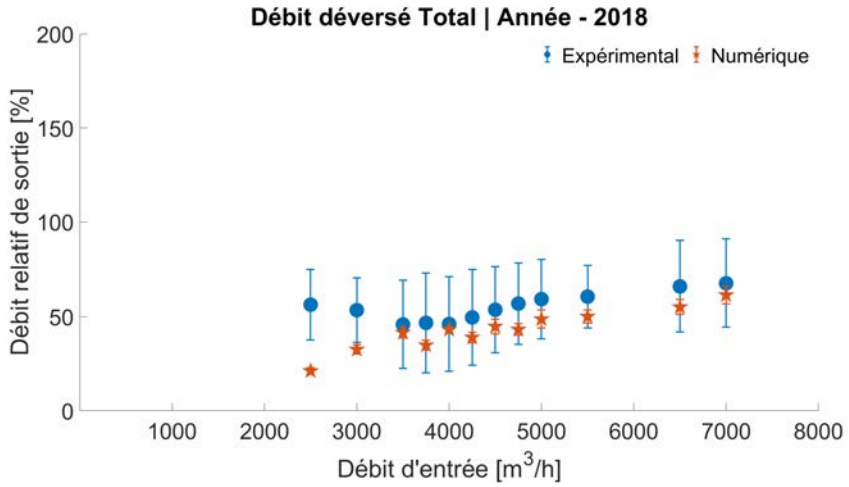
Le modèle numérique sous-estime légèrement le débit moyen déversé dans la conduite « Droit » D_D dans l'intervalle $D_E \in [2500 - 7000]\,m^3/h$. La valeur moyenne de tous les résultats numériques (étoile rouge) est comprise dans l'IC à 95% des données expérimentales (cercle bleu) mais elle est proche de l'extrême inférieur de cet intervalle de confiance (voir Fig. 4.13c). L'erreur RMSE du débit relatif D_D/D_E est (i) égale à 13.5% et (ii) inférieure à l'incertitude relative moyenne liée aux données expérimentales $\overline{u(D_D)/D_D} = 18.7\%$.

Ainsi, le modèle numérique 3D du DO « Gambetta » permet d'estimer les débits déversés (« Total », « Gauche » et « Droit ») avec une erreur moyenne quadratique (RMSE) inférieure aux incertitudes relatives moyennes $\overline{u(D_i)/D_i}$ sur les données expérimentales.

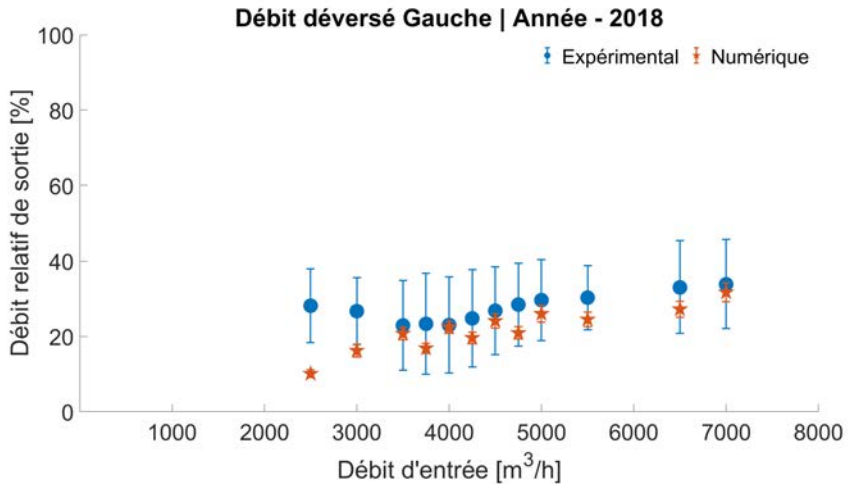
4.4.2 La hauteur d'eau dans la chambre du DO « Gambetta »

La hauteur d'eau moyenne expérimentale (cercle bleu) et numérique (étoile rouge) en fonction du débit d'entrée $D_E \in [2500 - 7000]\,m^3/h$ est présentée dans la Fig. 4.14. Les barres verticales correspondent

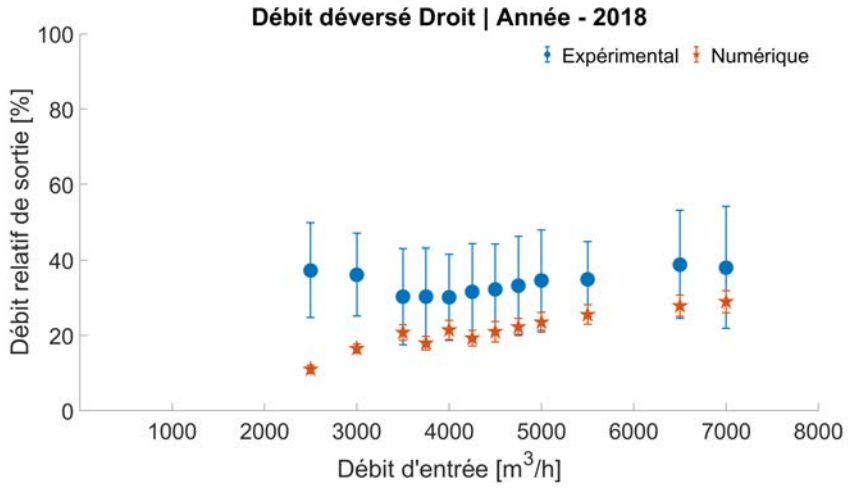
Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2020LYSEI083/these.pdf
© [A. Claro Barreto], [2020], INSA Lyon, tous droits réservés



(a)



(b)



(c)

Figure 4.13 – Débits déversés « Total » (4.13a) , « Gauche » (4.13b) et « Droit » (4.13c) en fonction des débits d'entrée au niveau du DO « Gambetta ». Les barres d'erreur correspondent à l'intervalle de confiance à 95% du débit expérimental moyen.

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2020LYSEI083/these.pdf
© [A. Claro Barreto], [2020], INSA Lyon, tous droits réservés

à l'intervalle de confiance (IC) à 95%. Les valeurs moyennes et les IC à 95% des résultats numériques présentées sont calculées selon l'approche GCI (Section 4.2.4.2).

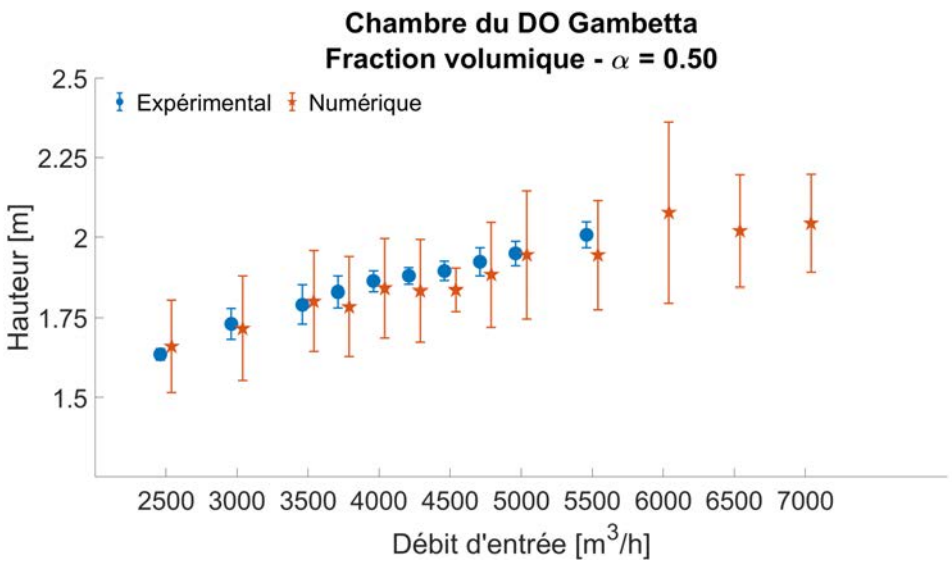


Figure 4.14 – Hauteur d'eau expérimentale (cercle bleu) et numérique (étoile rouge) dans la chambre du DO « Gambetta » en fonction du débit d'entrée D_E. Les barres d'erreur des données expérimentales (en bleu) et numériques (en rouge) correspondent à l'intervalle de confiance à 95% sur la hauteur d'eau H_{chambre}.

Il est observé que l'IC à 95% des résultats numériques (barre rouge) est plus large que celui associé aux mesures *in situ* (barre bleue). L'incertitude-type composée moyenne des résultats numériques $\overline{U(H_{\text{CFD}})} = 8.8\% H_{\text{chambre}}$ (avec $\alpha_{\text{VOF}} = 0.50$) est supérieure à l'incertitude expérimentale $U(H_{\text{Exp}}) = 2\,cm$ en temps de pluie (Bertrand-Krajewski et al. 2000), cette dernière correspond à $U(H_{\text{Exp}}) = 1.0\% H_{\text{chambre}}$ pour $H_{\text{Exp}} = 2\ m$. Cette incertitude numérique élevée est principalement due aux fortes variations du débit « Conservé » D_C (Fig. 4.9). En effet, la variation de la hauteur d'eau numérique H_{chambre} est directement corrélée au débit « Conservé » D_C parce que D_C est régulé par une vanne guillotine localisée à l'aval de H_{chambre}. A titre indicatif, l'incertitude relative moyenne du débit « Conservé » ($CV_C = 8.10\%$) est supérieure à celui de la hauteur d'eau dans la chambre du DO ($CV_C = 4.39\%$). Une nouvelle campagne de simulation, qui prendrait en compte une conduite plus longue à l'aval de la vanne guillotine, permettrait de diminuer l'incertitude sur la hauteur d'eau numérique H_{chambre}.

Malgré la forte incertitude des résultats numériques, la hauteur moyenne H_{chambre} est reproduite avec une erreur moyenne quadratique $\text{RMSE}_H = 0.038\,m$, qui est du même ordre de grandeur que l'IC moyenne à 95% de la mesure expérimentale $2\,\overline{\sigma_{H_{\text{EXP}}}} = 0.039\,m$. Le modèle numérique 3D du DO « Gambetta » est ainsi capable de reproduire la hauteur d'eau dans la chambre du DO « Gambetta » en temps de pluie.

4.5 Résultats

Le modèle numérique 3D du déversoir d'orage (DO) « Gambetta » a été vérifié (Section 4.3.1) et validé par rapport aux données *in situ* (Sections 4.4- 4.4.2). Le fonctionnement hydraulique du DO en temps de pluie est étudié via (i) les lois de déversement (Section 4.5.1) et (ii) la distribution spatiale et temporelle des lignes de courant en fonction du débit d'entrée (Sections 4.5.2, 4.5.3 et 4.5.4).

4.5.1 Les lois de déversement en temps de pluie

Les débits déversés « Gauche » D_G et « Droit » D_D sont reliés à la hauteur d'eau à l'amont du DO « Gambetta » H_{Amont} sous la forme des équations (4.12) et (4.13), respectivement. Le débit d'entrée D_E est l'équi-

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2020LYSEI083/these.pdf
© [A. Claro Barreto], [2020], INSA Lyon, tous droits réservés

valent du débit de la conduite amont du DO « Gambetta » D_{Amont}. Le débit à l'amont du DO « Gambetta » $D_{\text{Amont}} = f\left(H_{\text{Amont}}, I_{\text{Amont}}, K_{s_{\text{Amont}}}\right)$ correspond à celui obtenu dans l'Annexe D - Section D.4. Les deux lois de déversement calées, les Eq. 4.12 et Eq. 4.13), ont un coefficient de détermination $R^2 = 0,94$. L'erreur moyenne quadratique (RMSE en anglais) est égale à $130,8 m^3/h$ et $126,5 m^3/h$ pour les conduites « Gauche » et « Droit », respectivement.

$$\begin{aligned} D_{\text{G}} &= p_{1\text{G}} * \left(D_{\text{E}} - p_{2\text{G}}\right)^{p_{3\text{G}}} \\ p_{1\text{G}} &= 0.01174 \pm 0.00120 \left(m^3/h\right)^{(1-p_3)} \\ p_{2\text{G}} &= 1000 \pm 28.924\, m^3/h \\ p_{3\text{G}} &= 1.39 \pm 0.01 \end{aligned} \tag{4.12}$$

$$\begin{aligned} D_{\text{D}} &= p_{1\text{D}} * \left(D_{\text{E}} - p_{2\text{D}}\right)^{p_{3\text{D}}} \\ p_{1\text{D}} &= 0.03982 \pm 0.00329 \left(m^3/h\right)^{(1-p_3)} \\ p_{2\text{D}} &= 1189 \pm 24.734\, m^3/h \\ p_{3\text{D}} &= 1.25 \pm 0.01 \end{aligned} \tag{4.13}$$

Ces lois de déversement, obtenues après application de l'approche GCI (Section 4.2.5.1) sont présentées dans la Fig. 4.15. Les conduites de décharge « Gauche » (ligne bleue - Fig. 4.15) et « Droit » (ligne rouge - Fig. 4.15) collectent un débit similaire jusqu'à une hauteur d'eau dans la conduite amont du DO $H_{\text{Amont}} \leq 0,650 m$. Le débit de déversement de la conduite « Gauche » est légèrement supérieur à celui collecté par la conduite « Droit ». Cependant, les intervalles de confiance (IC) à 95% des lois de déversement des conduites se chevauchent dans la gamme du débit d'entrée simulée $D_{\text{E}} \in [2500 - 7000] m^3/h$ (i.e. $H_{\text{Amont}} \in [0,42 - 0,72]\, m$).

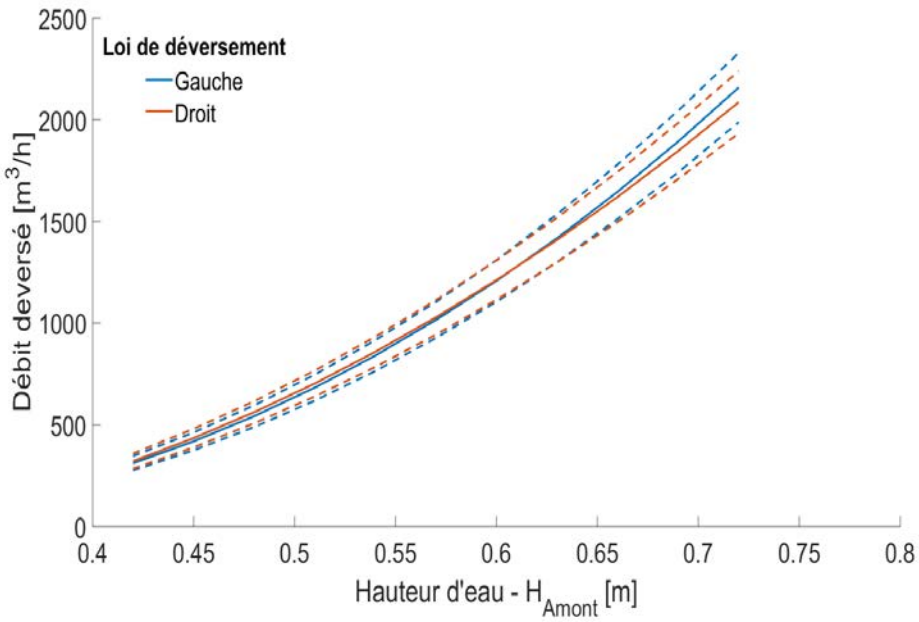


Figure 4.15 – Loi du déversement $D = f\left(H_{\text{Amont}}\right)$ des débits déversés « Gauche » D_{G} et « Droit » D_{D} en fonction de la hauteur d'eau de la conduite amont du « Gambetta » H_{Amont} après application de la procédure GCI (voir Section 4.2.4.2). Les lignes discontinues représentent l'intervalle de confiance à 95% selon la procédure GUM (voir Section 4.2.5.1).

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2020LYSEI083/these.pdf
© [A. Claro Barreto], [2020], INSA Lyon, tous droits réservés

L'incertitude élargie relative $U(D)/D$ à 95% ($k_{\text{GUM}} = 2$) pour les deux conduites de décharge est compris entre 12% et 7% dans l'intervalle $H_{\text{Amont}} \in [0,42 - 0,72]$. L'incertitude $U(D)/D$ à 95% est légèrement plus élevé dans la conduite « Gauche » que dans la conduite « Droit ». L'incertitude $U(D)/D$ maximale obtenue pour les deux lois de déversement numérique est (i) d'environ 12% et (ii) inférieure à celle couramment rencontrée dans la littérature, entre 10% - 40% (e.g. Isel et al. 2014a,b ; Lipeme Kouyi et al. 2011). En outre, ces lois de déversement numérique ont une incertitude relative $U(D)/D$ inférieure ou égale aux mesures *in situ* (Chapitre 2 - Section 2.3.5).

Le modèle numérique 3D du DO a permis d'établir des lois de déversement pour chacune des conduites de déversement en temps de pluie. Ces lois pourront être utilisées pour compléter les séries temporelles du débit déversé si l'un ou les deux capteurs *in situ* dysfonctionnent provisoirement ou complètement en temps de pluie.

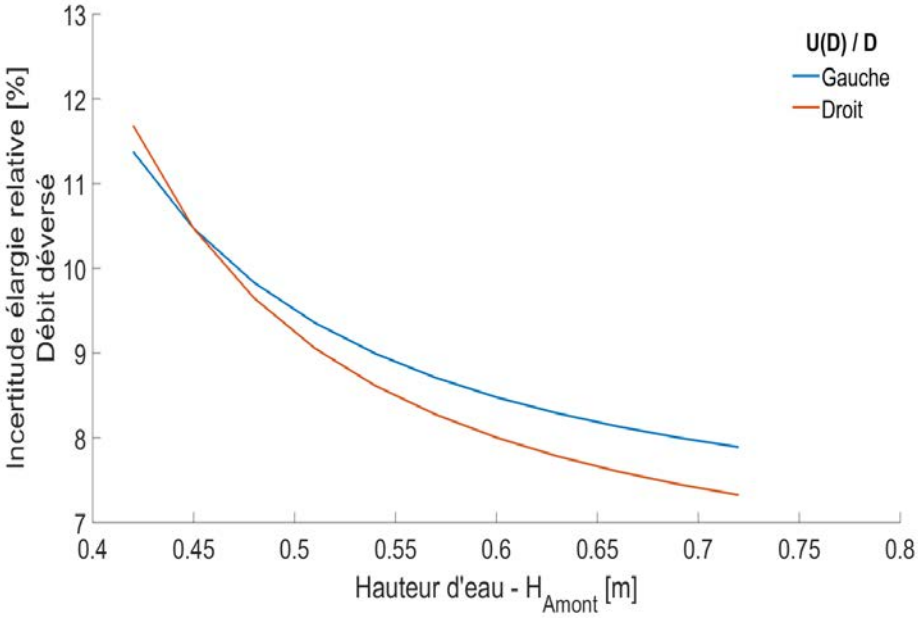


Figure 4.16 – Incertitude élargie relative $U(D)/D$ (avec $U(D) = 2 * u_c(D)$) des débits déversés « Gauche » D_{G} et « Droit » D_{D} en fonction de la hauteur d'eau de la conduite amont du « Gambetta » H_{Amont} après application de la procédure GCI (voir Section 4.2.5.1).

4.5.2 La distribution spatiale des lignes de courant au niveau de la section d'entrée « réelle »

Au niveau de la section d'entrée « réelle », la distribution spatiale des lignes de courant en fonction du débit d'entrée D_{E} (3000 - 5000 - 7000 m^3/h) et de la résolution (N°1 - N°2 - N°3) est présentée sur la Fig. 4.17. L'entrée « réelle » est situé à $7.305\ m$ à l'aval de la condition limite d'entrée du modèle numérique 3D. Les lignes de courant ont pour point de départ la section d'entrée du modèle numérique 3D. Les lignes de courant sont colorées en fonction de la section (condition limite) par où elles sortent : « Gauche » (violet), « Droit » (orange) et « Conservé » (bleue).

Le débit déversé « Droit » D_{D} correspond à la première conduite de décharge que l'écoulement emprunte. Le débit D_{D} est principalement apporté par la région nord-est de la section d'entrée « réelle ». Cette région augmente principalement suivant la verticale en fonction du débit d'entrée D_{E} (e.g. Fig. 4.17a-4.17b-4.17c).

Le débit déversé « Gauche » D_{G} correspond à la deuxième conduite de décharge que l'écoulement suit. Le débit D_{G} est apporté par la région nord centrale de la section d'entrée « réelle ». Cette région augmente principalement dans le sens horizontal en fonction du débit d'entrée D_{E} (e.g. Fig. 4.17a-4.17b-4.17c). Cependant, il est observé que cette région n'arrive pas à complètement s'étaler vers l'ouest car la région nord-

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2020LYSEI083/these.pdf
© [A. Claro Barreto], [2020], INSA Lyon, tous droits réservés

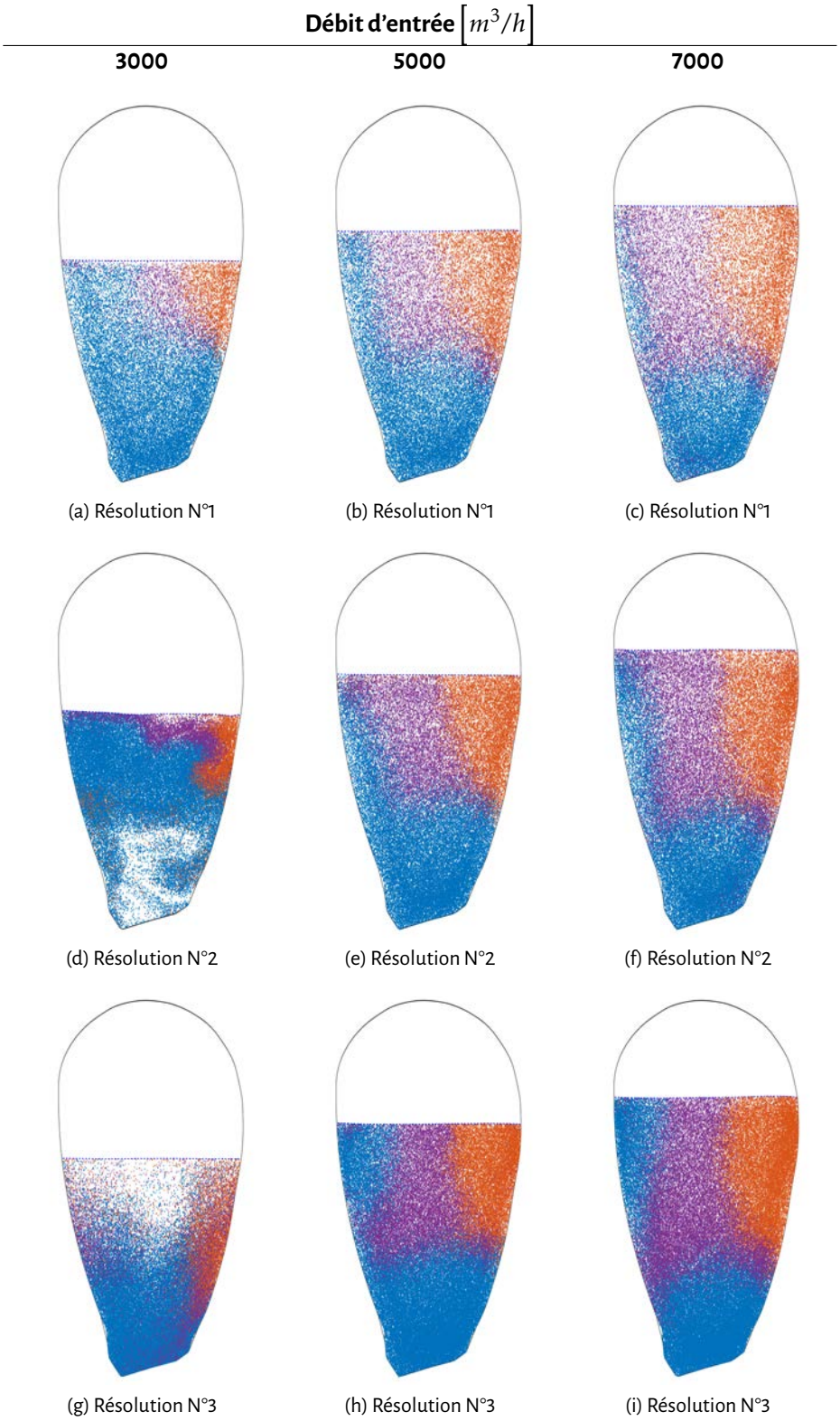


Figure 4.17 – La distribution spatiale au niveau de la section d'entrée réelle des lignes de courant qui sortent par les conditions limites « Gauche » (violet), « Droit » (orange) et « Conservé » (bleu) en fonction des débits d'entrée $3000\,m^3/h$ (Fig. 4.17a-4.17d-4.17g), $5000\,m^3/h$ (Fig. 4.17b-4.17e-4.17h) et $7000\,m^3/h$ (Fig. 4.17c-4.17f-4.17i) pour les trois résolutions N°1, N°2 et N°3. L'écoulement s'éloigne de l'observateur (vue vers l'aval).

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2020LYSEI083/these.pdf
© [A. Claro Barreto], [2020], INSA Lyon, tous droits réservés

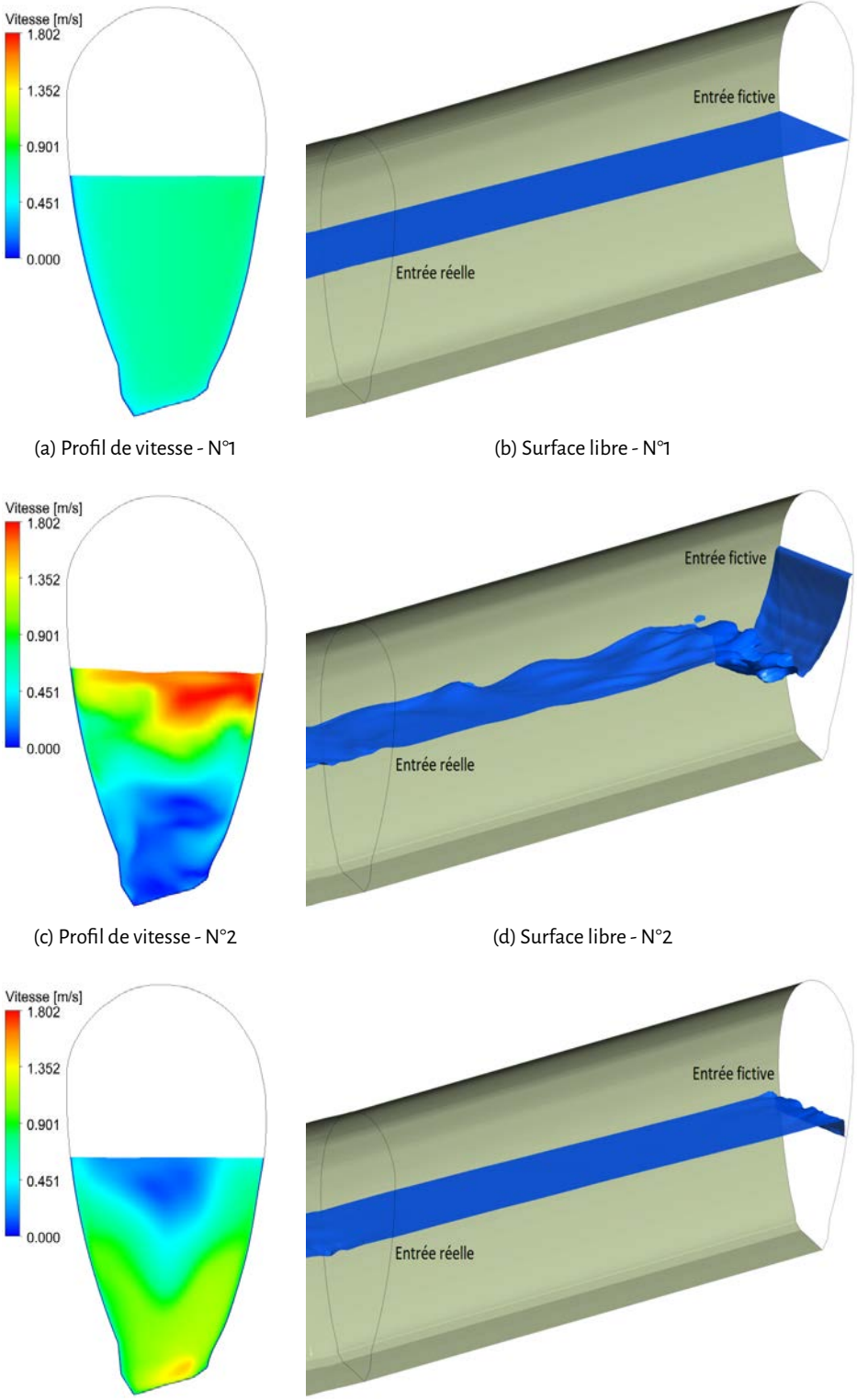
ouest contribue toujours au débit « Conservé » D_C.

La région sud est la principale source du débit « Conservé » D_C. La deuxième source d'apport est la région nord-ouest qui diminue proportionnellement au débit d'entrée D_E. En outre, la région inférieure de la section ne contribue jamais aux débits déversés D_G et D_D. Dans cette région, il est fort probable que la pollution collectée par le DO soit envoyée à la station d'épuration d'eaux usées.

Pour le débit d'entrée $D_E = 3000\,m^3/h$, des distributions spatiales des lignes de courant différentes entre les trois résolutions sont observées à cause de la hauteur d'eau définie dans la condition limite d'entrée. La hauteur d'eau à l'entrée produit un ressaut hydraulique pour la résolution N°2 à cause de la chute d'eau amont vers un écoulement fluvial à l'aval (Fig. 4.18d) et pour la résolution N°3 à cause d'une hauteur amont inférieure à la hauteur aval d'un écoulement fluvial (Fig. 4.18f). Le profil de vitesse au niveau de l'entrée « réelle » n'est pas complètement développé pour les résolutions N°2 et N°3, voir respectivement les Figs. 4.18c-4.18e. Ceci montre que la longueur de la conduite « fictive » utilisée n'est pas suffisante pour garantir un profil de vitesse développé au niveau de l'entrée « réelle » pour $D_E = 3000\,m^3/h$. Cependant, la hauteur d'eau obtenue au niveau de l'entrée « réelle » est indépendant de la hauteur d'eau à l'entrée du modèle du DO (Fig. 4.18b-4.18d-4.18f). Malgré cette sensibilité à la condition limite amont pour $D_E = 3000\,m^3/h$, les résultats numériques restent fiables et valides par rapport à la répartition des débits et à la hauteur dans la chambre du DO en temps de pluie. Ces résultats peuvent donc être utilisés pour mieux comprendre le fonctionnement du DO « Gambetta ».

Les distributions spatiales des lignes de courant suivent un patron cohérent et comparable à celui observé au niveau du déversoir latéral pilote (Chapitre 3) pour les différents débits d'entrée. Cette étude qualitative a permis également d'identifier les zones de la section droite à l'entrée du DO qui contribuent au débit déversé en temps de pluie. L'identification de ces zones est d'un grand intérêt parce qu'elle permet de cerner les secteurs de la chambre du DO par lesquels transitent majoritairement les flux de pollution déversés en temps de pluie. Enfin, cette étude qualitative permet d'identifier des lieux recommandés d'échantillonnage ou d'implémentation des capteurs dans le but de quantifier les flux de polluants déversés.

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2020LYSEI083/these.pdf
© [A. Claro Barreto], [2020], INSA Lyon, tous droits réservés



(a) Profil de vitesse - N°1

(b) Surface libre - N°1

(c) Profil de vitesse - N°2

(d) Surface libre - N°2

(e) Profil de vitesse - N°3

(f) Surface libre - N°3

Figure 4.18 – Le contour de vitesse moyenne (Fig. 4.18a-4.18c-4.18e) à l'entrée réelle et la surface libre (Fig. 4.18b-4.18d-4.18f) au niveau de la conduite « fictive » du DO « Gambetta » pour le débit d'entrée $D_E = 3000\,m^3/h$ et les résolutions N°1 (Fig. 4.18a-4.18b), N°2 (Fig. 4.18c-4.18d) et N°3 (Fig. 4.18e-4.18f).

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2020LYSEI083/these.pdf
© [A. Claro Barreto], [2020], INSA Lyon, tous droits réservés

4.5.3 Le temps de séjour de l'écoulement

Le temps de séjour de l'écoulement en fonction des conditions limites de sortie «Conservé», «Gauche» et «Droit» est présenté dans les Tableaux 4.12- 4.13- 4.14, respectivement. Ce temps de séjour correspond au temps qu'une goutte d'eau (i.e. ligne de courant) prend pour sortir du domaine de calcul par une des sorties du DO. Les temps de séjour moyens entre les différentes résolutions pour une même condition de sortie et débit d'entrée sont du même ordre de grandeur. Ceci montre que la solution est indépendante du maillage utilisé. Cependant, la variation du temps de séjour maximal (deuxième valeur entre crochets) entre les 3 résolutions pour un même débit d'entrée et même condition de sortie est due à la dispersion de la solution numérique (i.e. le critère GCI de la Section 4.3.2).

Le temps de séjour moyen de la sortie «Gauche» (Tableau 4.13) est légèrement supérieur (1 seconde) à celui de la sortie «Droit» (Tableau 4.14) car cette dernière est la première conduite de décharge que l'écoulement rencontre. Le temps de séjour de la sortie «Conservé» (Tableau 4.12) est similaire à celui de la sortie «Gauche» (Tableau 4.13). Les temps de séjour maximum sont supérieurs dans les sorties «Gauche» et «Droit» que dans la sortie «Conservé».

Le pourcentage des lignes de courant qui sont restées dans le domaine de calcul (i.e. sans sortir par aucune des conditions limites) est présenté dans le Tableau 4.15. Entre 0.30% à 3.36% des lignes de courant restent dans domaine de calcul et leur temps de séjour est supérieur à 102.8 - 403.7 secondes.

Cette analyse sur le temps de séjour permet de vérifier si des zones de stagnation sont présentes dans le domaine de calcul (par exemple des recirculations 2D ou 3D, c'est-à-dire de forme hélicoïdale et difficile à détecter – voir Momplot et al. 2017). L'identification de ces zones probables de stagnation et/ou de recirculation est intéressante également d'un point de vue de la sédimentation et de la transformation bio-physico-chimique des effluents transitant par le DO. Au vu des temps de séjour très faibles (quelques secondes) et de la distribution des lignes de courant, nous pouvons émettre l'hypothèse de l'absence d'une rétention et d'une transformation bio-physico-chimique importante des effluents entre les zones de contribution identifiées précédemment et l'écoulement dans les canalisations des débits «Conservé» et déversés. Les prélèvements ou mesures en continu réalisées au niveau de ces zones de contribution seraient donc représentatifs de la qualité des effluents déversés et conservés.

	Débit d'entrée D_E		
Résolution	3000 m^3/h	5000 m^3/h	7000 m^3/h
N°1	10.3 (0.9) [8.6 - 17.9]	7.5 (1.3) [6.3 - 93.2]	6.1 (0.6) [5.2 - 10.1]
N°2		8.5 (1.1) [5.5 - 42.7]	6.9 (1.4) [4.2 - 106.0]
N°3		8.5 (1.5) [5.1 - 101.3]	6.8 (1.3) [4.3 - 64.0]

Tableau 4.12 – Temps de séjour (en secondes) le long des lignes de courant (i.e. l'écoulement) sortant par la condition limite «Conservé». L'écart-type est donné entre parenthèses et les valeurs minimale et maximale sont indiqués respectivement entre crochets.

4.5.4 Simulation de l'implémentation d'un capteur de suivi de la pollution

La Fig. 4.19 présente la distribution spatiale des lignes de courant qui ont traversé le cylindre d'observation vertical (Section 4.2.6) en fonction du débit d'entrée D_E et de la résolution du maillage. A noter que les distributions spatiales de la pollution dissoute pour le débit $D_E = 3000\,m^3/h$ et les résolution N°2 (Fig. 4.19d) et N°3 (Fig. 4.19g) sont jugées invalides parce que la condition d'entrée utilisée influence cette répartition (voir Section 4.5.2).

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2020LYSEI083/these.pdf
© [A. Claro Barreto], [2020], INSA Lyon, tous droits réservés

Résolution	Débit d'entrée D_E		
	3000 m^3/h	5000 m^3/h	7000 m^3/h
N°1	10.2 (2.8) [8.7 - 403.7]	7.4 (4.3) [6.3 - 130.0]	6.2 (3.7) [5.0 - 145.1]
N°2		7.1 (2.5) [5.3 - 76.2]	6.0 (3.3) [4.1 - 154.8]
N°3		7.5 (4.0) [4.9 - 127.2]	6.2 (2.4) [4.2 - 94.8]

Tableau 4.13 – Temps de séjour (en secondes) le long des lignes de courant (i.e. l'écoulement) sortant par la condition limite « Gauche ». L'écart-type est donné entre parenthèses et les valeurs minimale et maximale sont indiqués respectivement entre crochets.

Résolution	Débit d'entrée D_E		
	3000 m^3/h	5000 m^3/h	7000 m^3/h
N°1	9.6 (8.2) [8.4 - 284.3]	7.1 (4.9) [6.0 - 157.2]	5.9 (5.1) [4.9 - 150.6]
N°2		6.5 (3.9) [5.0 - 120.8]	5.5 (4.6) [4.0 - 151.9]
N°3		6.5 (4.8) [4.8 - 125.3]	5.4 (3.5) [4.0 - 106.6]

Tableau 4.14 – Temps de séjour des lignes de courant (i.e. l'écoulement) sortant par la condition limite « Droit ». L'écart-type est donné entre parenthèses et les valeurs minimale et maximale sont indiqués respectivement entre crochets.

Résolution	Débit d'entrée D_E		
	3000 m^3/h	5000 m^3/h	7000 m^3/h
N°1	0.60%	0.30%	1.17%
N°2		2.77%	3.36%
N°3		2.43%	1.41%

Tableau 4.15 – Le pourcentage (%) de lignes de courant qui restent dans le domaine de calcul sans sortir par aucune des conditions limites.

La pollution particulaire très fine transportée en bas de la sonde de turbidité correspond uniquement à la région du débit « Conservé » D_C pour les trois débits d'entrée présentés dans la Fig. 4.19. En effet, la pollution transportée en bas de la sonde *in situ* est principalement issue d'une zone proche du radier ou de la région nord-ouest à l'entrée du DO. Cependant, la pollution particulaire très fine très proche du fond est rarement observable au niveau du volume d'échantillonnage de la sonde *in situ*.

4.6 Discussions

Plusieurs études (e.g. Fach et al. 2009; Isel et al. 2014a,b; Lipeme Kouyi et al. 2005) ont conçu des lois de déversement (i.e. la relation H-Q) à l'aide de l'approche CFD sans les valider expérimentalement à

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2020LYSEI083/these.pdf
© [A. Claro Barreto], [2020], INSA Lyon, tous droits réservés

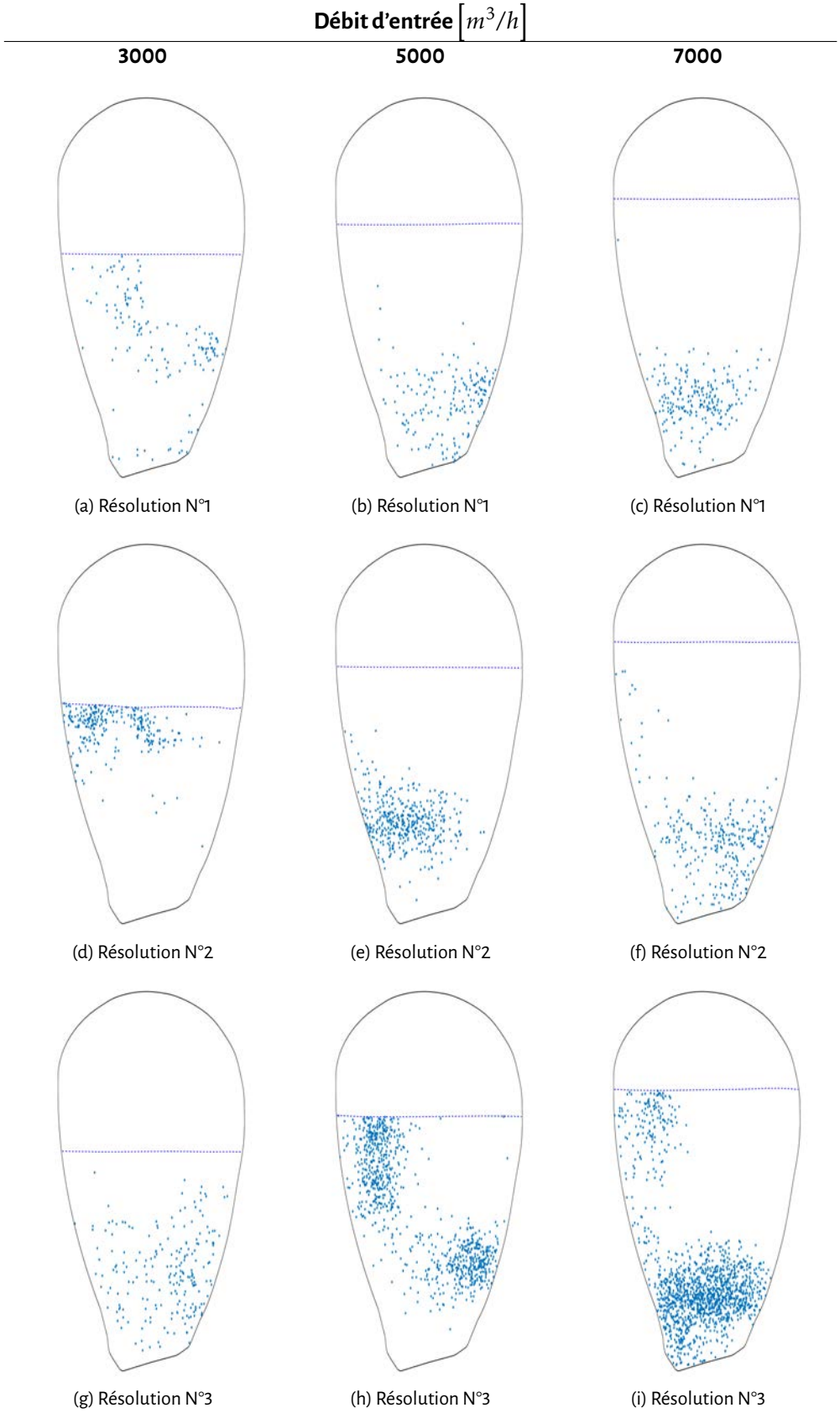


Figure 4.19 – La distribution spatiale des lignes de courant observées par la sonde de turbidité localisée à côté de la vanne guillotine du DO « Gambetta ».

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2020LYSEI083/these.pdf
© [A. Claro Barreto], [2020], INSA Lyon, tous droits réservés

cause de la complexité inhérente aux observations en site complexe. Les travaux de Van Daal-Rombouts et al. (2017) sont les premiers à valider le débit à l'aval d'un seuil frontal complexe. Cependant, l'ouvrage simulé ne correspond pas à un déversoir d'orage, car le seuil frontal est installé au sein d'un canal avec une seule entrée et une seule sortie. Les travaux présentés dans ce chapitre représentent la première étude numérique, à notre connaissance, qui démontre la capacité de la CFD à reproduire la répartition des débits et de la forme de la surface libre d'un DO complexe *in situ* en temps de pluie.

Le modèle numérique du DO a été vérifié et validé par rapport au débit déversé et la surface libre au niveau de la chambre du DO. D'une part, le débit déversé relatif $D_\mathsf{i}/D_\mathsf{E}$ en temps de pluie est reproduit numériquement avec une erreur moyenne quadratique (RMSE) égale à 7.4% et 13.5% pour les débits D_G et D_D, respectivement. Cette erreur est inférieure à l'erreur observée ($< 25\%$) sur le débit D_E à l'aval d'un seuil frontal réel et complexe simulé par Van Daal-Rombouts et al. (2017) mais supérieure à l'erreur observée ($\approx 5.4\%$) par Lipeme Kouyi (2004) dans un déversoir latéral à échelle réduite en régime fluvial. Cependant, l'erreur RMSE obtenue est inférieure à l'incertitude relative associée au débit déversé *in situ* $u(D_\mathsf{i})/D_\mathsf{i}$.

D'autre part, la surface libre dans la chambre du DO a été observée à l'aide de la hauteur d'eau H_chambre. Cette hauteur est reproduite numériquement avec une RMSE égale à $38\ mm$. Cette erreur est supérieure à l'erreur de $5\ mm$ observée dans un déversoir latéral à double parois en conditions contrôles (Lipeme Kouyi et al. 2003). Cependant, l'erreur RMSE obtenue est du même ordre de grandeur que l'incertitude de la sonde de hauteur d'eau *in situ*, $2\overline{\sigma_\mathsf{exp}} = 39\ mm$. Le modèle numérique 3D est ainsi capable de reproduire la hauteur dans la chambre du DO en temps de pluie.

Ces résultats numériques ont permis d'établir des relations de déversement H-Q avec une incertitude inférieure à celle observé pour le couplage expérimental « Hauteur-Vitesse » (Bertrand-Krajewski et al. 2000 ; Joannis et al. 2009). Ces relations numériques sont basées uniquement sur la hauteur d'eau dans la conduite amont du DO (H_Amont) et elles peuvent être utilisées en cas du dysfonctionnement des capteurs de hauteur et/ou de vitesse des conduites de décharge.

4.7 Conclusions

Le DO « Gambetta » a fait l'objet d'une étude spécifique afin de comprendre le comportement hydraulique de l'ouvrage en temps de pluie et de valider son instrumentation. Le modèle numérique 3D du DO a été vérifié par rapport aux critères de convergence et validé par rapport aux données expérimentales *in situ*. Notre étude montre pour la première fois, à notre connaissance, que l'approche CFD utilisée est capable de reproduire la répartition des débits et la hauteur d'eau dans la chambre d'un DO réel en temps de pluie, en considérant une succession de régimes permanents.

L'étude du fonctionnement hydraulique 3D de l'ouvrage a permis (i) de visualiser les régions qui contribuent aux débits déversés et conservé du DO, (ii) d'évaluer la relation probable entre la pollution observée par la sonde de turbidité *in situ* et les flux de pollutions déversés et (iii) d'établir des lois de déversement H-Q.

L'analyse qualitative des lignes de courant a permis d'observer les régions, au niveau de la section transversale à l'entrée du DO, qui alimentent chacune des sorties de l'ouvrage en fonction du débit d'entrée. Ces informations sont d'un grand intérêt pour les opérationnels qui peuvent ainsi étudier des configurations géométriques du DO qui permettent de respecter des contraintes réglementaires et/ou hydrauliques (e.g. C. He et J. Marsalek 2009).

La méthode numérique de vérification d'emplacement d'un capteur de qualité a permis de vérifier si la sonde de turbidité *in situ* existante est capable de mesurer la pollution véhiculée vers la STEP ou vers les conduites de déversement en temps de pluie. Les résultats numériques ont montré que la sonde de turbidité *in situ* mesure uniquement la pollution véhiculée vers la STEP. Notre étude a ainsi montré que la mesure de turbidité *in situ* est uniquement représentative si la pollution particulaire transportée comme un scalaire passif est distribuée uniformément sur toute la section transversale à l'entrée du DO.

Enfin, le fonctionnement hydraulique de l'ouvrage est caractérisé par des relations de déversement en temps de pluie. Une fiche technique décrivant de façon détaillée le fonctionnement hydraulique du

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2020LYSEI083/these.pdf
© [A. Claro Barreto], [2020], INSA Lyon, tous droits réservés

déversoir d'orage « Gambetta » en temps de pluie est disponible en Annexe A.

4.8 Perspectives

La géométrie de la conduite du débit « Conservé » D_C doit être modifiée : (i) la prolongation de la conduite et (ii) l'utilisation de la section transversale *in situ*. Ces modifications permettront de réduire l'écart-type de la conservation de masse du modèle numérique 3D (Section 4.3.1).

Le champ de vitesse moyenne observé au niveau de l'entrée « réelle » du DO n'est pas le même pour les trois résolutions utilisées parce que la hauteur d'eau définie à l'entrée du modèle 3D n'est pas la même entre les trois résolutions. Une nouvelle campagne de simulation est nécessaire afin d'éviter la création d'une discontinuité hydraulique importante dans la conduite « fictive ». Cette nouvelle campagne devrait simuler des débits d'entrée D_E supérieurs à $7000\,m^3/h$ afin d'étudier toute la gamme expérimentale des débits déversés observés jusqu'à présent.

La modification de la géométrie de la conduite du débit « Conservé » D_C et la nouvelle campagne de mesure permettront de réduire les incertitudes des résultats numériques sur le débit déversé et la hauteur d'eau dans la chambre du DO en temps de pluie.

Enfin, un modèle de transport particulaire pourra être utilisé pour comprendre la dispersion de la pollution particulaire au sein du DO « Gambetta » en temps de pluie. Cette étude sur la pollution particulaire permettra d'évaluer le flux de pollution total déversé et d'apprécier la représentativité des mesures réalisées à l'aide de la sonde de turbidité *in situ* existante à l'amont de la vanne.

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2020LYSEI083/these.pdf
© [A. Claro Barreto], [2020], INSA Lyon, tous droits réservés

Modélisation des écoulements turbulents avec la méthode de Boltzmann sur réseaux

Who sees the future? Let us have free scope for all directions of research; away with dogmatism, either atomistic or anti-atomistic!

Lectures on Gas Theory - 1896
"Ludwig Boltzmann" translated by
Stephen George Brush

5.1 Introduction

Comme indiqué dans les Chapitres 3 et 4, le fonctionnement hydrodynamique d'un déversoir d'orage *in situ* est généralement étudié à l'aide de la mécanique des fluides numérique (CFD, en anglais). L'approche CFD est utilisée en milieu académique et industriel à cause de la complexité des écoulements en temps de pluie (e.g. Lipeme Kouyi et al. 2011 ; Mignot et al. 2012) et de l'inaptitude de ces ouvrages à une métrologique complète et variée (Bertrand-Krajewski et al. 2000). Parmi les méthodes les plus utilisées dans l'approche CFD et indiqué dans le Chapitre 4, la méthode des volumes finis est la méthode de prédilection pour simuler les écoulements turbulents à surface libre rencontrés dans les ouvrages de dérivation, tel que les déversoir d'orage (e.g. Isel et al. 2014b ; Lipeme Kouyi 2004 ; MENTOR 2011). En particulier, dans le cadre du présent projet de recherche, cette méthode a été employée pour simuler l'écoulement d'un déversoir latéral à échelle réduite (Chapitre 3) et d'un déversoir d'orage réel (Chapitre 4).

Malgré l'ample utilisation de la méthode de volumes finis, ses deux principaux désavantages sont : (i) la résolution de l'équation de Poisson pour les écoulements incompressibles (e.g. l'eau) augmente considérablement le temps de calcul et (ii) la conception d'un maillage adapté aux contraintes géométriques et hydrauliques d'intérêt. En particulier, la phase de discrétisation spatiale (i.e. le maillage) est l'une des phases qui consomment le plus de temps du projet de simulation numérique (e.g. Maté Marín et al. 2018).

Depuis les années 2000, la méthode de Boltzmann sur réseau (LBM, en anglais) est devenue une alternative prometteuse capable de simuler des écoulements turbulents industriels (nombre de Reynolds $\mathrm{Re} \geq 10^3$ - Smits et Marusic 2013 ; Sauro Succi 2001). La LBM permet de résoudre les équations de Navier-Stokes pour des écoulements faiblement compressibles (i.e. nombre de Mach faibles - Krüger et al. 2017 ; Sauro Succi 2001). Cette méthode résout numériquement l'équation de transport de Boltzmann à l'échelle mésoscopique, c'est-à-dire, entre les échelles micro- and macroscopiques. Les équations de Navier-Stokes sont obtenues suite à une expansion de Chapman-Enskog de l'équation de Boltzmann sous certaines contraintes : conservation de la masse et de la quantité de mouvement (Krüger et al. 2017 ; Sauro Succi 2001).

Les avantages de cette méthode par rapport à la méthode des volumes finis sont : (i) l'équation de Poisson, équation non linéaire, ne doit pas être résolue pour conserver la masse dans le système (Huang

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2020LYSEI083/these.pdf
© [A. Claro Barreto], [2020], INSA Lyon, tous droits réservés

et al. 2015 ; Nourgaliev et al. 2003), (ii) les principaux calculs sont locaux ce qui permet une bonne parallélisation du calcul (Krüger et al. 2017 ; Sauro Succi 2001), et (iii) elle est préférable pour des écoulements non stationnaires car l'approche est explicitement dépendante du temps. En outre, la précision de la méthode est de deuxième ordre en temps et en espace (S. Chen et Doolen 1998).

La LBM a été utilisée tant pour des simulations directes (DNS, en anglais) que pour des simulations aux grandes échelles (LES, en anglais) des écoulements confinés. Les principaux travaux du couplage LBM au modèle de turbulence LES sont vers la reproduction de cas de référence (Jahanshaloo et al. 2013) comme (i) le tourbillon de Taylor-Green et (ii) l'écoulement turbulent bi-périodique. La plupart des travaux avec le modèle LES sont des simulations du type « wall-resolved », c'est-à-dire, la couche visqueuse est complètement résolue numériquement (e.g. Jafari et Rahnama 2011 ; Ming et al. 2012 ; Premnath et al. 2009 ; Suga et al. 2015 ; Zhuo et Zhong 2016). Ces travaux arrivent à reproduire l'écoulement moyen et les contraintes de Reynolds similaires aux données DNS (e.g. Kim et al. 1987). Cependant, les écoulements simulés correspondent à des nombres de Reynolds faibles à raison du maillage nécessaire pour les simulations LES du type « wall-resolved ». Malaspinas et Sagaut (2014) sont les premiers à simuler le canal bi-périodique pour des grands nombres de Reynolds (i.e. $\mathrm{Re}_\tau \equiv u_\tau L/\nu = 2000$, avec u_τ la vitesse de cisaillement) à l'aide d'une loi de paroi. Le premier nœud du maillage utilisé est situé dans la zone logarithmique grâce à l'utilisation des lois de parois. Le profil vertical de vitesse longitudinale obtenu est similaire aux données DNS de Hoyas et Jiménez (2006).

Concernant les écoulements en canal fermé (i.e. en charge), différents travaux scientifiques ont correctement simulé les courants secondaires pour des sections rectangulaires et circulaires (e.g. Pattison et al. 2009 ; Suga et al. 2015 ; Trias et al. 2013). Les écoulements simulés correspondent à des nombres de Reynolds faibles, Re_τ entre 300 à 400, car toutes les simulations sont du type LES « wall-resolved ». Concernant les écoulements à surface libre dans un canal rectangulaire, les travaux de Fernandino et al. (2009) sont les premiers à des nombres de Reynolds faibles ($\mathrm{Re}_\tau \approx 140$). L'écoulement moyen et les fluctuations turbulentes obtenus sont similaires aux données DNS de Gavrilakis (1992)) et aux données LES de Broglia et al. (2003). D'autres travaux ont simulé des écoulements turbulents à surface libre, comme par exemple la rupture des barrages, la montée d'une bulle d'air, etc. (e.g. Dinesh Kumar et al. 2019 ; Janßen et Krafczyk 2011b). Cependant, les champs de vitesse et des contraintes de Reynolds des écoulements étudiés ne sont pas comparés ou validés aux mesures expérimentales.

Dans le cadre du présent projet de recherche, la LBM est testée pour des écoulements turbulents à surface libre. Dans un premier temps, cette méthode est validée pour un canal 2D à surface libre et en régime laminaire $\mathrm{Re} = 300$ (Claro Barreto et al. 2016). La surface libre est simulée avec une condition de non glissement via l'approche de réflexion spéculaire (Sauro Succi 2001) et les conditions limites d'entrée et sortie correspondent à une condition de périodicité afin de simuler un canal infini. Le profil vertical de vitesse est similaire au profil théorique de poiseuille.

Ensuite, le modèle LES est couplé à la LBM pour simuler des écoulements turbulents au sein d'un canal bi-périodique (i.e. $\mathrm{Re}_\tau = 2000$; Claro Barreto et al. 2017a). Ce canal est simulé avec l'opérateur de collision de Bhatnagar et al. (1954) couplée au modèle de turbulence « Shear Improved Smagorinsky Model » (SISM, Lévêque et al. 2007) et à la loi de paroi de Musker (1979). La loi de parois est implémentée en se basant sur l'approche proposée par Malaspinas et Sagaut (2014). Le profil vertical de la vitesse moyenne de l'écoulement est similaire aux données DNS de Hoyas et Jiménez (2006).

Puis, la méthodologie développée dans Claro Barreto et al. (2017a) est appliquée pour un canal rectangulaire de longueur infinie (Claro Barreto et al. 2017b). Une condition de périodicité est appliquée dans le sens principal (« streamwise », en anglais) pour les conditions limites d'entrée et sortie. Le profil vertical de la vitesse longitudinale est similaire aux travaux de Shi et al. (1999). Cependant, le phénomène « dip » sur le profil de vitesse n'est pas obtenu dû à la condition limite de glissement utilisée comme observé par Fernandino et al. (2009).

Enfin, les derniers travaux scientifiques ont été réalisés en collaboration étroite avec le Dr. Mathias J. Krause et le doctorant Ing. Marc Haussmann du groupe de recherche de la méthode Boltzmann sur réseaux à l'Institut de Techonologie de Karlsruhe (KIT, en anglais). Le fruit de cette collaboration a fait l'objet d'une publication internationale (avec A. Claro Barreto comme second auteur) dans un journal

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2020LYSEI083/these.pdf
© [A. Claro Barreto], [2020], INSA Lyon, tous droits réservés

avec comité de lecture. Elle s'intitule « Large-Eddy simulation coupled with wall models for turbulent channel flows at high Reynolds numbers with a lattice Boltzmann method - Application to Coriolis mass flowmeter » dans le journal « Computers and Mathematics with Applications » (Haussmann et al. 2019). Le lecteur intéressé pour cette publication est invité à cliquer ce *lien* ou chercher sur internet l'adresse https ://doi.org/10.1016/j.camwa.2019.04.033.

Un résumé et les principaux résultats des ces travaux précédents (i.e. Haussmann et al. 2019) sont présentés sommairement dans ce chapitre afin de montrer la capacité de l'opérateur de collision SRT (Bhatnagar et al. 1954) à reproduire les champs de vitesse et des contraintes de Reynolds des écoulements turbulents confinés avec des maillages adaptés au milieu industriel.

5.2 Matériel et Méthodes

Le cas d'étude discuté dans cette section correspond à l'écoulement turbulent confiné bi-périodique de Haussmann et al. (2019). Les lecteurs intéressés par la reproduction de la perte de charge au sein d'un débitmètre massique Coriolis à l'aide la méthode LBM sont invités à consulter la section 4 de Haussmann et al. (2019).

5.2.1 Le canal bi-périodique

La canal bi-périodique présenté dans la Fig. 5.1 correspond à deux plaques parallèles horizontales (plane XZ) avec des conditions de périodicité dans le sens principal (l'axe X) et transversal (l'axe Z) de l'écoulement. Ce canal est simulé pour trois écoulements turbulents : $Re_\tau = 1000$, $Re_\tau = 2000$ et $Re_\tau = 5200$. Le nombre de Reynolds du cisaillement est définit $Re_\tau = Hu_\tau/\nu$; avec H la mi-hauteur du canal (Fig. 5.1), u_τ la vitesse de cisaillement et ν la viscosité cinématique du fluide. Ces trois écoulements correspondent à un nombre de Reynolds basé dans la vitesse moyenne ($\overline{u}$), $Re = 2H\,\overline{u}/\nu$ entre 50 000 et 250 000.

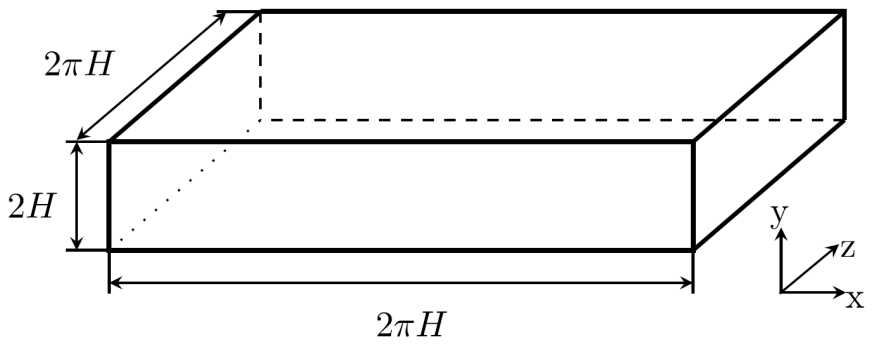


Figure 5.1 – Schéma 3D du canal bi-périodique avec conditions de périodicité dans les sens principal (l'axe X) et transversal (l'axe Y). La mi-hauteur du canal $H = 1\ m$, d'après Haussmann et al. (2019).

L'écoulement turbulent dans ce canal est simulé à l'aide de trois différentes résolutions : (i) grossier $N = 10$, (i) intermédiaire $N = 20$, et (i) fin $N = 40$; avec N le nombre de nœuds dans la mi-hauteur H du canal. Ces trois résolutions correspondent à une distance non-dimensionnelle y^+ égale à 50, 25 et 12,5, respectivement. La distance non-dimensionnelle entre la paroi et le nœud $y^+ = y\overline{u_\tau}/\nu$, avec y la distance entre le nœud et la paroi ; $\overline{u_\tau} = \sqrt{\overline{\tau_w}/\rho}$ la vitesse de cisaillement et $\overline{\tau_w}$ la contrainte de cisaillement à la paroi.

5.2.2 La méthode de Boltzmann sur réseaux

Le domaine de calcul (Fig. 5.1) est discrétisé spatialement à l'aide de l'arrangement du réseau D3Q19 qui utilise 19 directions discrètes de vitesse dans un domaine à 3 dimensions spatiales (voir Fig. 5.2). L'équa-

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2020LYSEI083/these.pdf
© [A. Claro Barreto], [2020], INSA Lyon, tous droits réservés

tion discrète de Boltzmann Eq. 5.1 correspond à celle proposée par Z. Guo et al. (2002b) afin de prendre en compte les forces externes du volume F_i (e.g. la gravité).

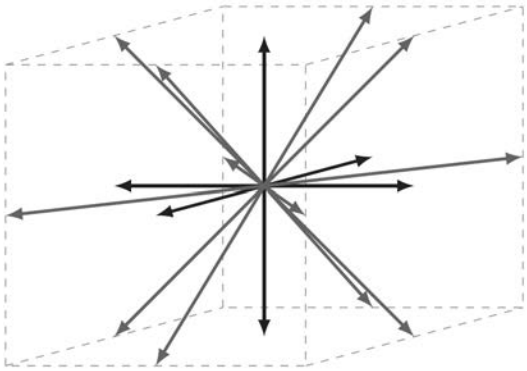


Figure 5.2 – L'arrangement à 3 dimensions spatiales avec 19 vecteurs de vitesse discrète, d'après Viggen (2014). Les vecteurs en noir correspondent aux nœuds les plus proches du nœud central

.

$$f_i\left(t+\Delta t, \mathbf{x}+\mathbf{c}_i\Delta t\right) = f_i\left(t,\mathbf{x}\right) + \Omega_i + \Delta t\, F_i(\rho, \mathbf{u}^*) \tag{5.1}$$

avec $\mathbf{x}$ le vecteur de position ; Δt le pas de temps ; $\mathbf{c}_i$ la vitesse discrète. L'opérateur de collision Ω_i est approximé par le modèle au temps de relaxation unique (SRT, en anglais) proposé par Bhatnagar et al. (1954), Eq. 5.2.

$$\Omega_i = -\frac{1}{\tau}\left(f_i\left(t,\mathbf{x}\right) - f_i^{\mathrm{eq}}\left(\rho, \mathbf{u}^*\right)\right), \tag{5.2}$$

avec f_i^{eq} la fonction de distribution discrète de Maxwell-Boltzmann ; et τ le temps de relaxation de la distribution de particules f_i vers l'équilibre f_i^{eq}. La conservation de la masse et de la quantité de mouvement sont respectées par les propriétés inhérentes de cet opérateur de collision. La distribution de particules à l'équilibre f_i^{eq} et la force externe de volume F_i sont définies par

$$f_i^{\mathrm{eq}}\left(\rho, \mathbf{u}^*\right) = \rho\omega_i\left[1 + \frac{\mathbf{c}_i\cdot\mathbf{u}^*}{c_s^2} + \frac{(\mathbf{c}_i\mathbf{c}_i - c_s^2\mathbf{I}):\mathbf{u}^*\mathbf{u}^*}{2c_s^4}\right] \tag{5.3}$$

$$F_i\left(\rho, \mathbf{u}^*\right) = \rho\omega_i\left(1 - \frac{1}{2\tau}\right)\left[\frac{\mathbf{c}_i - \mathbf{u}^*}{c_s^2} + \frac{(\mathbf{c}_i\left(\mathbf{c}_i\cdot\mathbf{u}^*\right)}{2c_s^4}\right]\cdot\mathbf{g} \tag{5.4}$$

avec ω_i le poids de chaque distribution f_i obtenu à l'aide d'une quadrature de Gauss-Hermite (X. He et Luo 1997 ; Shan et al. 2006) ; $c_s = 1/\sqrt{3}$ la vitesse du son dans le réseau ; et $\mathbf{g}$ l'accélération du volume externe. La densité ρ et la vitesse $\mathbf{u}^*$ macroscopiques sont définies par les Eq. 5.5 et Eq. 5.6, respectivement.

$$\rho = \sum_{i=0}^{q-1} f_i \tag{5.5}$$

$$\mathbf{u}^* = \sum_{i=0}^{q-1}\left(\mathbf{c}_i f_i\right) + \frac{1}{2}\mathbf{F} \tag{5.6}$$

L'Eq. 5.1 est résolue en deux phases : (i) la collision et (ii) la convection. La phase de collision, Ω_i (Eq. 5.2), est représentée par la partie gauche de la Fig. 5.3. Le phase de convection est représentée par la partie droite de la Fig. 5.3. A noter que la distribution de particules f_i de chaque nœud est reconstruite à l'aide des nœuds voisins (flèches grises de la Fig. 5.3).

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2020LYSEI083/these.pdf
© [A. Claro Barreto], [2020], INSA Lyon, tous droits réservés

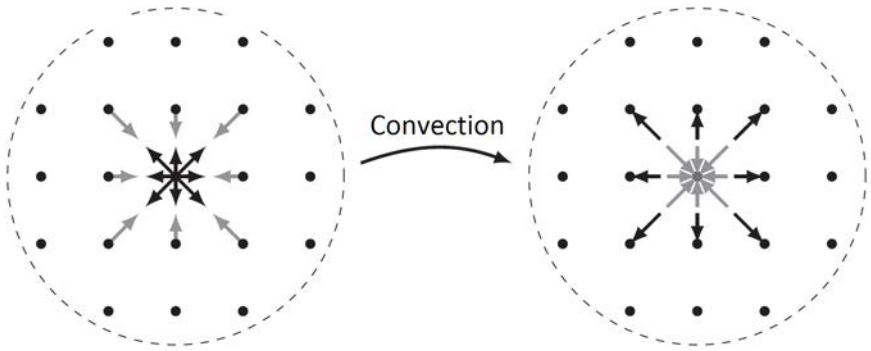


Figure 5.3 – Principe de collision et convection de la méthode Boltzmann sur réseaux. Les distributions de particules f_i (en noir) font collision au sein du nœud (à gauche) et ensuite elles sont diffusées vers les nœuds voisins (à droit). Adapté de Viggen (2014).

5.2.3 La simulation de la turbulence

La turbulence de l'écoulement est approximée par l'approche de simulation des grandes structures de la turbulence (LES, en anglais). Le modèle LES proposé par Smagorinsky (1963) est utilisé en se basant sur les travaux de Malaspinas et Sagaut (2014). La forte dissipation proche des parois immobiles, dans le modèle de Smagorinsky (1963), est limitée à l'aide d'une fonction d'atténuation de la viscosité turbulente (Van Driest 1956).

5.2.4 L'écoulement proche de parois

L'écoulement proche paroi est simulé à l'aide des lois de paroi logarithmique (Musker 1979), de puissance (Werner et Wengle 1993) ou d'une combinaison des deux (L. Schmitt 1988). La vitesse fournie par la loi de paroi au niveau du nœud adjacent à la paroi (i.e. la condition limite) est calculée à l'aide du nœud voisin selon la procédure proposée par Malaspinas et Sagaut (2014). La procédure de Malaspinas et Sagaut (2014) implique une condition de vitesse du type Dirichlet au niveau des parois fixes du domaine de calcul.

La condition Dirichlet est imposée à l'aide de l'approche du nœud mouillé (e.g. Krüger et al. 2017). Cette approche reconstruit la distribution f_i à l'aide de la somme de deux distributions : (i) la distribution à l'équilibre f_i^{eq} et (ii) la distribution hors équilibre $f^{(1)}$. La distribution à l'équilibre f_i^{eq} est une fonction de la densité et de la vitesse macroscopiques dans le nœud adjacent à la paroi. La distribution hors équilibre $f^{(1)}$ est plus compliquée à calculer car elle dépend des gradients locaux du champs de vitesses. La distribution $f_i^{(1)}$ est reconstruite à l'aide de deux méthodes : (i) l'approche d'équilibre qui suppose $f^{(1)} = 0$ (Latt et al. 2008 ; Mohamad et Succi 2009) et (ii) l'approche d'extrapolation qui approxime $f^{(1)}$ à l'aide d'un schéma d'extrapolation d'ordre zéro (Z. Guo et al. 2002a ; Zhao-Li et al. 2002).

5.3 Résultats

Le modèle SRT couplé (i) au modèle de turbulence LES et (ii) aux lois de parois est comparé aux simulations numériques directes (DNS, en anglais) de Lee et Moser (2015). La capacité du modèle SRT est validée vis-à-vis des statistiques turbulentes de 1er et 2ième ordre : (i) la vitesse principale $\overline{u}$, (ii) la contrainte normale de Reynolds $\overline{u'u'}$ et (iii) la contrainte de cisaillement de Reynolds $\overline{u'v'}$.

5.3.1 L'influence du calcul de $f^{(1)}$ sur les statistiques turbulentes

La vitesse principale $\overline{u}$ proche de la paroi est mieux approchée par la méthode d'extrapolation de $f^{(1)}$ que par la méthode d'équilibre (i.e. $f^{(1)} = 0$). Si le nœud voisin de la paroi se trouve au-dessous de

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2020LYSEI083/these.pdf
© [A. Claro Barreto], [2020], INSA Lyon, tous droits réservés

la région logarithmique (i.e. $y^+ < 30$), les méthodes d'extrapolation et d'équilibre ne sont pas capables d'approcher correctement la vitesse $\overline{u}$ du nœud voisin à la paroi.

Les contraintes normales $\overline{u'u'}$ et de cisaillement $\overline{u'v'}$ sont mieux approchées par la méthode d'extrapolation que la méthode d'équilibre si la distance non-dimensionnelle du nœud voisin à la paroi $y^+ \leq 25$. Si la distance $y^+ > 25$, la méthode d'équilibre permet d'obtenir des profils des contraintes $\overline{u'u'}$ et $\overline{u'v'}$ plus stables grâce au filtrage de la distribution $f^{(1)}$ (i.e. $f^{(1)} = 0$).

5.3.2 L'influence des lois de parois sur les statistiques turbulentes

Les lois de parois de Musker (1979), L. Schmitt (1988) et Werner et Wengle (1993) sont capables d'approcher les profils de vitesse $\overline{u}$ et des contraintes $\overline{u'u'}$ et $\overline{u'v'}$ si le nœud voisin à la paroi se situe dans la région logarithmique (i.e. $y^+ > 30$). Si le nœud voisin à la paroi se situe dans la zone tampon (i.e. $5 < y^+ < 30$), la loi de paroi de Werner et Wengle (1993) surestime la contrainte normale $\overline{u'u'}$ à cause de l'erreur inhérente à cette loi dans la région tampon. Par contre, les lois de paroi de Musker (1979) et L. Schmitt (1988) sont capables d'approcher les profils de vitesse $\overline{u}$ et des contraintes $\overline{u'u'}$ et $\overline{u'v'}$ car elles ont été conçues pour être appliquées dans les trois régions de l'écoulement.

5.3.3 L'applicabilité de l'opérateur SRT pour des écoulements turbulents

La méthode d'extrapolation de $f^{(1)}$ et la loi de paroi de Musker (1979) ont été utilisées pour simuler l'écoulement turbulent bi-périodique à $\mathrm{Re}_\tau = 2000$ et $\mathrm{Re}_\tau = 5200$ car la combinaison de ces deux modèles donnent les meilleurs résultats, comme démontré dans les Sections 5.3.1 et 5.3.2.

La vitesse $\overline{u}$ est correctement approchée pour ces deux nombres de Reynolds Re_τ dans les trois résolutions utilisées ($y^+ = 12,5 - 25 - 50$). La contrainte normale $\overline{u'u'}$ est approchée correctement seulement pour la résolution la plus fine ($y^+ = 12,5$) tandis que les deux autres résolutions ($y^+ = 25$ et $y^+ = 50$) la surestiment. Le profil vertical de la contrainte de cisaillement $\overline{u'v'}$ est (i) incorrect pour la résolution grossier ($y^+ = 50$), (ii) surestimé par la résolution moyenne ($y^+ = 25$) et (iii) assez correcte pour la résolution fine ($y^+ = 25$). Les résultats numériques ont montré une convergence du maillage (i.e. « grid convergence ») des contraintes de Reynolds $\overline{v'v'}$, $\overline{w'w'}$ et $\overline{u'v'}$ pour $\mathrm{Re}_\tau = 2000$ et $\mathrm{Re}_\tau = 5200$.

5.4 Discussion

L'opérateur de collision SRT est capable de reproduire les champs de vitesses et les contraintes de Reynolds des écoulements turbulents confinés à fort nombre de Reynolds s'il est couplé (i) à l'approche de turbulence LES et (ii) à des lois de paroi. Les contraintes de Reynolds sont correctement approchées si le nœud voisin à la paroi est localisé à $y^+ \leq 12.5$. En particulier, la loi de paroi de Musker (1979) couplée à l'approche d'extrapolation (Z. Guo et al. 2002a ; Zhao-Li et al. 2002) permet d'approcher assez bien les champs de vitesses et des contraintes de Reynolds pour des maillages relativement grossiers et aptes au milieu industriel.

5.5 Conclusions

La méthode Boltzmann sur réseau (LBM, en anglais) est capable de simuler des écoulements turbulents confinés à fort nombre de Reynolds ($Re \geq 25\,000$). En particulier, l'opérateur de collision SRT couplé (i) au modèle de turbulence LES et (ii) à des lois de paroi est capable de reproduire assez bien les champs de vitesse et des contraintes de Reynolds avec des maillages « industriels » (i.e. aptes pour le milieu industriel).

Malgré la capacité à simuler correctement des écoulements turbulents confinés à fort nombre de Reynolds, le développement scientifique de la LBM est arrêté lors de la deuxième année du projet pour deux raisons : (i) l'état de maturité de conditions limites adéquates aux écoulements à forts nombres de Reynolds (ii) le développement informatique nécessaire à faire dans le logiciel gratuit utilisé.

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2020LYSEI083/these.pdf
© [A. Claro Barreto], [2020], INSA Lyon, tous droits réservés

Il est connu dans la communauté LBM que les conditions limites jouent un rôle essentiel dans la stabilité et la précision de la méthode. En particulier, la simulation des écoulements à fort nombre de Reynolds avec des maillages « industriels » est spécialement problématique en raison de la production des ondes acoustiques non-physiques au niveau des conditions limites. Les travaux de Hu et al. (2017) et Wissocq et al. (2017) ont testé et validé des conditions limites du type Dirichlet-Neumann pour des écoulements turbulents entre $\mathrm{Re} = 7500$ à $\mathrm{Re} = 10^5$, respectivement. Cependant, les maillages utilisés dans ces travaux sont très denses parce que Hu et al. (2017) et Wissocq et al. (2017) n'ont pas utilisé un modèle de turbulence. Ainsi, il manque une validation des conditions limites d'entrée (e.g. le débit massique et la vitesse) et de sortie (e.g. la pression) pour des écoulements turbulents à fort nombre de Reynolds ($\mathrm{Re} > 10^4$) avec des maillages « industriels ».

Le logiciel gratuit choisit, dans le cadre du présent projet de recherche, est codé dans le langage de programmation C++. Ce logiciel est développé et animé pour une communauté très active, car il s'agit principalement des ingénieurs en préparation d'un projet de doctorat du groupe de recherche du Dr. Mathias Krause au KIT. Cependant, les principaux désavantages du logiciel sont le manque d'une interface utilisateur graphique et de tutoriels plus pédagogiques. Ces deux éléments font que la prise en main et la maîtrise du logiciel prennent un temps considérable pour des nouveaux utilisateurs avec une connaissance limité du langage de programmation C++. En effet, près de la moitié du temps du projet de recherche a été consacrée à simuler des écoulements turbulents confinés (i) avec des conditions de périodicité pour l'entrée et la sortie et (ii) avec un traitement de la surface libre via une paroi avec glissement. En outre, mon niveau de connaissances du langage de programmation C++ (à la moitié du projet) ne permettait pas d'implémenter les différents modèles théoriques de manière efficace et rapide pour respecter la durée du projet de recherche. Ainsi, le temps d'implémentation, simulation et validation des écoulements turbulents à surface libre chargés en sédiments avec la LBM a été jugé hors de la portée du présent projet de recherche.

Afin de répondre aux objectifs industriels du projet de recherche, on a choisi de revenir sur la méthode classique des volumes finis pour étudier l'hydrodynamique des déversoirs latéraux à échelle réduite (Chapitre 3) et réelle (Chapitre 4). En effet, cette méthode a fait l'objet de plusieurs études scientifiques dans le domaine de l'assainissement (e.g. Isel et al. 2014b ; Lipeme Kouyi 2004 ; MENTOR 2011) et elle est maîtrisée au sein du laboratoire DEEP pour étudier le comportement hydraulique des ouvrages d'assainissement (e.g. Claro Barreto et al. 2015 ; Lipeme Kouyi et al. 2005 ; Maté Marín et al. 2018 ; Yan 2013 ; Zhu et al. 2016).

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2020LYSEI083/these.pdf
© [A. Claro Barreto], [2020], INSA Lyon, tous droits réservés

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2020LYSEI083/these.pdf
© [A. Claro Barreto], [2020], INSA Lyon, tous droits réservés

Deuxième partie

Le transport particulaire au sein d'un déversoir latéral de décharge

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2020LYSEI083/these.pdf
© [A. Claro Barreto], [2020], INSA Lyon, tous droits réservés

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2020LYSEI083/these.pdf
© [A. Claro Barreto], [2020], INSA Lyon, tous droits réservés

La répartition massique au sein d'un déversoir latéral à échelle réduite

Pour ébranler une hypothèse, il ne faut quelquefois que la pousser aussi loin qu'elle peut aller.

« Denis Diderot »

6.1 Introduction

Les travaux menés au niveau du Chapitre 3 ont permis d'étudier en détail l'hydrodynamique d'un déversoir latéral en régime fluvial. On s'intéresse maintenant à étudier le transport en suspension des polluants particulaires au sein de ces ouvrages. Ce phénomène sera étudiée en conditions contrôlées à l'aide de la répartition massique au sein du déversoir latéral du Chapitre 3.

D'après la littérature (Hager 2010 ; Isel et al. 2014a,b ; Lipeme Kouyi 2004), au niveau des réseaux d'assainissement unitaires la pollution déversée en temps de pluie est issue de la fraction de sédiments en suspension, écrêtée par les déversoir d'orage qui sont pour la plupart des déversoirs latéraux ou frontaux, et alors que la partie de charriage reste au sein du réseau. Au sein de ces ouvrages, le déversement se produit dès que la hauteur d'eau dépasse la hauteur du seuil et que les sédiments transportés en suspension sont déversés vers l'exutoire de l'ouvrage (i.e. le milieu naturel). A noter que le transport de sédiments en suspension en réseau unitaire est évalué à environ 80% du flux massique total en temps de pluie (Ashley et al. 2004).

La pollution en suspension est le mélange des dépôts remis en suspension et de la pollution issue du ruissellement par temps de pluie (Bersinger et al. 2015 ; Gasperi et al. 2010 ; Gromaire-Mertz 2000 ; Gromaire et al. 1997, 2001 ; Hannouche et al. 2014). Différentes études ont montré que la remise en suspension des dépôts du temps sec du réseau d'assainissement représente la principale source de pollution organique (biodégradable) du temps de pluie (e.g. Gasperi et al. 2010 ; Gromaire et al. 2001). Des études expérimentales ont caractérisé la pollution en suspension au sein de réseaux unitaires en temps de pluie (e.g. Gasperi et al. 2010, 2012b ; Gromaire-Mertz et al. 1998 ; Gromaire et al. 1997, 2001 ; A. Hannouche et al. 2014 ; Joannis et al. 2015). Le lecteur intéressé par la pollution véhiculée au sein de réseaux séparatifs est invité à consulter les travaux de Zgheib et al. (2012), Ma et al. (2018), et Beckers et al. (2018).

Approche théorique

Le transport de sédiments en suspension a fait l'objet de plusieurs études expérimentales et numériques. Les principaux travaux sur des modèles analytiques sont basés sur le cas d'un écoulement confiné, uniforme ($\partial/\partial x = 0$) et stationnaire ($\partial/\partial t = 0$) (Dey et al. 2018 ; Kaczmarek et al. 2019). Ces modèles ont permis d'identifier les différents mécanismes physiques qui gouvernent le transport en suspension (e.g. Pal et Ghoshal 2017) : (i) le flux ascendant de sédiments dû à la diffusion turbulente, (ii) la décantation

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2020LYSEI083/these.pdf
© [A. Claro Barreto], [2020], INSA Lyon, tous droits réservés

due à la force de pesanteur, (iii) le phénomène de décantation encombrée, (iv) les courants secondaires, (v) la force de flottation induite par le fluide et (vi) le gradient des contraintes normales de Reynolds.

A noter que la présence des sédiments en suspension peut diminuer la vitesse de l'écoulement (e.g. Z. Li et al. 2015 ; Muste et al. 2009), réduire ou augmenter l'énergie de l'écoulement à cause du travail fourni par ce dernier pour maintenir les sédiments en suspension (e.g. Ali et Dey 2016, cité par Dey et al. 2018) et diminuer la constante de Von Karman κ (e.g. Best et al. 1997 ; Nezu et Azuma 2004, cités par Nezu 2005).

Également, l'analyse dimensionnelle du transport de particules en suspension a permis d'établir des nombres adimensionnels pour définir des profils de concentration (e.g. Hunt 1954 ; Rouse 1937 ; van Rijn 1984 ; Zagustin 1968) et des seuils de suspension (e.g. Bagnold 1966 ; Cheng et Chiew 1999 ; Garcia 1999). Les deux principaux nombres adimensionnels sont (i) le nombre de Rouse $Z = \omega_s/\beta\kappa u_\star$ et (ii) le nombre de Shields $\Theta = \rho u_\star/g\Delta d_p$. Les nombres de Rouse Z et de Shields Θ évaluent le rapport entre la vitesse de chute de la particule ω_s et la vitesse de frottement $u_\star$, avec $\omega_s \equiv g\Delta d_p$ dans le nombre de Shields. Ce rapport représente l'équilibre entre l'entraînement des particules par la diffusion turbulente ($u_\star$) et la tendance de déposition de particules due à la gravité (ω_s).

Les modèles analytiques du transport de sédiments en suspension précédemment cités ont permis d'étudier ce phénomène pour des configurations relativement simplifiées (i.e. l'écoulement permanent au sein d'un canal prismatique). Cependant, le transport de sédiments en suspension au sein d'un déversoir d'orage s'avère plus complexe en raison des structures tridimensionnelles de l'écoulement et des caractéristiques hétérogènes des sédiments du réseaux d'assainissement en temps de pluie (e.g. Lipeme Kouyi et al. 2011 ; Mignot et al. 2012, 2014). Des études expérimentales et numériques se sont avérées nécessaires pour comprendre le transport et la répartition massique de sédiments au sein des ouvrages de dérivation. L'approche adimensionnelle reste l'outil essentiel des études expérimentales afin d'assurer que les particules utilisées dans les modèles (à échelle réduite) soient représentatives de celles du prototype.

Études expérimentales

La plupart des études expérimentales sur la répartition de la pollution au sein des ouvrages de dérivation correspondent à des modèles à échelle réduite en conditions contrôlées. L'étude des ouvrages réels est très rare à cause de contraintes opérationnelles, d'accès, et de sécurité (e.g. V. Schmitt 2013). Les ouvrages de dérivation étudiés à l'aide des modèles à échelle réduite correspondent à des séparateurs hydrodynamiques (Hedges et al. 1993 ; Luyckx et al. 1998), séparateurs à effet vortex (Van Poucke et al. 1970 ; Weiß 1997 ; Weiß et Michelbach 1996, d'après Luyckx et al. (2002)), déversoirs frontaux (Kehrwiller 1995, cités par Dufresne et al. (2009a)) et déversoirs latéraux (Kehrwiller 1995 ; Luyckx et al. 1999, d'après Dufresne et al. (2009a)).

Luyckx et al. (1999) ont étudié l'efficacité de rétention de déversoirs latéraux à l'aide de 185 différentes configurations géométriques. Ils ont établi une loi empirique d'efficacité (i.e. le pourcentage de rétention) en fonction de la géométrie, du débit d'entrée et des caractéristiques des sédiments. Kehrwiller (1995, cité par Dufresne et al. 2009a), ont étudié également l'efficacité de déversoirs latéraux simples et doubles à l'échelle réduite (échelle géométrique de 3:40) à l'aide des particules inertes (polystyrol P423) de masse volumique égale à 1024 Kg/m^3 et diamètre inférieur ou égal à $200\,\mu m$. Ces particules inertes ont été choisies selon une similitude de Froude sur la vitesse de chute des sédiments réels de la ville de Bad Mergentheim (Allemagne). L'efficacité des ouvrages dans les travaux cités précédemment est évaluée à l'aide d'un bilan massique des sédiments décantés, déversés et conservés pour chacune des configurations étudiées.

Études numériques

Au niveau numérique, le transport de sédiments en suspension au sein des ouvrages de dérivation peut être simulé par deux principales approches (Van Wachem et Almstedt 2003) : Eulérienne-Eulérienne et Eulérienne-Lagrangienne. L'approche Eulérienne-Eulérienne simule le milieu continu et les sédiments comme des milieux continus et les équations de Navier-Stokes sont résolues pour chacune des phases.

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2020LYSEI083/these.pdf
© [A. Claro Barreto], [2020], INSA Lyon, tous droits réservés

Les deux phases sont couplées à l'aide des coefficients de transfert de masse, quantité de mouvement et énergie. L'approche Eulérienne-Lagrangienne simule l'écoulement depuis un référentiel Eulérien et le transport des particules avec une approche Lagrangienne (Brennen 2005 ; Van Wachem et Almstedt 2003).

La répartition massique de sédiments au sein des ouvrages de dérivation en réseau d'assainissement est couramment simulée à l'aide de l'approche Eulérienne-Lagrangienne (e.g. Dufresne et al. 2009a,b ; Isenmann 2016 ; Lipeme Kouyi 2004 ; Yan 2013). Le transport de particules est simulé à l'aide du modèle de phase discrète (DPM, en anglais) parce que la fraction volumique *in situ* est inférieure à 10% (e.g. Isenmann 2016 ; Lipeme Kouyi 2004 ; Yan 2013). A ce niveau de concentration volumique, les collisions entre particules sont statistiquement négligeables. Si les collisions entre particules ne sont pas négligeables (e.g. le transport par charriage), le transport des particules devra être simulé à l'aide d'un modèle d'éléments discrets (DEM, en anglais). Le lecteur intéressé par la méthode DEM est invité à consulter les travaux de Kuang et al. (2019).

Les différents ouvrages de dérivations simulés avec l'approche Eulérienne-Lagrangienne sont : des zones humides construites (e.g. Han et al. 2014), des séparateurs à effet vortex (e.g. Pathapati et Sansalone 2009a,b ; V. Schmitt 2013), des bassins de décantation (e.g. Adamsson et al. 2003 ; Carbone et al. 2014 ; Dickenson et Sansalone 2009 ; Dufresne et al. 2009b ; P. Marsalek et al. 2000 ; Al-Sammarraee et al. 2009 ; Saul et D. Ellis 1992 ; Stovin 1996 ; Stovin et Saul 1998, 2000 ; X. Wang et al. 2008), des déversoirs latéraux (e.g. Z. Chen et al. 2013 ; Dufresne et al. 2010, 2009a ; Pollert et Stránský 2003) et des déversoirs frontaux (e.g. Dufresne et al. 2010, 2009a). La majorité des études numériques validées par des données expérimentales correspondent aux bassins de décantation à échelle réduite en conditions contrôlées (e.g. Dufresne et al. 2009b). Les autres études numériques du transport des particules au sein des ouvrages de dérivation réels sont qualitatives parce que la mesure *in situ* du flux de sédiments est complexe voire impossible (e.g. Z. Chen et al. 2013 ; Dutta et al. 2014 ; Pollert et Stránský 2003). Les travaux de Pollert et Stránský (2003), Dufresne et al. (2009, 2010) et Z. Chen et al. (2013) sont les principales études numériques sur la répartition massique au sein de déversoirs latéraux.

Pollert et Stránský (2003) ont simulé l'efficacité de séparation des sédiments en suspension du plus important déversoir d'orage – celui qui déverse le plus de volume – de la ville de Prague (République Tchèque). Cet ouvrage correspond à un déversoir latéral à crête haute, seuil de déversement à 1.215 m dans une section ovoïde de 2.1 m de hauteur et 1.2 m de largeur. Ces travaux ont estimé qualitativement (i.e. sans validation expérimentale) la répartition massique des sédiments en suspension en fonction du débit d'entrée, de la masse volumique ($\rho \in [1300-2600]\, Kg/m^3$) et du diamètre ($d_p \in [1-1000]\, \mu m$) des particules. Ils ont observé que le pourcentage de masse déversée est (i) inversement proportionnel au diamètre des particules et (ii) indépendant de la masse volumique des particules pour $d_p < 100\, \mu m$.

Dufresne et al. (2009a) (2009, 2010) ont simulé la répartition massique en fonction du débit d'entrée des trois déversoirs à échelle réduite de Kehrwiller (1995). Ils ont observé que le modèle DPM est capable de reproduire la répartition massique pour le déversoir frontal et les déversoirs latéraux simples et doubles étudiés par Kehrwiller (1995). En outre, ils ont proposé une condition limite au fond du déversoir basée sur le seuil de mise en mouvement de Shields (i.e. la contrainte de cisaillement à la paroi) afin de mieux reproduire les particules décantées. Cependant, la répartition massique calculée par Dufresne et al. (2009, 2010) risque de sous- ou surestimer la répartition expérimentale parce qu'un seul diamètre de particules est utilisé pour calculer les masses conservées, décantées et déversées. En effet, le pourcentage des masses conservées, décantées et déversées est définit égal au nombre de particules conservées, décantées et déversées obtenu à l'aide du modèle numérique.

Z. Chen et al. (2013) ont simulé la répartition massique d'un déversoir latéral à échelle réelle de la ville de Edmonton (Canada) en fonction de différentes modifications géométriques. L'hydrodynamique de l'ouvrage existant est validée vis-à-vis à l'aide de la vitesse expérimentale mesurée par Kronebusch et al. (2010) - d'après Z. Chen et al. 2013 - dans un modèle à échelle réduite (échelle géométrique de 1:6.5). La répartition massique de l'ouvrage existant et de chaque modification structurale est simulée à l'aide du modèle DPM en mode transitoire pour un débit massique constant de sédiments monodispersés ($Q_p = 0.008\, Kg/s$, $\rho_p = 1550\, Kg/m^3$ et $d_p = 100\, \mu m$). La répartition massique est jugée conver-

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2020LYSEI083/these.pdf
© [A. Claro Barreto], [2020], INSA Lyon, tous droits réservés

gée quand la masse dans chacune des sorties est constante dans le temps. Encore une fois, les répartitions numériques calculées correspondent à des résultats qualitatifs, car les données expérimentales *in situ* sont inexistantes tant pour l'entrée que pour les sorties de l'ouvrage existant.

Problématique

Jusqu'à présent, la plupart de travaux de recherche cités ont étudié la capacité de rétention et/ou décantation (i.e. l'efficacité) des ouvrages de dérivation pour de sédiments grossiers (e.g. Carbone et al. 2014 ; Dickenson et Sansalone 2009 ; Dufresne et al. 2009b ; Al-Sammarraee et al. 2009 ; X. Wang et al. 2008). Concernant les déversoirs latéraux et frontaux, les travaux expérimentaux de Kehrwiller (1995, d'après Dufresne et al. (2009a)) sont parmi les premiers à utiliser des particules avec une granulométrie similaire à celle rencontrée en réseau d'assainissement. Mais le transport de ces sédiments en suspension et/ou par charriage n'est pas assuré, car la similitude de Shields n'a pas été utilisée lors du choix des particules. Dans tous les travaux de recherche, l'injection expérimentale de sédiments à l'entrée de l'ouvrage de dérivation est toujours réalisée sur l'ensemble de la section transversale parce qu'il est supposé que la distribution spatiale des sédiments *in situ* est uniforme en temps de pluie.

Concernant les études numériques, seule la répartition massique des modèles à échelle réduite a été validée (e.g. Dufresne et al. 2010, 2009a). La validation des simulations des ouvrages *in situ* reste à valider parce que l'obtention des données expérimentales est très compliquée, voire impossible. Malgré les résultats qualitatifs des études numériques pour des ouvrages *in situ*, les différents travaux montrent que l'approche numérique est un outil efficace et rentable pour étudier, optimiser et concevoir de déversoirs d'orage adaptés aux contraintes réglementaires et structurales (e.g. Z. Chen et al. 2013).

Ainsi, le présent chapitre présente l'étude expérimentale et numérique de la répartition massique de particules inertes au sein d'un déversoir latéral à échelle réduite en régime fluvial en fonction de la localisation spatiale de ces particules à l'entrée du déversoir. Le déversoir latéral est choisi comme l'ouvrage de dérivation d'intérêt parce que son comportement hydraulique s'assimile au déversoir d'orage *in situ* du présent projet de recherche. Les particules utilisées sont choisies en fonction des caractéristiques des sédiments en réseau unitaire et du nombre de Shields. Celui-ci permet d'assurer que les sédiments sont transportés principalement en suspension. L'injection ponctuelle des sédiments à l'entrée du déversoir permet d'étudier la répartition massique en fonction de la localisation spatiale dans la section transversale. L'ensemble de la distribution granulométrique est simulée afin de calculer la répartition massique avec une méthode de calcul similaire aux travaux de Pollert et Stránský (2003).

6.2 Matériel et méthodes

La répartition massique des particules inertes en fonction de la localisation spatiale du point d'injection est étudiée de manière expérimentale et numérique. Au niveau expérimental, les méthodes employées pour mesurer la masse volumique et la granulométrie des sédiments utilisés sont présentées dans les Sections 6.2.1-6.2.2, respectivement. Le déversoir latéral à échelle réduite est sommairement présenté dans la Section 6.2.3, car il s'agit du même ouvrage qu'au Chapitre 3. Le protocole expérimental conçu pour mesurer la répartition massique des particules inertes est présenté dans la Section 6.2.4. Une comparaison adimensionnelle entre les particules utilisées dans la présente étude et celles relatives au déversoir d'orage réel est réalisée dans la Section 6.2.5.

Concernant l'approche numérique employée, la Section 6.2.6 est dédiée à l'approche de phase discrète (DPM, en anglais), avec une description détaillée de la dispersion des particules liée à la turbulence de l'écoulement au niveau de la Section 6.2.6.1. Enfin, la méthode numérique pour calculer la répartition massique obtenue à l'aide du modèle DPM est décrite dans la Section 6.2.7.

6.2.1 La masse volumique des particules inertes

La masse volumique des particules en verre expansé est mesurée à l'aide de la méthode du pycnomètre à eau, selon la norme NF EN ISO 17892-3 (AFNOR 2015). La masse volumique est exprimée avec un

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2020LYSEI083/these.pdf
© [A. Claro Barreto], [2020], INSA Lyon, tous droits réservés

intervalle d'arrondissage de 10 Kg/m^3. Les particules sont hydratées au minimum 24 heures à l'avance pour disposer des mêmes conditions que celles utilisées dans les essais expérimentaux sur la répartition massique.

La masse volumique des particules ρ_s est calculée selon l'Eq. 6.1 :

$$\rho_s = \rho_w \frac{m_2 - m_1}{m_4 + m_2 - m_1 - m_3}, \tag{6.1}$$

avec m_1 le poids du pycnomètre vide, m_2 la masse du pycnomètre rempli avec des particules séchées, m_3 la masse du pycnomètre rempli avec des particules et de l'eau après 24 heures d'hydratation, m_4 la masse du pycnomètre rempli seulement avec de l'eau.

La masse volumique ρ_w de l'eau utilisée pour mesurer ρ_s est obtenue à l'aide de la méthode du pycnomètre à bouchon capillaire. Le pycnomètre utilisé a un volume nominal de 5 ml et une précision au millième (1/1000) de cm^3. La masse volumique de l'eau (ρ_w) est calculée selon l'Eq. 6.2 :

$$\rho_w = \frac{m_2 - m_1}{V_{ref}}, \tag{6.2}$$

avec m_2 et m_1 les masses du pycnomètre avec bouchon capillaire vide et rempli d'eau déminéralisé, respectivement; V_{ref} correspond au volume nominal du pycnomètre avec bouchon capillaire.

Les incertitudes-type de la masse volumique des particules $u(\rho_s)$ et de l'eau $u(\rho_w)$ sont calculées à l'aide la méthode GUM via la loi de propagation de variances. L'incertitude-type $u(\rho_s)$ est calculée selon l'Eq. 6.3 et le Tableau 6.1 en supposant que toutes les variables de l'Eq 6.1 sont linéairement corrélées, $r(x_i, x_j) = 1$. L'incertitude-type $u(\rho_w)$ est calculée selon l'Eq. 6.4 et le Tableau 6.2. Le volume V_{ref} et les masses m_i ne sont pas corrélés, $r\left(V_{ref}, m_i\right) = 0$, car ces grandeurs sont obtenues de manière indépendante.

$$u(\rho_s) = \left[\frac{\partial \rho_s}{\partial \rho_w} u(\rho_w)\right] + \left[\frac{\partial \rho_s}{\partial m_1} u(m_1)\right] + \left[\frac{\partial \rho_s}{\partial m_2} u(m_2)\right] + \left[\frac{\partial \rho_s}{\partial m_3} u(m_3)\right] + \left[\frac{\partial \rho_s}{\partial m_4} u(m_4)\right] \tag{6.3}$$

$\mathbf{x_i}$	unité	$\partial \mathbf{f}/\partial \mathbf{x_i}$	$\mathbf{u}(\mathbf{x_i})$	$\mathbf{r}(\mathbf{x_i}, \mathbf{x_k})$
ρ_w	kg/m^3	$(m_2 - m_1)/(m_4 + m_2 - m_1 - m_3)$	Eq. 6.4	[1, 1]
m_1	g	$-rho_w\,(m_4 - m_3)/(m_4 + m_2 - m_1 - m_3)^2$	$0.01/\sqrt{12}$	1
m_2	g	$rho_w\,(m_4 - m_3)/(m_4 + m_2 - m_1 - m_3)^2$	$0.01/\sqrt{12}$	1
m_3	g	$rho_w\,(m_2 - m_1)/(m_4 + m_2 - m_1 - m_3)^2$	$0.01/\sqrt{12}$	1
m_4	g	$-rho_w\,(m_2 - m_1)/(m_4 + m_2 - m_1 - m_3)^2$	$0.01/\sqrt{12}$	1

Tableau 6.1 – Les dérivées partielles et les écarts-type du calcul de la masse volumique des particules par pycnomètre à eau.

$$u^2(\rho_w) = \left[\frac{\partial \rho_w}{\partial m_2} u(m_2)\right]^2 + \left[\frac{\partial \rho_w}{\partial m_1} u(m_1)\right]^2 + \left[\frac{\partial \rho_w}{\partial V_{ref}} u(V_{ref})\right]^2 + 2\left[\frac{\partial \rho_w}{\partial m_1}\frac{\partial \rho_w}{\partial m_2} u(m_2) u(m_1)\right], \tag{6.4}$$

La masse volumique moyenne des particules ($\overline{\rho_s}$) et son incertitude-type ($u\left(\overline{\rho_s}\right)$) sont calculées à partir de 6 mesures indépendantes selon les Eq. 6.5 et Eq. 6.6, respectivement.

$$\overline{\rho_s} = \frac{1}{n}\sum \rho_{s,i}\text{, avec } n = 6; \tag{6.5}$$

$$u\left(\overline{\rho_s}\right) = \sqrt{\frac{1}{n(n-1)}\sum\left(\rho_{s,i} - \overline{\rho_s}\right)^2}; \tag{6.6}$$

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2020LYSEI083/these.pdf
© [A. Claro Barreto], [2020], INSA Lyon, tous droits réservés

$\mathbf{x_i}$	unité	$\partial \mathbf{f}/\partial \mathbf{x_i}$	$\mathbf{u}(\mathbf{x_i})$	$\mathbf{r}(\mathbf{x_i}, \mathbf{x_k})$
m_1	g	$-1/V_{ref}$	$0.01/\sqrt{12}$	[1, 0]
m_2	g	$1/V_{ref}$	$0.01/\sqrt{12}$	[1, 0]
V_{ref}	ml	$-(m_2 - m_1)/V_{ref}^2$	$0.001/\sqrt{12}$	[0, 0]

Tableau 6.2 – Dérivées partielles et écarts-type du calcul de la masse volumique de l'eau par pycnomètre à bouchon capillaire.

La masse volumique moyenne des particules de verre expansé est égale à $2030 \pm 112\, Kg/m^3$, d'après l'Eqs. 6.5-6.6 et les 6 mesures indépendantes présentées dans le Tableau 6.3.

	ρ_s - Eq. 6.1	$u(\rho_s)$ - Eq. 6.3
	2040	3
	1980	1
	2000	1
	1870	2
	1990	2
	2280	1
$\overline{\rho}_s$	2030	
$u(\overline{\rho}_s)$	56	

Tableau 6.3 – Les 6 mesures indépendantes de la masse volumique des particules en verre expansé, la moyenne ($\overline{\rho}_s$ - Eq. 6.5) et l'écart-type ($u(\overline{\rho}_s)$ - Eq. 6.6).

6.2.2 La granulométrie des particules inertes

La distribution granulométrique des particules en verre expansé est déterminée par diffraction laser à l'aide d'un granulomètre MALVERN Mastersizer 2000 équipé d'un système de dispersion des échantillons Hydro 2000G. Le système permet de mesurer le diamètre des particules entre 0.02 et 2000 μm. Le principe de mesure est basé sur la théorie de Mie qui permet de prédire comment la lumière est dispersée et absorbée par des particules sphériques. Les indices de réflexion et dispersion sont définis égaux à 1.52 et 1.33, respectivement.

Le protocole de mesure de la granulométrie d'un échantillon est composé de 3 étapes : (i) la mesure du bruit du fond, (ii) l'ajout de l'échantillon dans le bac de mélange afin de l'homogénéiser et (iii) la mesure du diagramme de dispersion du faisceau laser. Le bruit de fond est d'abord mesuré, puis l'échantillon est introduit jusqu'à un taux d'obturation supérieur ou égal à 12%. Les particules sont mélangées en continu pendant 3 minutes à l'aide (i) d'un bras d'agitation réglé à 400 tours/min et (ii) d'un système ultrason à 100% de sa capacité. Celui-ci permet d'homogénéiser l'échantillon avant d'effectuer la mesure optique. Une fois le temps de mélange écoulé, la dispersion de la lumière est mesurée environ 2 000 fois pour établir la courbe granulométrique de l'échantillon.

Les distributions granulométriques des particules piégées aux sorties des canaux des débits de déversement et conservé sont mesurées avec des échantillons secs. Une analyse préalable a montré que la distribution granulométrique est similaire pour des particules sèches ou pré-hydratées pendant 24 heures (voir Fig. 6.1). Les diamètres nominaux DN 10, DN 50 et DN 90 des distributions granulométriques des particules sèches et hydratées pendant 24 heures sont similaires (voir Tableau 6.4).

6.2.3 Le déversoir latéral expérimental

Les expériences présentées dans ce chapitre ont été réalisées dans le déversoir latéral du laboratoire de Mécanique des Fluides et Acoustique (LMFA) à l'INSA de Lyon. Le débit d'entrée Q_E fixe à $10.55\, L/s$ est

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2020LYSEI083/these.pdf
© [A. Claro Barreto], [2020], INSA Lyon, tous droits réservés

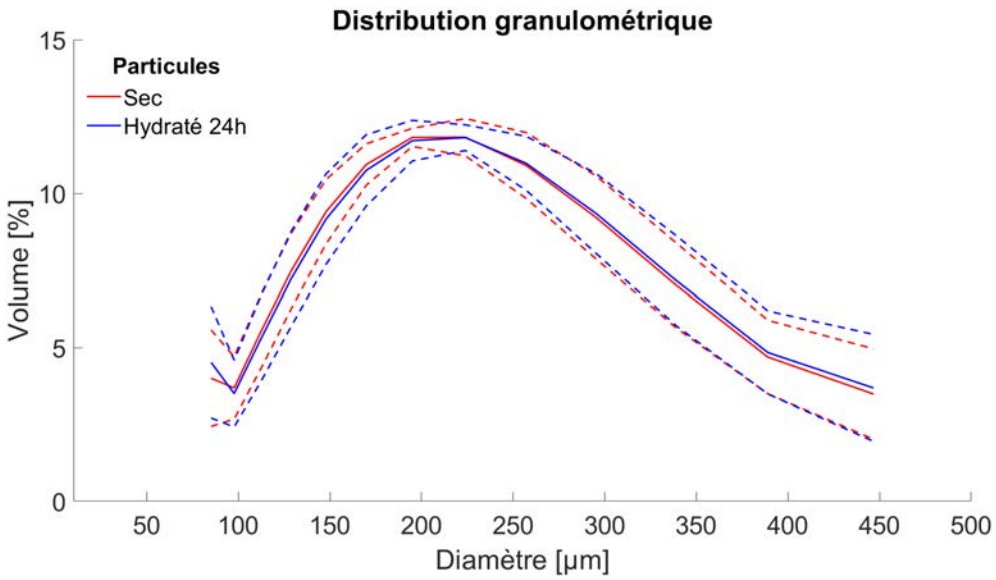


Figure 6.1 – Distribution granulométrique des particules en verre expansé sèches et hydratées pendant 24 heures. L'échantillon mesuré correspond aux particules de diamètre nominal $100\ \mu m \leq d_p \leq 300\ \mu m$ de la société Poraver®. Les lignes en pointillées correspondent aux percentiles à 5% et 95% des mesures expérimentales.

	Sec	Hydraté 24h
DN 10	$113 \pm 3\,\mu m$	$111 \pm 2\,\mu m$
DN 50	$203 \pm 5\,\mu m$	$205 \pm 5\,\mu m$
DN 90	$350 \pm 8\,\mu m$	$353 \pm 9\,\mu m$

Tableau 6.4 – Diamètres nominaux (DN) inférieurs ou égaux à 10%, 50% et 90% du volume des distributions granulométriques des particules en verre expansé sèches et hydratées 24 heures.

mesuré par un débitmètre électromagnétique dont l'incertitude est $\pm 0.05\ L/s$ (voir Fig. 6.2). Les débits déversé (mesuré) et conservé (calculé) sont égaux à $2.43 \pm 0.05\ L/s$ et $8.12 \pm 0.07\ L/s$, respectivement (voir Fig. 6.2). La hauteur du seuil latéral est égale à $0.075\ m$. L'écoulement à l'amont du déversement est en régime fluvial avec un nombre de Froude $\mathrm{Fr}_{\mathrm{DL}} = 0.355$. Ce nombre de Froude est calculé à l'aide du débit d'entrée Q_E, de la largeur $B = 0.300\ m$ (canal rectangulaire) et de la hauteur d'eau à l'amont du déversement $H = 0.100\ m$, selon l'Eq. 6.7. Le lecteur intéressé dans le fonctionnement hydraulique de ce déversoir latéral est invité à consulter le Chapitre 3.

$$\mathrm{Fr}_{\mathrm{DL}} = \frac{Q_E}{BH\sqrt{gH}} \quad \text{, avec } g = 9.807\ m/s^2 \tag{6.7}$$

6.2.4 Le protocole expérimental de répartition massique des particules inertes

La répartition massique des particules inertes au sein du déversoir latéral à échelle réduite est étudiée pour différents points d'injection à l'amont du déversement. Le protocole de mesure se divise en deux phases : (i) l'injection des particules et (ii) la récupération et l'analyse des masses piégées. Les particules utilisées dans cette étude correspondent à du verre expansé produit par la société Poraver® de diamètre $100\ \mu m \leq d_p \leq 300\ \mu m$ (Poraver 2017).

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2020LYSEI083/these.pdf
© [A. Claro Barreto], [2020], INSA Lyon, tous droits réservés

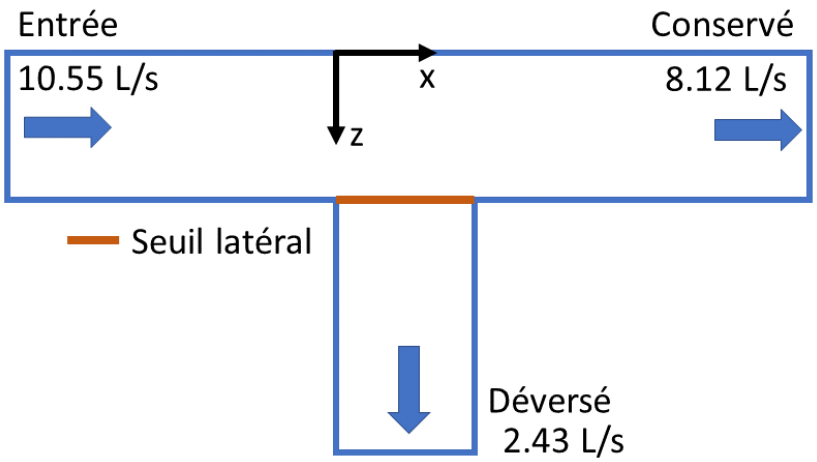


Figure 6.2 – Schéma hydraulique du déversoir latéral en régime fluvial.

6.2.4.1 L'injection de particules inertes

Les particules sont injectées avec un débit massique constant, avec une vitesse d'injection que l'on s'efforce d'avoir égale à la vitesse locale de l'écoulement, en divers points de cet écoulement. Les particules sont injectées en une des 9 localisations envisagées (Fig. 6.5) sous la forme d'une suspension, dont la fraction volumique de particules $\bigvee_p \approx 0.25\% \, m^3/m^3$, calculée à partir de la masse totale de particules $m_{ini} \approx 50\,g$ et du volume du mélange eau-sédiments dans le bac de mélange $\bigvee_{ini} \approx 10\,L$. Cette concentration y est maintenue homogène grâce à un mélangeur à pales (voir Fig. 6.3). Une pompe péristaltique assure ensuite un débit constant de cette suspension dans un tuyau de diamètre intérieur $9.61\,mm$, le débit du mélange injecté $Q_p \approx 0.0255\,L/s$. L'extrémité du tuyau est fixée à une tige en acier (Fig. 6.4). Les particules sont ainsi injectées dans une direction parallèle à celle de l'écoulement, c'est à dire selon x. L'injection a lieu en amont du déversoir en $x/B = -6.363$, avec $x/B = 0$ le début du déversement latéral (Fig. 6.2). Les diverses positions d'injection (Fig. 6.5) dans ce plan sont ensuite établies à l'aide d'un chariot permettant un déplacement de la tige et du tuyau selon y et z (Fig. 6.6). Au début du seuil latéral ($x/B = 0$), la concentration au sein de l'écoulement est d'environ $378\,mg/L$ de matières en suspension (MES), si l'on considère une dispersion verticale totale (i.e. $y/H \in [0,1]$) et une dispersion horizontale égale au diamètre du tuyau d'injection ($D_{\text{p-DL}} = 0.00961\,m$). Cette concentration est similaire à celle observée en réseau d'assainissement (e.g. Ashley et al. 2004 ; Lipeme Kouyi 2004).

(a) Début mélange (b) Mi-Mélange (c) Fin mélange

Figure 6.3 – Le mélange des particules en verre expansé avant injection.

6.2.4.2 Récupération et analyse des masses de particules piégées

Les sédiments déversés par chacune des branches (x_o et z_o - voir Fig. 6.2) sont récupérés à l'aide de tamis. Les masses de sédiments conservées et déversées sont notées m_c et m_d, respectivement. Les tamis sont réalisés avec de la toile de polyester de maille $33\,\mu m$ sur la diagonale, sous la forme de manchons (Fig. 6.7) qui filtrent la totalité des débits conservé Q_c ou déversé Q_d. Les particules restant dans les canaux en fin d'essai dans l'installation sont également dirigées par raclage vers les tamis : tamis z_o à l'aval

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2020LYSEI083/these.pdf
© [A. Claro Barreto], [2020], INSA Lyon, tous droits réservés

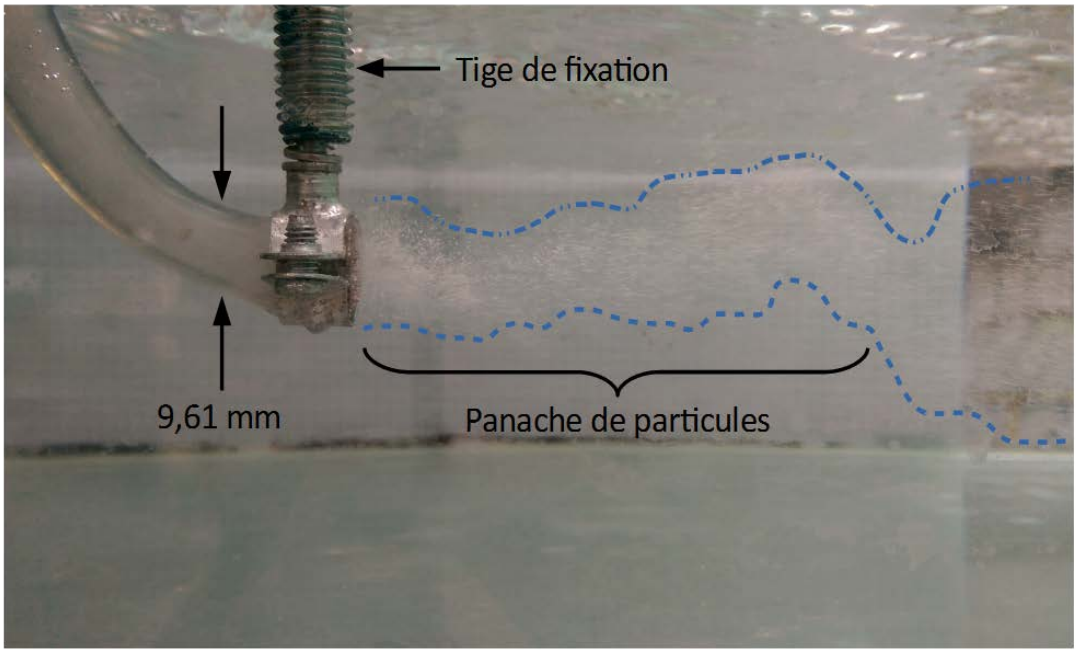


Figure 6.4 – Le système de fixation du tuyau d'injection et le panache des particules lors d'un essai expérimental.

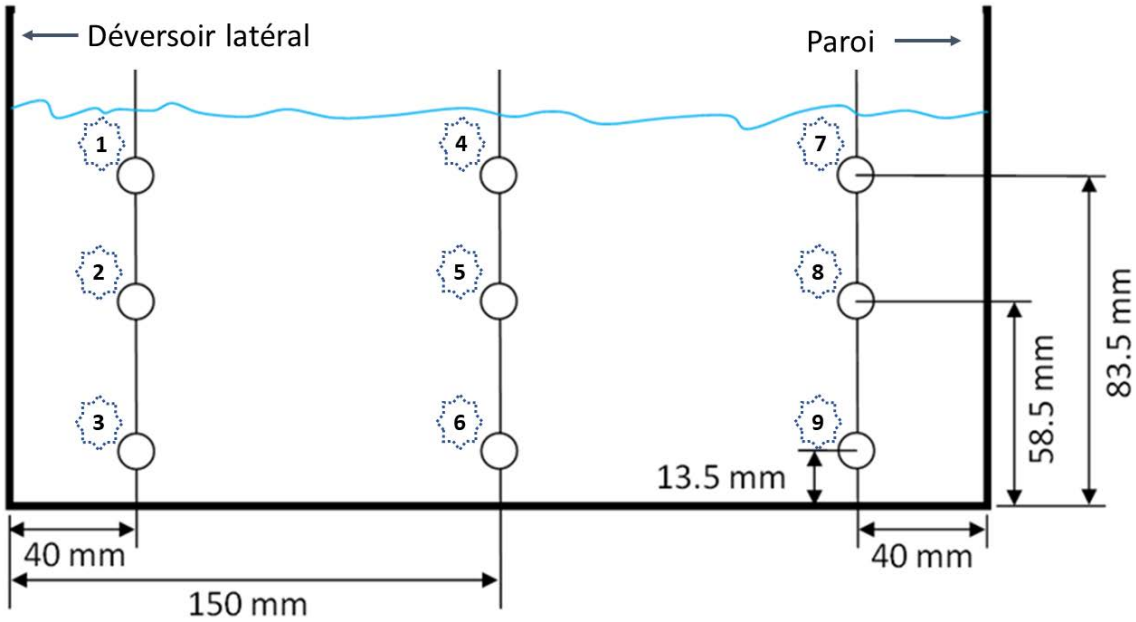


Figure 6.5 – Les 9 positions d'injections des particules de verre expansé à l'amont du déversoir latéral, dans un plan perpendiculaire à l'écoulement amont.. L'écoulement s'approche de l'observateur.

du déversoir latéral et tamis x_o pour les autres. Afin de vérifier la conservation de la masse de particules, la masse m_{bac} de particules non injectées (restées dans le bac de mélange amont) est également récupérée dans un tamis.

La mesure des masses des particules est basée sur la Norme AFNOR NF T90-105 (2005) qui est utilisée pour caractériser les matières en suspension (MES). Les particules sont lavées des manchons vers des tamis plus petits mais de même maille (voir Fig. 6.8). Ces tamis sont ensuite séchés durant 24 heures à 105°C sous étuve. Ils sont ensuite pesés sur une balance Adventurer ARA520 OHAUS avec une résolution

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2020LYSEI083/these.pdf
© [A. Claro Barreto], [2020], INSA Lyon, tous droits réservés

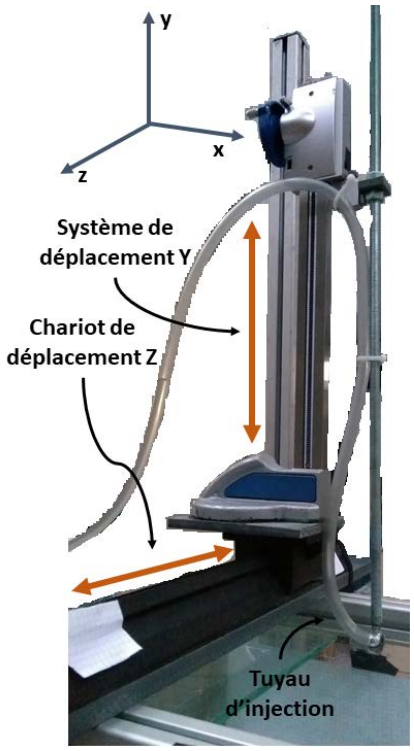


Figure 6.6 – Le chariot de déplacement vertical (y) et horizontal (z) du tuyau d'injection de particules inertes.

Figure 6.7 – Le manchon sur mesure utilisé pour piéger les particules de verre expansé du déversoir latéral.

de mesure égale à $0.01\,g$, qui correspond à une incertitude relative d'environ 0.02% avec $m_{\text{ini}} \approx 50\,g$. L'incertitude élargie de la masse mesurée $U(m)$ est définie en se basant sur l'approche GUM (ISO/IEC Guide 98-1 2009) selon l'Eq. 6.8.

$$U(m) = 2\sqrt{\underbrace{\frac{0.01^2}{12}}_{\text{Pré-mesure}} + \underbrace{\frac{0.01^2}{12}}_{\text{Mesure}}} \approx 0.016\,[g] \tag{6.8}$$

Parallèlement à ces incertitudes, il convient de considérer les éventuelles pertes de particules lors des différentes phases d'injection et de récupération. Pour les estimer, on compare les masses mesurées en fin d'essai m_{post} avec la masse initiale dans le bac m_{ini}. La masse mesurée à la fin d'un essai $m_{\text{post}} = m_c + m_d + m_{\text{bac}}$. Sur l'ensemble de nos essais, l'écart relatif $\left(m_{\text{post}} - m_{\text{ini}}\right)/m_{ini} \approx -2.0\%$. On estime

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2020LYSEI083/these.pdf
© [A. Claro Barreto], [2020], INSA Lyon, tous droits réservés

Figure 6.8 – Exemple de tamis en polyester de taille réduite (même maille de $33\,\mu m$) pour mesure de la masse déversée par l'un des canaux du déversoir latéral.

que les pertes sont négligeables.

Un triplicata sur le point d'injection central-inférieur (Fig. 6.5) a montré que l'erreur relative du protocole expérimental $\left(m_{\text{post}} - m_{\text{ini}}\right)/m_{ini}$ est de l'ordre de -3%. Liée aux contraintes du temps une seule configuration hydrodynamique a été étudiée en détail. Un total de 9 points d'injection à l'entrée du dispositif a permis d'analyser l'influence spatiale sur la répartition massique.

6.2.5 Analyse dimensionnelle du transport de particules

Le mode de transport des particules en verre expansé est évalué à l'aide d'une approche adimensionnelle basée sur les nombres adimensionnels de Shields Θ et de Reynolds de la particule Re_ω. Ces deux nombres sont les plus utilisés dans la littérature pour évaluer le degré de similitude dynamique du transport de sédiments (par charriage et/ou en suspension) entre le prototype et le modèle à échelle réduite (e.g. Chanson 2004 ; El Kadi Abderrezzak et al. 2014 ; Gorrick et Rodríguez 2012, 2014 ; Julien 2002, 2009 ; Vermeulen et al. 2014).

A noter que la présente étude ne cherche pas à assurer la similitude dynamique du transport de sédiments en suspension entre le déversoir d'orage (DO) *in situ* (prototype) et le déversoir latéral du présent chapitre (modèle à échelle réduite). Concernant la similitude de Froude entre le DO *in situ* et le déversoir latéral, le Froude du déversoir latéral $\text{Fr}_{\text{DL}} = 0.355$ (Eq. 6.7) et le Froude du DO *in situ* $\text{Fr}_{\text{DO}} \in [0.424, 0.760]$ (Eq. 6.9) pour un débit d'entrée $D_{\text{Amont}}^{\text{in situ}} \in [2500, 7000]\, m^3/h$.

$$\text{Fr}_{\text{DO}} = \frac{D_{\text{Amont}}^{\text{in situ}}}{A_{\text{Amont}}(h_{\text{Amont}})\sqrt{g\dfrac{A_{\text{Amont}}(h_{\text{Amont}})}{B_{\text{Amont}}(h_{\text{Amont}})}}} \tag{6.9}$$

avec A_{Amont} la surface mouillée et B_{Amont} la largeur au miroir de la section ovoïde du canal d'entrée du déversoir d'orage *in situ* (voir Annexe D), h_{Amont} la hauteur d'eau à l'entrée du canal d'entrée du déversoir d'orage *in situ* (voir Chapitre 4 - Section 4.4.2).

Pour estimer si le mode de transport des sédiments utilisés sera principalement par charriage, en suspension, ou un mélange entre ces deux, on utilise les nombres adimensionnels Θ et Re_ω. Le nombre de Shields Θ évalue le rapport entre la contrainte de cisaillement à la paroi τ_{bss} et la vitesse de chute de la particule ω_s :

$$\Theta = \frac{\tau_{bss}}{g\left(\rho_p - \rho\right) d_p} = \frac{u_\star^2}{g\,\Delta_\rho\, d_p} = \frac{u_\star^2}{\omega_s^2}, \tag{6.10}$$

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2020LYSEI083/these.pdf
© [A. Claro Barreto], [2020], INSA Lyon, tous droits réservés

avec g l'accélération due à la gravité, d_p le diamètre de la particule, ρ et ρ_p les masse volumiques de l'eau et de particules, respectivement. La vitesse de chute de la particule est définie par $\omega_s^2 = g\,\Delta_\rho\,d_p$, avec $\Delta_\rho = \left(\rho_p - \rho\right)/\rho$ la masse volumique relative de la particule.

Le nombre de Reynolds particulaire Re_ω considère le rapport entre la force d'inertie de la particule ($\omega_s\,d_p$) et la force de viscosité du fluide (ν) :

$$\mathrm{Re}_\omega = \frac{\omega_s\,d_p}{\nu} \tag{6.11}$$

Les particules en verre expansé sont principalement transportées en suspension par l'écoulement, car la contrainte de cisaillement adimensionnelle Θ expérimentée par ces particules est supérieure aux seuils de suspension de la littérature (voir les cercles rouges de la Fig. 6.9). En outre, les particules inertes sont transportées en suspension comme celles du DO *in situ* même si le nombre de Shields Θ n'est pas égal pour un même nombre de Reynolds de la particule Re_ω (voir Fig. 6.9). Les sédiments *in situ* de la Fig. 6.9 correspondent à des particules avec un diamètre $d_p \in [5\,,500]\,\mu m$ et une masse volumique $\rho_p \in [1700\,,2200]\,Kg/m^3$, selon la littérature (Ashley et al. 2004 ; Butler et al. 1992 ; Chebbo et al. 1995 ; Chocat et al. 2007 ; Hemmerle 2014 ; Piro et al. 2010 ; Randrianarimanana 2016 ; Verbanck et al. 1994 ; Zhang et T. Li 2015). L'écoulement du DO *in situ* correspond à un débit d'entrée $D^{\text{in situ}}_{\text{Amont}} \in [228\,,1092]\,m^3/h$, comme étudié dans le Chapitre 4.

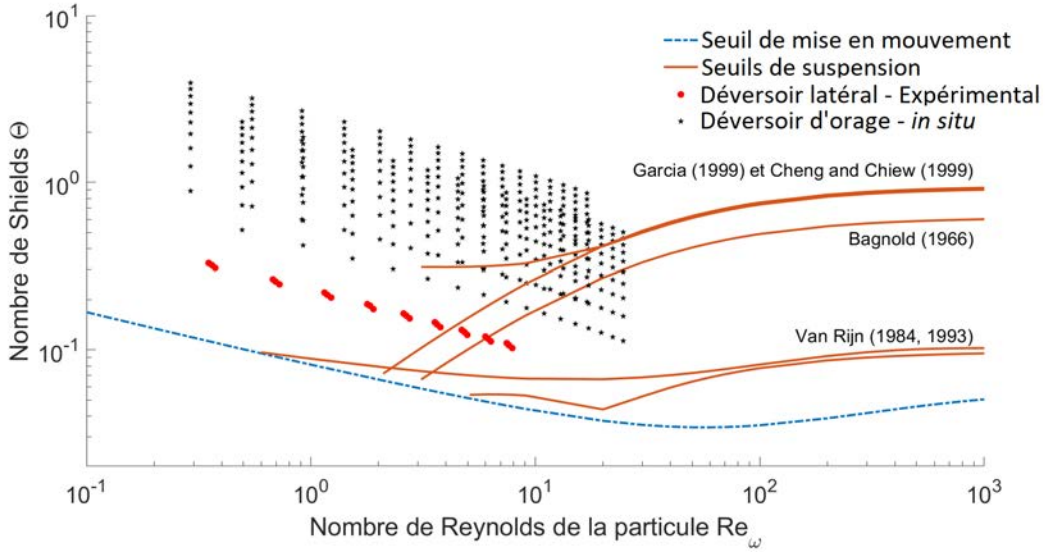


Figure 6.9 – Le nombre de Shields (Θ) en fonction du nombre de Reynolds de la particule (Re_ω) pour les particules utilisées (cercles rouges) et celles rencontrées en réseaux unitaire en temps de pluie (étoiles noires). La ligne pointillée en bleue correspond au seuil de mise en mouvement (J. Guo 2002). Les lignes rouges correspondent aux seuils de suspension de la littérature (Bagnold 1966 ; Cheng et Chiew 1999 ; Garcia 1999 ; van Rijn 1984, 1993).

6.2.6 Le modèle numérique du transport des particules discrètes - DPM

La répartition massique des particules de verre expansé est simulée à l'aide d'un modèle déterministe Lagrangien de transport de particules (DPM, en anglais). Ce modèle applique la 2^{ime} loi de Newton sur une particule : la somme de l'ensemble des forces dans un corps définit son accélération. L'équation de transport d'une particule sphérique est écrite

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2020LYSEI083/these.pdf
© [A. Claro Barreto], [2020], INSA Lyon, tous droits réservés

$$\frac{d\vec{u}_p}{dt} = \underbrace{\frac{\vec{u}-\vec{u}_p}{\tau_r}}_{\text{Traînée}} + \underbrace{\frac{\vec{g}\left(\rho_p-\rho\right)}{\rho_p}}_{\text{Gravité}} + \underbrace{C_{\text{vm}}\frac{\rho}{\rho_p}\left(\vec{u}_p\nabla\vec{u}-\frac{d\vec{u}_p}{dt}\right)}_{\text{Masse ajoutée}} + \underbrace{\frac{\rho}{\rho_p}\vec{u}_p\nabla\vec{u}}_{\text{Gradient pression}} \tag{6.12}$$

avec $\vec{u}_p$ le vecteur vitesse de la particule, $\vec{u}$ le vecteur de vitesse du milieu continu (i.e. l'eau), $\vec{g}$ le vecteur d'accélération due à la gravité, τ_r le temps de relaxation de la particule, C_{vm} le facteur de masse ajoutée et égale à 0.5 (Batchelor 2000), ρ_p et ρ sont respectivement les masse volumique de la particule et du milieu continu.

L'Eq. 6.12 est composée de 4 différentes forces : (i) la force de traînée ou de friction, (ii) la force liée à la gravité ou due à la flottabilité, (iii) la force de masse ajoutée qui représente la force nécessaire pour accélérer le fluide autour de la particule et (iv) la force liée au gradient de pression dans le fluide.

Le temps de relaxation de la particule τ_r est définit par

$$\tau_r = \frac{\rho_p D_p^2}{18\mu}\frac{24}{C_{d-p}\text{Re}_p} \tag{6.13}$$

avec D_p le diamètre de la particule, $\text{Re}_p = \rho D_p\left|\vec{u}_p-\vec{u}\right|/\mu$ le nombre de Reynolds de la particule, et C_{d-p} le coefficient de la force de traînée. Le coefficient C_{d-p} est calculé selon les travaux de Haider et Levenspiel (1989) pour des particules non sphériques comme suit

$$C_{d-p} = \frac{24}{\text{Re}_{p,s}}\left(1+b_1\text{Re}_{p,s}{}^{b_2}\right)+\frac{b_3\text{Re}_{p,s}}{b_4+\text{Re}_{p,s}} \tag{6.14}$$

$$\begin{aligned}
b_1 &= \exp\left(2.3288-6.4581\phi_\text{p}+2.4486\phi_\text{p}^2\right)\\
b_2 &= 0.0964-0.5565\phi_\text{p}\\
b_3 &= \exp\left(4.905-13.8944\phi_\text{p}+18.4222\phi_\text{p}^2-10.2599\phi_\text{p}^3\right)\\
b_4 &= \exp\left(1.4681-12.2584\phi_\text{p}+20.7322\phi_\text{p}^2-15.8855\phi_\text{p}^3\right)
\end{aligned}$$

avec ϕ_p le facteur de forme qui est le rapport entre la surface d'une sphère de volume équivalent à celui de la particule et la surface réelle de la particule. Ce facteur de forme est estimé à l'aide du rapport entre le diamètre moyen de Sauter (D_{32}) et le diamètre d'une sphère de volume équivalent à celui de la particule ($D_v \approx D_{50}$). Les diamètres D_{32} et D_{50} sont calculés à l'aide des distributions granulométriques des particules de verre expansé (Section 6.2.2). Le facteur de forme obtenu est $\phi_\text{p} = 0.896$. Le nombre de Reynolds de la particule $\text{Re}_{p,s} = \rho D_{50}\left|\vec{u}_p-\vec{u}\right|/\mu$.

Le modèle DPM ne prends pas en compte les collisions entre les particules parce qu'elles sont statistiquement négligeables pour de fractions volumiques de sédiments faibles (Balachandar et Eaton 2010), ce qui est le cas des écoulements en réseau d'assainissement (e.g. Chocat et al. 2007; Isenmann 2016; Lipeme Kouyi 2004; Yan 2013).

6.2.6.1 La dispersion turbulente des particules

La dispersion des particules dans un écoulement turbulent est principalement due aux fluctuations chaotiques de la vitesse du fluide. La dispersion due à la turbulence est calculée à l'aide d'un modèle stochastique de suivi de particules. Le modèle utilisé dans cette étude correspond au modèle discret de marche aléatoire (DRW, en anglais). Le modèle DWR inclut l'effet de la turbulence dans la trajectoire de la particule (Eq. 6.12) en incluant les fluctuations instantanées de la vitesse $\vec{u'}$ à la vitesse moyenne dans le temps $\vec{\bar{u}}$ pour estimer la vitesse instantanée de l'écoulement $\vec{u} = \vec{\bar{u}} + \vec{u'}$. Les fluctuations $\vec{u'}$ sont

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2020LYSEI083/these.pdf
© [A. Claro Barreto], [2020], INSA Lyon, tous droits réservés

supposées suivre une distribution de probabilité gaussienne avec des valeurs moyennes quadratiques $\sqrt{\overline{u_i^{'2}}} = \sqrt{2k/3}$ et variable aléatoire $\gamma \sim N(0,1)$.

$$u_i^{'} = \gamma \sqrt{\overline{u_i^{'2}}} = \gamma \sqrt{2k/3} \tag{6.15}$$

Le modèle DWR permet de prendre en compte l'interaction avec l'écoulement mais néglige l'interaction entre particules car les collisions entre particules sont statistiquement insignifiantes pour des écoulements avec une faible fraction massique ou volumique de particules (Balachandar et Eaton 2010; Elghobashi 1991). Le couplage unidirectionnel correspond à l'influence de l'écoulement sur la particule et le couplage bidirectionnel ajoute l'influence de la particule sur l'écoulement. Le transport des sédiments dans cette étude est calculé à l'aide d'un couplage unidirectionnel.

La trajectoire de la particule est calculée en intégrant l'Eq. 6.12 pendant un intervalle du temps relatif à l'échelle du temps d'interaction d'une particule avec un tourbillon. Ce temps d'interaction est le minimum entre le temps de vie du tourbillon et le temps pour traverser le tourbillon (i.e. dû à l'inertie de la particule ou des forces de gravité). Une fois le temps d'interaction écoulé, une nouvelle fluctuation de la vitesse $\vec{u}^{'}$ est calculée selon l'Eq. 6.15.

Le temps de vie du tourbillon correspond à la durée nécessaire pour le dissiper sous l'effet de la viscosité du fluide. Ce temps de vie est estimé à l'aide du temps de corrélation de la vitesse lagrangienne T_L, valable pour des particules qui se comportent comme des traceurs (i.e. avec un nombre de Stokes St ≈ 0), par $\tau_e \approx C_T(k/\epsilon) = 2\,C_L(k/\epsilon) = 2T_L$, avec k l'énergie cinétique turbulente de l'écoulement, ϵ le taux de dissipation de k et C_T le coefficient de l'échelle constante du temps. Le coefficient $C_L \approx 0.15$ est obtenu en prenant en compte la diffusion des traceurs ($\overline{u_i^{'}u_j^{'}}T_L$) et le taux de diffusion d'un scalaire (ν_t/σ). Le coefficient C_L est généralement ajusté pour reproduire au mieux les études expérimentales (e.g. Coimbra et al. 1998; Dufresne et al. 2009b; Patel et al. 2011; Shams et al. 2002). Le temps de vie du tourbillon est défini comme une variable aléatoire : $\tau_e = -T_L \ln(r)$, avec r une variable aléatoire uniforme dans l'intervalle $(0,1)$.

Le temps pour traverser le tourbillon τ_{tt} est calculé d'après les travaux de Brown et Hutchinson (1979) :

$$\tau_{\text{tt}} = -\tau_r \ln\left(1 - \left(\frac{L_e}{\tau_r\left|\vec{u} - \vec{u}_p\right|}\right)\right) \tag{6.16}$$

avec L_e l'échelle de longueur du tourbillon définie comme $L_e = C_\mu^{1/2} k^{3/2}/\epsilon$.

Le temps d'interaction particule-tourbillon τ_{iter} est

$$\tau_{\text{iter}} = \min(\tau_e, \tau_{\text{tt}}) \tag{6.17}$$

6.2.7 La méthode de calcul de la répartition massique

La répartition massique du modèle numérique est calculée à l'aide de (i) la masse volumique, (ii) la granulométrie et (iii) la probabilité numérique de déversement; de manière similaire à l'approche de Pollert et Stránský (2003). La masse volumique et la distribution granulométrique expérimentales sont celles présentées dans les Section 6.2.1 et Section 6.2.2, respectivement. La probabilité numérique de déversement est calculée à l'aide d'un suivi détaillé de la répartition des particules vers les conduites du débit conservé et du débit déversé. Ce suivi permet de connaître (i) la position, (ii) la masse volumique, (iii) le diamètre, et (iv) le point d'injection de chaque particule qui traverse les plans d'observation du débit déversé ou conservé (Fig. 6.10). La position des particules permet d'éliminer celles localisées en dessus de la surface libre, avec la fraction volumique de l'eau $\alpha_{\text{eau}} = 0.5$. Les points d'injection de particules sont les mêmes que ceux de la Fig. 6.5. La forme de la surface numérique d'injection correspond à un carré de surface équivalente au tuyau circulaire d'injection de diamètre interne $D = 9.61\ mm$.

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2020LYSEI083/these.pdf
© [A. Claro Barreto], [2020], INSA Lyon, tous droits réservés

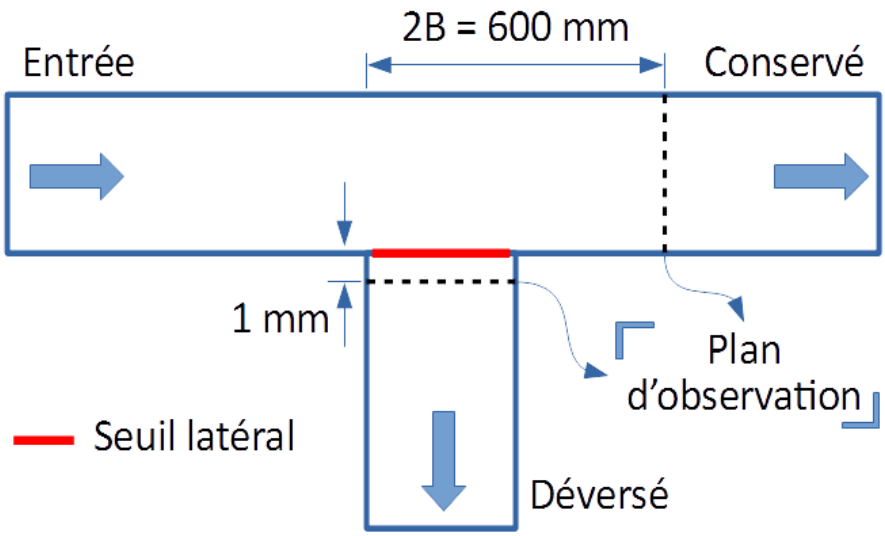


Figure 6.10 – Les plans numériques d'observation de particules du déversoir latéral.

La mesure de la distribution granulométrique des particules, selon la Section 6.2.2, offre une répartition du pourcentage de volume en fonction du diamètre. S'il est supposé que toutes les particules utilisées sont sphériques avec masse volumique constante ρ_p, il est possible de calculer le nombre nominal de particules par diamètre N_i^T selon l'Eq. 6.19.

$$N_i^T = \frac{m^D \times \bigvee_i^D + m^C \times \bigvee_i^C}{4/3\pi(D_i/2)^3\,\rho}, \tag{6.18}$$

avec m^D et m^C les masses expérimentales des particules déversées et conservées, respectivement ; $\bigvee_i^D$ et $\bigvee_i^C$ les pourcentages par volume expérimentaux des particules déversées et conservées en fonction du diamètre D_i, respectivement. Le diamètre D_i correspond à la valeur médiane de la classe de la distribution granulométrique.

La masse numérique déversée m_{Sim}^D est calculée à l'aide de la probabilité de déversement P^D par taille de particule D_i, du nombre nominale de particules N^T par diamètre (Eq. 6.19) et de la masse volumique ρ, selon l'Eq.6.19. La masse numérique conservée m_{Sim}^C est le complément de m_{Sim}^D car $P_i^C = 1 - P_i^D$.

$$m_{\text{Sim}}^D = \rho \sum \left(N_i^T \times P_i^D \times 4/3\pi(D_i/2)^3 \right) \tag{6.19}$$

6.3 Résultats et Discussions

L'ensemble des résultats présenté correspond à deux types : des résultats expérimentaux (Sections 6.3.1-6.3.2) et des résultats numériques (Sections 6.3.3-6.3.4). Les résultats expérimentaux correspondent aux distributions granulométriques des particules conservées et déversées (Section 6.3.1) et à la répartition massique en fonction du point d'injection des particules (Section 6.3.2). Les résultats numériques sont comparés aux mesures expérimentales à l'aide de la probabilité numérique de déversement de l'eau (Section 6.3.3). Ensuite, la performance de l'approche numérique est évaluée par rapport aux données expérimentales sur la répartition massique en fonction du point d'injection (Section 6.3.4).

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2020LYSEI083/these.pdf
© [A. Claro Barreto], [2020], INSA Lyon, tous droits réservés

Expérimental

6.3.1 La granulométrie des particules déversées

Les distributions granulométriques des particules (i) piégées à la sortie des canaux « conservé » et « déversé », et (ii) demeurées dans le bac de mélange (Fig. 6.3) sont mesurées à l'aide d'un granulomètre (Section. 6.2.2). Les diamètres nominaux DN 10, DN 50 et DN 90 des particules conservées, déversées et non-injectées (« Amont ») pour chacun des points d'injection sont présentés dans le Tableau 6.6.

y/H	z/B		
	0.13	0.50	0.87
0.835	7	4	1
0.585	8	5	2
0.135	9	6	3

Tableau 6.5 – Positions d'injections des particules de verre expansé à l'amont du déversoir latéral selon les coordonnées adimensionnelles y/H et z/B. La largeur du canal rectangulaire $B = 0.300\ m$. La hauteur d'eau moyenne $H = 0.100\ m$.

Injection	Déversement			Conservé			Amont		
	DN 10	DN 50	DN 90	DN 10	DN 50	DN 90	DN 10	DN 50	DN 90
1	88	170	306	119	199	325	93	181	320
2	112	191	317	112	190	318	136	205	308
3	112	190	313	110	187	313	89	158	272
4				87	160	286	117	193	315
5				109	186	309	103	186	320
6	92	178	321	104	184	313	114	191	314
7				101	187	327	105	182	304
8				90	176	316	118	198	327
9				93	183	324	100	176	297

Tableau 6.6 – Diamètres nominaux médianes DN 10, DN 50 et DN 90 des particules piégées dans les canaux du débit conservé et du débit déversé, ainsi que celles demeurées dans le bac de mélange à l'amont en fonction du point d'injection (Tableau 6.5).

Il est observé que le système de mélange a permis une injection homogène de particules, car les distributions granulométriques des particules piégées dans la sortie du débit conservé (« Conservé ») sont similaires aux particules demeurées dans le bac de mélange (« Amont ») pour les points d'injection les plus éloignés du côté du déversement (i.e. les injections N°7 à N°9 - $z/B = 0.13$).

Il est aussi observé que les DN10 à DN90 des particules déversées et conservées restent similaires pour les points d'injections du côté du déversement latéral (i.e les injections N°1 à N°3 - $z/B = 0.87$). Cette similitude granulométrie est obtenue à cause de l'écoulement oscillant observé au niveau de l'injection de particules (Fig. 6.4). Cet écoulement a intensifié la dispersion verticale des particules.

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2020LYSEI083/these.pdf
© [A. Claro Barreto], [2020], INSA Lyon, tous droits réservés

6.3.2 La répartition massique expérimentale

La répartition massique expérimentale de particules inertes au sein du déversoir latéral en régime fluvial, mesurée selon le protocole de la Section 6.2.4, est étudiée à l'aide du rapport entre la masse déversée et la masse totale injectée (Tableau 6.7 et Fig. 6.11). Ce rapport correspond au pourcentage de masse déversée PMD qui indique que sur $100\,g$ de particules injectées à y/H et z/B en $x/B = -6.363$, $100 \times$PMD g de ces particules vont être déversées.

y/H	z/B		
	0.13	0.50	0.87
0.835	0.8%	4.2%	54.1%
0.585	0.7%	6.8%	51.6%
0.135	0.5%	2.8%	47.5%

Tableau 6.7 – Pourcentage (%) de masse déversée expérimentale pour les différents points d'injection selon les coordonnées adimensionnelles y/H et z/B. La largeur du canal rectangulaire $B = 0.300\,m$. La hauteur d'eau moyenne $H = 0.100\,m$.

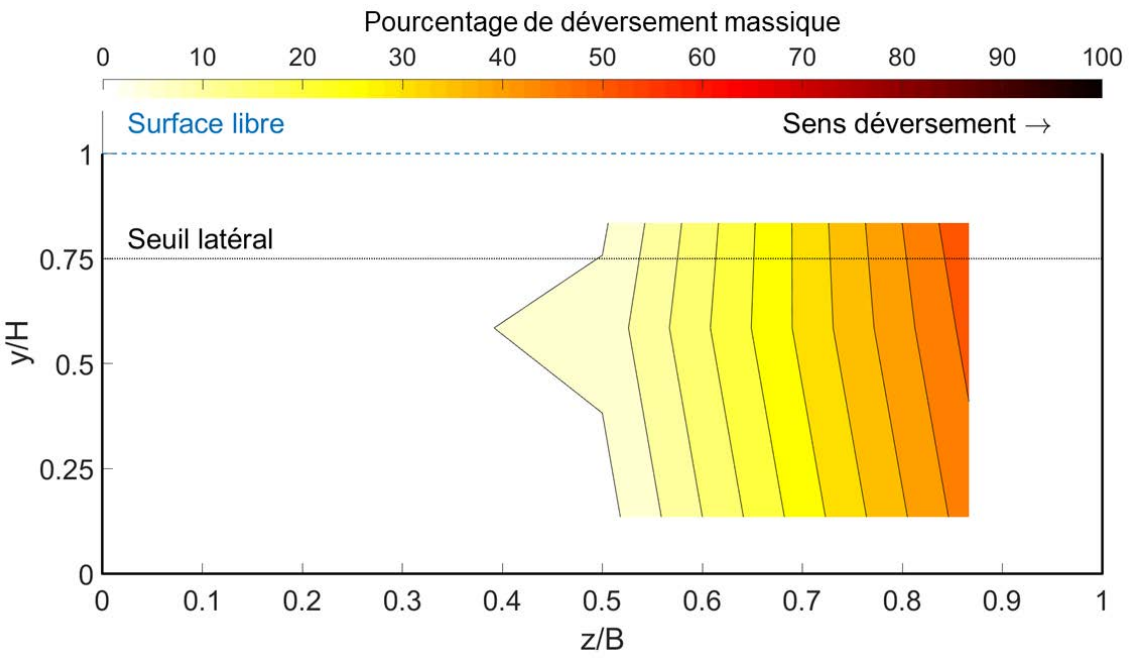


Figure 6.11 – Pourcentage de déversement massique expérimental du déversoir latéral. L'écoulement s'éloigne de l'observateur.

Il est observé que le PMD présente deux caractéristiques principales (Fig. 6.11) : (i) il ne varie pas verticalement pour un z/B fixe dans la hauteur $y/H \in [0.135, 0.835]$ et (ii) il croît vers le côté du déversement, $z/B \rightarrow 1$. En effet, le point d'injection situé le plus proche du côté du seuil latéral ($z/B = 0.87$) et de la surface libre ($y/H = 0.835$) correspond au pourcentage maximal de masse déversée (54.1% - colonne de droite du Tableau 6.7).

Cependant, il est probable que les PDM obtenus pour les injections du côté du déversement ($z/B = 0.87$) sont surestimés à cause du dispositif d'injection de particules (Fig. 6.4), car celui-ci a produit une distribution granulométrique des sédiments déversés et conservés similaire pour ces points d'injection (Tableau 6.6 - Section 6.3.1). Or, l'analyse dimensionnelle du transport des particules injectées a montré que les sédiments du diamètre le plus élevé ($d_p >$ DN 70) sont susceptibles de ne pas rester en suspension et donc de ne pas être déversées, car leurs nombres de Shields Θ sont inférieurs aux seuils de suspension proposés par Bagnold (1966), Cheng et Chiew (1999) et Garcia (1999) (Fig. 6.9). Ainsi, si ces particules

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2020LYSEI083/these.pdf
© [A. Claro Barreto], [2020], INSA Lyon, tous droits réservés

grossières ($d_p >$ DN 70 - Fig. 6.9) n'avaient pas atteint le canal de déversement, la masse déversée serait significativement inférieure à celle observée parce que la masse d'une particule sphérique est proportionnelle au d_p^3.

Numérique

6.3.3 Probabilité de déversement de l'eau

La distribution spatiale du pourcentage de masse déversée (PMD) est comparée, dans un premier temps, à la probabilité numérique de déversement de l'écoulement PD_{eau}. La PD_{eau} est calculée à l'aide de l'injection de particules d'eau dans l'ensemble de la section transversale localisée à $x/B = -6.363$. La PD_{eau} obtenue pour le modèle de turbulence RNG k-ϵ est présentée dans la Fig. 6.12. Une PD_{eau} en y/H et z/B indique que sur 100 particules d'eau injectées à cet endroit (en $x/B = -6.363$), $100 \times PD_{eau}$ particules d'eau vont être déversées.

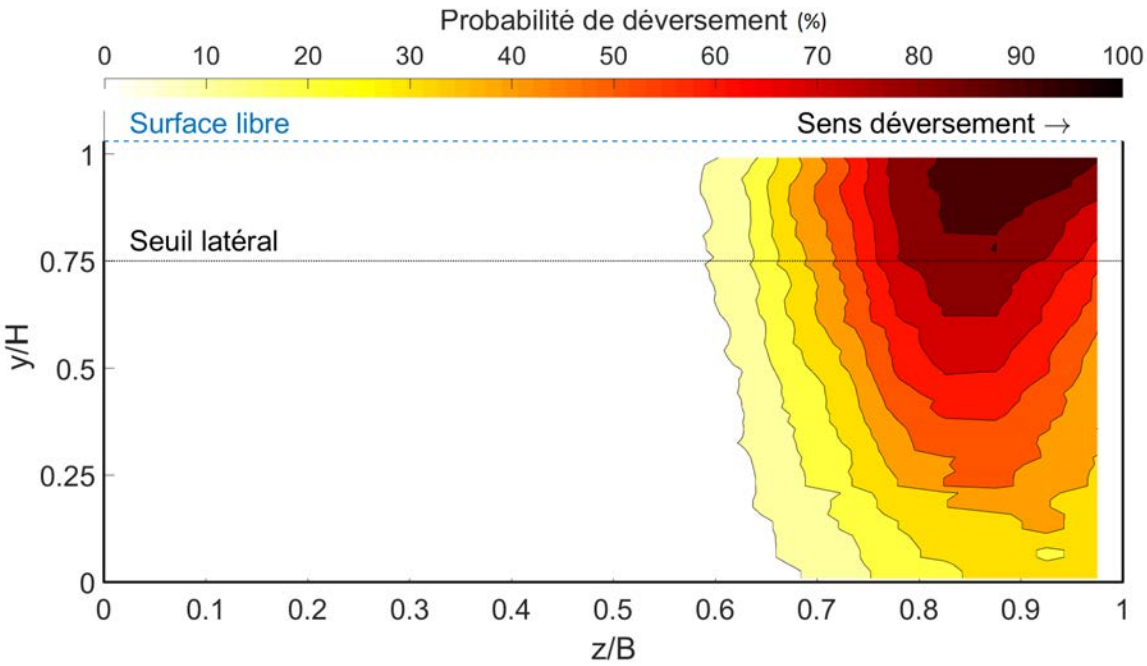


Figure 6.12 – Probabilité de déversement numérique de l'eau pour le déversoir latéral, avec l'échelle constante du temps $C_L = 0.15$.

Il est observé que la forme de la distribution spatiale de la PD_{eau} est similaire au PMD, voir les Fig. 6.12 et Fig. 6.11, respectivement. Les isovaleurs des résultats expérimentaux (PMD) et numériques (PD_{eau}) sont invariantes verticalement pour les $PD_{eau} < 50\%$ dans la région $z/B < 0.75$. Cependant, les distributions de masse PMD et de l'écoulement PD_{eau} présentent deux différences : (i) la région de contribution au déversement est plus étendue pour l'injection expérimentale des particules inertes (PMD) et (ii) la distribution PMD $<$ PD_{eau} pour un même point de la section transversale.

D'une part, la contribution au déversement massique (PMD $\geq 10\%$) débute pour $z/B \approx 0.6$ (Fig. 6.12). Ceci est probablement dû à la diffusion horizontale des tourbillons crées au niveau de l'injection (i) par la présence du dispositif et (ii) de la vitesse d'injection lors des essais expérimentaux, voir le panache expérimental de sédiments dans la Fig. 6.4. Le modèle numérique est également une source importante d'erreur, car il n'a pas réussi à reproduire la dissymétrie de la distribution spatiale de vitesse longitudinale moyenne $\overline{u}$ des sections transversales yz à l'entrée du canal amont ($x/B = -6.363$) et à l'amont du déversoir latéral ($x/B = -1.00$), voir la Fig. 3.22 du Chapitre 3.

D'autre part, le pourcentage massique de déversement PMD est inférieur à la probabilité de déversement de l'écoulement PD_{eau} pour un même point $< y_i/H, z_j/B >$ parce que la probabilité de rester en

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2020LYSEI083/these.pdf
© [A. Claro Barreto], [2020], INSA Lyon, tous droits réservés

suspension est inversement proportionnelle à la masse volumique et la taille de particules. Comme déjà discuté dans la Section 6.3.2, une fraction des particules injectées (DN $\geq$ DN70) présente un nombre de Shields Θ inférieur au seuil de suspension de la littérature (voir la Fig. 6.9). Ces particules ne peuvent pas être retenues en suspension par l'écoulement fluvial et leur masse sera principalement collectée au niveau de la sortie du débit conservé (Q_c). Le modèle numérique est l'autre source d'erreur parce que la magnitude des courants secondaires est sous-estimée au niveau du déversement ($x/B \in [0.00\,,1.00]$ - Section 3.4.2.2 - Chapitre 3). Malgré ces sources d'erreur, les différences observées entre les distributions expérimentale de masse PMD et numérique de l'écoulement PD_{eau} montrent que les particules injectées ne se comportent pas comme des scalaires passifs.

Ainsi, la distribution spatiale du PMD et de la PD_{eau} est invariante verticalement et augmente vers le côté du déversement ($z/B \rightarrow 1$). Mais les différences observées entre le PMD et la PD_{eau} sont dues au dispositif expérimental d'injection de particules et au modèle numérique utilisé.

6.3.4 La répartition massique numérique

La performance du modèle de transport de particules DPM à simuler la masse déversée en fonction du point d'injection est étudiée dans la présente section. Un point important est l'influence de l'échelle de temps C_L sur la masse déversée qui est analysée spécifiquement.

6.3.4.1 La masse déversée

Les résultats numériques montrent que le modèle DPM (i) est capable de reproduire la masse déversée pour la région $z/B \leq 0.5$ mais (ii) sous-estime la masse déversée pour les points d'injection les plus proches du côté du déversement (i.e. $z/B = 0.87$). Les résultats numériques le plus proches des résultats expérimentaux, par ajustement visuel, sont ceux obtenus avec un coefficient d'interaction particule-tourbillon $C_L = 2.4$ (Fig. 6.13 - les barres verticales représentent l'intervalle de confiance (IC) à 95%). La valeur du C_L obtenue reste conforme aux valeurs de la littérature (e.g. Dufresne et al. 2010, 2009a; Yan 2013).

La masse déversée est sous-estimée pour les points d'injection les plus proches du déversement (i.e. les points d'injection «1» à «3» de la Fig. 6.5) à environ 50% par rapport à la masse mesurée (Fig. 6.15a), car (i) l'injection numérique ne reproduit pas l'écoulement oscillatoire au niveau du début de l'injection expérimentale (Fig. 6.14) et (ii) le modèle numérique ne reproduit pas la distribution spatiale de la vitesse longitudinale $\overline{u}$. Comme vu précédemment dans la Section 6.3.2, les tourbillons créés par la présence du dispositif d'injection et la vitesse d'injection jouent un rôle important dans la distribution spatiale des particules. La reproduction de cette distribution spatiale est très importante parce que la région $z/B \geq 0.87$ présente les probabilités de déversement d'eau PD_{eau} les plus élevées (Fig. 6.12). La Fig. 6.14 met en évidence également que l'ensemble des particules ne suit pas l'écoulement (i.e. comme un scalaire passif) car les particules les plus grandes (i.e. selon le diamètre) sont transportées proche du fond.

Les masses déversées pour les points d'injection situés à $z/B \leq 0.5$ sont correctement reproduites grâce à la probabilité de déversement de l'écoulement PD_{eau} dans cette région. Au niveau de l'injection de particules, l'écoulement oscillatoire a une influence moins importante dans la masse déversée parce que la probabilité de déversement $PD_{eau} \approx 0\%$ dans cette région (Fig. 6.12). L'erreur relative sur la masse conservée pour ces points d'injection est proche de 0% (Fig. 6.15b).

6.3.4.2 Influence de la constante C_L sur la répartition massique

L'influence de la constante C_L sur la répartition massique est étudiée dans cette section. La répartition massique de particules par point d'injection est calculée pour différentes valeurs de l'échelle constante du temps $C_L \in [0.012 - 2.4]$. Comme déjà indiqué dans la Section 6.2.6.1, la constante C_L permet de définir le temps de vie d'un tourbillon et le temps d'interaction entre une particule et l'écoulement. Cette constante est directement reliée à la dispersion spatiale des particules.

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2020LYSEI083/these.pdf
© [A. Claro Barreto], [2020], INSA Lyon, tous droits réservés

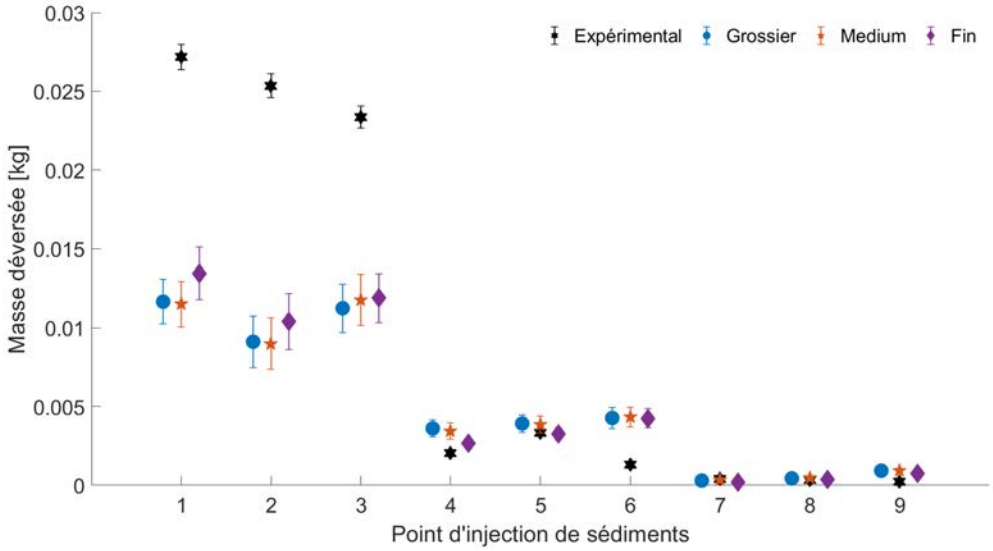


Figure 6.13 – La masse déversée en fonction du point d'injection. Les résultats numériques pour les trois maillages et expérimentaux. Les barres d'erreur correspondent à l'intervalle à 95% (i.e. 2σ).

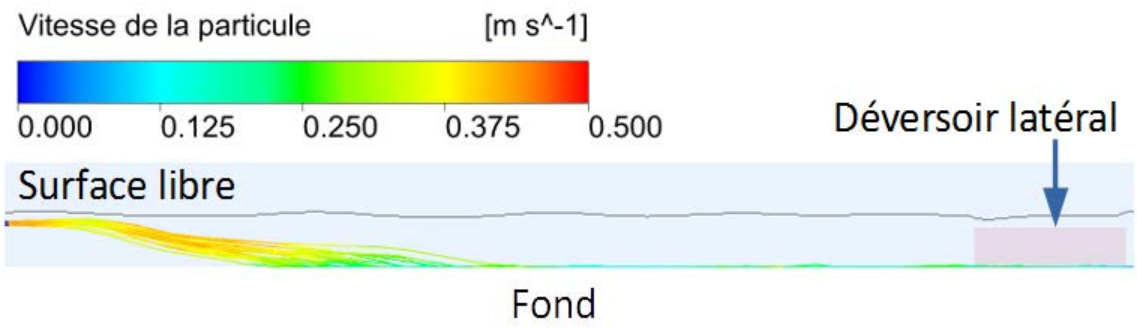


Figure 6.14 – Les trajectoire des particules en verre expansé avec $\rho_p = 2010\,Kg/m^3$ et $d_p = 400\,\mu m$ pour le point d'injection «1».

L'échelle constante du temps C_L influence la répartition massique de particules en suspension de deux manières : (i) la masse déversée $m_\mathrm{D} \propto C_L$ et (ii) la répartition massique devient invariable pour des C_L élevés (Fig. 6.15).

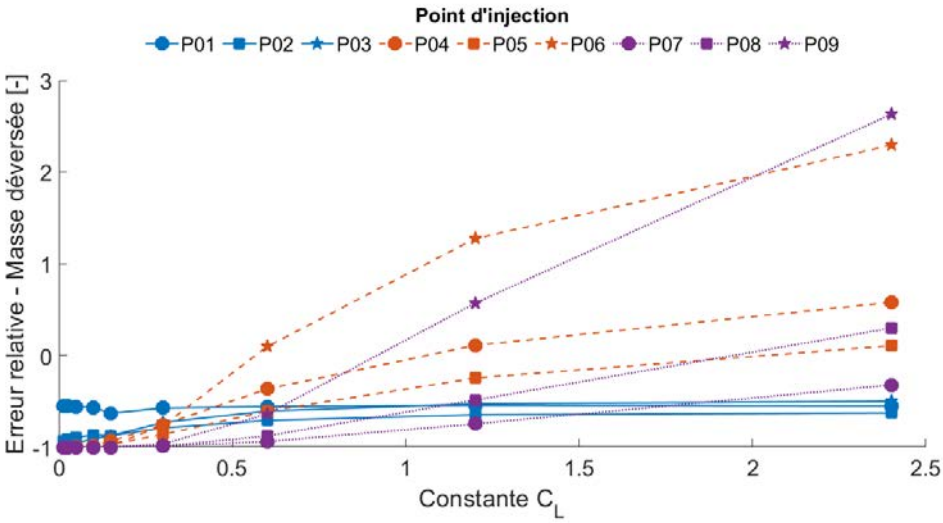
La masse déversée m_D est proportionnelle à la constante C_L parce que cette dernière intensifie la dispersion spatiale des particules. Une dispersion spatiale plus élevée permet d'augmenter la probabilité de déversement des particules. Cependant, la masse déversée atteint sa limite pour $C_L \geq 1.2$ dans ce cas d'étude (Fig. 6.15). Les deux mécanismes responsables de ce seuil sont : (i) le temps d'interaction entre la particule-tourbillon et (ii) la méthode numérique d'injection de particules.

D'une part, le temps d'interaction particule-tourbillon maximal est égal au temps de vie du tourbillon si C_L devient très grand (voir Eq. 6.17). Cette valeur maximale représente la dispersion spatiale maximale des particules due à la turbulence de l'écoulement (i.e. l'énergie cinétique turbulente k). Quand la constante $C_L \geq 1.2$, la dispersion spatiale des particules atteint la dispersion homogène maximale possible sur la section transversale pour le présent cas d'étude.

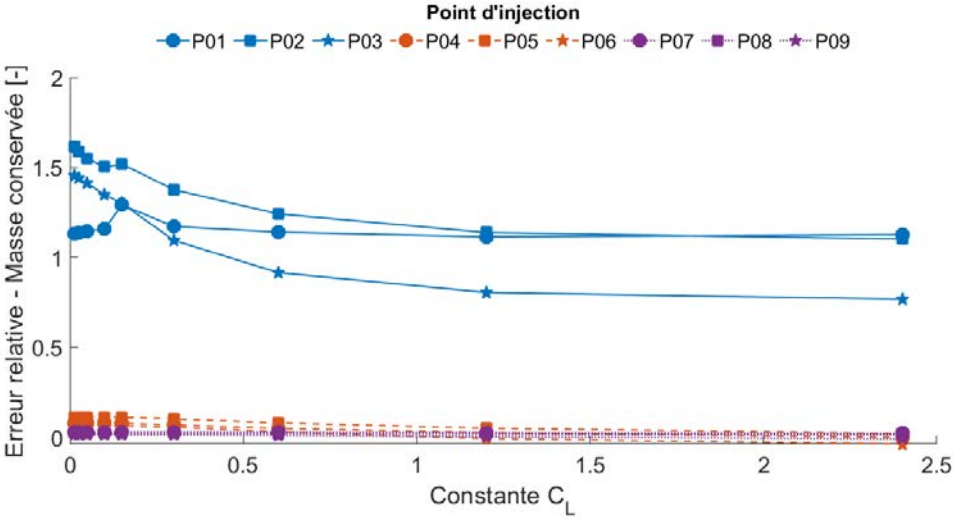
D'autre part, la méthode numérique d'injection de particules ne reproduit pas les conditions expérimentales d'injection de particules. L'écoulement expérimental au niveau de l'injection est oscillatoire à cause de la présence du dispositif d'injection (Fig. 6.4). Par contre, l'injection numérique de particules est horizontale à l'écoulement et la vitesse initiale imposée à la particule est nulle ($u_p^{ini} = 0\ m/s$). Ces deux choix numériques affectent principalement les grandes particules, car celles-ci n'auront pas une énergie

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2020LYSEI083/these.pdf
© [A. Claro Barreto], [2020], INSA Lyon, tous droits réservés

cinétique initiale suffisante pour rester en suspension jusqu'au déversement latéral (Fig. 6.14).



(a)



(b)

Figure 6.15 – L'erreur relative $(y_{\text{Sim}} - y_{\text{Exp}})/y_{\text{Exp}}$ de la masse déversée (Fig. 6.15a) et de la masse conservé (Fig. 6.15b) en fonction de la constante C_L pour tous les 9 points d'injection.

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2020LYSEI083/these.pdf
© [A. Claro Barreto], [2020], INSA Lyon, tous droits réservés

6.4 Conclusions

La répartition massique des particules inertes au sein d'un déversoir latéral à échelle réduite en régime fluvial a été étudiée expérimentalement et numériquement. La répartition massique est évaluée à l'aide de 9 points indépendants d'injection de sédiments à l'amont du déversoir latéral. Les expériences en laboratoire ont permis d'observer que les particules étudiées ne se comportent pas comme des scalaires passifs, car le pourcentage de masse déversée est inférieur au pourcentage (numérique) de déversement de l'écoulement pour l'ensemble des points d'injection de la section transversale. Malheureusement, les pourcentages expérimentaux obtenus sur une même verticale (z/B fixe) semblent biaisés parce que le dispositif d'injection a perturbé l'écoulement au niveau du point d'injection en augmentant la dispersion verticale de particules. Cette influence est observée expérimentalement pour les points d'injection les plus proches du déversement (i.e. $z/B = 0.87$) parce que les distributions granulométriques des particules déversées et conservées sont similaires, voire égales.

Concernant le modèle numérique de transport de particules, le modèle DPM est capable de reproduire la répartition massique pour les points d'injection dans la moitié opposée au déversement ($z/B \leq 0.5$). Cependant, la répartition massique est sous-estimée pour la verticale la plus proche du côté du déversement (i.e. $z/B = 0.87$). La principale source d'erreur est l'hydrodynamique reproduite par le modèle de turbulence RNG k-ϵ parce que la dissymétrie des distributions spatiales de la vitesse longitudinale $\overline{u}$ n'est pas correctement reproduite (Chapitre 3). Ensuite, la méthode numérique d'injection de particules est l'autre source majeure d'erreur parce qu'elle ne reproduit pas l'écoulement expérimental oscillatoire à l'aval du point d'injection.

La 3ième principale source d'erreur est la méthode utilisée pour prendre en compte la dispersion liée à la turbulence, car celle-ci a été conçue pour des particules (i) qui subissent une loi de trainée dans le régime de Stokes et (ii) qui ont un rapport de masse volumique $\rho/\rho_p \leq 10^{-3}$ (Brown et Hutchinson 1979). Le coefficient de trainée C_D des particules simulées ($d_p \in [100 - 300]\ \mu m$) est localisé dans le régime de Stokes. Par contre, le rapport $\rho/\rho_p \leq 10^{-3}$ n'est pas respecté pour les particules simulées ni pour celles rencontrées en réseaux d'assainissement. Les sédiments *in situ* et ceux injectés dans le déversoir latéral ont tendance à avoir un temps d'interaction particule-tourbillon inférieur à celui des particules avec un rapport de masse volumique $\rho/\rho_p \leq 10^{-3}$, car les forces de flottabilité, masse ajoutée et du gradient de pression sur la particule sont inférieures pour les particules avec un rapport de masse volumique $\rho/\rho_p \leq 10^{-3}$.

Au vu des résultats numériques obtenus dans la présente étude, des études expérimentales et numériques additionnelles devront être réalisées afin de pouvoir appliquer avec confiance l'approche numérique du transport de sédiments sur le flux de pollution particulaire déversé par un déversoir d'orage en temps de pluie. Les perspectives ci-dessous sont les premières pistes à explorer pour appliquer promptement l'approche numérique dans ce type d'ouvrages.

6.5 Perspectives

Le temps disponible pour les expériences de laboratoire – en raison des multiples approches combinées dans ce travail mais aussi de la disponibilité de l'installation utilisée par d'autres doctorants – a laissé quelques inconnues au sein de notre travail qui gênent des conclusions parfaitement définitives. Notamment, il serait intéressant de faire des expériences complémentaires pour vérifier si le dispositif d'injection, créant des tourbillons de type Von Karmann, a un réel impact sur la dispersion verticale. Un injecteur par capillaire horizontal pourrait permettre ces tests. . En outre, il serait intéressant d'effectuer des expériences complémentaires, en faisant varier le débit d'entrée, la hauteur du seuil latéral et le débit conservé, pour afin d'évaluer l'impact du nombre de Froude sur la distribution spatiale du pourcentage de masse déversée.

D'un point de vue numérique, certaines amélioration pourraient également être apportées. Celle concernant la reproduction de l'hydrodynamique du déversoir latéral en régime fluvial a déjà été évoquée, car une mauvaise restitution du champ de vitesse et de contraintes turbulentes peut grandement affecter les

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2020LYSEI083/these.pdf
© [A. Claro Barreto], [2020], INSA Lyon, tous droits réservés

performances du modèle de transport solide. Ensuite, en l'absence de nouvelles expériences, il serait intéressant de modifier la direction de la vitesse d'injection de particules, où plutôt d'y adjoindre un obstacle dont le nombre de Strouhal permettrait de reproduire les oscillations de l'injection observées en laboratoire, afin de statuer sur son influence dans la dispersion des particules. Enfin, si la répartition massique n'est pas correctement reproduite, il sera nécessaire de prendre en compte l'influence des particules sur l'écoulement à l'aide du modèle de transport de particules en couplage bidirectionnel.

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2020LYSEI083/these.pdf
© [A. Claro Barreto], [2020], INSA Lyon, tous droits réservés

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2020LYSEI083/these.pdf
© [A. Claro Barreto], [2020], INSA Lyon, tous droits réservés

La pollution déversée au niveau du déversoir d'orage « Gambetta »

> Water and air, the two essential fluids on which all life depends, have become global garbage cans.
>
> *Jacques-Yves Cousteau*

7.1 Introduction

Valence Romans Agglo souhaite évaluer si le critère de conformité réglementaire lié au flux de pollution déversée est le mieux adapté au fonctionnement de son système de collecte (Chapitre 1). A cette fin, la présente étude s'intéresse à la pollution déversée en temps de pluie par le principal déversoir d'orage (DO) du système de collecte, le DO « Gambetta », car ce DO est responsable d'un peu plus de 50% du volume annuel déversé (Valence Romans Agglo 2018).

L'ensemble des travaux sur l'hydrodynamique des déversoir latéraux, présentés dans les Chapitres 3 et 4, a permis de comprendre le fonctionnement du DO « Gambetta » en temps de pluie (e.g. les zones de contribution au déversement, la loi de déversement, etc.). En outre, la précédente étude expérimentale (Chapitre 6), sur le transport en suspension de particules au sein d'un déversoir latérale à échelle réduite, a montré que les particules (ou polluants particulaires) transportées en suspension ne suivent pas l'écoulement. Ces résultats expérimentales et numériques seront pris en compte dans la présente étude lors de la conception d'une méthodologie adaptée au suivi de la pollution déversée en temps de pluie au niveau du DO « Gambetta ».

Les premiers travaux sur la pollution déversée par les DO en temps de pluie datent des années 90. En Europe centrale et en Allemagne, les principaux travaux expérimentaux ont permis de mesurer la pollution déversée à l'aide de préleveurs automatiques afin d'établir des concentrations événementielles en matières en suspension (MES) et la demande chimique en oxygène (DCO) (Brombach et Fuchs 2003 ; Macke et al. 2002, 1987 ; O. Schulz et Macke 1995 - d'après Gruber et al. 2005). W. Schulz et al. (1994) ont mesuré la pollution déversée par trois DO du système de collecte de la ville de Munich (Allemagne) afin de créer une base de données pour les futurs aménagements du système, qui devront permettre de réduire l'impact des rejets de temps de pluie. Leurs travaux ont permis d'obtenir des pollutogrammes et d'établir des concentrations moyennes de déversement en MES, DCO, DBO_5 et de certains métaux lourds (i.e. le plomb, le cuivre, le zinc et le cadmium). Les travaux de Gruber et al. (2005) ont estimé le flux déversé par un DO de la ville de Graz (Autriche) grâce à la mesure en continue par spectrométrie UV-Visible. Ces mesures ont permis d'estimer la variation temporelle des concentrations en MES et en DCO. Cependant, les flux de pollution déversée en MES et en DCO ont été calculés à l'aide de l'équation par défaut de la sonde submersible de spectrométrie.

En France, différents travaux se sont également intéressés à l'estimation le flux de pollution déversée en MES et/ou en DCO à l'aide de la mesure en continu de la turbidité (e.g. Maruéjouls et al. 2017 ; Roger et Tonghini 2010 ; Vandelannoote et Desetables 2010). Vandelannoote et Desetables (2010) ont pré-

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2020LYSEI083/these.pdf
© [A. Claro Barreto], [2020], INSA Lyon, tous droits réservés

senté une procédure adaptée aux contraintes opérationnelles (e.g. les phénomènes d'encrassement et d'occultation des cellules optiques) afin de garantir la surveillance constante des 24 DO du département de Seine-Saint-Denis. Ils ont établi des relations empiriques entre la Turbidité et les MES pour chacun des 24 DO instrumentés. Maruéjouls et al. (2017) ont estimé le flux de pollution déversée en MES des quatre principaux DO du réseau unitaire du bassin versant historique de la ville de Bordeaux. Ils ont observé que le calcul de la masse totale déversée avec (i) la concentration moyenne *in situ* constante ou (ii) la concentration temporelle issue de la relation *in situ* turbidité-MES donnent un écart d'environ 10%.

En Espagne, les travaux de Diaz-Fierros et al. (2002) ont étudié le flux déversé en temps de pluie par le DO en tête de la station d'épuration (STEP) de la ville de Santiago de Compostela. Ces travaux ont permis d'obtenir des pollutogrammes et d'estimer les concentrations moyennes événementielles (CME) à l'aide des campagnes de prélèvement ponctuel. Ensuite, Suarez et Puertas (2005) ont présenté les principaux résultats d'un projet de recherche au niveau national sur les flux de pollution déversés en temps de pluie au sein de cinq différents bassins versants. De manière similaire à Diaz-Fierros et al. (2002), ces travaux ont permis d'obtenir des pollutogrammes et d'estimer les CME et les masses déversées en termes de MES, DCO et DBO_5 pour chacun des événements pluvieux étudié sur chaque bassin versant. Récemment, García et al. (2017) ont mesuré le flux de pollution en temps de pluie à l'exutoire de deux bassins versants résidentiels de la ville de Murcia. Les points de mesure de la qualité des effluents (i) se localisent en amont des DO et (ii) mesurent en continu grâce à un canal extérieur alimenté par un système de pompage et des sondes de turbidité, conductivité et température. Les flux de pollution déversés en MES et en DCO calculés par García et al. (2017) correspondent à une estimation parce qu'ils sont calculés à l'aide des séries temporelles *in situ* et d'une sonde de turbidité uniquement étalonnée (i.e. sans relations empiriques *in situ* MES-Turbidité et DCO-Turbidité).

Les principaux résultats des travaux sur la pollution en temps de pluie à l'exutoire des réseaux unitaires (e.g. Gromaire et al. 2001) ou déversée (i.e. les travaux précédemment cités) ont montré que les effluents déversés en temps de pluie transportent des matières organiques, des métaux lourds, médicaments, et d'autres micropolluants (Gasperi et al. 2010, 2014). En outre, la plupart de ces polluants, par exemple les métaux lourds, HAP (hydrocarbures aromatiques polycycliques) ou matières organiques, sont transportés par les particules en suspension (e.g. Gromaire et al. 2001). Par exemple, Gromaire-Mertz et al. (1998) et Zhang et T. Li (2015) ont montré qu'environ 72-92% de la demande chimique en oxygène (DCO) en temps de pluie correspond à la fraction particulaire (diamètre > 0.45 µm). Gromaire-Mertz et al. (1998) ont montré que la fraction particulaire représente environ 71-91% de la DBO_5 des flux produits en temps de pluie sur le bassin versant « Le Marais » à Paris (France). La principale source de cette pollution organique, susceptible d'être déversée, est la remise en suspension des sédiments déposés et de l'arrachement du biofilm lors des événements pluvieux (e.g. Gasperi et al. 2010 ; Gromaire-Mertz 2000 ; Gromaire et al. 1997 ; Hannouche et al. 2014 ; Seco et al. 2013). En effet, il est observé un pic de concentration des MES, de la DCO et de la DBO_5, produit au début de l'événement pluvieux, avec une décroissance temporelle de la concentration au cours du déversement (e.g. Diaz-Fierros et al. 2002 ; García et al. 2017 ; Gruber et al. 2005 ; W. Schulz et al. 1994 ; Xu et al. 2017). Ce pic de concentration est généralement corrélé au pic du débit au début de l'événement pluvieux. La variation de la concentration dans le temps (i.e. le pollutogramme) dépend en général de la concentration en temps sec, de la concentration maximale observée, et du débit (García et al. 2017).

Enfin, l'objectif final des différents travaux est généralement le calcul de la masse totale déversée en temps de pluie grâce à la mesure du débit et de la concentration. Ce flux de pollution déversée peut être calculé avec la concentration moyenne événementielle (CME) (e.g. Suarez et Puertas 2005) ou globale (e.g. bilan 24 heures en entrée de STEP), ou avec la mesure en continu de la turbidité ou de la spectrométrie UV-Visible (e.g. Gruber et al. 2005). L'utilisation des sondes optiques submersibles requiert la création des lois empiriques avec des échantillons *in situ*. Les CME sont obtenues à l'aide d'un échantillon composé, ou par pondération d'un ensemble d'échantillons uniques, ou à l'aide de la mesure en continu préalablement calibrée.

Malgré les connaissances acquises grâce aux différents travaux de recherche cités auparavant, la plupart des sites de mesure de la pollution en temps de pluie correspondent à l'exutoire des réseaux unitaires

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2020LYSEI083/these.pdf
© [A. Claro Barreto], [2020], INSA Lyon, tous droits réservés

(e.g. García et al. 2017 ; Gasperi et al. 2010 ; Gromaire et al. 2001), car l'hypothèse faite est que la pollution déversée par les DO en aval est la même que celle observée dans les points de mesure. D'autres études n'ont pas mesuré la concentration du flux déversé mais la concentration proche du fond de la chambre de déversement (e.g. Maruéjouls et al. 2017), ou à l'amont du déversement (e.g. García et al. 2017 ; Vandelannoote et Desetables 2010) ou bien la pollution en tête de STEP (Roger et Tonghini 2010). Ces études supposent également que la concentration mesurée correspond à celle déversée en temps de pluie.

Pour finir, la plupart des travaux qui ont mesuré le flux déversé se sont intéressés uniquement aux flux des MES et/ou de la DCO déversés à l'aide des relations empiriques basées sur la mesure de turbidité (e.g. Maruéjouls et al. 2017 ; Vandelannoote et Desetables 2010) ou par spectrométrie UV-Visible (e.g. Gruber et al. 2005). Seuls les travaux de Diaz-Fierros et al. (2002) et Suarez et Puertas (2005) ont mesuré également la demande biochimique en oxygène sur 5 jours (DBO_5) des effluents déversés en temps de pluie.

La présente étude s'intéresse tout particulièrement (i) à évaluer la pollution en DBO_5 déversée en temps de pluie par un DO en réseau unitaire dans le but de vérifier le respect des contraintes règlementaires françaises en vigueur (i.e. l'Arrêté du 21 juillet 2015) et (ii) à développer, tester et vérifier des relations empiriques entre les MES et la DBO_5 déversées. L'existence d'une corrélation entre les concentration en MES et en DBO_5 déversées est attendue d'après les travaux de Piro et al. (2007) sur la relation entre les MES et la DCO en temps de pluie. Le flux de pollution déversé en temps de pluie pourra être évalué à l'aide de la concentration moyenne événementielle en DBO_5 obtenue par une pondération des échantillons instantanés. L'exploitation des relations MES - DBO_5 établies permettra de vérifier si le critère de conformité lié au flux de pollution en DBO_5 est approprié pour la ville de Valence. Une nouvelle méthode de mesure de la DBO_5 en 48 heures (la méthode Enverdi®) est également exposée dans ce chapitre.

7.2 Matériel et méthodes

Le flux de pollution déversé par le déversoir d'orage « Gambetta » en temps de pluie est étudié expérimentalement. L'ensemble des équipements mis en place pour échantillonner l'écoulement chargé en polluants est présenté dans la Section 7.2.1. Le protocole de mesure conçu pour échantillonner l'écoulement et caractériser la pollution collectée est présenté dans les Sections 7.2.2.1-7.2.2.2, respectivement. L'ensemble des campagnes de mesure réalisées dans la présente étude est décrit dans la Section 7.2.2.3. L'ensemble des méthodes de caractérisation physico-chimique de la pollution est présenté dans la Section 7.2.3, avec une attention spéciale sur les mesures de la turbidité (Section 7.2.3.1) et de la DBO_5 avec la méthode Enverdi® DBO (Section 7.2.3.2). La méthode de calcul des incertitudes des différentes relations empiriques entre les différents paramètres physico-chimiques est décrite dans la Section 7.2.4.

Ensuite, il est décrit la méthode de calcul de la concentration moyenne événementielle (CME) maximale autorisée par déversement (Section 7.2.5) et la CME du déversement échantillonné (Section 7.2.6). Enfin, la méthode de calcul du flux de pollution déversé par le système de collecte de la ville de Valence pour l'année 2018 est décrite dans la Section 7.2.8.

7.2.1 Le site expérimental

Le déversoir d'orage (DO) « Gambetta » est choisi pour étudier le flux de pollution déversé par temps de pluie. On rappelle que cet ouvrage contribue un peu plus du 50% du volume total déversé à l'année par l'ensemble des DO du système de collecte (Valence Romans Agglo 2018). La géométrie et le fonctionnement hydraulique en temps de pluie sont présentés dans le Chapitre 4. L'écoulement au sein du DO « Gambetta » s'assimile à celui d'un déversoir latéral avec une vanne guillotine à l'aval. En temps de pluie, le flux déversé est véhiculé par deux conduites circulaires parallèles vers la rivière Rhône. Ces deux conduites de déversement sont séparées d'environ 20 cm. Le flux conservé, en temps sec et temps de pluie, est contrôlé par une vanne guillotine et véhiculé par une conduite circulaire avec banquette vers la station d'épuration (STEP) de Valence.

Au départ, l'entrée et toutes les sorties du DO « Gambetta » sont équipées d'un préleveur automatique afin de boucler le bilan de masse collectée, déversée et conservée en temps de pluie. En outre, deux turbi-

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2020LYSEI083/these.pdf
© [A. Claro Barreto], [2020], INSA Lyon, tous droits réservés

dimètres sont installés, un à l'entrée et un dans la conduite du flux conservé (i.e après la vanne guillotine), afin de suivre en continu la turbidité en temps sec et temps de pluie. Cependant, le dysfonctionnement de l'un des quatre préleveurs automatiques et de l'une des deux sondes de turbidité lors des premières campagnes de mesure a réduit l'équipement du DO. Les résultats présentés dans ce chapitre ont été obtenus à l'aide des équipements présentés dans la Fig. 7.1.

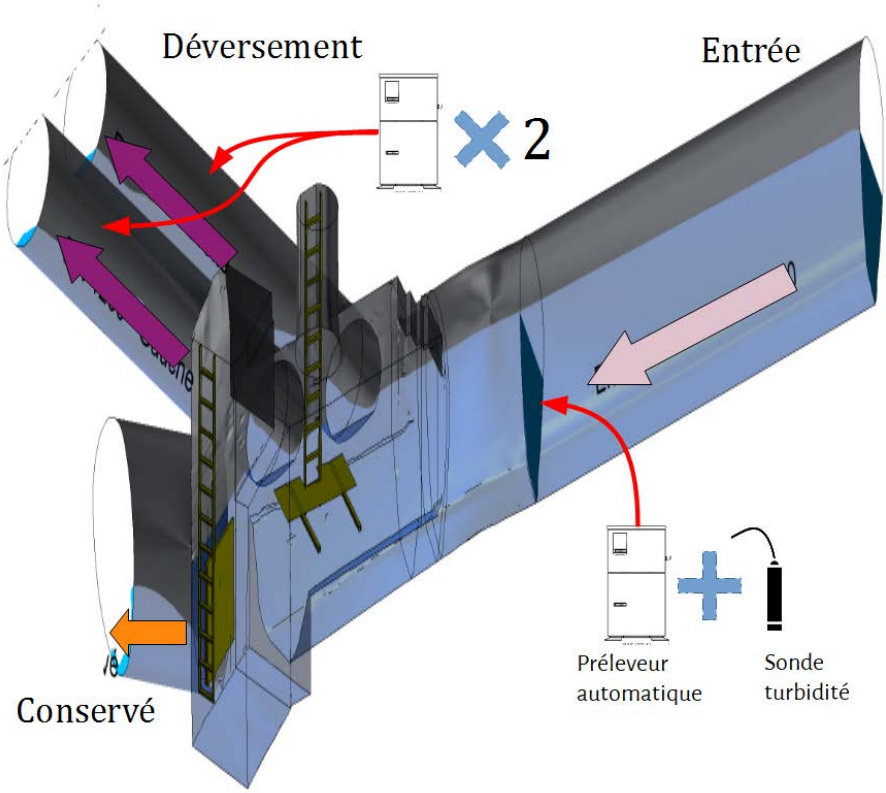


Figure 7.1 – Schéma 3D des équipements installés au déversoir d'orage « Gambetta » pour suivre le flux de pollution en temps de pluie. Le sens de l'écoulement est indiqué par les flèches en mauve pour l'entrée, en violet foncée pour le déversement et en orange pour le débit conservé.

Les préleveurs automatiques sont installés dans un « kiosque » localisé juste à côté de la chambre du DO, cet édifice est géré par le service d'assainissement de Valence Romans Agglo. Les caractéristiques des préleveurs installés sont présentées dans le Tableau 7.1. Les prélèvements sont commandés à l'aide d'une impulsion électrique depuis un poste de télégestion SOFREL S550 dédié au présent projet de recherche. Le principe de prélèvement en temps de pluie est expliqué dans la Section 7.2.2.

Section de mesure	Amont	Droit	Gauche
Référence	Liquiport 2010 CSP44	SD900 Sigma	
Refrigéré	Non	Oui	
Poste Fixe	Non	Oui	
Système de dosage	Pompe Péristaltique précalibrée		
Volume bouteille (mL)	750	1000	
Nombre de bouteilles	12	24	24

Tableau 7.1 – Caractéristiques des préleveurs automatiques installés dans le déversoir d'orage « Gambetta ».

La sonde de turbidité Turbimax CUS51D est installée à l'amont de la chambre de déversement à l'aide du système présenté dans la Fig. 7.2. Ce système permet (i) d'installer la sonde proche du point d'échan-

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2020LYSEI083/these.pdf
© [A. Claro Barreto], [2020], INSA Lyon, tous droits réservés

tillonnage et (ii) de la situer au centre de la section transversale à une hauteur fixe. La conduite en PVC sert (i) de bras de fixation pour la sonde de turbidité (en violet) et (ii) de chemin de support au tuyau d'aspiration souple (en vert) jusqu'au point d'échantillonnage. Cette conduite en PVC est fixée en haut à une barre horizontale en inox d'environ 5 mètres et maintenue en position verticale par une équerre en inox sur mesure. Des supports en inox accrochés au plafond de la chambre de déversement permettent de supporter le poids de tout le système. La sonde de turbidité et le point de prélèvement sont installés à environ 2 m à l'amont de l'entrée de la chambre du DO. L'interaction entre le système de fixation et la sonde de turbidité n'a pas été étudiée dans le cadre de ce travail ; il est supposé que la mesure de la turbidité et le prélèvement de l'écoulement ne sont pas impactés de manière significative.

L'état de conduites de déversement avant chaque événement pluvieux est illustré dans la Fig. 7.3. Les deux conduites ne présentent pas des dépôts, d'après plusieurs vérifications *in situ*. Seule la conduite de déversement « Gauche » présente en certaines occasions de l'eau stagnante (Fig. 7.3a) à cause de la pente de la conduite entre le point de mesure et l'aval.

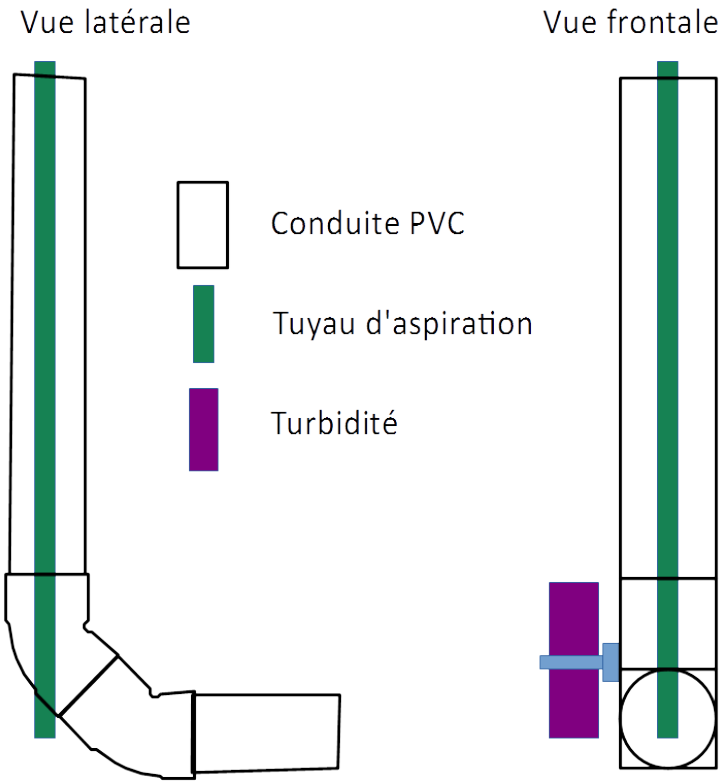


Figure 7.2 – Schéma du système de fixation d'une sonde de turbidité (DN40) au centre de la conduite d'entrée du déversoir d'orage « Gambetta ». Les diamètres externes de la sonde de turbidité, du tuyaux PVC, du tuyau d'aspiration souple sont respectivement 40, 70, 15.9 mm. A noter que les dessins ne sont pas à l'échelle.

7.2.2 Protocole de mesure de la pollution au sein d'un déversoir d'orage en temps de pluie

Le protocole de mesure de la pollution au sein du déversoir d'orage « Gambetta » en temps de pluie se divise en deux parties : (i) l'échantillonnage de l'écoulement et (ii) la caractérisation des échantillons du point de vue des paramètres physico-chimiques décrits dans la Section 7.2.3.

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2020LYSEI083/these.pdf
© [A. Claro Barreto], [2020], INSA Lyon, tous droits réservés

(a) Conduite « Gauche » -Vue vers l'aval.

(b) Conduite « Droit » - Vue vers l'aval.

Figure 7.3 – État des conduites de déversement « Gauche » (Fig. 7.3a) et « Droit » (Fig. 7.3b) en temps sec.

7.2.2.1 L'échantillonnage de l'écoulement

La stratégie d'échantillonnage correspond à un prélèvement à pas de temps variable et volume constant (Bertrand-Krajewski et al. 2000) sans recomposition d'échantillon composite, car on souhaite connaître la dynamique temporelle de la pollution. Le pas de temps minimum entre deux prélèvements est égal au rapport entre la durée totale de mesure (4 heures) et le nombre de bouteilles du préleveur (Tableau 7.1). La durée totale de mesure est obtenue à l'aide d'une analyse statistique des durées de déversement des années précédentes entre 2013 au 2015, elle est égale pour tous les préleveurs automatiques. Si la durée du déversement est supérieure à 4h, le déversement sera échantillonné uniquement sur les premières 4 heures parce que l'on ne dispose pas de matériel supplémentaire pour continuer à échantillonner. Le volume échantillonné dépend de la section de mesure (voir Tableau 7.1).

Procédure d'échantillonnage

Lorsqu'un événement pluvieux produit un déversement au niveau du DO « Gambetta », une campagne de mesure démarre selon la procédure ci-dessous :

1. Déclenchement automatique du préleveur de la conduite de déversement dès que le niveau de l'eau est supérieur ou égal à 10 cm pendant 1 minute.

   - Ce seuil sur la hauteur d'eau a été déterminé lors des essais de pompage et pré-calibration du préleveur automatique.
   - La durée de 1 minute permet (i) de s'assurer que la sonde de hauteur *in-situ* mesure en temps de pluie et (ii) d'éviter de prélever au moment où les données de débits sont erronées.

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2020LYSEI083/these.pdf
© [A. Claro Barreto], [2020], INSA Lyon, tous droits réservés

- Le poste de télégestion (Sofrel S550) démarre les préleveurs automatiques des conduites de déversement de manière indépendante. Par exemple, le préleveur de la conduite « Gauche » pourra démarrer si les conditions sur la hauteur ($H > 10$ cm) et le temps ($T = 1$ min) sont vérifiées même si ces conditions ne sont pas encore vérifiées dans la conduite côté « Droit ».

2. Déclenchement automatique du préleveur « Amont » lorsque l'un des préleveurs des conduites de déversement (« Gauche » ou « Droit ») est actionné comme indiqué à l'étape précédente.

3. Collecte d'un échantillon par flacon à un pas de temps variable et volume fixé. Le préleveur « Amont » collecte 12 flacons tandis que les sections de mesure des conduites de déversement collectent 24 flacons au total. A noter que le déclenchement du prélèvement est réalisé à l'aide d'une procédure codée et intégrée dans le poste de télégestion.

   3.1 Ne pas vérifier le pas de temps si c'est le premier flacon.

   3.2 Vérifier que le pas de temps minimum est atteint et que la hauteur d'eau dans la section de mesure soit (i) supérieure ou égale à 10 cm pour les conduites de décharge et (ii) supérieure au profil de temps sec pour la conduite « Amont ». Si la condition sur la hauteur d'eau n'est pas respectée, le poste de télégestion attend 15 secondes avant de vérifier à nouveau les conditions décrites.

   - Les pas du temps minimums pour les préleveurs des conduites de déversement et à l'entrée du DO sont respectivement 10 minutes et 20 minutes. Ces pas de temps ont été choisis en fonction de la durée moyenne d'un événement pluvieux (i.e. 4 heures) et des prélever automatiques utilisés, afin de couvrir la totalité de l'évènement de déversement.
   - Le profil de temps sec à l'entrée du DO est calculé à l'aide des séries temporelles des années 2011 à 2015.

4. La campagne de mesure s'arrête selon l'une des trois conditions ci-dessous.

   4.1 Toutes les bouteilles sont remplies.

   4.2 Le temps d'attente écoulé depuis le dernier prélèvement est supérieur à 24 heures.

   4.3 L'opérateur met fin aux prélèvements à la fin de l'événement pluvieux.

7.2.2.2 La caractérisation de la pollution

Une fois la campagne de mesure réalisée, la turbidité des échantillons collectés est mesurée *in situ* selon le protocole de la Section 7.2.3.1. Le turbidimètre utilisé est celui installé à l'amont de l'entrée de la chambre du DO.

La pollution des échantillons est caractérisée à l'aide des paramètres physico-chimiques indiquées dans le Tableau 7.2. Le carbone organique total (COT) et la demande biochimique en oxygène sur 5 jours (DBO_5) sont analysés par le laboratoire agréé mandaté. Les autres paramètres sont analysés par le doctorant dans le laboratoire d'analyse du laboratoire DEEP ou le laboratoire interne de la STEP de la ville de Valence. La DBO_5 avec la méthode Enverdi® DBO (DBO_5 - 48h) est réalisée seulement dans le laboratoire DEEP comme indiqué dans la Section 7.2.3.2.

7.2.2.3 Les campagnes de mesure réalisées

Les campagnes de mesure de la pollution au sein du DO « Gambetta » se sont déroulées dans la période du 01/08/2018 au 31/03/2019. Suite à des problèmes techniques sur les préleveurs et informatiques sur le poste de télégestion Sofrel S550, les événements pluvieux dans la période 01/08/2018 au 28/10/2018 n'ont pas pu être mesurés. L'ensemble des caractéristiques des pluies, déversements et prélèvements sur le déversoir d'orage « Gambetta » est présenté dans le Tableau 7.3.

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2020LYSEI083/these.pdf
© [A. Claro Barreto], [2020], INSA Lyon, tous droits réservés

Laboratoire	Paramètre physico-chimique	Norme	Volume échantillon (mL)
Interne	MES	AFNOR T.90-105	> 250
	MVS	AFNOR NF T90-029	
	DCO	AFNOR T.90-101	
	DBO_5 - 48h	Code Sandre 991	
Externe	COT	AFNOR NF EN 1484 (T90-102)	250
	DBO_5	AFNOR NF EN 1899-1	

Tableau 7.2 – L'ensemble des analyses physico-chimiques pour caractériser la pollution déversée par le déversoir d'orage « Gambetta ».

		Tous Médiane [5% - 95%]	2018 29/10	2018 06/11	2018 19/12	2019 07/03
Pluie						
H_{Total}	(mm)	12.3 [2.97 - 56.47]	63.3	34.4	12.7	10.60
$\overline{I}$	(mm/h)	1.56 [0.46 - 6.36]	2.29	4.20	1.99	5.05
$\overline{I}_{\text{max}}(12\,\text{min})$	(mm/h)	4.50 [1.43 - 19.95]	5.25	5.75	4.25	15.50
Durée	(hh:mm)	8:12 [1:04 - 31:34]	27:42	8:12	6:24	2:06
Temps sec précédent	(jours)	2.13 [0.28 - 19.11]	0.26	4.16	2.14	1.14
Déversement						
$\overline{D}$	(m^3/s)		0.514	1.649	0.722	0.761
D_{max}	(m^3/s)		1.662	2.932	1.412	1.351
Volume	(m^3)		33 280	31 656	8 008	5 704
Section de mesure (Volume prélevé $\geq 500\ mL$)						
Amont			8	3	1	-
Gauche	(nombre		-	-	-	9
Droit	d'échantillons)		7	8	12	7
Aval			4	×	×	×

Tableau 7.3 – Caractéristiques de l'ensemble des événements pluvieux qui ont produit un déversement entre l'année 2013 et 2018 (« Tous ») et ceux mesurés. *Section de mesure* : La section de mesure « Aval » est condamnée (symbole ×) après la première campagne de mesure afin d'équiper la section de mesure « Amont ».

Lors de la campagne de mesure du 29/10/2018, le préleveur automatique de la section de mesure « Amont » est tombé en panne au cours de l'événement pluvieux. Le préleveur automatique de la section de mesure « Aval » a été condamné (symbole × - Tableau 7.3) et son préleveur a été utilisé pour la section de mesure « Amont ».

Il est observé que la section « Droit » a fonctionnée pour les quatre campagnes de mesure tandis que la section « Gauche » a fonctionnée seulement pour une campagne de mesure. La principale cause de dysfonctionnement du point « Gauche » a été la sortie du tuyau d'aspiration dans le dispositif installé dans

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2020LYSEI083/these.pdf
© [A. Claro Barreto], [2020], INSA Lyon, tous droits réservés

cette conduite de décharge.

La section de mesure « Amont » est celle qui a dysfonctionné le plus souvent à cause des macrodéchets accrochés dans le système de support de la sonde de turbidité et de prélèvement comme illustré sur la Fig. 7.4. Du fait du faible nombre de mesures réalisées dans les sections « Amont » et « Aval », les résultats d'analyse liés à ces sections ne seront pas présentés dans ce chapitre (le peu d'échantillons n'est pas suffisant pour une analyse représentatif du fonctionnement du DO en termes de pollution).

Figure 7.4 – Exemple des macro déchets accrochés au système de support de la sonde de turbidité et de prélèvement pour la section de mesure « Amont ».

7.2.3 Les analyses physico-chimiques

La pollution des échantillons collectés en temps de pluie est mesurée à l'aide des différentes analyses physico-chimiques indiquées dans le Tableau 7.2. La turbidité est le seul paramètre analysé *in-situ*. L'ensemble des mesures physico-chimiques réalisées dans le cadre de cette étude est présenté dans l'Annexe F.

L'incertitude de mesure du carbone organique total (COT) et de la demande biochimique en oxygène sur 5 jours (DBO_5) d'après le laboratoire agréé mandaté est égale à 10% de la valeur mesurée. L'incertitude des autres paramètres physico-chimiques a été obtenue à partir des résultats des analyses réalisées en laboratoire par le doctorant.

7.2.3.1 La turbidité

La turbidité du milieu est mesurée à l'aide d'une sonde Turbimax CUS51D de la société Endress+Hauser. Cette sonde utilise la méthode de la lumière rétrodiffusée : une lampe à LED émet un faisceau lumineux au sein d'un milieu chargé en particules et deux détecteurs de lumière positionnés à 90° et 135° mesurent la quantité de lumière diffusée. La sonde possède deux systèmes d'émission-réception indépendants afin de rendre la mesure plus robuste.

La turbidité des échantillons collectés est mesurée à l'aide d'un bécher en verre prélavé de 1 L et d'un agitateur magnétique pour assurer l'homogénéisation de l'échantillon. Le système est mis en obscurité à l'aide d'une boîte en PVC construite sur mesure auparavant par l'équipe du diagnostic permanent de Valence. Une fois le signal stable, la turbidité est enregistrée manuellement pendant un intervalle de temps d'environ 1 minute afin de calculer l'incertitude-type.

Malgré toutes les précautions prises en compte lors des mesures, les premiers résultats expérimentaux n'ont pas permis d'établir une relation empirique entre la turbidité et les matières en suspension

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2020LYSEI083/these.pdf
© [A. Claro Barreto], [2020], INSA Lyon, tous droits réservés

(MES) pour les flux d'entrée et de sortie du déversoir d'orage «Gambetta» en temps de pluie (Fig. 7.5). Même si ces premiers résultats expérimentaux sont décourageants, différents travaux de recherche ont déjà démontré que les MES et la DCO peuvent être corrélées à une mesure de turbidité (e.g. Bersinger et al. 2015; Joannis et al. 2015; Lacour et al. 2009; G. Ruban et al. 2001). D'autres événements pluvieux devront être échantillonnés sur ce site expérimental afin d'établir les relations empiriques à l'aide de la turbidité en temps de pluie.

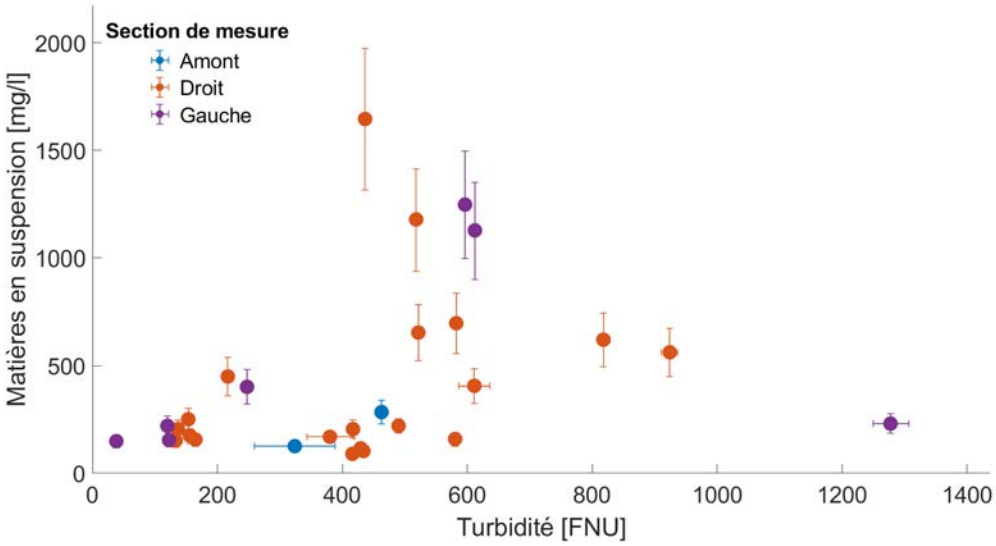


Figure 7.5 – Les matières en suspension (MES) en fonction de la turbidité pour les trois sections de mesure.

7.2.3.2 La DBO_5 en 48 heures - Méthode Enverdi® DBO

La demande biochimique en oxygène sur 5 jours (DBO_5) est mesurée de manière alternative à l'aide de la méthode Enverdi® DBO. La méthode Enverdi® DBO mesure la demande biochimique en oxygène par mesure fluorimétrique de l'activité respiratoire bactérienne lors d'une incubation de 48 heures à 30°C (Code Sandre 991). La fluorescence mesurée est convertie en mg/l d'oxygène (O_2) grâce à des solutions étalons de DBO_5 connue. Les spécifications analytiques de la méthode Enverdi® DBO sont indiquées dans le Tableau 7.4.

Limite de quantification (selon NF T90-210)			3 $mg\,O_2/L$
Validité d'étalonnage (linéaire) (selon NF T90-210)			jusqu'à 90 $mg\,O_2/L$
Exactitude satisfaisante à (selon NF T90-210)	3 9 15	37 50 160	$mg\,O_2/L$
Incertitude élargie ($k = 2$) (selon NF ISO 11352)	de 3 à 6 $mg\,O_2/L$ au-delà 6 $mg\,O_2/L$	$\pm 1.8\,mg\,O_2/L$ (max.) $\pm 30\%$ (max.)	

Tableau 7.4 – Spécifications analytiques de la méthode Enverdi® DBO.

Les trois principaux avantages de cette méthode vis-à-vis de la méthode normée sont (Jouanneau et al. 2014) : (i) un temps d'incubation réduit de 5 jours à 48 heures (Muller et al. 2017), (ii) un domaine d'étalonnage étendu jusqu'à 90 $O_2\,mg/L$ et (iii) pas de limite d'oxygène à respecter contrairement au seuil de

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2020LYSEI083/these.pdf
© [A. Claro Barreto], [2020], INSA Lyon, tous droits réservés

$6\,000\,mg\,O_2/L$ de la méthode normée. En outre, le kit d'analyse Enverdi® DBO a besoin seulement d'un inoculum standard ou pré-validé pour être utilisé. Le lecteur intéressé dans le protocole expérimental de cette méthode d'analyse est invité à consulter le manuel d'utilisation (AMS ENVOLURE 2018).

L'inoculum utilisé correspond à l'entrée de la station d'épuration de Pierre-Bénite (Lyon Métropole). Cet inoculum a été pré-validé par une étude confidentielle réalisée par AMS Envolure SAS au Grand Lyon Métropole (Yoris et Muller 2018). Un délai inférieur de 3 jours est assuré entre le jour d'analyse et le moment de collection de l'inoculum.

La méthode Enverdi® DBO a été validée pour les eaux résiduaires urbaines (ERU) en France et aux Etats-Unis (Magnin et al. 2015; Muller et al. 2017, 2014). Près de 98% des échantillons de temps sec analysés avec la méthode Enverdi® DBO se trouvent dans l'incertitude de la méthode normée.

Afin de vérifier la validité de la méthode Enverdi® DBO pour les rejets urbains par temps de pluie, la pollution déversée le 07/03/2019 par le déversoir d'orage Gambetta a été mesurée avec la méthode normée et la méthode Enverdi® DBO. Un total de 12 échantillons est collecté pour comparer ces deux méthodes d'analyse.

La DBO_5 obtenue avec la méthode Enverdi® est similaire à la méthode normée, 75% des points de validation se localisent dans la bande d'incertitude de $\pm 20\%$ (Fig. 7.6). Seulement 2 points sur 12 semblent aberrantes. L'intervalle de confiance à 95% des données valides (83%) est de l'ordre de grandeur de 20% pour l'ensemble des échantillons mesurés avec la méthode Enverdi® DBO.

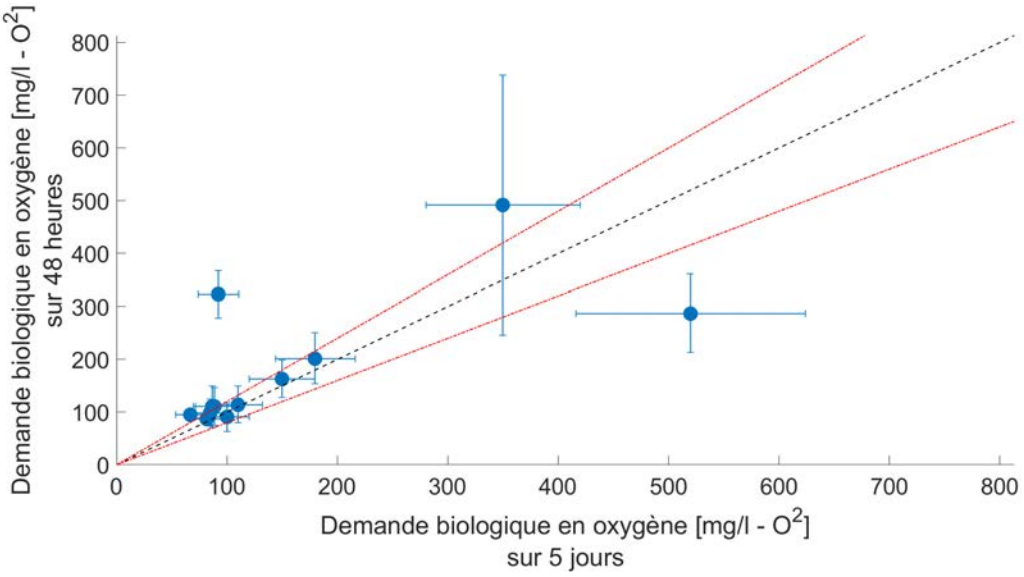


Figure 7.6 – Demande biologique en oxygène sur 5 jours (DBO_5) avec la méthode normée NF EN 1899-1 (en abscisses) versus celle obtenue avec la méthode Enverdi® DBO Code Sandre [991] (en ordonnées). Les barres horizontales et verticales représentent l'intervalle de confiance à 95%. La ligne pointillée en noir représente la fonction $y = x$ et les lignes en pointillées rouges représentent l'incertitude relative à $\pm 20\%$.

7.2.4 L'incertitude des relations entre les paramètres physico-chimiques

Toutes les relations empiriques testées entre les différents paramètres physico-chimiques sont des polynômes de premier ordre avec constante nulle : $y = a\,x$.

Si l'incertitude sur les variables y et x est connue *a priori*, la méthode de Monte Carlo avec 1 million de simulations est appliquée pour estimer la valeur moyenne (Eq. 7.1) et l'écart-type (Eq. 7.2) du coefficient directeur a ainsi que du coefficient de détermination R^2 de la régression. Le coefficient directeur a de chaque simulation de Monte Carlo est calculé selon l'Eq. 7.3 selon la méthode de moindres carrés. Les variables x et y sont générés aléatoirement à l'aide d'une distribution normale multivariée en supposant que les couples (x_k, y_k), (x_k, x_m) et (y_k, y_m) ont un coefficient de corrélation linéaire égal à zéro.

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2020LYSEI083/these.pdf
© [A. Claro Barreto], [2020], INSA Lyon, tous droits réservés

$$\overline{a} \equiv a = \frac{1}{10^6} \sum_{j=1}^{10^6} a_j \tag{7.1}$$

$$u(a) = \sqrt{\frac{1}{10^6 - 1} \sum_{j=1}^{10^6} \left(a_j - \overline{a}\right)^2} \tag{7.2}$$

$$a_j = \frac{\sum x_{i,j} y_{i,j}}{\sum {x_{i,j}}^2} \tag{7.3}$$

Si l'incertitude sur les variables x et y n'est pas connue, le coefficient de détermination R^2 et le coefficient directeur a sont calculés à l'aide d'une méthode de moindres carrées classique. L'écart-type du coefficient a est calculé à l'aide de l'erreur moyenne quadratique et de la matrice jacobienne de la régression selon les équations 2.15 et 2.16.

7.2.5 La concentration moyenne événementielle maximale $\mathrm{CME_{max}}$ du déversement

Le critère de flux de pollution que souhaite vérifier Valence Romans Agglo (Arrêté du 21 juillet 2015) impose que la charge totale déversée en temps de pluie par le système de collecte soit inférieure à 5% de la charge totale collectée. Cette règle est transcrite par l'Eq. 7.4.

$$\frac{\mathrm{V}_{A1} \times \overline{C}_{A1}}{\mathrm{V}_{A1} \times \overline{C}_{A1} + \mathrm{V}_{A3} \times \overline{C}_{A3}} < 5\%, \tag{7.4}$$

avec V_{A1} le volume total déversé en temps de pluie par an par tous les déversoir d'orage (DO) du système de collecte ; V_{A3} le volume total annuel collecté à l'entrée de la STEP ; $\overline{C}_{A1}$ et $\overline{C}_{A3}$ sont les concentrations moyennes annuelles en $\mathrm{DBO_5}$ (demande biochimique en oxygène sur 5 jours) de tous les DO du système de collecte et de l'entrée de STEP, respectivement.

Si l'on considère que tous les DO du système de collecte déversent avec une concentration moyenne événementielle (CME) similaire, la concentration moyenne $\overline{C}_{A1}$ correspond à la concentration moyenne événementielle maximale $\mathrm{CME_{max}}$ que chaque déversement ne doit pas dépasser afin de respecter le critère de conformité lié aux flux de pollution. La concentration $\mathrm{CME_{max}}$ est calculée à l'aide de l'Eq. 7.4 et définie selon l'Eq. 7.5.

$$\overline{C}_{A1} \equiv \mathrm{CME_{max}} < \frac{5}{95} \frac{\mathrm{V}_{A3} \times \overline{C}_{A3}}{\mathrm{V}_{A1}} \tag{7.5}$$

D'après l'Eq. 7.5, le respect du critère du flux de pollution est plus difficile pour les années avec un volume total déversé important (i.e. $\mathrm{V}_{A1}/\mathrm{V}_{A3}$ augmente), car la concentration événementielle $\mathrm{CME_{max}}$ diminue. Par contre, les années avec un volume total déversé faible (i.e. $\mathrm{V}_{A1}/\mathrm{V}_{A3}$ diminue) permettent de déverser un écoulement avec une concentration événementielle $\mathrm{CME_{max}}$ plus élevée.

La concentration $\mathrm{CME_{max}}$ est calculée pour les années 2014 à 2018 d'après le bilan annuel du système de collecte de Valence pour l'année 2018 (Valence Romans Agglo 2018). Le Tableau 7.5 présente la charge collectée à l'entrée de la STEP de Valence ($\mathrm{V}_{A3} \times \overline{C}_{A3}$) et le volume total déversé par l'ensemble des DO (V_{A1}) pour chaque année. La concentration $\mathrm{CME_{max}}$ pour l'année 2018 est d'environ 130.3 $mg\ O_2/L$ de $\mathrm{DBO_5}$.

7.2.6 La concentration moyenne événementielle

La concentration moyenne événementielle du flux déversé (CME^{A1}) au sein du DO « Gambetta » est calculée selon l'Eq. 7.6 à l'aide des n échantillons collectés pour lesquels la concentration instantanée C et le débit moyen $\overline{D}$ ont été mesurés. Cette concentration sera mieux connue avec un nombre élevé d'échantillons.

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2020LYSEI083/these.pdf
© [A. Claro Barreto], [2020], INSA Lyon, tous droits réservés

	Année	2014	2015	2016	2017	2018
$V_{A3} \times \overline{C}_{A3}$	(Kg DBO_5)	1 715 463	1 865 390	1 895 390	1 919 436	1 921 143
V_{A1}	(m^3)	1 105 220	633 939	552 026	398 245	775 772
CME_{max}	$(mg\,O_2/L)$ DBO_5	81.7	154.9	180.7	253.7	130.3

Tableau 7.5 – La charge en DBO_5 collectée à l'entrée de la STEP ($V_{A3} \times \overline{C}_{A3}$), le volume total déversé du système de collecte (V_{A1}) et la concentration moyenne événementielle maximale CME_{max} du déversement selon l'Eq. 7.5 pour les années 2014 à 2018, d'après Valence Romans Agglo (2018).

$$\mathrm{CME}^{\mathrm{A1}} = \frac{\sum_{i=1}^{n} \overline{D}_i \times C_i}{\sum_{i=1}^{n} \overline{D}_i} \tag{7.6}$$

L'incertitude sur la concentration CME^{A1} est calculée à l'aide de la méthode GUM (ISO/IEC Guide 98-1 2009) en supposant que les coefficients de corrélation linéaire $r(\chi_1, \chi_2)$ et la covariance $cov(\chi_1, \chi_2)$ sont égaux à zéro. CME^{A1} est calculée selon l'Eq. 7.7.

$$u\left(\mathrm{CME}^{\mathrm{A1}}\right) = \left|\mathrm{CME}^{\mathrm{A1}}\right| \times \sqrt{\left(\frac{u(\chi_1)}{\chi_1}\right)^2 + \left(\frac{u(\chi_2)}{\chi_2}\right)^2} \tag{7.7}$$

avec $\chi_1 = \sum_{i=1}^{n} \overline{D}_i \times C_i$ et $\chi_2 = \sum_{i=1}^{n} \overline{D}_i$. Les incertitudes $u(\chi_1)$ et $u(\chi_2)$ sont respectivement définies par les Eqs. 7.8-7.9. Ces deux incertitudes sont obtenues à l'aide de la méthode GUM (ISO/IEC Guide 98-1 2009) en supposant que les coefficients de corrélation linéaire $r\left(\overline{D}_i, C_i\right)$ et $r\left(\overline{D}_i, \overline{D}_j\right)$ et les covariances $cov\left(\overline{D}_i, C_i\right)$ et $cov\left(\overline{D}_i, \overline{D}_j\right)$ sont égaux à zéro.

$$u(\chi_1) = \sqrt{\sum_{i=1}^{n} \left(\left|\overline{D}_i \times C_i\right| \times \sqrt{\left(\frac{u\left(\overline{D}_i\right)}{\overline{D}_i}\right)^2 + \left(\frac{u(C_i)}{C_i}\right)^2} \right)^2} \tag{7.8}$$

$$u(\chi_2) = \sqrt{\sum_{i=1}^{n} u^2\left(\overline{D}_i\right)} \tag{7.9}$$

Les concentrations moyennes événementielles (i) du flux déversé par le DO en tête de STEP (CME^{A2}) et (ii) à l'entrée de la STEP (CME^{A3}) sont égales à la valeur mesurée. Si la concentration n'a pas été mesurée, elle est définie égale à la moyenne mensuelle des concentrations connues. En cas d'absence de celles-ci, elle est définie égale à la moyenne annuelle.

Les incertitudes $u\left(\mathrm{CME}^{\mathrm{A2}}\right)$ et $u\left(\mathrm{CME}^{\mathrm{A3}}\right)$ sont définies respectivement par les Eqs. 7.10-7.11. L'incertitude des concentrations mesurées est égale 10%, d'après l'incertitude communiquée par le laboratoire agrée. L'incertitude des concentrations non mesurées est obtenue à l'aide de la méthode GUM (ISO/IEC Guide 98-1 2009) en supposant que les coefficients de corrélation linéaire $r\left(\mathrm{CME}_i^{\mathrm{A2}}, \mathrm{CME}_j^{\mathrm{A2}}\right)$ et $r\left(\mathrm{CME}_i^{\mathrm{A3}}, \mathrm{CME}_j^{\mathrm{A3}}\right)$ et les covariances $cov\left(\mathrm{CME}_i^{\mathrm{A2}}, \mathrm{CME}_j^{\mathrm{A2}}\right)$ et $cov\left(\mathrm{CME}_i^{\mathrm{A3}}, \mathrm{CME}_j^{\mathrm{A3}}\right)$ sont égaux à zéro.

$$u\left(\mathrm{CME}^{\mathrm{A2}}\right) = \begin{cases} 10\% \times \mathrm{CME}^{\mathrm{A2}} & \text{si mesurée} \\ \frac{1}{n} \times \sqrt{\sum_{i=1}^{n} \left(u\left(\mathrm{CME}_i^{\mathrm{A2}}\right)^2\right)} & \text{autrement} \end{cases} \tag{7.10}$$

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2020LYSEI083/these.pdf
© [A. Claro Barreto], [2020], INSA Lyon, tous droits réservés

$$u\left(\text{CME}^{\text{A3}}\right) = \begin{cases} 10\% \times \text{CME}^{\text{A3}} & \text{si mesurée} \\ \frac{1}{n} \times \sqrt{\sum_{i=1}^{n} u^2\left(\text{CME}_i^{\text{A3}}\right)} & \text{autrement} \end{cases} \tag{7.11}$$

7.2.7 La concentration moyenne du déversoir d'orage

La concentration moyenne du déversoir d'orage (CMS^{A1}) pour le DO « Gambetta » est calculée selon l'Eq. 7.12 à l'aide des n événements mesurés, pour l'année 2018 $n = 3$.

$$\text{CMS}^{\text{A1}} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{n} \text{CME}_i^{\text{A1}} \tag{7.12}$$

D'après la littérature (e.g. McCarthy et al. 2018 ; M. Mourad et al. 2005), l'incertitude sur la concentration moyenne du déversoir d'orage diminue non linéairement avec le nombre d'événement pluvieux mesurés. La campagne de mesure réalisée a permis de mesurer 3 des 42 déversements observés au sein du DO « Gambetta » dans l'année 2018. L'incertitude sur la concentration moyenne du déversoir d'orage est ainsi définie égale à la moitié de CMS^{A1}, $u\left(\text{CMS}^{\text{A1}}\right) = 50\%\text{CMS}^{\text{A1}}$, afin de prendre en compte du faible nombre d'événements mesurés.

7.2.8 Le critère de flux de pollution

Le critère de conformité réglementaire (CCR) sur le flux de pollution s'intéresse au rapport entre le flux de pollution déversé et le flux de pollution produit. Ce critère sera calculé selon 3 hypothèses différentes :

- « **STEP** » : La concentration du flux déversé pour l'ensemble de déversements non mesurées par chaque déversoir d'orage est égale à la concentration du flux en entrée de la station d'épuration des eaux usées (STEP, CME^{A3}).
- « **CMS** » : La concentration du flux déversé pour l'ensemble de déversements non mesurées par chaque déversoir d'orage est égale à la concentration moyenne du déversoir d'orage « Gambetta » (CMS^{A1}).
- « **Rapport** » : La concentration du flux déversé pour l'ensemble de déversements non mesurées par chaque déversoir d'orage est égale de la concentration CME^{A3} par le rapport moyen entre les concentrations CME^{A1} (au niveau du DO « Gambetta ») et CME^{A3} (au niveau de l'entrée de la STEP).

Le CCR sur le flux de pollution (annuel) est calculé selon la procédure suivante :

1. Calculer la concentration moyenne événementielle (CME^{A1}) selon la Section 7.2.6 pour chaque déversement mesuré. Pour l'année 2018, la campagne de mesure réalisée au niveau du DO « Gambetta » a permis de suivre 3 événements pluvieux (Tableau 7.3). La CME^{A1} des déversements mesurés est indiqué dans le Tableau 7.6.

		Déversement		
		29/10	06/11	19/12
CME^{A1}	$mg\,O_2/L$	38.76	112.97	119.03
$2u\left(\text{CME}^{\text{A1}}\right)/\text{CME}^{\text{A1}}$		7.1 %	7.3 %	6.0 %

Tableau 7.6 – La concentration moyenne événementiel en DBO_5 des flux de pollution déversés par le déversoir d'orage (DO) « Gambetta » dans l'année 2018.

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2020LYSEI083/these.pdf
© [A. Claro Barreto], [2020], INSA Lyon, tous droits réservés

2. Calculer la concentration moyenne du déversoir d'orage (CMS^{A1}) selon la Section 7.2.7 pour chaque déversoir d'orage suivi. Pour l'année 2018, la campagne de mesure a suivi uniquement le DO « Gambetta ». D'après le Tableau 7.6,

$$\text{CMS}^{\text{A1}} = 90.25\ \frac{mg\ O_2}{L}$$

$$u\left(\text{CMS}^{\text{A1}}\right) = 45.13\ \frac{mg\ O_2}{L}$$

.

3. Calculer le rapport moyen (φ_{DO}) entre la concentration moyenne événementielle du flux déversé (CME^{A1}) et la concentration du flux à l'entrée de la STEP (CME^{A3}), selon l'Eq. 7.13.

$$\varphi_{\text{DO}} = \frac{1}{3}\sum_{i=1}^{3}\frac{\text{CME}_i^{\text{A1}}}{\text{CME}_i^{\text{A3}}} \tag{7.13}$$

L'incertitude du rapport moyen φ_{DO} est définie égale à 25% φ_{DO}, car ce rapport est calculé à partir de 3 déversements et le flux de pollution déversé et collecté est un phénomène variable dans le temps et l'espace.

La concentration du bilan 24 heures à l'entrée de la STEP (CME^{A3}) pour les trois déversements mesurés en 2018 est (i) calculée selon la Section 7.2.6 et (ii) présentée dans le Tableau 7.7.

		Déversement		
		29/10	06/11	19/12
CME^{A3}	$mg\ O_2/L$	49.92	134.07	139.50
$2u\left(\text{CME}^{\text{A3}}\right)/\text{CME}^{\text{A3}}$		20.0 %	22.4 %	45.2 %

Tableau 7.7 – La concentration en DBO_5 du bilan 24 heures des flux de pollution à l'entrée de la STEP pour les 3 déversements mesurés au niveau du DO « Gambetta » dans l'année 2018.

D'après les Tableaux 7.6 et 7.7, $\varphi_{\text{DO}} = 0.824$ et $u\left(\varphi_{\text{DO}}\right) = 0.206$.

4. Calculer la concentration du flux déversé pour chaque déversements non mesurés au sein du déversoir d'orage « Gambetta » en 2018.

   - « **STEP** » : La concentration moyenne événementielle $\text{CME}_i^{\text{A1-G-Reste}}$ est calculée selon l'Eq. 7.14. L'incertitude $u\left(\text{CME}_i^{\text{A1-G-Reste}}\right)$ est calculé selon l'Eq. 7.15.

$$\text{CME}_i^{\text{A1-G-Reste}} = \begin{cases} \text{CME}_i^{\text{A2}} & \text{si } \text{CME}_i^{\text{A2}} > \text{CME}_i^{\text{A3}} \\ \text{CME}_i^{\text{A3}} & \text{autrement} \end{cases} \tag{7.14}$$

$$u\left(\text{CME}_i^{\text{A1-G-Reste}}\right) = \begin{cases} u\left(\text{CME}_i^{\text{A2}}\right) & \text{si } \text{CME}_i^{\text{A2}} > \text{CME}_i^{\text{A3}} \\ u\left(\text{CME}_i^{\text{A3}}\right) & \text{autrement} \end{cases} \tag{7.15}$$

   - « **CMS** » : La concentration $\text{CME}_i^{\text{A1-G-Reste}} = \text{CMS}^{A1}$ et $u\left(\text{CME}_i^{\text{A1-G-Reste}}\right) = u\left(\text{CMS}^{A1}\right)$.

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2020LYSEI083/these.pdf
© [A. Claro Barreto], [2020], INSA Lyon, tous droits réservés

- «**Rapport**» : La concentration $\mathrm{CME}_i^{\text{A1-G-Reste}}$ est calculée selon lEq. 7.16. L'incertitude $u\left(\mathrm{CME}_i^{\text{A1-G-Reste}}\right)$ est calculée selon l'Eq. 7.17, selon la méthode GUM (), en supposant que tout coefficient de corrélation et toute covariance entre la concentration en entrée de la STEP et le rapport φ_{DO} sont égaux à zéro.

$$\mathrm{CME}_i^{\text{A1-G-Reste}} = \varphi_{\mathrm{DO}} \times \begin{cases} \mathrm{CME}_i^{\mathrm{A2}} & \text{si } \mathrm{CME}_i^{\mathrm{A2}} > \mathrm{CME}_i^{\mathrm{A3}} \\ \mathrm{CME}_i^{\mathrm{A3}} & \text{autrement} \end{cases} \tag{7.16}$$

$$u\left(\mathrm{CME}_i^{\text{A1-G-Reste}}\right) = \mathrm{CME}_i^{\text{A1-G-Reste}} \times \begin{cases} \sqrt{\left(\dfrac{u\left(\mathrm{CME}_i^{\mathrm{A2}}\right)}{\mathrm{CME}_i^{\mathrm{A2}}}\right)^2 + \left(\dfrac{u\left(\varphi_{\mathrm{DO}}\right)}{\varphi_{\mathrm{DO}}}\right)^2} & \text{si } \mathrm{CME}_i^{\mathrm{A2}} > \mathrm{CME}_i^{\mathrm{A3}} \\ \sqrt{\left(\dfrac{u\left(\mathrm{CME}_i^{\mathrm{A3}}\right)}{\mathrm{CME}_i^{\mathrm{A3}}}\right)^2 + \left(\dfrac{u\left(\varphi_{\mathrm{DO}}\right)}{\varphi_{\mathrm{DO}}}\right)^2} & \text{autrement} \end{cases} \tag{7.17}$$

5. Calculer le flux de pollution annuel déversé par le DO «Gambetta».

   Le volume annuel déversé en 2018 par le déversoir d'orage «Gambetta» $\mathrm{V_G}$ est calculé à l'aide de l'Éq. 7.18. Les volumes événementiels $\mathrm{V}_{\mathrm{G}_{29/10}}$, $\mathrm{V}_{\mathrm{G}_{06/11}}$ et $\mathrm{V}_{\mathrm{G}_{19/12}}$ correspondent aux volumes du Tableau 7.3. Le volume de l'ensemble des événements pluvieux non étudiés $\mathrm{V}_{\mathrm{G}_{reste}}$ est obtenue à l'aide des données *in-situ*.

$$\mathrm{V_G} = \mathrm{V}_{\mathrm{G}_{29/10}} + \mathrm{V}_{\mathrm{G}_{06/11}} + \mathrm{V}_{\mathrm{G}_{19/12}} + \mathrm{V}_{\mathrm{G}_{reste}} \tag{7.18}$$

   L'incertitude du volume annuel déversé en 2018 par le DO «Gambetta» $u\left(\mathrm{V_G}\right)$ est calculée à l'aide de l'Eq. 7.19. L'incertitude de chacun des termes de l'Eq. 7.19 est obtenue à l'aide de l'Eq. 7.20. Les incertitudes $u\left(\mathrm{V_G}\right)$ et $u\left(\mathrm{V}_{\mathrm{G}_i}\right)$ sont obtenues à l'aide de la méthode GUM (ISO/IEC Guide 98-1 2009) en supposant tout coefficient de corrélation linéaire et toute covariance sont égaux à zéro. L'incertitude du débit des conduites de décharge «Droit» ($u\left(D_{\mathrm{Droit}_j}\right)$) et «Gauche» ($u\left(D_{\mathrm{Gauche}_j}\right)$) est définie respectivement par les Eqs. 7.21-7.22, d'après la Section 2.3.5 du Chapitre 2.

$$u\left(\mathrm{V_G}\right) = \sqrt{u^2\left(\mathrm{V}_{\mathrm{G}_{29/10}}\right) + u^2\left(\mathrm{V}_{\mathrm{G}_{06/11}}\right) + u^2\left(\mathrm{V}_{\mathrm{G}_{19/12}}\right) + u^2\left(\mathrm{V}_{\mathrm{G}_{reste}}\right)} \tag{7.19}$$

$$u\left(\mathrm{V}_{\mathrm{G}_i}\right) = \delta t \sqrt{\sum_{j=1}^{n}\left(u^2\left(D_{\mathrm{Droit}_j}\right) + u^2\left(D_{\mathrm{Gauche}_j}\right)\right)} \quad \text{avec} \quad \delta t = \frac{5}{60}\,\mathrm{h} \tag{7.20}$$

$$u\left(D_{\mathrm{Droit}_j}\right) = 0.0088 \cdot D_{\mathrm{Droit}_j} + 12.05\, m^3/h \tag{7.21}$$

$$u\left(D_{\mathrm{Gauche}_j}\right) = 0.0205 \cdot D_{\mathrm{Gauche}_j} + 37.29\, m^3/h \tag{7.22}$$

   Le flux de pollution annuelle déversé en 2018 par le DO «Gambetta» M_{G} et son incertitude $u\left(M_{\mathrm{G}}\right)$ sont calculés respectivement à l'aide des Eqs. 7.23-7.24. $u\left(M_{\mathrm{G}}\right)$ est obtenue selon la méthode GUM (ISO/IEC Guide 98-1 2009) en supposant tout coefficient de corrélation linéaire et toute covariance entre les différents flux de pollution M_{G_i} sont égaux à zéro.

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2020LYSEI083/these.pdf
© [A. Claro Barreto], [2020], INSA Lyon, tous droits réservés

$$M_{\mathrm{G}} = M_{\mathrm{G}_{29/10}} + M_{\mathrm{G}_{06/11}} + M_{\mathrm{G}_{19/12}} + M_{\mathrm{G}_{\mathrm{reste}}} \tag{7.23}$$

$$u\left(M_{\mathrm{G}}\right) = \sqrt{u^2\left(M_{\mathrm{G}_{29/10}}\right) + u^2\left(M_{\mathrm{G}_{06/11}}\right) + u^2\left(M_{\mathrm{G}_{19/12}}\right) + u^2\left(M_{\mathrm{G}_{\mathrm{reste}}}\right)} \tag{7.24}$$

Le flux de pollution des événements pluvieux mesurés ($M_{\mathrm{G}_{29/10}}$, $M_{\mathrm{G}_{06/11}}$ et $M_{\mathrm{G}_{19/12}}$) est calculé à l'aide de la concentration moyenne événementielle *in situ* (Eq. 7.6) et du volume événementiel ($\mathrm{V}_{\mathrm{G}_{29/10}}$, $\mathrm{V}_{\mathrm{G}_{06/11}}$ et $\mathrm{V}_{\mathrm{G}_{19/12}}$ - Tableau 7.3), selon l'Eq. 7.25. L'incertitude $u\left(M_{\mathrm{G}_i}\right)$ est calculée à l'aide de la méthode GUM (ISO/IEC Guide 98-1 2009) en supposant que le coefficient de corrélation linéaire $r\left(\mathrm{V}_{\mathrm{G}_i}, \mathrm{CME}_i^{\mathrm{A1}}\right)$ et la covariance $cov\left(\mathrm{V}_{\mathrm{G}_i}, \mathrm{CME}_i^{\mathrm{A1}}\right)$ sont égaux à zéro. $u\left(M_{\mathrm{G}_i}\right)$ est calculée par l'Eq. 7.26.

$$M_{\mathrm{G}_i} = \mathrm{V}_{\mathrm{G}_i} \cdot \mathrm{CME}_i^{\mathrm{A1}} \tag{7.25}$$

$$u\left(M_{\mathrm{G}_i}\right) = \left(\mathrm{V}_{\mathrm{G}_i} \cdot \mathrm{CME}_i^{\mathrm{A1}}\right) \times \sqrt{\left(\frac{u\left(\mathrm{V}_{\mathrm{G}_i}\right)}{\mathrm{V}_{\mathrm{G}_i}}\right)^2 + \left(\frac{u\left(\mathrm{CME}_i^{\mathrm{A1}}\right)}{\mathrm{CME}_i^{\mathrm{A1}}}\right)^2} \tag{7.26}$$

L'incertitude $u\left(M_{\mathrm{G}_{reste}}\right)$ est calculée à l'aide de l'Eq. 7.28. Cette incertitude est obtenue à l'aide de la méthode GUM (ISO/IEC Guide 98-1 2009) en supposant que tout coefficient de corrélation linéaire et toute covariance entre les flux de pollution des événements non mesurés $M_{\mathrm{G}_{\mathrm{reste,j}}}$ sont égaux à zéro.

$$M_{\mathrm{G}_{reste}} = \sum_{j=1}^{n} M_{\mathrm{G}_{\mathrm{reste,j}}} \tag{7.27}$$

$$M_{\mathrm{G}_{\mathrm{reste,j}}} = \mathrm{V}_{\mathrm{G}_{\mathrm{reste,j}}} \times \mathrm{CME}_j^{\mathrm{A1\text{-}G\text{-}Reste}}$$

$$u\left(M_{\mathrm{G}_{reste}}\right) = \sqrt{\sum_{j=1}^{n} u^2\left(M_{\mathrm{G}_{\mathrm{reste,j}}}\right)} \tag{7.28}$$

$$u\left(M_{\mathrm{G}_{\mathrm{reste,j}}}\right) = \left(\mathrm{V}_{\mathrm{G}_{\mathrm{reste,j}}} \times \phi_j\right) \times \sqrt{\left(\frac{u\left(\mathrm{V}_{\mathrm{G}_{\mathrm{reste,j}}}\right)}{\mathrm{V}_{\mathrm{G}_{\mathrm{reste,j}}}}\right)^2 + \left(\frac{u\left(\mathrm{CME}_j^{\mathrm{A1\text{-}G\text{-}Reste}}\right)}{\mathrm{CME}_j^{\mathrm{A1\text{-}G\text{-}Reste}}}\right)^2}$$

6. Calculer le flux de pollution annuel déversé par les autres déversoir d'orage (DO) qui collecte en temps sec une charge brute de pollution organique supérieure ou égale à 600 Kg/jour de DBO_5, à savoir les DO « Barjon » et « Port ».

   · « **STEP** » : Le volume et flux de pollution annuels déversés par ces deux DO sont obtenus d'après le bilan annuel du système d'assainissement (Valence Romans Agglo 2018), voir Tableau 7.8. L'incertitude sur le volume $u\left(\mathrm{V}_{>600_i}\right)$ est calculée à l'aide de l'Eq. 7.29, en supposant qu'elle est proportionnelle à l'incertitude relative moyenne du volume déversé pour les 3 événements mesurés au sein du DO « Gambetta ».

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2020LYSEI083/these.pdf
© [A. Claro Barreto], [2020], INSA Lyon, tous droits réservés

$DO_{>600}$	Volume (m^3)	DBO_5 (Kg)
Barjon	166 642	21 781
Port	123 118	16 814

Tableau 7.8 – Volumes et flux de pollution déversés dans l'année 2018 par les déversoirs d'orage (DO) qui collectent en amont une charge supérieure à 600 Kg de DBO_5 par jour, d'après Valence Romans Agglo (2018).

$$u\left(V_{>600_i}\right) = V_{>600_i} \times \frac{1}{3}\sum_{i=1}^{3}\frac{u\left(V_{G_i}\right)}{V_{G_i}} \tag{7.29}$$

L'incertitude sur le flux de pollution annuel $u\left(M_{>600_i}\right)$ est calculés à l'aide de l'Eq. 7.30, en supposant qu'elle est proportionnelle à l'incertitude relative du flux de pollution annuel de l'ensemble des déversements non mesurés au niveau du DO « Gambetta ».

$$u\left(M_{>600_i}\right) = M_{>600_i} \times \frac{u\left(M_{G_{reste}}\right)}{M_{G_{reste}}} \tag{7.30}$$

- « **CMS** » : Le flux de pollution annuel déversé est calculé à l'aide de l'Eq.7.31, avec V_{G_i} le volume total déversé par chaque DO selon le Tableau 7.8. L'incertitude du flux de pollution annuel déversé est calculée à l'aide de l'Eq. 7.32, selon la méthode GUM (ISO/IEC Guide 98-1 2009), en supposant que le coefficient de corrélation et la covariance entre $V_{>600_i}$ et CMS^{A1} sont égaux à zéro.

$$M_{>600_i} = V_{>600_i} \times CMS^{A1} \tag{7.31}$$

$$u\left(M_{>600_i}\right) = M_{>600_i}\sqrt{\left(\frac{u\left(V_{>600_i}\right)}{V_{>600_i}}\right)^2 + \left(\frac{u\left(CMS^{A1}\right)}{CMS^{A1}}\right)^2} \tag{7.32}$$

- « **Rapport** » : Le flux de pollution annuel déversé est calculé à l'aide de l'Eq.7.33, avec $M^{STEP}_{>600_i}$ le flux de pollution annuel déversé selon l'hypothèse « STEP » pour chaque DO (Tableau. 7.8). L'incertitude du flux de pollution annuel est calculée à l'aide de l'Eq. 7.32, selon la méthode GUM (ISO/IEC Guide 98-1 2009), en supposant que le coefficient de corrélation et la covariance entre $M^{STEP}_{>600_i}$ et φ_G sont égaux à zéro. L'incertitude $u\left(M^{STEP}_{>600_i}\right)$ est calculée à l'aide de l'Eq. 7.30.

$$M_{>600_i} = \underbrace{M^{STEP}_{>600_i}}_{\text{Tab. 7.8}} \times \varphi_G \tag{7.33}$$

$$u\left(M_{>600_i}\right) = M_{>600_i}\sqrt{\underbrace{\left(\frac{u\left(M^{STEP}_{>600_i}\right)}{M^{STEP}_{>600_i}}\right)^2}_{\text{Eq. 7.30}} + \left(\frac{u\left(\varphi_G\right)}{\varphi_G}\right)^2} \tag{7.34}$$

7. Calculer la concentration du flux de pollution annuel déversé par l'ensemble des déversoirs d'orage qui collectent en temps sec une charge inférieure à 600 Kg de DBO_5 par jour. A noter que la réglementation en vigueur n'exige pas de suivre le flux de pollution pour ces DO (Arrêté du 21 juillet 2015).

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2020LYSEI083/these.pdf
© [A. Claro Barreto], [2020], INSA Lyon, tous droits réservés

- «**STEP**» : La concentration du flux déversé est égale à la concentration moyenne des flux de pollutions déversés non mesurés pour les 3 déversoirs d'orage qui collectent une charge supérieure ou égale à 600 Kg de DBO_5 par jour (voir l'Étape 5 et le Tableau 7.8).

$$\begin{aligned} \mathrm{C}_{<600} &= \frac{1}{3}\left(\underset{\text{Gambetta non mesurée}}{\mathrm{CMS}^{\text{A1-G-reste}}} + \underset{\text{Barjon}}{\mathrm{CMS}^{\text{A1-B}}} + \underset{\text{Port}}{\mathrm{CMS}^{\text{A1-P}}}\right) \\ &= \frac{1}{3}\left(\underset{\text{Gambetta non mesurée}}{\frac{M_{\mathrm{G}_{\text{reste}}}}{\mathrm{V}_{\mathrm{G}_{\text{reste}}}}} + \underset{\text{Barjon}}{\frac{M_{\mathrm{B}}}{\mathrm{V}_{\mathrm{B}}}} + \underset{\text{Port}}{\frac{M_{\mathrm{P}}}{\mathrm{V}_{\mathrm{P}}}}\right) \\ &= \frac{1}{3}\left(\frac{46\,805\,Kg\,O_2}{309\,659\,m^3} + \frac{21\,781\,Kg\,O_2}{116\,642\,m^3} + \frac{16\,814\,Kg\,O_2}{123\,118\,m^3}\right) \\ &= 139.47\,\frac{mg\,O_2}{L} \end{aligned} \tag{7.35}$$

L'incertitude $u\left(\mathrm{C}_{<600}\right)$ est calculée à l'aide de l'Eq. 7.36, selon la méthode GUM (ISO/IEC Guide 98-1 2009), en supposant que la corrélation linéaire et la variance entre les concentrations moyennes des déversoirs d'orages sont égales à zéro.

$$\begin{aligned} u\left(\mathrm{C}_{<600}\right) &= \frac{1}{3}\sqrt{u^2\left(\mathrm{CMS}^{\text{A1-G-reste}}\right) + u^2\left(\mathrm{CMS}^{\text{A1-B}}\right) + u^2\left(\mathrm{CMS}^{\text{A1-P}}\right)} \\ &= 2.30\,\frac{mg\,O_2}{L} \end{aligned} \tag{7.36}$$

- «**CMS**» : La concentration du flux déversé est égale à celle obtenue dans l'étape 2, à savoir $C_{<600} = \mathrm{CMS}^{\mathrm{A1}}$ et $u\left(C_{<600}\right) = u\left(\mathrm{CMS}^{\mathrm{A1}}\right)$.
- «**Rapport**» : La concentration du flux déversé est calculée à l'aide de l'Eq. 7.37. L'incertitude $u\left(C_{<600}\right)$ est calculée à l'aide de l'Eq. 7.38, selon la méthode GUM (ISO/IEC Guide 98-1 2009), en supposant que toute corrélation linéaire et variance est égale à zéro.

$$\begin{aligned} \mathrm{C}_{<600} &= \underbrace{139.47\,\frac{mg\,O_2}{L}}_{\textbf{STEP}} \times \varphi_{\mathrm{G}} \\ &= 114.94\,\frac{mg\,O_2}{L} \end{aligned} \tag{7.37}$$

$$\begin{aligned} u\left(\mathrm{C}_{<600}\right) &= \underbrace{\mathrm{C}_{<600}}_{\text{Eq. 7.37}} \sqrt{\underbrace{\left(\frac{2.30}{139.47}\right)^2}_{\text{Eqs. 7.35-7.36}} + \left(\frac{u\left(\varphi_{\mathrm{G}}\right)}{\varphi_{\mathrm{G}}}\right)^2} \\ &= 28.80\,\frac{mg\,O_2}{L} \end{aligned} \tag{7.38}$$

8. Calculer le flux de pollution annuel déversé par l'ensemble des déversoirs d'orage qui collectent en temps sec une charge inférieure à 600 Kg de DBO_5 par jour.

   Le volume total déversé par l'ensemble de ces DO ($\mathrm{V}_{<600}$) est obtenu d'après le bilan annuel du système de collecte (Valence Romans Agglo 2018), il est égal à $100\,247\,m^3$. L'incertitude $u\left(\mathrm{V}_{<600}\right)$ est calculé à l'aide de l'Eq. 7.29.

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2020LYSEI083/these.pdf
© [A. Claro Barreto], [2020], INSA Lyon, tous droits réservés

Le flux de pollution annuel déversé $M_{<600}$ est calculé à l'aide de l'Eq. 7.39. L'incertitude $u\left(M_{<600}\right)$ est calculée à l'aide de l'Eq. 7.40, selon la méthode GUM (ISO/IEC Guide 98-1 2009), en supposant que la corrélation linéaire et la variance entre $\mathrm{V}_{<600}$ et $\mathrm{C}_{<600}$ sont égales à zéro.

$$M_{<600} = \mathrm{V}_{<600} \times \mathrm{C}_{<600} \tag{7.39}$$

$$u\left(M_{<600}\right) = M_{<600}\sqrt{\left(\frac{u\left(\mathrm{V}_{<600}\right)}{\mathrm{V}_{<600}}\right)^2 + \left(\frac{u\left(\mathrm{C}_{<600}\right)}{\mathrm{C}_{<600}}\right)^2} \tag{7.40}$$

9. Calculer le volume annuel déversé par le système de collecte V_{A1}.

$$\mathrm{V}_{\mathrm{A1}} = \underset{Gambetta}{\mathrm{V}_{\mathrm{G}}} + \underset{Barjon}{\mathrm{V}_{\mathrm{B}}} + \underset{Port}{\mathrm{V}_{\mathrm{P}}} + \mathrm{V}_{<600} \tag{7.41}$$

$$u\left(\mathrm{V}_{\mathrm{A1}}\right) = \sqrt{u^2\left(\mathrm{V}_{\mathrm{G}}\right) + u^2\left(\mathrm{V}_{\mathrm{B}}\right) + u^2\left(\mathrm{V}_{\mathrm{P}}\right) + u^2\left(\mathrm{V}_{<600}\right)} \tag{7.42}$$

10. Calculer le volume annuel collecté par le système de collecte V_{T}.

Le volume V_{T} correspond à la somme du volume annuel déversé V_{A1} et le volume annuel collecté et traité par la STEP V_{A3}. L'incertitude $u\left(\mathrm{V}_{\mathrm{T}}\right)$ est calculée à l'aide de l'Eq. 7.44, selon la méthode GUM (ISO/IEC Guide 98-1 2009), en supposant que la corrélation linéaire et la variance entre V_{A1} et V_{A3} sont égales à zéro.

$$\mathrm{V}_{\mathrm{T}} = \mathrm{V}_{\mathrm{A1}} + \mathrm{V}_{\mathrm{A3}} \tag{7.43}$$

$$u\left(\mathrm{V}_{\mathrm{T}}\right) = \sqrt{u^2\left(\mathrm{V}_{\mathrm{A1}}\right) + u^2\left(\mathrm{V}_{\mathrm{A3}}\right)} \tag{7.44}$$

Le volume V_{A3} est obtenue à partir du volume journalier de l'année 2018, qui est mesuré et fourni par l'exploitant de la STEP (Veolia Eau - Valence Romans Agglo (2018)). Il est supposé que l'incertitude relative sur le volume journalier soit égale à 2% (Versini et al. 2015, Section 5.5). Le volume annuel V_{A3} et son incertitude $u\left(\mathrm{V}_{\mathrm{A3}}\right)$ sont calculés respectivement selon les Eqs. 7.45-7.46. $u\left(\mathrm{V}_{\mathrm{A3}}\right)$ est obtenue à l'aide de la méthode GUM (ISO/IEC Guide 98-1 2009) en supposant que tout coefficient de corrélation linéaire et toute covariance entre les volumes journaliers $\mathrm{V}_{\mathrm{A3}_i}$ sont égaux à zéro.

$$\mathrm{V}_{\mathrm{A3}} = \sum_{i=1}^{365}\left(\mathrm{V}_{\mathrm{A3}_i}\right) \tag{7.45}$$

$$u\left(\mathrm{V}_{\mathrm{A3}}\right) = \sqrt{\sum_{i=1}^{365} u^2\left(\mathrm{V}_{\mathrm{A3}_i}\right)} \tag{7.46}$$

11. Calculer le flux de pollution annuel collecté par le système de collecte

Le volume M_{T} correspond à la somme du flux de pollution annuel déversé M_{A1} et le flux de pollution annuel collecté et traité par la STEP M_{A3}. L'incertitude $u\left(M_{\mathrm{T}}\right)$ est calculée à l'aide de l'Eq. 7.48, selon la méthode GUM (ISO/IEC Guide 98-1 2009), en supposant que la corrélation linéaire et la variance entre M_{A1} et M_{A3} sont égales à zéro.

$$M_{\mathrm{T}} = M_{\mathrm{A1}} + M_{\mathrm{A3}} \tag{7.47}$$

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2020LYSEI083/these.pdf
© [A. Claro Barreto], [2020], INSA Lyon, tous droits réservés

$$u\left(M_{\mathrm{T}}\right)=\sqrt{u^{2}\left(M_{\mathrm{A1}}\right)+u^{2}\left(M_{\mathrm{A3}}\right)} \tag{7.48}$$

La masse de DBO_5 collectée à l'entrée de STEP M_{A3} est calculée selon l'Eq. 7.49.

$$M_{\mathrm{A3}}=\sum_{i=1}^{365}\left(\mathrm{V}_{\mathrm{A3}_i}\times\mathrm{CME}_i^{\mathrm{A3}}\right) \tag{7.49}$$

La concentration journalière $\mathrm{CME}_i^{\mathrm{A3}}$ et son incertitude $u\left(\mathrm{CME}_i^{\mathrm{A3}}\right)$ sont définies selon la Section 7.2.6.

L'incertitude $u\left(M_{\mathrm{A3}}\right)$ est calculée à l'aide de l'Eq. 7.50. Cette incertitude est obtenue à l'aide de la méthode GUM (ISO/IEC Guide 98-1 2009) en supposant que tout coefficient de corrélation linéaire et toute covariance entre le volume journalier $\mathrm{V}_{\mathrm{A3}_i}$ et la concentration moyenne sur 24h $\mathrm{CME}_i^{\mathrm{A3}}$ sont égaux à zéro.

$$u\left(M_{\mathrm{A3}}\right)=\sqrt{\sum_{i=1}^{365}\left(\left|\mathrm{V}_{\mathrm{A3}_i}\times\mathrm{CME}_i^{\mathrm{A3}}\right|\times\sqrt{\left(\frac{u\left(\mathrm{V}_{\mathrm{A3}_i}\right)}{\mathrm{V}_{\mathrm{A3}_i}}\right)^{2}+\left(\frac{u\left(\mathrm{CME}_i^{\mathrm{A3}}\right)}{\mathrm{CME}_i^{\mathrm{A3}}}\right)^{2}}\right)^{2}} \tag{7.50}$$

L'incertitude $u\left(\mathrm{CME}_i^{\mathrm{A3}}\right)$ est calculée selon l'Eq. 7.11.

12. Calculer le critère de conformité réglementaire lié au volume déversé par le système de collecte.

$$\mathrm{CCR}_{\mathrm{Volume}}=\frac{\mathrm{V}_{\mathrm{A1}}}{\mathrm{V}_{\mathrm{T}}} \tag{7.51}$$

$$u\left(\mathrm{CCR}_{\mathrm{Volume}}\right)=\mathrm{CCR}_{\mathrm{Volume}}\sqrt{\left(\frac{u\left(\mathrm{V}_{\mathrm{A1}}\right)}{\mathrm{V}_{\mathrm{A1}}}\right)^{2}+\left(\frac{u\left(\mathrm{V}_{\mathrm{T}}\right)}{\mathrm{V}_{\mathrm{T}}}\right)^{2}} \tag{7.52}$$

13. Calculer le critère de conformité réglementaire lié au flux de pollution déversé par le système de collecte.

$$\mathrm{CCR}_{\mathrm{DBO}_5}=\frac{M_{\mathrm{A1}}}{M_{\mathrm{T}}} \tag{7.53}$$

$$u\left(\mathrm{CCR}_{\mathrm{DBO}_5}\right)=\mathrm{CCR}_{\mathrm{DBO}_5}\sqrt{\left(\frac{u\left(M_{\mathrm{A1}}\right)}{M_{\mathrm{A1}}}\right)^{2}+\left(\frac{u\left(M_{\mathrm{T}}\right)}{M_{\mathrm{T}}}\right)^{2}} \tag{7.54}$$

7.3 Résultats et Discussions

Le flux de pollution déversé en temps de pluie par le système de collecte de la ville de Valence est étudié expérimentalement selon le protocole de la Section 7.2.2. Les campagnes de mesure *in situ* réalisées sur le principal déversoir d'orage (DO) du système de collecte, le DO « Gambetta », serviront à évaluer si le critère de conformité réglementaire lié au flux de pollution a été respecté pour l'année 2018 (Section 7.3.1). Ces mesures *in situ* ont permis également de caractériser la pollution déversée en temps de pluie par le DO « Gambetta » afin d'évaluer (i) si la concentration instantanée des deux conduites de déversement est similaire (Section 7.3.2.1), (ii) si la pollution mesurée en entrée de la station d'épuration est similaire à celle déversée (Section 7.3.2.2) et (iii) quelle est la fraction organique de la pollution déversée (Section 7.3.2.3). Enfin, il est présenté qu'il est possible de suivre la demande biochimique en oxygène sur 5 jours (DBO_5) du flux de pollution déversé à l'aide des matières en suspension (MES), Section 7.3.3.

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2020LYSEI083/these.pdf
© [A. Claro Barreto], [2020], INSA Lyon, tous droits réservés

7.3.1 Le flux de pollution déversé en temps de pluie

Le critère de conformité réglementaire lié au flux de pollution est évalué selon la méthodologie décrite dans la Section 7.2.8. Ensuite, les concentrations moyennes événementielles des flux de pollution (i) collecté en entrée de station d'épuration (STEP) et (ii) déversés au niveau des deux conduites de déversement du déversoir d'orage « Gambetta » sont calculés selon la Section 7.2.6.

7.3.1.1 Le critère de conformité réglementaire lié au flux de pollution

Le critère de conformité réglementaire (CCR) sur le flux de pollution déverse du système de collecte de la ville de Valence est calculée pour l'année 2018 selon 3 hypothèses : « STEP » et « CMS » et « Rapport ». A noter que le flux de pollution déversé correspond à la masse annuelle déversée de DBO_5 (demande biochimique en oxygène sur 5 jours), dans le cadre de l'Arrêté du 21 juillet 2015.

Pour rappel (voir la Section 7.2.8), la masse de DBO_5 déversée est calculée à l'aide (i) de la concentration moyenne du bilan 24 heures en entrée de STEP selon l'hypothèse « STEP », (ii) de la concentration moyenne du déversoir d'orage « Gambetta » selon l'hypothèse « CMS », et (iii) du rapport moyen empirique entre la concentration événementielle et la concentration moyenne du bilan 24 heures en entrée de STEP selon l'hypothèse « Rapport ». Les trois hypothèses prennent en compte les 3 campagnes de mesure *in situ* pour déterminer une partie de la masse de DBO_5 déversée par le DO « Gambetta » (voir les 3 premières lignes de la colonne « Masse de DBO_5 » du Tableau 7.9).

Le taux du flux de pollution déversé dans l'année 2018 par le système de collecte selon l'hypothèse « STEP » $\mu_{CCR_{STEP}^{DBO_5}} = 5.04\%$. Ce taux est légèrement supérieur au critère de conformité réglementaire $CCR_{max}^{DBO_5} = 5.00\%$ (voir Tableau 7.10). Cependant, l'incertitude du taux du flux de pollution montre qu'il est probable que le système de collecte respecte le critère de conformité réglementaire parce que la valeur inférieure de l'intervalle de confiance (IC) à 95% $\mu_{CCR_{STEP}^{DBO_5}} - 2\sigma_{CCR_{STEP}^{DBO_5}} = 4.77\% < CCR_{max}^{DBO_5}$.

Si l'on considère que l'ensemble des déversoirs d'orage (DO) du système de collecte rejettent en temps de pluie une pollution similaire que la concentration moyenne du déversoir d'orage « Gambetta », c'est-à-dire l'hypothèse « CMS », le taux du flux de pollution déversé $\mu_{CCR_{CMS}^{DBO_5}} = 3.38\% < CCR_{max}^{DBO_5}$ (voir Tableau 7.10). En outre, le critère du flux de pollution est toujours respecté parce que la valeur maximale de l'IC à 95% du taux du flux de pollution $\mu_{CCR_{CMS}^{DBO_5}} + 2\sigma_{CCR_{CMS}^{DBO_5}} = 4.45\% < CCR_{max}^{DBO_5}$.

Des résultats similaires à l'hypothèse « CMS » sont obtenus avec l'hypothèse « Rapport », à savoir : (i) le taux de pollution déversé $\mu_{CCR_{Rapport}^{DBO_5}} = 3.38\% < CCR_{max}^{DBO_5}$, et (ii) le critère du flux de pollution est toujours respecté ($\mu_{CCR_{Rapport}^{DBO_5}} + 2\sigma_{CCR_{Rapport}^{DBO_5}} = 4.93\% < CCR_{max}^{DBO_5}$).

Ainsi, ces premiers résultats montrent que le système de collecte de la ville de Valence est en capacité de respecter le critère de conformité réglementaire lié au flux de pollution ($CCR_{max}^{DBO_5}$) pour l'année 2018 ($CCR_{STEP}^{DBO_5}$ - Tableau 7.10). Il est observé également que l'ensemble des flux de pollution déversés par le DO « Gambetta » présentent une concentration de DBO_5 inférieure à l'entrée de STEP ($C_{Local} < C_{STEP}$ - Tableau 7.9). En outre, il est possible de respecter avec une confiance à 95% le $CCR_{max}^{DBO_5}$ s'il est supposé que la concentration du flux de pollution déversé pour chaque déversement de chacun des DO (i) correspond à la concentration moyenne du déversoir d'orage « Gambetta », ou (ii) est proportionnelle au rapport moyen empirique (φ_G - Eq. 7.13) entre la concentration événementielle du DO « Gambetta » et la concentration moyenne du bilan 24 heures en entrée de STEP.

7.3.1.2 La concentration moyenne événementielle déversée en temps de pluie par le déversoir d'orage « Gambetta »

La concentration moyenne événementielle (CME) déversée en temps de pluie par le déversoir d'orage « Gambetta » est inférieure à la concentration moyenne sur 24 heures en entrée de la station d'épuration (STEP). Ce comportement est observé pour les quatre campagnes de mesure, voir Tableau 7.11. Les CMEs déversées des conduites « Gauche » et « Droit » sont inférieures à la CME maximale du déversement pour l'année 2018 : $CME_{max} = 130.3\ mg\ O_2/L$ de DBO_5 (voir Tableau 7.5).

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2020LYSEI083/these.pdf
© [A. Claro Barreto], [2020], INSA Lyon, tous droits réservés

DO Gambetta 2018	Volume $[m^3]$	Concentration $\left[\frac{mg}{L}\right]$		Masse de DBO_5 $[Kg]$		
		STEP	DO	**STEP**	**CMS**	**Rapport**
Pluie du 29/10	33 280	49.92	38.76		1 290	
	(0.4%)	(20.0%)	(7.1%)		(7.2%)	
Pluie du 06/11	31 656	134.07	112.97		3 576	
	(0.5%)	(22.4%)	(7.3%)		(7.4%)	
Pluie du 19/12	8 008	139.50	119.03		953	
	(0.9%)	(45.2%)	(6.0%)		(6.0%)	
Les autres pluies	309 660			46 805	27 948	38 571
	(0.1%)			(5.7%)	(23.7%)	(12.5%)

Tableau 7.9 – Le volume, la concentration moyenne et la masse en DBO_5 des flux de pollution déversés par le déversoir d'orage (DO) « Gambetta » dans l'année 2018. La masse est calculée selon les hypothèses « **STEP** », « **CMS** » et « **Rapport** ». L'incertitude relative élargie ($2\sigma/\mu$) est indiquée entre parenthèses.

	Volume $[m^3]$	Masse de DBO_5 $[Kg]$		
		STEP	**CMS**	**Rapport**
DO Gambetta	382 604	52 624	33 767	44 391
	(0.1%)	(5.1%)	(19.6%)	(10.9%)
DO Barjon	166 642	21 781	15 040	17 949
	(0.6%)	(5.7%)	(100.0%)	(50.3%)
DO Port	123 118	16 814	11 112	13 856
	(0.6%)	(5.7%)	(100.0%)	(50.3%)
DO < 600 Kg/j DBO_5	100 247	13 982	9 047	11 522
	(0.6%)	(3.3%)	(100.0%)	(50.1%)
Total DO	772 611	105 201	68 967	87 719
	(0.2%)	(3.0%)	(31.7%)	(15.6%)
STEP	10 351 535		1 971 355	
	(0.2%)		(1.5%)	
$CCR \equiv \frac{\text{Déversé}}{\text{Produit}}$	6.95%	5.07%	3.38%	4.26%
	[6.93% – 6.96%]	[4.90% – 5.23%]	[2.31% – 4.45%]	[3.59% – 4.93%]

Tableau 7.10 – Le volume et la masse en DBO_5 des flux de pollution déversés et collectés par le système de collecte de la ville de Valence dans l'année 2018 en fonction des hypothèses « **STEP** », « **CMS** » et « **Rapport** ». L'incertitude relative élargie ($2\sigma/\mu$) est indiquée entre parenthèses et l'intervalle de confiance à 95% ($\mu \pm 2\sigma$) est indiqué entre crochets.

Les CMEs des conduites de déversement « Gauche » et « Droit », présentées dans le Tableau 7.11, sont validées qualitativement à l'aide la Fig. 7.7. Les trois dernières campagnes de mesure (Fig. 7.7b-7.7d) ont échantillonné tout au long du déversement. Seule la campagne de mesure du 29/10/2018 (Fig. 7.7a) a mesuré environ 20% de la durée du déversement.

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2020LYSEI083/these.pdf
© [A. Claro Barreto], [2020], INSA Lyon, tous droits réservés

N°	Date	STEP Valence	DO Gambetta Gauche	DO Gambetta Droit
		DBO_5 $(mg\,O_2/L)$		
1	2018/10/29	49.9	38.7	38.8
2	2018/11/06	116.9	117.5	108.9
3	2018/12/19	134.1	120.4	118.0
4	2019/03/07	240.5	146.7	128.5

Tableau 7.11 – La demande biochimique en oxygène sur 5 jours (DBO_5) moyenne (i) sur 24 heures à l'entrée de la station d'épuration (STEP) de Valence et (ii) événementielle (Eq. 7.6) dans les conduites de déversement « Gauche » et « Droit » en fonction de l'événement pluvieux.

Ces premiers résultats montrent que le déversoir d'orage « Gambetta » déverse une pollution légèrement moins concentrée en DBO_5 que celle observée en l'entrée de STEP en temps de pluie.

7.3.2 Caractérisation de la pollution déversée en temps de pluie par le déversoir d'orage « Gambetta »

La pollution déversée par le déversoir d'orage « Gambetta » en temps de pluie est caractérisée à l'aide des différents paramètres physico-chimiques indiqués dans le Tableau 7.2 - Section 7.2.2.2. La Section 7.3.2.1 montre la similitude des concentrations instantanées du flux de pollution déversé par les deux conduites de décharge. Les principales caractéristiques physico-chimiques du flux de pollution déversé sont présentées dans la Section 7.3.2.2. Enfin, la fraction organique de la pollution déversée est présentée dans la Section 7.3.2.3.

7.3.2.1 La charge polluante des conduites de déversement

La concentration instantanée du flux de pollution déversé pour l'ensemble des paramètres physico-chimiques est similaire entre les conduites de décharge « Gauche » et « Droit ». Cette hypothèse est validée uniquement à l'aide de l'événement pluvieux du 07/03/2019, car le protocole d'échantillonnage de la conduite « Gauche » n'a pas fonctionné pour les autres trois campagnes de mesure à cause des aléas opérationnels (Tableau 7.3 - Section 7.2.2.3).

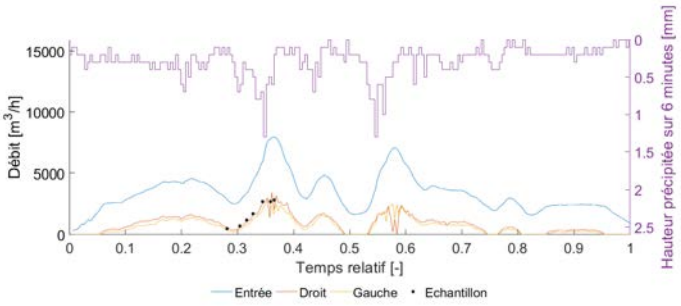
La Fig. 7.8 présente le rapport de la concentration instantanée de la conduite « Gauche » C_{Gauche} sur la conduite « Droit » C_{Droit} pour les différents paramètres physico-chimiques : les matières en suspension (MES), les matières volatiles en suspension (MVS), le carbone organique total (COT), la demande chimique en oxygène (DCO) et la demande biochimique en oxygène sur 5 jours avec la méthode normée (DBO_5 - 5J) et la méthode Enverdi® DBO (DBO_5 - 48h). Les barres verticales représentent l'intervalle de confiance à 95% du rapport $C_{\text{Gauche}}/C_{\text{Droit}}$. Ce rapport est calculé à l'aide de la méthode des moindres carrés de l'équation $C_{\text{Gauche}} = \alpha\, C_{\text{Droit}}$. L'incertitude $u\,(C_{\text{Gauche}} = \alpha\, C_{\text{Droit}})$ est obtenue à l'aide d'une simulation de Monte Carlo d'environ 1 000 000 de réalisations.

Bien que la moyenne du rapport $C_{\text{Gauche}}/C_{\text{Droit}}$ soit supérieure à l'unité pour l'ensemble des paramètres physico-chimiques (sauf pour la « DBO_5 - 48h »), tous les rapports moyens sont compris dans la bande d'incertitude expérimentale de $\pm 20\%$. Cette similitude de concentration est due principalement à la séparation spatiale de 20 cm entre les deux conduites de déversement (voir Fig. 7.1 - Section 7.2.1).

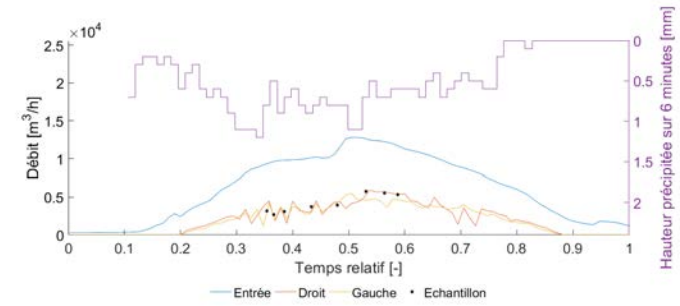
7.3.2.2 Caractéristiques physico-chimiques de la pollution déversée

La pollution déversée par le DO « Gambetta » en temps de pluie est caractérisée à l'aide des rapports DBO_5/MES, DCO/MES et DCO/DBO_5. Ces rapports sont évalués pour (i) la concentration instantanée déversée par le DO « Gambetta », (ii) la concentration moyenne sur bilan 24 heures (CM24) à l'entrée de la STEP et (iii) la concentration moyenne événementielle (CME) de temps pluie à l'exutoire du réseau unitaire des travaux de Gromaire et al. (2001) et certains DO en Espagne (Suarez et Puertas 2005). Le rapport

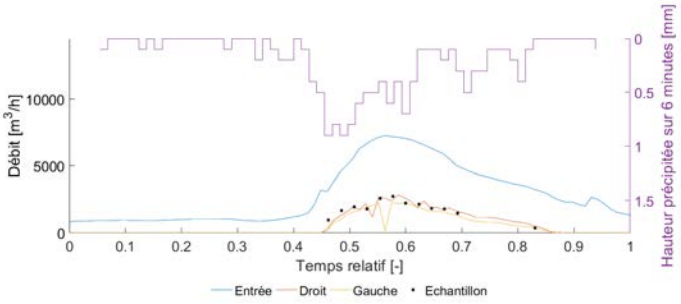
Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2020LYSEI083/these.pdf
© [A. Claro Barreto], [2020], INSA Lyon, tous droits réservés



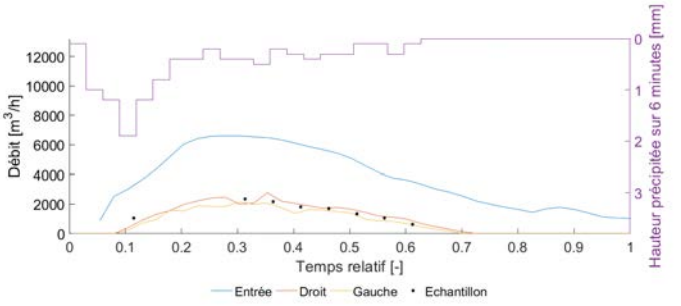
(a) Pluie du 2018/10/29



(b) Pluie du 2018/11/06



(c) Pluie du 2018/12/19



(d) Pluie du 2019/03/07

Figure 7.7 – Instant temporel de l'échantillonnage dans au moins l'un des points de mesure (i.e. Amont, Droit et Gauche) pour chaque événement pluvieux. Le temps relatif correspond au rapport entre le temps et la durée de l'événement pluvieux.

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2020LYSEI083/these.pdf
© [A. Claro Barreto], [2020], INSA Lyon, tous droits réservés

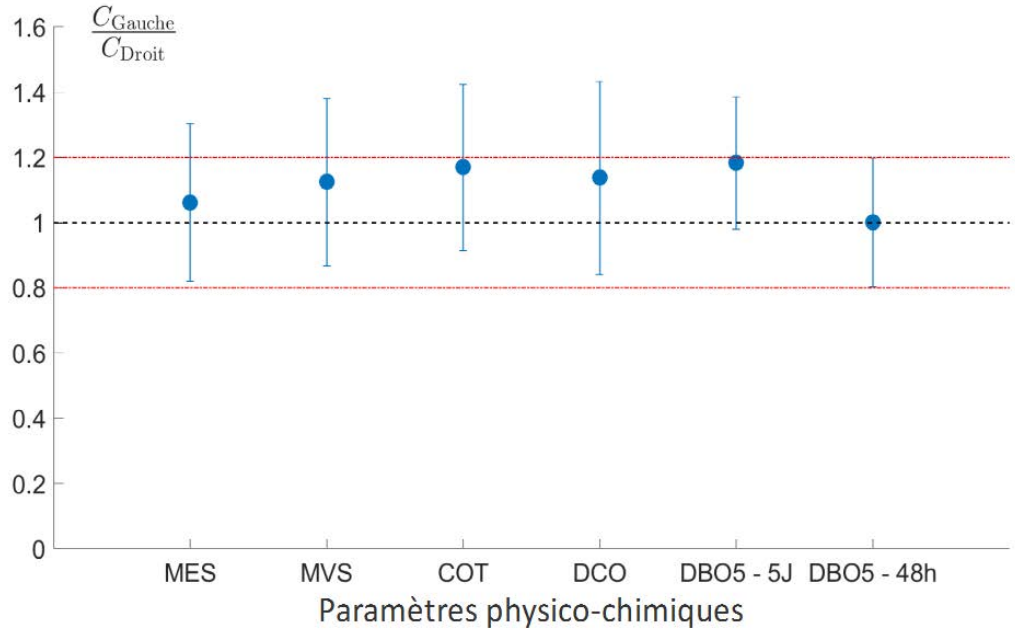


Figure 7.8 – Le rapport des concentrations instantanées de la conduite « Gauche » sur la conduite « Droit » $C_{\text{Gauche}}/C_{\text{Droit}}$ en fonction des paramètres physico-chimiques pour l'événement pluvieux du 07/03/2019. Les barres verticales représentent l'intervalle de confiance à 95%. Les lignes pointillées horizontales rouges correspondent à l'incertitude expérimentale de $\pm 20\%$.

DBO_5/MES permet d'estimer la fraction de la pollution organique biodégradable liée aux matières en suspension. Le rapport DCO/MES permet d'estimer la pollution organique et minérale liée aux matières en suspension. Le rapport de biodégradabilité DCO/DBO_5 permet d'estimer le rapport entre les matières organiques biodégradables et celles non biodégradables et minérales.

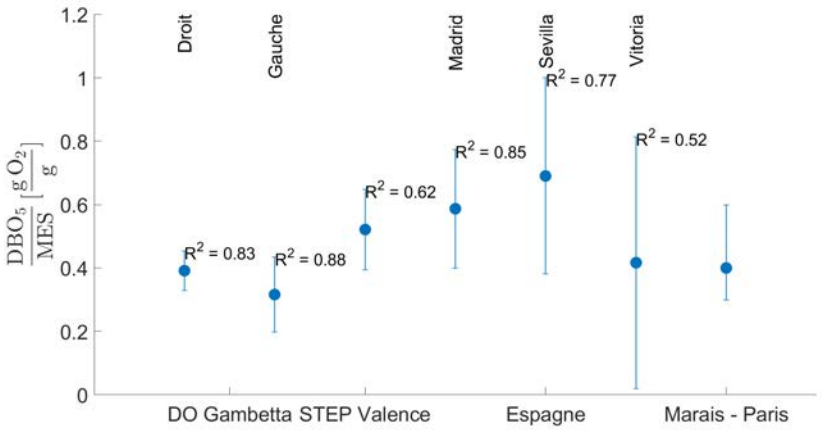
Le rapport DBO_5/MES au niveau du DO « Gambetta » est inférieur à celui en entrée de STEP (i.e. CM24 - voir Fig. 7.9a). Ce rapport vaut environ $0.41\ g\,O_2/g$ et il est du même ordre de grandeur que celui des travaux de Gromaire et al. (2001) à l'exutoire du bassin versant du « Marais » à Paris (voir Section 7.3.3).

Le pourcentage de la pollution organique et minérale transportée par les matières en suspension déversées (DCO/MES) par le DO « Gambetta » est plus élevé que (i) celui observé en entrée de STEP et (ii) celui obtenu par Gromaire et al. (2001) à l'exutoire d'un réseau unitaire (Fig. 7.9b). Le rapport DCO/MES des travaux de Suarez et Puertas (2005) varie entre les différentes villes.

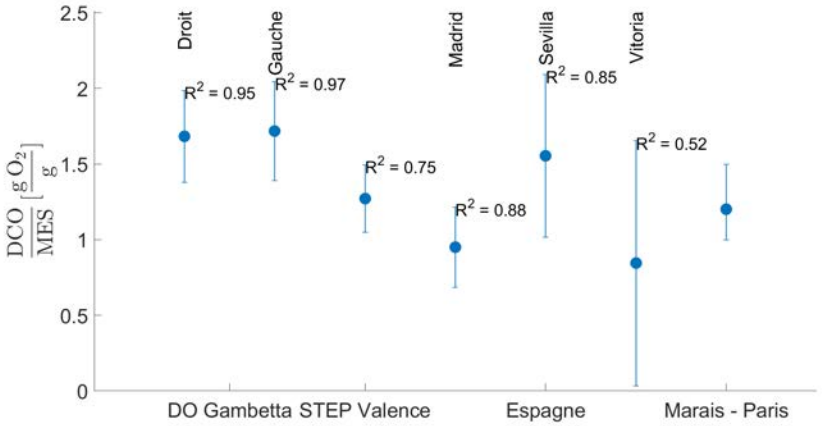
Le taux de biodégradabilité (i.e. DCO/DBO_5) est plus élevé dans le flux déversé par le DO « Gambetta » qu'à l'entrée de la STEP (voir Fig. 7.9c). A noter que le rapport DCO/DBO_5 à l'entrée de la STEP de Valence est similaire à celui observé dans la littérature (e.g. Grady et al. 2011). Le rapport DCO/DBO_5 à l'entrée de la STEP est similaire à celui observé par Gromaire et al. (2001) à Paris et par Suarez et Puertas (2005) en Espagne.

Malgré des différences sur les rapports observés dans la Fig. 7.9, les coefficients de détermination R^2 des régression linéaires sur les couples « DBO_5 - MES », « DCO - MES » et « DCO - DBO_5 » sont relativement élevés pour l'ensemble des sites étudiés : (i) les concentrations instantanées au DO « Gambetta » (ii) les CM24 en entrée STEP à Valence et (iii) les CME de Suarez et Puertas (2005). En outre, ces résultats sont similaires aux expériences de Piro et al. (2007) sur les relations entre les MES et la DCO en temps de pluie. Ceci montre la possibilité d'établir des relations empiriques entre les MES, la DCO et la DBO_5 sur les flux déversés d'un déversoir d'orage d'un réseau unitaire en temps de pluie.

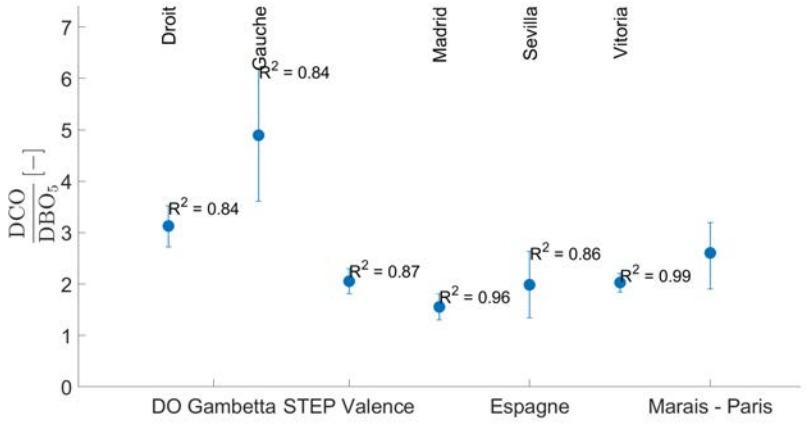
Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2020LYSEI083/these.pdf
© [A. Claro Barreto], [2020], INSA Lyon, tous droits réservés



(a)



(b)



(c)

Figure 7.9 – Le rapports DBO_5/MES (Fig. 7.9a), DCO/MES (Fig. 7.9a), et DCO/DBO_5 (Fig. 7.9a) pour les concentrations instantanées (DO « Gambetta »), sur 24 heures (STEP Valence) et moyennes événementielles (Espagne - Suarez et Puertas 2005 ; et Marais-Paris Gromaire et al. 2001).

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2020LYSEI083/these.pdf
© [A. Claro Barreto], [2020], INSA Lyon, tous droits réservés

7.3.2.3 La fraction organique de la pollution déversée

La fraction organique de la pollution déversée est mesurée à l'aide des matières volatiles en suspension (MVS). Les MVS en fonction des matières en suspension (MES) sont présentées dans la Fig. 7.10 pour les deux conduites de déversement : «Gauche» et «Droit». Les barres verticales et horizontales représentent l'intervalle de confiance à 95% des MVS et MES, respectivement.

Il est observé que les MVS sont fortement corrélées ($R^2 \geq 0.95$) aux MES pour ces deux sections de mesure (voir Tableau 7.12), ce résultat est en cohérence avec la littérature (e.g. Gromaire-Mertz et al. 1998). La fraction organique transportée par les matières en suspension lors des déversements représente environ 75%, correspondant au coefficient directeur de la relation MVS $= a$ MES (voir Tableau 7.12).

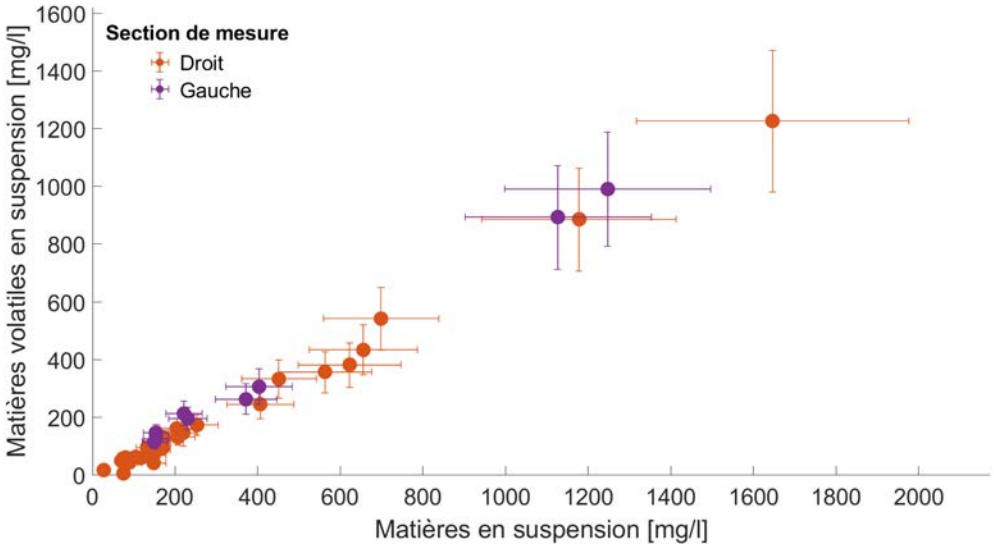


Figure 7.10 – Matières volatiles en suspension (MVS) en fonction des matières en suspension (MES) pour les deux conduites de décharge du déversoir d'orage «Gambetta».

	MVS $= a$ MES		
Section	a	$u(a)$	R^2
Droit	0.716	0.049	0.963
Gauche	0.792	0.069	0.968

Tableau 7.12 – Coefficient directeur a et de détermination R^2 de la relation empirique MVS $= a$ MES en fonction de la section de mesure. $u(a)$ est l'incertitude du coefficient a.

D'après la littérature (e.g. Gromaire-Mertz et al. 1998 - à l'exutoire d'un réseau unitaire en temps de pluie), la fraction particulaire de la demande biochimique en oxygène sur 5 jours $DBO_5^p/DBO_5 \approx 81\%$. Si l'on prendre en compte les rapports empiriques DBO_5/MES et MES/MVS (Tableaux 7.13-7.12, respectivement), il est possible d'obtenir le rapport DBO_5^p/MVS qui correspond à l'oxygène dissous consommé par les matières organiques biodégradables sous forme particulaire (DBO_5^p) par rapport aux matières organiques (MVS). On observe que le flux de pollution déversé en temps de pluie au niveau du déversoir d'orage «Gambetta» pourrait avoir un rapport empirique $DBO_5^p/MVS \approx 0.44\, mg\, O_2/mg$ (voir l'Eq. 7.55), si $DBO_5^p/DBO_5 \approx 81\%$ est valable pour ce DO. Ce résultat implique ainsi que chaque gramme de pollution particulaire organique déversée par le DO «Gambetta» va consommer en moyenne $0.44\, g\, O_2$ dissous du milieu récepteur sur 5 jours.

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2020LYSEI083/these.pdf
© [A. Claro Barreto], [2020], INSA Lyon, tous droits réservés

$$\underbrace{\frac{\mathrm{DBO}_5^p}{\mathrm{DBO}_5}}_{\substack{\text{Hypothèse}\\ \approx 81\%}} \times \underbrace{\frac{\mathrm{DBO}_5}{\mathrm{MES}}}_{\substack{\text{Coef. } a\\ \text{Tab. 7.13}}} \times \underbrace{\frac{\mathrm{MES}}{\mathrm{MVS}}}_{\substack{\text{Coef. } a^{-1}\\ \text{Tab. 7.12}}} = \frac{\mathrm{DBO}_5^p}{\mathrm{MVS}} = \begin{cases} 0.46\dfrac{mg\ O_2}{mg} & \text{Conduite «Gauche»} \\ 0.42\dfrac{mg\ O_2}{mg} & \text{Conduite «Droit»} \end{cases} \tag{7.55}$$

7.3.3 Mesure de la demande biochimique en oxygène sur 5 jours (DBO_5) à l'aide des matières en suspension (MES)

La demande biochimique en oxygène sur 5 jours (DBO_5) du flux déversé en temps de pluie par le déversoir d'orage (DO) «Gambetta» peut être calculée à l'aide d'une relation empirique par rapport aux matières en suspension (MES). Les campagnes de mesure *in situ* montrent que la relation linéaire $\mathrm{DBO}_5 = a\,\mathrm{MES}$ donnent des coefficients de détermination $R^2 \approx 0.8$ avec la méthode normée (Tableau 7.13). En outre, les relations linéaires $\mathrm{DBO}_5 = a\,\mathrm{MES}$ avec les méthodes normée et Enverdi® DBO, pour la campagne de mesure du 07/03/2019, donnent des $R^2 \approx 0.8$ (Tableau 7.14). La corrélation entre la DBO_5 et les MES est observée également sur 3 des 5 bassins versants étudiés par Suarez et Puertas (2005) (Tableau 7.15). Les coefficients de détermination R^2 des régressions linéaires sur les concentrations moyennes événementielles oscillent entre 52% et 82%.

Le coefficient directeur «a» des régressions linéaires ($\mathrm{DBO}_5 = a\mathrm{MES}$) pour les deux conduites de déversement «Droit» et «Gauche» est respectivement 0.37 et 0.45 (Tableau 7.13). Les coefficients directeurs du Tableau 7.13 sont similaires au rapport $\mathrm{DBO}_5^p/\mathrm{MES} \in [0.3 - 0.7]$ observé par Gromaire et al. (2001) à la sortie d'un réseau unitaire du bassin versant «Marais» à Paris en temps de pluie; avec DBO_5^p la différence entre la DBO_5 totale et dissoute. Le rapport $\mathrm{DBO}_5/\mathrm{MES}$ au DO «Gambetta» est aussi du même ordre de grandeur que celui observé par Suarez et Puertas (2005).

Concernant l'événement pluvieux du 07/03/2019, les coefficients directeurs obtenus avec les méthodes Enverdi® DBO et normée sont (i) similaires pour la conduite de décharge «Droit» et (ii) différents pour la conduite de décharge «Gauche» (Tableau 7.14). Cette différence au niveau de la conduite de décharge «Gauche» est due au nombre de points de mesure utilisé pour estimer les coefficients de la régression linéaire.

Ces premiers résultats montrent une corrélation non négligeable entre les MES et la DBO_5 déversées en temps de pluie par le DO «Gambetta». Il est ainsi observé que les matières en suspension déversées sont capables de transporter environ 41% des matières organiques biodégradables (correspondant au coefficient a du Tableau 7.13).

	$\mathrm{DBO}_5 = a\,\mathrm{MES}$		
Section	a $\left[\frac{mg\ O_2}{mg}\right]$	$u(a)$	R^2
Droit	0.374	0.019	0.859
Gauche	0.451	0.040	0.769

Tableau 7.13 – Coefficients directeur a et de détermination R^2 de la relation empirique $\mathrm{DBO}_5 = a\,\mathrm{MES}$ en fonction de la section de mesure. $u(a)$ est l'incertitude du coefficient a.

7.4 Conclusions

Le fonctionnement global vis-à-vis de la pollution déversée du déversoir d'orage (DO) «Gambetta» en temps de pluie a été étudié expérimentalement grâce à quatre campagnes de mesure *in situ*. Ces premiers

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2020LYSEI083/these.pdf
© [A. Claro Barreto], [2020], INSA Lyon, tous droits réservés

DBO_5	Section	$DBO_5 = a\,MES$ a $\left[\frac{mg\,O_2}{mg}\right]$	$u(a)$	R^2	Nombre de mesures
Enverdi®	Droit	0.300	0.051	0.850	7
	Gauche	0.379	0.045	0.786	5
Normée	Droit	0.373	0.032	0.467	7
	Gauche	0.451	0.040	0.768	9

Tableau 7.14 – Coefficients directeur a et de détermination R^2 de la relation empirique $DBO_5 = a\,MES$ de l'événement pluvieux du 07/03/2019 en fonction de la section de mesure et de la méthode de mesure de la DBO_5. $u(a)$ est l'incertitude du coefficient a.

Ville			Madrid	Sevilla	Vitoria
Bassin versant			Arroyo del Fresno	Los Remedios	Almendra
Surface (ha)			3 800	135	132
Population			228 000	51 300	18 480
Nombre de pluies			11	10	8
$DBO_5 = a\,MES$	a	$\left[\frac{mg\,O_2}{mg}\right]$	0.587	0.691	0.416
	R^2		0.849	0.768	0.523
$DCO = a\,MES$	a	$\left[\frac{mg\,O_2}{mg}\right]$	0.949	1.555	0.844
	R^2		0.880	0.848	0.521

Tableau 7.15 – Relations empiriques entre les matières en suspension (MES), la demande biochimique en oxygène sur 5 jours (DBO_5) et la demande chimique en oxygène (DCO) par bassin versant selon les concentrations moyennes événementielles mesurées par Suarez et Puertas (2005).

résultats expérimentaux ont permis de développer et tester des premières relations entre paramètres de qualité de l'eau. Le suivi de la demande biochimique en oxygène sur 5 jours (DBO_5) à l'aide des concentrations en matières en suspension (MES) ou de la demande chimique en oxygène (DCO) est possible sur ce site d'étude, par exemple à l'aide d'un turbidimètre. En effet, les MES déversées en temps de pluie sont fortement corrélées ($R^2 \approx 0.84$) à la DBO_5 et on a observé un rapport de concentration DBO_5/MES d'environ $0.41\ mg\ O_2/mg$ pour ce DO. En outre, la pollution organique sous forme particulaire est capable sur 5 jours de consommer environ $0.44\ mg\ O_2/mg$. L'ensemble des relations empiriques obtenues est cohérent par rapport aux résultats de la littérature.

L'exploitation des données obtenues a permis de vérifier que le critère de conformité réglementaire lié au flux de pollution en DBO_5 pourrait être pertinent pour la ville de Valence. D'après ces premiers résultats, la charge polluante déversée représente environ 5% de la charge totale collectée (Hypothèse «STEP»). Ce rapport pourra diminuer à environ 3.8% si l'on considère que les concentrations des flux déversés sont similaires à la concentration moyenne du DO «Gambetta» (Hypothèse «CMS») ou proportionnelles au rapport moyen entre la concentration événementielle du DO «Gambetta» et la concentration du bilan 24 h en entrée de STEP (Hypothèse «Rapport»). Globalement, ces premiers résultats montrent que les concentrations moyennes événementielles (CME) en DBO_5 des conduites de décharge du DO «Gambetta» pour l'ensemble des campagnes de mesure sont inférieures (i) à la concentration moyenne événementielle maximale (CME_{max}) et (ii) aux concentrations du bilan sur 24 heures en entrée de STEP.

Ceci montre que la masse déversée en DBO_5 (en temps de pluie) au sein d'un DO du système de collecte peut être surestimée si l'on utilise la concentration en entrée de STEP. L'utilisation des concentrations en entrée de STEP s'avère utile pour l'exploitant en manque de mesures de qualité des rejets des DO *in situ* mais elle n'est pas représentative du fonctionnement vis-à-vis du flux de pollution déversé (Bertrand-

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2020LYSEI083/these.pdf
© [A. Claro Barreto], [2020], INSA Lyon, tous droits réservés

Krajewski et Maruéjouls 2019). En effet, le transport de polluants dans un réseau d'assainissement lors d'un événement pluvieux est un phénomène dynamique dans l'espace et le temps qui ne permet pas de garantir une concentration homogène de la pollution dans tous les points du réseau. En outre, le transport de la pollution au sein d'un déversoir d'orage est fortement déterminé par l'écoulement tridimensionnel et transitoire en place et les caractéristiques des polluants véhiculés.

Une nouvelle méthode de mesure de la DBO en 48h, la méthode Enverdi®, a été testée dans le cadre de cette étude. Les résultats sont comparables à ceux obtenus avec la méthode normée. Ces tests prometteurs montrent que cette nouvelle méthode est une alternative pour les collectivités qui s'intéressent au flux de pollution déversé. Toutefois, d'autres campagnes de mesure devront être réalisées pour conforter les résultats obtenus, car la complexité des mécanismes naturels mis en jeu pour le transport de la pollution dans un réseau d'assainissement et ses ouvrages de dérivation exige un nombre plus élevé de données expérimentales en temps de pluie pour obtenir des résultats statistiquement représentatifs (Francey et al. 2004 ; McCarthy et al. 2018 ; Métadier et Bertrand-Krajewski 2012).

7.5 Perspectives

Des campagnes de mesure du flux de pollution supplémentaires en temps de pluie permettraient de consolider des différents résultats présentés dans ce chapitre. Ces nouvelles campagnes devront échantillonner au minimum 10 différents événements pluvieux d'après les recommandations de la littérature (Francey et al. 2004 ; McCarthy et al. 2018 ; Métadier et Bertrand-Krajewski 2012) afin de connaître la concentration moyenne événementielle avec une incertitude inférieure à 30%. Aussi, il sera nécessaire de vérifier si le point de mesure de concentration à l'entrée de la STEP est représentatif vis-à-vis de la DBO_5 en temps de pluie, paramètre imposé par l'Arrêté du 21 juillet 2015. Cette vérification est nécessaire parce que cette concentration est utilisée pour calculer la concentration moyenne événementielle maximale CME_{max} autorisée par déversement et le critère de conformité réglementaire lié au flux de pollution déversé en temps de pluie.

Le point de mesure à l'amont du déversoir d'orage « Gambetta » devra être modifié afin (i) d'éviter le colmatage du système de mesure par des macrodéchets et (ii) d'assurer une mesure en continu de la turbidité. Le colmatage pourra être éliminé si le nouveau dispositif est similaire à la structure flottante utilisée par Gruber et al. (2005). Le fonctionnement de la sonde de turbidité en place devra être vérifié à nouveau par une nouvelle campagne d'étalonnage. Cette vérification permettra d'assurer l'obtention des relations empiriques (linéaires) entre la turbidité et les autres paramètres physico-chimiques, comme les MES et la DCO, pour le flux d'entrée et déversé. Tous ces travaux permettront de mieux calculer la masse déversée en temps de pluie tant pour les événements pluvieux mesurés que pour ceux suivis seulement par la turbidité.

Enfin, la simulation numérique du transport des matières en suspension sera possible si la granulométrie, la densité et les fractions particulaires de la DCO et de la DBO_5 sont mesurées en temps de pluie. Ces paramètres devront être mesurés pour les écoulements d'entrée et déversés. Les possibles variations rencontrées dans ces deux sections de mesure pourront expliquer la différence du rapport DCO/DBO_5 observée entre l'écoulement déversé et l'écoulement en entrée de la STEP. Les fractions particulaires de la DCO et la DBO_5 permettront aussi de vérifier si la pollution déversée est transportée principalement par les sédiments en suspension. Si cette hypothèse s'avère être valide, un fractionnement granulométrique des sédiments permettra de mieux cibler la fraction responsable du transport de la DCO et de la DBO_5.

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2020LYSEI083/these.pdf
© [A. Claro Barreto], [2020], INSA Lyon, tous droits réservés

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2020LYSEI083/these.pdf
© [A. Claro Barreto], [2020], INSA Lyon, tous droits réservés

Troisième partie

Conclusions et perspectives

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2020LYSEI083/these.pdf
© [A. Claro Barreto], [2020], INSA Lyon, tous droits réservés

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2020LYSEI083/these.pdf
© [A. Claro Barreto], [2020], INSA Lyon, tous droits réservés

Conclusions

Le présent projet de thèse s'intéresse ainsi à la caractérisation du flux de pollution déversé par un déversoir d'orage (DO) en temps de pluie. L'ensemble des travaux est consacré à l'étude expérimentale et numérique de l'hydrodynamique et de la dispersion de la pollution particulaire au sein des déversoirs latéraux aux échelles réduite et réelle. Le déversoir à échelle réelle étudié, le DO « Gambetta », est d'un intérêt particulier parce qu'il représente la contribution majeure ($> 50\%$) du volume total déversé en temps de pluie. Ce DO s'assimile à un déversoir latéral à paroi mince en régime fluvial qui correspond au déversoir à échelle réduite. Les conclusions majeures sur le comportement hydrodynamique et le flux de pollution déversé par un déversoir latéral sont présentées ci-dessous.

L'hydrodynamique

Concernant l'hydrodynamique des déversoirs d'orage (DO) latéraux, la mécanique des fluides numérique (CFD, en anglais) s'avère être un outil indispensable pour reproduire la complexité des écoulements rencontrés en réseau d'assainissement . Deux méthodes numériques CFD ont été testées dans la présente étude afin de reproduire l'hydrodynamique des déversoirs latéraux aux échelles réduite (pilote) et réelle (terrain) : (i) la méthode de Boltzmann sur réseaux - LBM - couplée au modèle de simulation des grandes échelles et (ii) la méthode de volumes finis couplée utilisée pour discrétiser les équations de Navier-Stokes moyennées dans le temps (i.e. selon la décomposition de Reynolds ; RANS, en anglais).

L'approche LBM couplée au modèle des grandes échelles (LES, en anglais) est capable de simuler des écoulements turbulents confinés à fort nombre de Reynolds (Re $\geq 25\,000$) avec des résolutions spatiales (i.e. le maillage) adaptées au milieu industriel. Mais l'état de développement actuel n'est pas suffisant pour reproduire les écoulements rencontrés en réseau d'assainissement : écoulements confinés à surface libre et chargés en polluants particulaires. Les conditions limites d'entrée et/ou sortie en LBM sont la principale source d'instabilité et d'imprécision pour les écoulements à fort nombre de Reynolds avec des maillages adaptés au milieu industriel, car elles produisent des ondes acoustiques non-physiques (e.g. Hu et al. 2017 ; Wissocq et al. 2017). Malheureusement, le développement informatique nécessaire pour simuler et valider le type d'écoulements en réseau d'assainissement est jugé hors de la portée du présent projet de recherche.

L'approche RANS discrétisée à l'aide de la méthode de volumes finis permet de simuler la répartition du débit et de la surface libre au sein des déversoirs latéraux aux échelles réduite (laboratoire - Chapitre 3) et réelle (terrain -Chapitre 4). Ce résultat conforte les différents travaux scientifiques qui ont employé cette approche en hydrologie urbaine (e.g. Claro Barreto et al. 2015 ; Isel et al. 2014b ; Lipeme Kouyi 2004 ; Lipeme Kouyi et al. 2005 ; Maté Marín et al. 2018 ; MENTOR 2011 ; Yan 2013 ; Zhu et al. 2016). Les travaux menés au sein d'un déversoir latéral à échelle réduite en régime fluvial (Fr $= 0.355$ - Chapitre 3) ont permis de démontrer que les modèles de turbulence RNG k-ϵ et SST k-ω sont capables de simuler relativement bien les champs de vitesses ($\overline{u}$, $\overline{v}$ et $\overline{w}$) et l'énergie cinétique turbulente (k) mesurés par vélocimétrie acoustique à effet Doppler (ADV, en anglais). L'analyse quantitative des erreurs obtenues par rapport aux données expérimentales (i.e. l'erreur moyenne quadratique - RMSE) a montré que le modèle RNG k-ϵ a une performance supérieure ou égale à celle du modèle SST k-ω. La RMSE médiane des deux modèles de turbulence sur les vitesses locales $\overline{u}$, $\overline{v}$ et $\overline{w}$, et l'énergie locale k est d'environ $0.10U_0$,

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2020LYSEI083/these.pdf
© [A. Claro Barreto], [2020], INSA Lyon, tous droits réservés

$0.07U_0$, $0.11U_0$ et $0.0042U_0^2$, respectivement ; avec $U_0 = 0.355\ m/s$ la vitesse moyenne à l'amont du déversoir.

Concernant le fonctionnement hydrodynamique du déversoir latéral à échelle réelle ou *in situ*, le DO « Gambetta », l'approche RANS couplée au modèle RNG k-ϵ a été employée sur la base des résultats obtenus pour le déversoir à échelle réduite (Chapitre 3) et des travaux scientifiques (e.g. Fach et al. 2009 ; Larsen et al. 2008 ; Lipeme Kouyi et al. 2011, 2005). L'approche appliquée a permis de reproduire la répartition du débit et la surface libre dans la chambre du DO « Gambetta » en temps de pluie, en considérant une succession de régimes permanents. Les débits déversés relatifs (i.e. le rapport entre le débit déversé et le débit d'entrée) par les deux conduites de décharge sont légèrement sous-estimés avec une RMSE comprise entre 7.4% et 14.8%. L'incertitude des résultats numériques du débit déversé est inférieure à celle sur les mesures expérimentales *in situ*. Ces résultats constituent, à notre connaissance, la première validation d'une simulation 3D d'un DO réel en temps de pluie.

Le modèle 3D du DO « Gambetta » a été ensuite exploité pour comprendre son fonctionnement hydrodynamique global. Des lois de déversement ont été conçues afin de calculer les débits déversés des (deux) conduites de décharge en fonction de l'actuelle mesure *in situ* de la hauteur d'eau à l'amont du DO. Ces lois de déversement permettent de valoriser la métrologie déjà mise en place. Le modèle 3D a également permis d'évaluer l'emplacement d'un capteur de qualité de l'eau *in situ* à l'aide des lignes de courant pour différents débits d'entrée. Les résultats numériques ont montré que l'emplacement actuel de la sonde de turbidité *in situ* ne permet pas capable de mesurer la pollution susceptible d'être déversée en temps de pluie. Un nouvel emplacement pourra être obtenu à l'aide du modèle numérique 3D si l'on souhaite mesurer en continu la qualité des rejets en temps de pluie.

La simulation 3D des déversoirs latéraux (à échelle réduite) a permis de calculer la probabilité numérique de déversement de l'eau en fonction de zone de contribution dans une section transversale localisée à l'amont du déversoir. Les résultats numériques ont montré que la probabilité de déversement accroît vers la région proche de la surface libre et du côté du seuil latéral. Le suivi de l'écoulement (i.e. les lignes de courant) permet ainsi d'évaluer la région de la section transversale responsable du déversement de la pollution dissoute, car cette dernière, supposée bien mélangée, est complètement transportée par l'écoulement.

Enfin, l'analyse des données expérimentales *in situ* (i.e. la hauteur d'eau et la vitesse moyenne) à l'aide d'une étude hydraulique 1D a montré que le capteur de hauteur est mieux adapté à l'environnement propre à l'assainissement que le capteur submergé de vitesse. En effet, le capteur de vitesse (i) souffre des problèmes d'encrassement en temps de pluie parce qu'il est en contact direct avec la pollution *in situ* et (ii) peut sous-estimer la vitesse moyenne de l'écoulement parce que le principe de mesure suppose que les particules en suspension se déplacent à la même vitesse que l'écoulement.

Le flux de pollution déversé

Suite aux travaux sur l'hydrodynamique des déversoirs latéraux, la dispersion de polluants particulaires au sein de ces ouvrages est étudiée de manière numérique et expérimentale en laboratoire et sur le terrain. Les premiers travaux sont réalisés sur le déversoir latéral à échelle réduite précédemment étudié afin d'évaluer la répartition massique des particules inertes en suspension en conditions contrôlées. Ensuite, les travaux au sein du déversoir d'orage « Gambetta », se sont intéressés (i) à évaluer la masse en DBO_5 (i.e. demande biochimique en oxygène sur 5 jours) déversée en temps de pluie et (ii) à établir des relations empiriques entre la DBO_5 et les autres paramètres physico-chimiques. L'ensemble de ces travaux avait pour but de déterminer si le critère de conformité réglementaire relatif au flux de pollution déversé est le mieux adapté au fonctionnement du système de collecte de la ville de Valence.

Au sein du déversoir latéral à échelle réduite, le flux de pollution déversé a fait l'objet d'une étude expérimentale et numérique de la répartition massique de particules inertes (i.e. billes en verre expansé). Ces particules inertes ont été injectés en 9 points indépendants à l'amont du déversoir afin d'étudier la masse déversée en fonction de sa position dans la section transversale. Les caractéristiques des particules inertes (i.e. la densité volumique et la distribution granulométrie) ont été choisies à l'aide d'une analyse

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2020LYSEI083/these.pdf
© [A. Claro Barreto], [2020], INSA Lyon, tous droits réservés

adimensionnelle afin d'assurer que les particules inertes soient transportées en suspension de manière similaire aux polluants particulaires *in situ* au sein du DO « Gambetta ».

Les résultats expérimentaux ont montré que les particules inertes injectées ne sont pas transportés par l'écoulement comme des scalaires passifs ; en d'autres termes, la pollution particulaire transportée en suspension ne suit pas l'écoulement. Ces résultats impliquent que la masse déversée n'est pas proportionnelle au volume déversé par le déversoir latéral. En effet, les résultats obtenus montrent que le pourcentage de la masse déversée est inférieur au pourcentage volumique de déversement de l'eau (i.e. volume déversé) pour un même endroit de la section transversale. Ces résultats impliquent également qu'il est fort improbable (i) d'avoir une distribution uniforme de la concentration au niveau de la section transversale et (ii) d'avoir une concentration équivalente à l'entrée, la décharge et l'aval d'un déversoir latéral. Ces résultats sont en en adéquation avec les travaux théoriques (e.g. Pal et Ghoshal 2017) et expérimentaux (e.g. Selbig et Bannerman 2011 ; Selbig et al. 2012). Il est ainsi indispensable de correctement sélectionner l'emplacement de prélèvement de l'écoulement qui est le plus représentatif de la pollution déversée en temps de pluie. D'après nos résultats, il est recommandé de mesurer la pollution déversée au niveau des conduites de décharge ou bien à l'amont du déversement au niveau d'une région qui contribue au volume déversé selon la méthode numérique de suivi des lignes de courant développée dans les Chapitres 4 et 6.

Le modèle numérique du transport de particules (i.e. le modèle de phase discrète - DPM, en anglais) est capable de reproduire les répartitions massiques expérimentales des particules injectés jusqu'à la moitié du côté opposé du déversement latéral de la section transversale. Cependant, le modèle DPM sous-estime la répartition massique des injections de particules du côté du déversement latéral. Les deux principales sources des différences sont (i) l'hydrodynamique obtenue par l'approche RANS avec les modèles de turbulence RNG k-ϵ et SST k-ω, et (ii) l'injection numérique de particules. Les courants secondaires au niveau du déversement n'ont pas été reproduites assez bien par le modèle numérique. L'injection numérique ne reproduit pas l'écoulement oscillatoire observé au niveau de l'injection expérimentale. Cet écoulement oscillatoire impacte la répartition massique des injections proches e la zone de déversement parce que la dispersion verticale des particules est augmentée de manière non négligeable.

Au niveau du déversoir d'orage « Gambetta », l'étude expérimentale du flux de pollution déversé en temps de pluie montre que le système de collecte de la ville de Valence, pour l'année 2018, est en mesure de respecter le critère de conformité réglementaire imposé par l'Arrêté du 21 juillet 2015. Parmi les trois critères proposés, le critère de conformité lié au flux de pollution déversé est respecté parce que la concentration en pollution biodégradable (i.e. la DBO_5) à l'entrée de la station d'épuration (STEP) est supérieure à celle rejetée par le DO « Gambetta » en temps de pluie. Par ailleurs, toutes les concentrations moyennes événementielles (CME) en DBO_5 des conduites de décharge sont inférieures (i) à la concentration moyenne événementielle maximale et (ii) aux concentrations du bilan 24 heures à l'entrée de STEP. Les résultats expérimentaux montrent également que la DBO_5 est fortement corrélée ($R^2 \approx 0.84$) aux matières en suspension (MES), ceci est en accord avec les précédents travaux scientifiques (e.g. Gromaire-Mertz et al. 1998). Il est donc envisageable de mesurer la concentration en DBO_5 du flux déversé à l'aide d'un capteur de qualité en continu (e.g. un turbidimètre) pré-calibré à une relation empirique aux MES *in situ*.

L'ensemble des résultats *in situ* sur le flux de BDO_5 a été obtenu grâce à une méthodologie de suivi méthodologie permet d'échantillonner l'écoulement déversé en temps de pluie et elle permet de diminuer le temps d'analyse de la DBO_5 de 5 jours à 48 heures grâce à la méthode Enverdi®. La méthode Enverdi® a été validée pour le flux de pollution déversé en temps de pluie dans le présent projet de recherche. La méthode Enverdi® est utile pour l'opérationnel qui souhaite évaluer le flux de pollution déversé par un déversoir en temps de pluie, car elle est plus rapide, moins coûteuse et possède une fiabilité comparable à la méthode normée.

Enfin, les résultats expérimentaux *in situ* montrent qu'il faut vérifier, voire rejeter, l'hypothèse qui suppose que les concentrations des rejets au niveau des DO sont similaires aux concentrations à l'entrée de la station d'épuration. Le transport de la pollution en réseaux d'assainissement est un phénomène dynamique dans l'espace et le temps. En particulier, le transport de la pollution au sein d'un déversoir d'orage

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2020LYSEI083/these.pdf
© [A. Claro Barreto], [2020], INSA Lyon, tous droits réservés

est déterminé par l'écoulement complexe en place et la variabilité des polluants particulaires *in situ*.

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2020LYSEI083/these.pdf
© [A. Claro Barreto], [2020], INSA Lyon, tous droits réservés

Perspectives

L'ensemble des perspectives est catégorisé en deux volets : opérationnelles et scientifiques. Le volet scientifique est constitué d'une partie expérimentale et une partie numérique.

Opérationnelles

Les travaux expérimentaux ont montré que le critère de conformité réglementaire liée aux flux de pollution déversés semble adapté au fonctionnement du système de collecte de la ville Valence. Valence Romans Agglo pourra adopter ce critère de conformité sous réserve de mesurer le flux de pollution déversé pour une durée supplémentaire d'environ 1 an, qui correspond à environ 12 événements pluvieux capables d'entrainer un déversement, afin de vérifier la validité des relations physico-chimiques *in situ* et les concentrations moyennes événementielles (CME) observées. Il est également conseillé d'évaluer le flux de pollution déversé en temps de pluie par les deux autres principaux déversoirs d'orages (DO) du système de collecte (i.e. les DO « Port » et « Barjon ») afin (i) de vérifier si les CME *in situ* sont inférieures à CME_{max} et (ii) de calculer les flux de pollution déversés par l'ensemble des DO en temps de pluie pour évaluer le respect du critère de conformité relatif à la pollution. Ces campagnes de mesure additionnelles pourront être effectuées promptement en se basant sur le protocole de mesure développé dans le cadre de cette thèse. En particulier, on préconise de mesurer la demande biochimique en oxygène sur 5 jours (DBO_5) à l'aide de la méthode Enverdi® DBO afin de réduire le temps et le coût d'analyse.

Sur le long terme, l'adoption du critère de conformité réglementaire lié aux flux de pollution déversés en temps de pluie dépend des innovations technologiques dans le domaine du suivi en continu de la pollution. L'opérationnel a besoin de capteurs de mesure en continu des paramètres physico-chimiques imposés par la réglementation en vigueur (e.g. les matières en suspension - MES, la demande chimique en oxygène - DCO, la DBO_5, etc.) afin de simplifier le suivi de la pollution déversée en temps de pluie, pour pouvoir la déployer de manière satisfaisante sur l'ensemble des territoires concernés. Ces innovations technologiques devront affranchir l'opérationnel non seulement des contraintes techniques mais aussi humaines, ces dernières étant l'un des principaux freins d'adaptabilité et l'une des principales sources d'incertitude des résultats obtenus. En effet, le critère lié à la pollution déversée pourra permettre d'éviter des modifications structurales importantes du système de collecte (e.g. la construction d'un bassin d'orage qu'il faudra entretenir et qui demande un investissement important). La mobilisation de nouvelles compétences en lien avec la métrologie connectée et communicante pourrait permettre de fiabiliser la chaîne de mesure et de réduire à moyen et long termes les ressources humaines. Des capteurs connectés et communicants sont aujourd'hui commercialisés et permettraient de suivre en continu les flux de DBOs déversés. Des campagnes de sensibilisation portant sur la réduction des rejets des lingettes et autres macrodéchets (comme proposé par Polomé et al. (2015) sur la réduction des rejets individuels) peut contribuer à réduire les coûts liés aux interventions du personnel pour l'entretien et la maintenance des sites de mesure.

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2020LYSEI083/these.pdf
© [A. Claro Barreto], [2020], INSA Lyon, tous droits réservés

Scientifiques - Expérimentations

L'état des connaissances actuel sur les flux de pollution déversés par un DO en temps de pluie exige des études expérimentales supplémentaires pour comprendre trois éléments clés de la pollution : (i) les variations spatio-temporelles des pollutants particulaires et dissous, (ii) les relations *in situ* entre les différents paramètres physico-chimiques et (iii) la fraction particulaire de la DBO_5 des flux déversés. La distribution spatiale de la pollution (e.g. les MES, la DCO, la DBO_5, etc.) à l'entrée et au sein d'un DO demeure méconnue à cause des des difficultés techniques liées à la mesure de ces paramètres, mais également du fait de la complexité des écoulements en jeu. Au niveau de l'entrée du DO, cette distribution spatiale est spécialement importante pour déterminer le rapport entre le flux de pollution susceptible d'être déversé et le flux de pollution total. Cet indicateur de la pollution déversée en temps de pluie pourra être mesurée en toute sécurité, par exemple, à l'aide du bras échantillonneur proposé et validé par Selbig (2015), Selbig et Bannerman (2011) et Selbig et al. (2012).

La variation temporelle du flux de pollution déversé a fait l'objet de plusieurs études expérimentales (e.g. Diaz-Fierros et al. 2002 ; García et al. 2017 ; Gruber et al. 2005 ; W. Schulz et al. 1994 ; Xu et al. 2017) mais l'ensemble de ces travaux n'a pas encore étudié les relations *in situ* entre les paramètres physico-chimiques. En particulier, la variation temporelle de la granulométrie et de la densité des particules déversées en fonction de l'indicateur de pollution (e.g. la DCO, la DBO_5, etc.) permettra d'évaluer si le pic de concentration est corrélé aux caractéristiques physiques des particules. En outre, la variation spatio-temporelle de la densité de particules permettra d'estimer leurs sources d'apport (i.e. remise en suspension ou apport en suspension depuis un autre lieu) et le pourcentage de la matière organique qui est un indicateur indirect de la DBO_5. Ces mesures permettront de comprendre ainsi l'importance de la fraction particulaire de la pollution ($d_p > 0.45\ \mu m$) du flux déversé par un déversoir d'orage en temps de pluie. Si les différents indicateurs de pollution sont transportés principalement sous forme particulaire, au début ou tout le long du déversement, il est fort probable que la répartition du débit ne soit pas une méthode fiable pour estimer et/ou calculer la répartition du flux de pollution déversé.

On considère également indispensable le fractionnement des indicateurs de pollution par taille de particule (d_p) afin de mieux déterminer quelle granulométrie est le vecteur principal de la pollution déversée. On préconise que toute campagne de mesure, si possible, suive la pollution à l'entrée du DO, au déversement et celle conservée afin de vérifier le bilan de masse du protocole de mesure (i.e. le masse d'entrée est égale à la somme des masses déversée et conservé, en supposant que les faibles temps de séjour ne permettent pas de transformation biochimiques et de sédimentation importantes). L'ensemble de ces résultats expérimentaux pourrait être accessible et gratuit au public (e.g. les exploitants, les scientifiques, les politiciens, les citoyens engagés, etc.) pour établir une base de données de validation des futurs modèles numériques.

Scientifiques - Numérique

L'approche numérique du flux de pollution déversé par un déversoir d'orage en temps de pluie a besoin d'une base de données *in situ* afin (i) de valider la répartition massique calculée (i.e. à l'aide des indicateurs d'erreur tels que la RMSE) et (ii) d'estimer l'incertitude des résultats numériques obtenus. En attendent cette base de données *in situ*, on considère que les premières études numériques doivent s'intéresser aux profils verticaux de concentration d'un canal prismatique à surface libre de la littérature (e.g. Noguchi et Nezu 2009). Ces études numériques permettront ainsi de déterminer la précision nécessaire sur l'hydrodynamique pour reproduire la répartition spatiale de la concentration des particules en suspension. En effet, il est conseillé de déterminer l'erreur maximale sur l'hydrodynamique qui permet de reproduire la répartition spatiale de la pollution particulaire avec une incertitude imposée. Pour les déversoirs latéraux, l'hydrodynamique devra assurer la simulation des courants secondaires de l'écoulement et aux grandeurs relatives à la turbulence (i.e. l'énergie cinétique turbulente et/ou les contraintes de Reynolds) afin de reproduire la répartition massique de la pollution particulaire avec une incertitude imposée.

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2020LYSEI083/these.pdf
© [A. Claro Barreto], [2020], INSA Lyon, tous droits réservés

En parallèle de ces premières études numériques en canal prismatique, on peut commencer à estimer la dispersion des polluants particulaires au sein d'un déversoir d'orage à l'aide des mesures expérimentales *in situ* de la pollution de voirie ruisselée en temps de pluie (e.g. Chebbo et al. 1990 ; Klemetson 1985 - d'après Mohammad Mourad 2005) et du modèle de transport de particules présenté dans cette thèse.

Enfin, on considère que la simulation numérique du flux de pollution déversé deviendra une méthode standard comme c'est déjà le cas pour la simulation numérique du comportement hydrodynamique du déversoir d'orage réel en temps de pluie. En effet, l'approche numérique présente l'avantage de pouvoir étudier en détail le transport de particules pour différentes configurations de l'écoulement à moindre coût, dans un temps raisonnable et en totale sécurité. En outre, cette approche permet de concevoir des modifications géométriques de l'ouvrage afin de diminuer le flux de pollution déversé et ainsi de diminuer l'impact des rejets du temps de pluie sur le milieu naturel.

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2020LYSEI083/these.pdf
© [A. Claro Barreto], [2020], INSA Lyon, tous droits réservés

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2020LYSEI083/these.pdf
© [A. Claro Barreto], [2020], INSA Lyon, tous droits réservés

Quatrième partie

Annexes

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2020LYSEI083/these.pdf
© [A. Claro Barreto], [2020], INSA Lyon, tous droits réservés

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2020LYSEI083/these.pdf
© [A. Claro Barreto], [2020], INSA Lyon, tous droits réservés

Fiche technique du déversoir d'orage « Gambetta »

Le déversoir d'orage « Gamebetta » est le principal ouvrage de dérivation du système de collecte de la Ville de Valence (France). Le volume annuel déversé du DO « Gambetta » représente un peu plus du 50% du volume annuel déversé du système de collecte (Valence Romans Agglo 2018). La localisation spatiale du DO « Gambetta » au sein du système collecte est présentée dans la Fig.A.1. La Fig.A.2 présente un plan 3D centré sur le DO « Gambetta » et le sens de l'écoulement à l'amont et à l'aval de celui-ci. Les débits d'entrée, déversé et conservé sont indiqués à l'aide des les flèches bleue, rouge et jaune, respectivement.

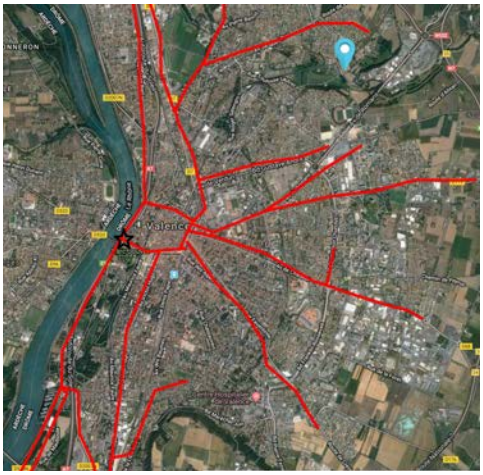


Figure A.1 – La localisation du déversoir d'orage « Gambetta » (étoile noire) dans le système de collecte de la ville de Valence. Les lignes rouges représentent les principaux collecteurs du système de collecte et le symbole en bleu correspond au pluviomètre « Belle Meunière ».

Le DO « Gambetta » correspond à un déversoir latéral (à 2 trous) piloté à l'aval par un vanne guillotine (Fig.A.3). Les caractéristiques techniques de cet ouvrage sont indiqués dans le TableauA.1. Le volume déversé de chacune deux conduite de décharge du DO « Gambetta » est calculé à l'aide d'une mesure couple de la hauteur d'eau et de la vitesse moyenne (DO *Gauche* et DO *Droit* - Tableau A.2). Le débit à l'entrée de l'ouvrage est calculé selon la Section A.1.2 du présente Annexe. La référence et la précision des capteurs de hauteur d'eau et de vitesse installés sont présentées dans le Tableau A.2. A titre d'exemple, le fonctionnement hydraulique du DO « Gambetta » en temps sec et en temps de pluie est illustré dans les Figs.A.4a-A.4b, respectivement.

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2020LYSEI083/these.pdf
© [A. Claro Barreto], [2020], INSA Lyon, tous droits réservés

Figure A.2 – Vue en 3D de la localisation du DO « Gambetta ». Les débits d'entrée, déversé et conservé correspondent aux flèches bleue, rouge et jaune, respectivement.

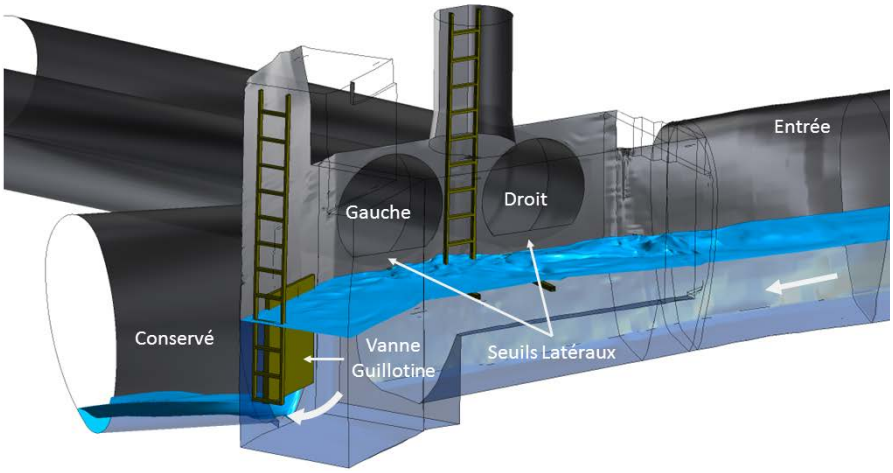


Figure A.3 – Schémas 3D du déversoir d'orage Gambetta d'après le relevé topographique 3D. Chapitre 2 - Section 2.2.2

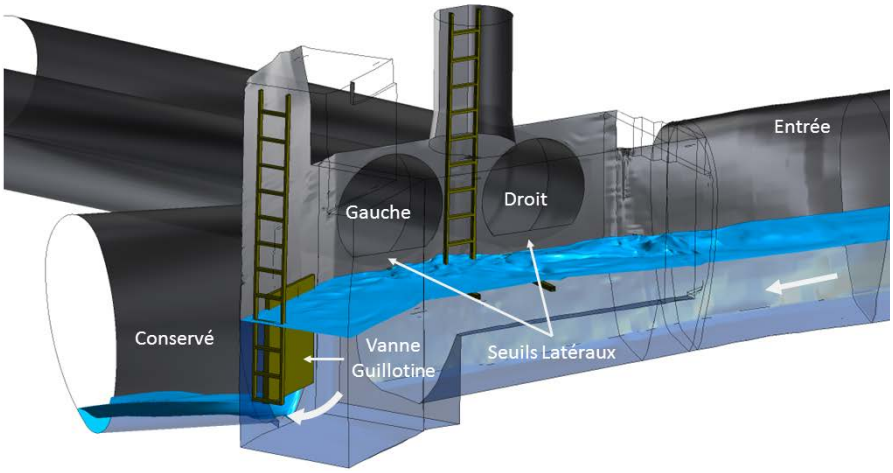
	Nom	DO Gambetta	
	Nom officiel	-	
	Type	Latéral à 2 trous	
Charge organique en temps sec		> 600 Kg de $DBO_5/jour$	
	Milieu récepteur	Rhône	
Hauteur Seuil	Amont	$H_{\text{gauche}} = 1.377\ m$	$H_{\text{droit}} = 1.314\ m$
	Aval	$H_{\text{gauche}} = 1.545\ m$	$H_{\text{droit}} = 1.347\ m$
	Longueur du seuil	$L_{\text{gauche}} = 0.859\ m$	$L_{\text{gauche}} = 0.928\ m$
Condition	Amont	Libre	
	Déversement	Libre	Libre
	Aval	Vanne guillotine	
Conduite	Amont	Ovoïde - 2300 mm x 1300 mm	
	Déversement	DN 1200 mm	DN 1200 mm
	Aval	Circulaire avec banquette	

Tableau A.1 – Les caractéristiques du déversoir d'orage « Gambetta ».

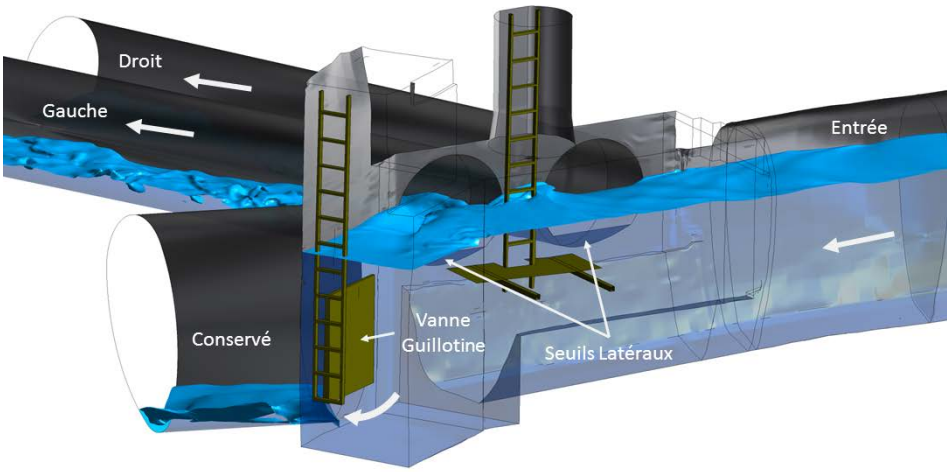
Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2020LYSEI083/these.pdf
© [A. Claro Barreto], [2020], INSA Lyon, tous droits réservés

Référence	Type capteur	Fabricant/Produit	Précision*
Amont			
AM-H	Hauteur (US)	Nivus P-6	$\pm 0,25\%$
AM-V	Vitesse (DP)	Nivus OCR-DEKB52000	$\pm 1,00\%$
DO Gauche			
GG-H	Hauteur (US)	Nivus i-3	$\max[\pm 0,25\%, 6\,mm]$
GG-V	Vitesse (DP)	Nivus OCR-DEKB52000	$\pm 1,00\%$
DO Droit			
GD-H	Hauteur (US)	Nivus P-3	$\max[\pm 0,25\%, 2\,mm]$
GD-V	Vitesse (DP)	Nivus OCR-DEKB52000	$\pm 1,00\%$

Tableau A.2 – Précision des capteurs installés dans le déversoir d'orage «Gambetta». * : la précision donnée par le constructeur ; US : ultrasone ; DP : Doppler. Chapitre 2 - Section 2.2.3



(a) Temps sec - $D_E = 2000\,m^3/h$



(b) Temps pluie - $D_E = 7000\,m^3/h$

Figure A.4 – Schéma 3D du fonctionnement hydraulique du déversoir d'orage «Gambetta» en temps sec (A.4a) et temps de pluie (A.4b). Chapitre 2 - Section 2.2.2.3.

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2020LYSEI083/these.pdf
© [A. Claro Barreto], [2020], INSA Lyon, tous droits réservés

A.1 Fonctionnement hydraulique du déversoir d'orage

Le fonctionnement hydraulique du déversoir d'orage « Gambetta » correspond au débit déversé D_{DO} en temps de pluie. Les débits déversés des conduites de décharge « Gauche » et « Droit » peuvent être calculés de manière expérimentale et numérique, voir le Tableau A.3. Le débit expérimental est obtenu à l'aide des sondes *in situ* de hauteur d'eau ($A = f(H)$) et de vitesse moyenne (U). Le débit numérique est obtenu à l'aide du débit d'entrée D_{E} qui est calculé selon la Section A.1.2.

Le débit déversé D_{DO} de chaque conduite de décharge selon le modèle numérique est représenté dans la Fig.A.5. L'incertitude relative du débit déversé $u(D_{\text{DO}})/D_{\text{DO}}$ des conduites « Gauche » et « Droit » est présenté pour le modèle numérique dans la Fig. A.6 et pour les mesures expérimentales *in situ* dans la Fig. A.7. L'incertitude relative du débit total déversé (diamond violet) pour les mesures expérimentales est présentée dans la Fig.A.7.

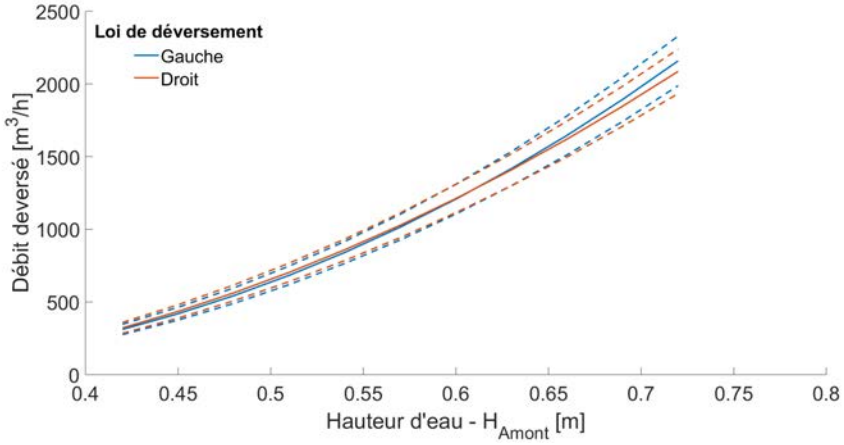


Figure A.5 – Loi du déversement numérique $D = f(H_{\text{Amont}})$ des débits déversés « Gauche » D_{G} et « Droit » D_{D} en fonction de la hauteur d'eau de la conduite amont du « Gambetta » H_{Amont}. Les lignes discontinues représentent l'intervalle de confiance à 95% selon la procédure GUM (voir Section 4.2.5.1).

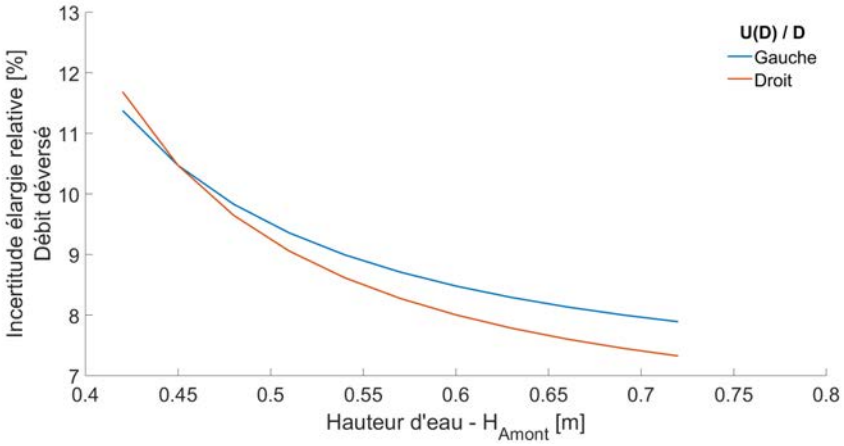


Figure A.6 – Incertitude élargie relative $U(D)/D$ (avec $U(D) = 2 * u_c(D)$) des débits déversés « Gauche » D_{G} et « Droit » D_{D} en fonction de la hauteur d'eau de la conduite amont du « Gambetta » H_{Amont} après application de la procédure GCI (voir Section 4.2.5.1).

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2020LYSEI083/these.pdf
© [A. Claro Barreto], [2020], INSA Lyon, tous droits réservés

	Conduite de déversement	
	Gauche	Droit
Experimental		
Débit - D_{DO}	$U \times A(H)$	
Surface mouillée - $A(H)$	$\frac{DN^2}{4}(\theta - \sin\theta\cos\theta)$	
θ	$\cos^{-1}\left(1 - \frac{2H}{DN}\right)$ avec $DN = 1.200\ m$	
Incertitude - $u(D_{\text{DO}})$	$\sqrt{\left(A(H) \times u(U)\right)^2 + \left(U \times u\left(A(H)\right)\right)^2 + \left(U \times A(H) \times cov\left(U, A(H)\right)\right)}$	
$u(U)$	$0.01 \times U$	
$u(A(H))$	$-\frac{2m^2 H(mH-2)\,u(H)}{\sqrt{1-(mH-1)^2}}$ avec $m = 2/DN$	
$u(H)$	$\sqrt{u^2(H_{\text{sonde}}) + u^2(H_{\text{pente}})}$	
H_{sonde}	$\max(0.0025 \times H, 0.006\ m)$	$\max(0.0025 \times H, 0.002\ m)$
H_{pente}	$\left(\frac{(\tan\alpha\tan\beta)^2}{1-(\tan\alpha\tan\beta)^2}\right)(H_{\text{ref}} - H)$ avec $\alpha = 10°$ et $H_{\text{ref}} = DN$	
Pente du radier - β	1.1%	2.4%
$cov\left(U, A(H)\right)$	0.75	0.76
Numérique		
Débit - D_{DO}	$p_1 * \left(D_{\text{E}} - p_2\right)^{p_3}$	
Débit d'entrée - D_{E}	Section A.1.2	
$p_1\left[\left(m^3/h\right)^{(1-p_3)}\right]$	0.01174	0.03982
$p_2\left[m^3/h\right]$	1000	1189
p_3	1.39	1.25
Incertitude - $u(D_{\text{DO}})$	$\sqrt{\left(\frac{\partial D_{\text{DO}}}{\partial p_1}u(p_1)\right)^2 + \left(\frac{\partial D_{\text{DO}}}{\partial p_2}u(p_2)\right)^2 + \left(\frac{\partial D_{\text{DO}}}{\partial p_3}u(p_3)\right)^2 + \left(\frac{\partial D_{\text{DO}}}{\partial D_{\text{E}}}D_{\text{E}}\right)^2}$	
	$\frac{\partial D_{\text{DO}}}{\partial p_1} = \left(D_{\text{E}} - p_2\right)^{p_3}, \frac{\partial D_{\text{DO}}}{\partial p_2} = -p_1 p_3\left(D_{\text{E}} - p_2\right)^{p_3 - 1}$	
	$\frac{\partial D_{\text{DO}}}{\partial p_3} = a_1(D_{\text{E}} - a_2)^{a_3}\ln(D_{\text{E}} - a_2), \frac{\partial D_{\text{DO}}}{\partial D_{\text{E}}} = a_1 a_3(D_{\text{E}} - a_2)^{a_3 - 1}$	
$u\left(p_1\right)$	$0.00120^2/12$	$0.00329^2/12$
$u\left(p_2\right)$	$29^2/12$	$25^2/12$
$u\left(p_3\right)$	$0.01^2/12$	$0.01^2/12$
$u(D_{\text{E}})$	Section A.1.2	

Tableau A.3 – Les lois de déversement des conduite de décharge « Gauche » et « Droit ».

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2020LYSEI083/these.pdf
© [A. Claro Barreto], [2020], INSA Lyon, tous droits réservés

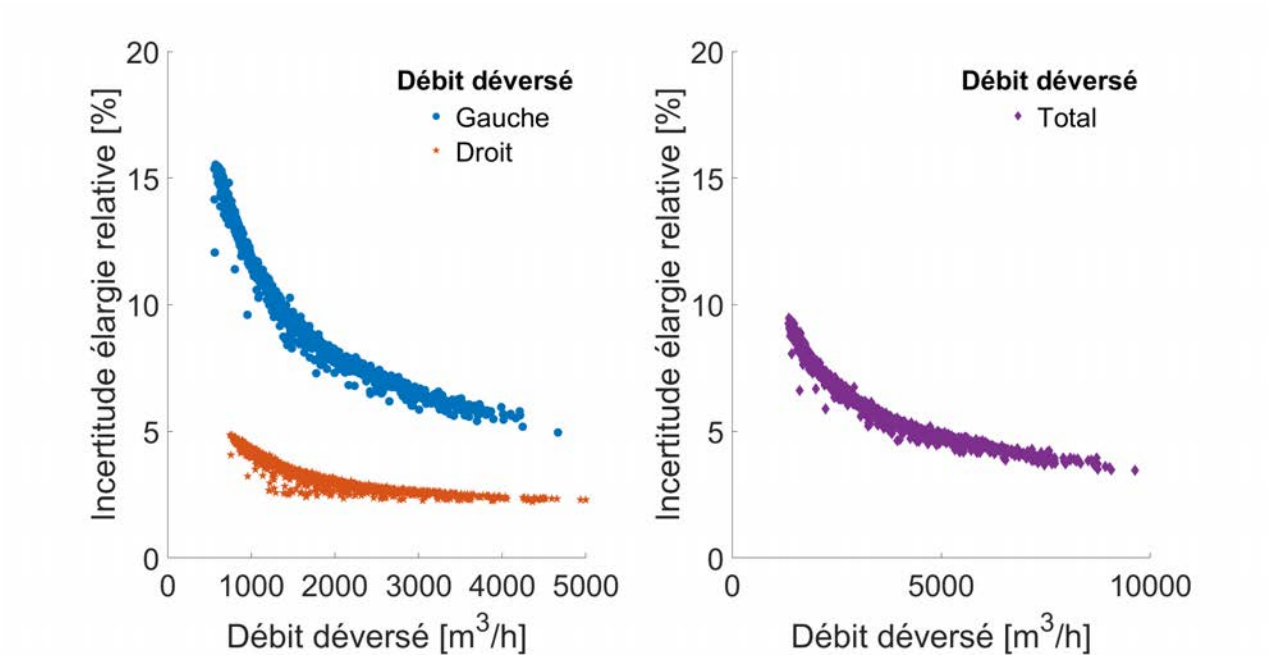


Figure A.7 – L'incertitude élargie relative $U(D_{\text{exp}})/D_{\text{exp}}$ des débits déversés expérimentaux « Gauche » (cercle bleu), « Droit » (étoile rouge) et « Total » (diamond violet), selon la méthode GUM (voir Section 2.2.8.1).

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2020LYSEI083/these.pdf
© [A. Claro Barreto], [2020], INSA Lyon, tous droits réservés

A.1.1 La hauteur d'eau dans la chambre du DO en fonction de la Hauteur d'eau Amont

Pendant la période des mois de Février à Avril 2019, une campagne de mesure *in situ* de la hauteur d'eau dans la chambre de l'ouvrage (H_{chambre}) a permis de déterminer sa variation en fonction de la hauteur d'eau dans le point de mesure à l'amont du DO (H_{Amont}). La localisation spatiale du capteur de hauteur d'eau utilisé est présentée dans la Fig. 2.8. La hauteur d'eau *in situ* H_{chambre} (cube orange - Fig. 2.8) est mesurée par une sonde à ultrasons IJINUS LNU06V03-80. La précision de mesure est égale à $\pm 0.2\%$ H_{chambre} jusqu'à 2.5 m et 5 mm au-delà (IJINUS 2017). H_{chambre} est enregistrée avec un pas de temps de 5 minutes. La Fig. 2.9 présente les résultats expérimentaux de H_{chambre} (cube orange - Fig. 2.8) en fonction de la hauteur d'eau dans la conduite amont du DO H_{Amont}.

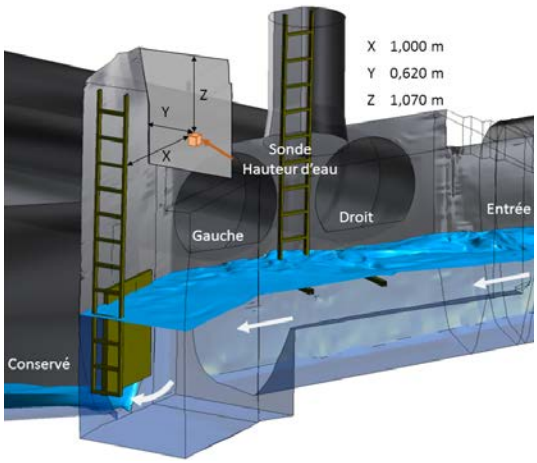


Figure A.8 – Schéma 3D de l'emplacement de la sonde de hauteur d'eau dans la chambre du déversoir d'orage « Gambetta ». Chapitre 2 - Section 4.2.1.2.

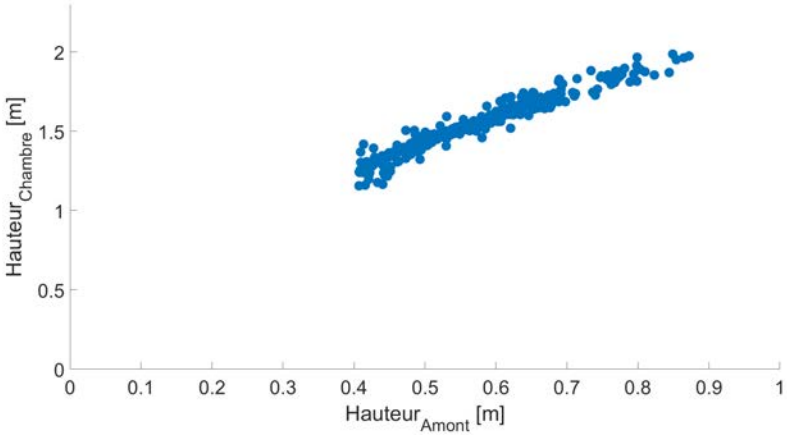


Figure A.9 – La hauteur d'eau dans la chambre du DO (H_{chambre}) en fonction de la hauteur d'eau dans la conduite amont du DO (H_{Amont}) en temps de pluie. Chapitre 2 - Section 4.2.1.2.

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2020LYSEI083/these.pdf
© [A. Claro Barreto], [2020], INSA Lyon, tous droits réservés

A.1.2 Le débit d'entrée selon la hauteur d'eau Amont

Le débit à l'entrée D_{E} du déversoir d'orage (DO) «Gambetta» est calculé à l'aide de la hauteur d'eau de la conduite à l'amont du DO H_{Amont}, selon l'Eq. A.1 (Annexe D).

$$D_{\mathrm{E}} = K_s\, A(h_{\mathrm{Amont}})\, R_h(h_{\mathrm{Amont}})^{2/3}\, I^{1/2}, \tag{A.1}$$

avec $K_s = 70.99 \pm 1.99\ m^{1/3}/s$ le coefficient de rugosité de Strickler, $I = 1.3\%$ la pente géométrique de la conduite, $A(h_{\mathrm{Amont}})$ la surface mouillée et $R_h(h_{\mathrm{Amont}})$ le rayon hydraulique de la section transversale de la conduite à l'amont du DO.

L'incertitude du débit d'entrée $u\,(D_{\mathrm{E}})$ est calculée selon la Section D.2.4.1 de l'Annexe D. L'incertitude élargie relative du débit d'entrée $2 \times u\,(D_{\mathrm{E}})/D_{\mathrm{E}}$ est présentée dans la Fig. A.12.

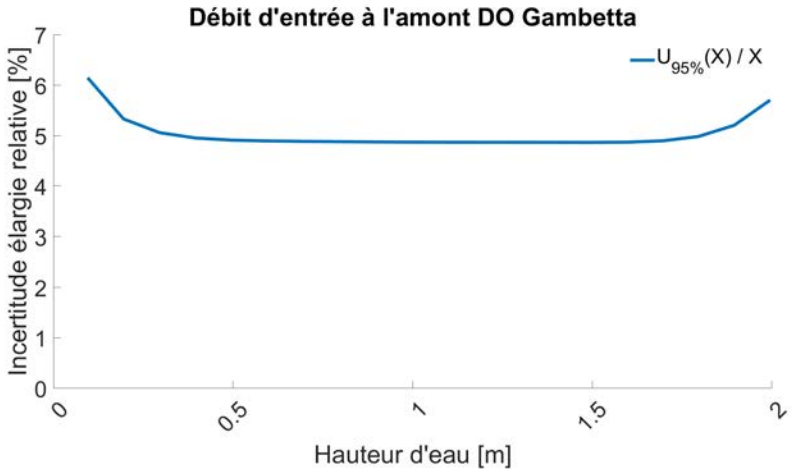


Figure A.10 – L'incertitude élargie relative $\left(U_{95\%}(X)/X\right)$ du débit d'entrée $D_{\mathrm{Amont}} \equiv D_{\mathrm{E}}$ en fonction de la hauteur d'eau au niveau de la section de contrôle H_{Amont}.

La surface mouillée $A(h_{\mathrm{Amont}})$ et le rayon hydraulique $R_h(h_{\mathrm{Amont}})$ sont approximés par un polynôme d'ordre 4 selon les Eqs. A.2-A.3, respectivement. Les incertitudes élargies relatives de la surface mouillée $2 \times u\left(A(h_{\mathrm{Amont}})\right)/A(h_{\mathrm{Amont}})$ et du rayon hydraulique $2 \times u\left(R_h(h_{\mathrm{Amont}})\right)/R_h(h_{\mathrm{Amont}})$ sont présentées dans les Figs.A.12-A.12, respectivement.

$$A_{\mathrm{Amont}} = p_1 * {H_{\mathrm{Amont}}}^4 + p_2 * {H_{\mathrm{Amont}}}^3 + p_3 * {H_{\mathrm{Amont}}}^2 + p_4 * H_{\mathrm{Amont}} \tag{A.2}$$

$$p_1 = 0,04473 \pm 0,02717\, m^{-2} \qquad p_2 = -0,3531 \pm 0,0686\, m^{-1}$$
$$p_3 = 0,9369 \pm 0,0680 \qquad p_4 = 0,2703 \pm 0,0210\, m$$

$$R_{h_{\mathrm{Amont}}} = p_1 * {H_{\mathrm{Amont}}}^4 + p_2 * {H_{\mathrm{Amont}}}^3 + p_3 * {H_{\mathrm{Amont}}}^2 + p_4 * H_{\mathrm{Amont}} \tag{A.3}$$

$$p_1 = -0,07158 \pm 0,0234\, m^{-3} \qquad p_2 = 0,2852 \pm 0,0740\, m^{-2}$$
$$p_3 = -0,4951 \pm 0,0734\, m^{-1} \qquad p_4 = 0,6366 \pm 0,0227$$

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2020LYSEI083/these.pdf
© [A. Claro Barreto], [2020], INSA Lyon, tous droits réservés

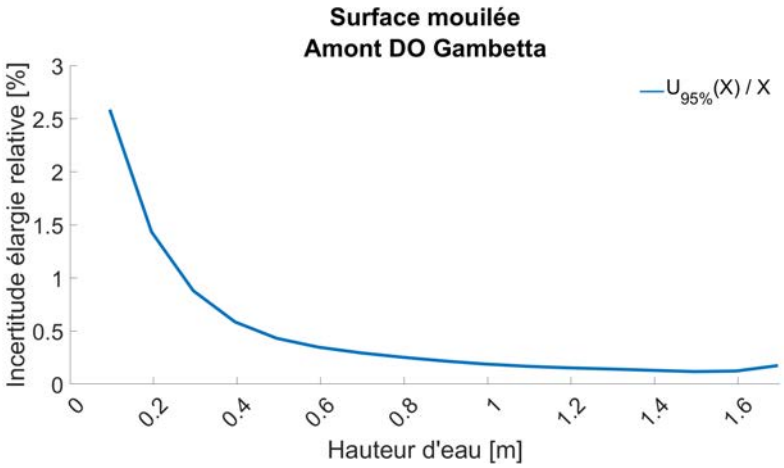


Figure A.11 – L'incertitude élargie relative $\left(U_{95\%}(X)/X\right)$ du débit d'entrée $D_{\text{Amont}} \equiv D_{\text{E}}$ en fonction de la hauteur d'eau au niveau de la section de contrôle H_{Amont}.

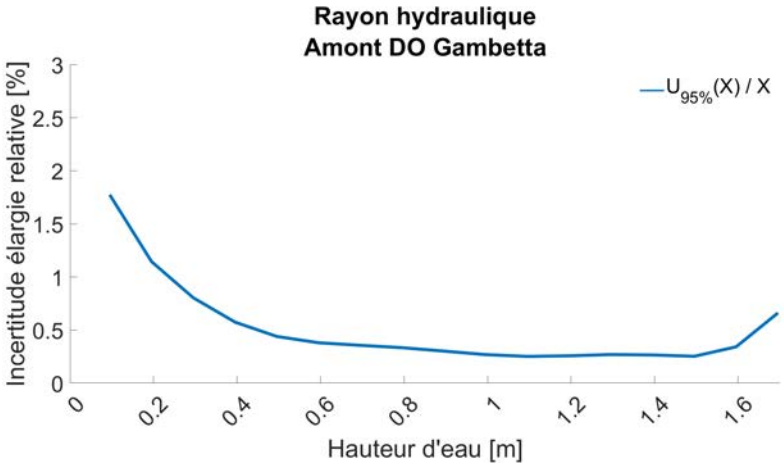
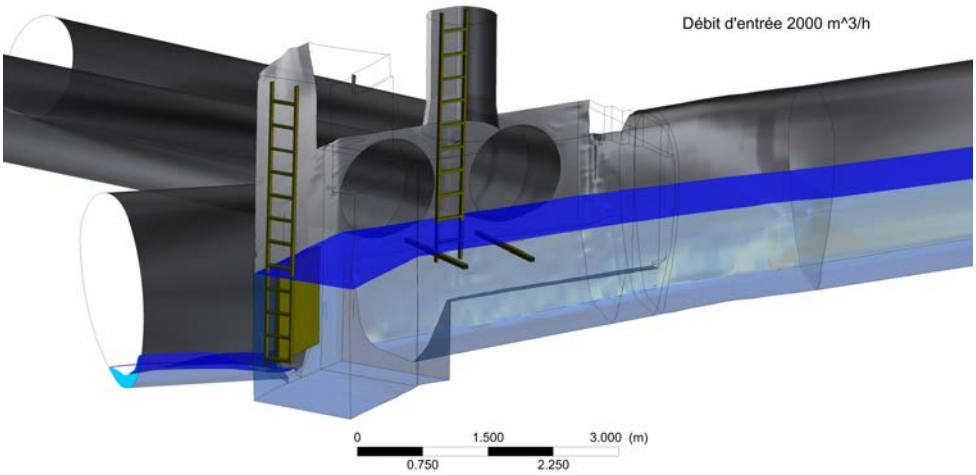


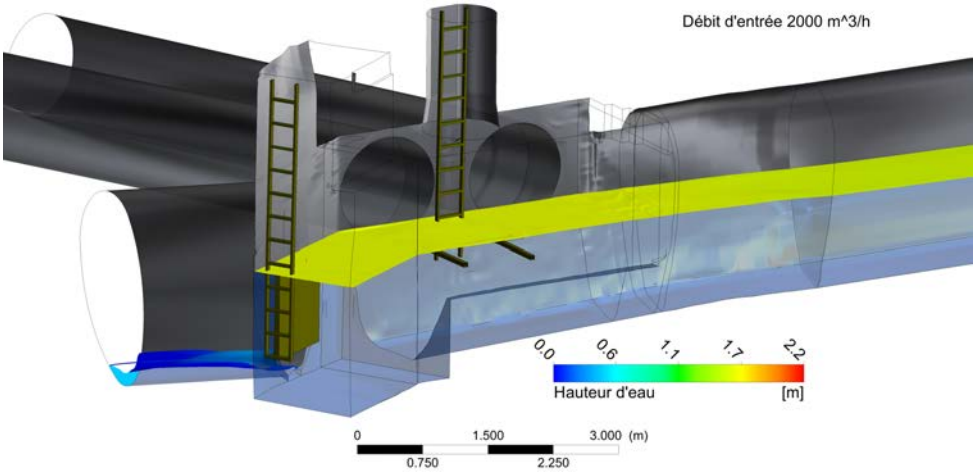
Figure A.12 – L'incertitude élargie relative $\left(U_{95\%}(X)/X\right)$ du débit d'entrée $D_{\text{Amont}} \equiv D_{\text{E}}$ en fonction de la hauteur d'eau au niveau de la section de contrôle H_{Amont}.

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2020LYSEI083/these.pdf
© [A. Claro Barreto], [2020], INSA Lyon, tous droits réservés

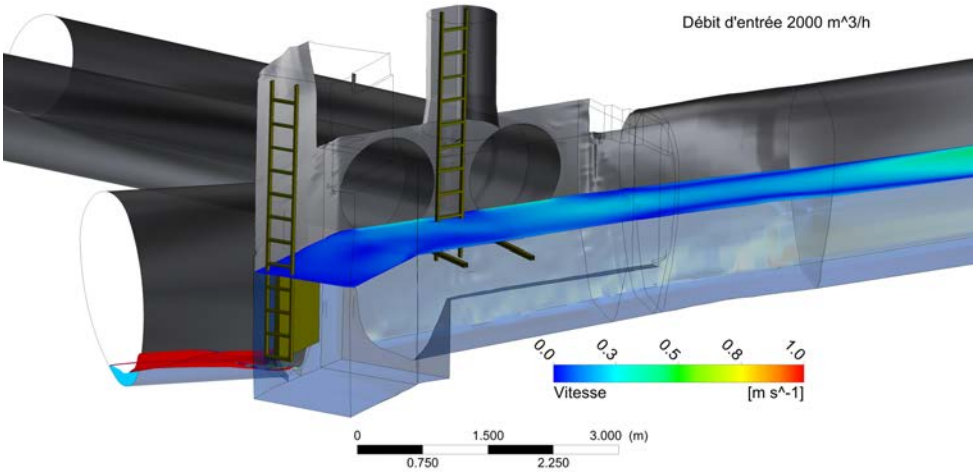
A.2 Fonctionnement hydraulique en temps de pluie



(a)



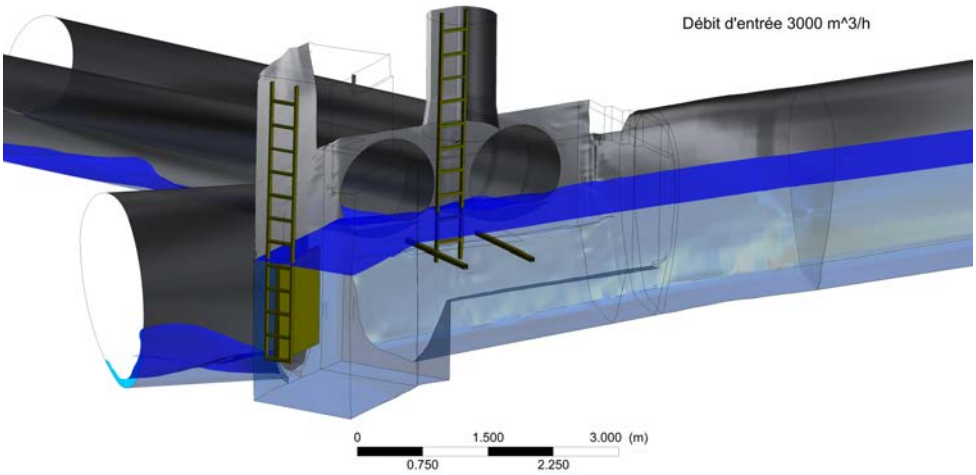
(b)



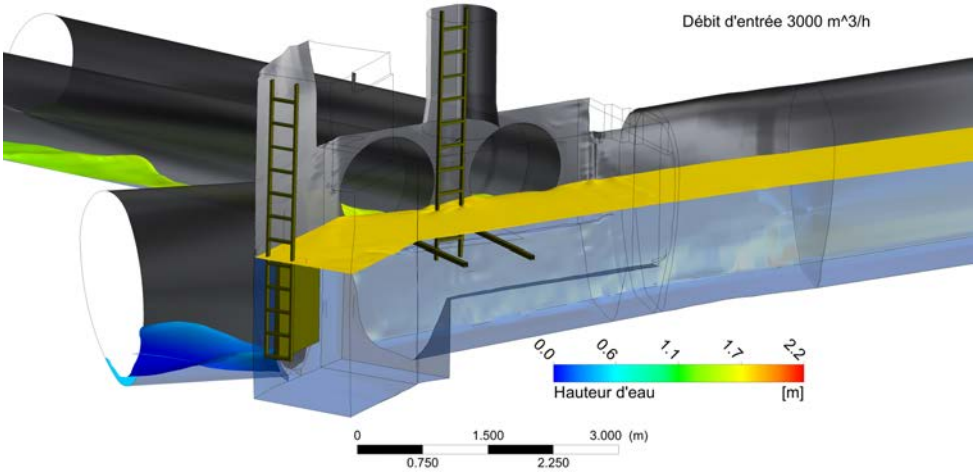
(c)

Figure A.13 – La surface libre (Figs. A.13a-A.13b) et la vitesse au niveau de la surface libre (Fig. A.13c) pour un débit d'entrée $D_E = 2000\ m^3/h$.

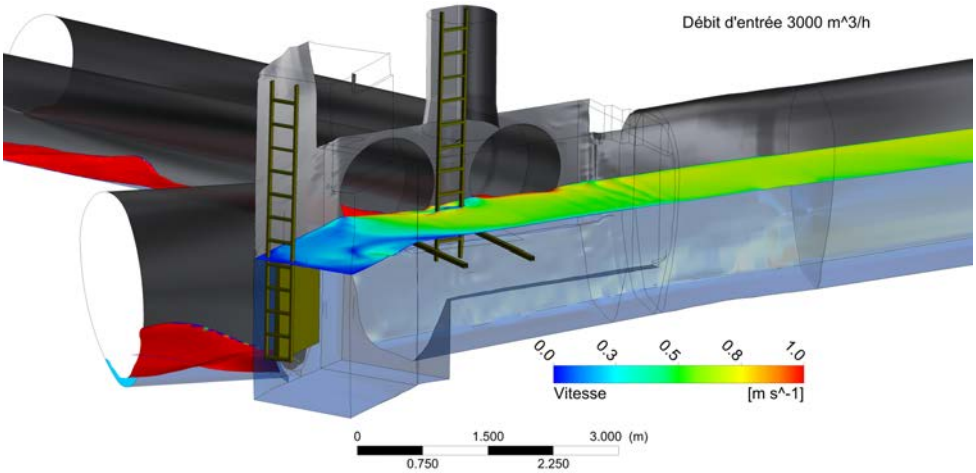
Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2020LYSEI083/these.pdf
© [A. Claro Barreto], [2020], INSA Lyon, tous droits réservés



(a)



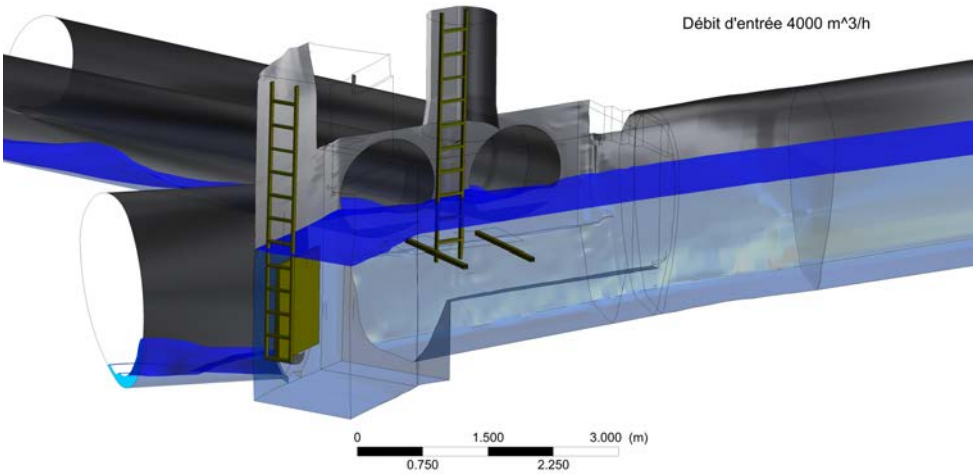
(b)



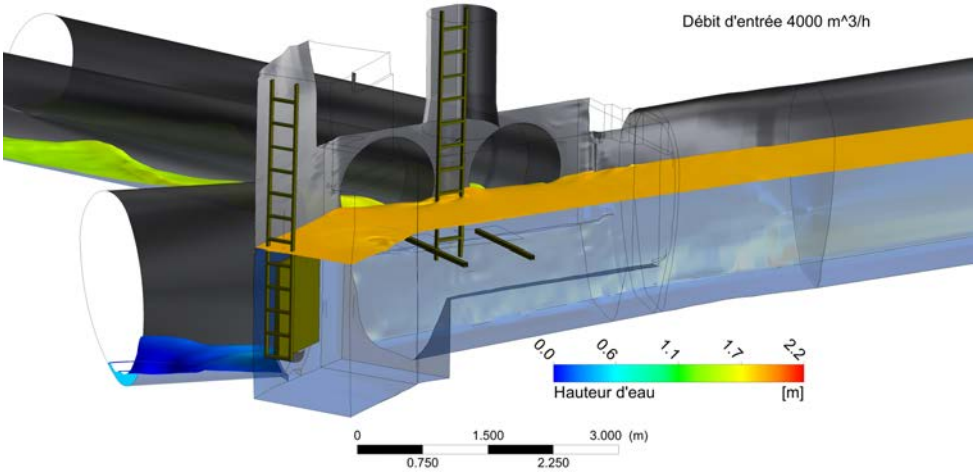
(c)

Figure A.14 – La surface libre (Figs. A.14a-A.14b) et la vitesse au niveau de la surface libre (Fig. A.14c) pour un débit d'entrée $D_E = 3000\ m^3/h$.

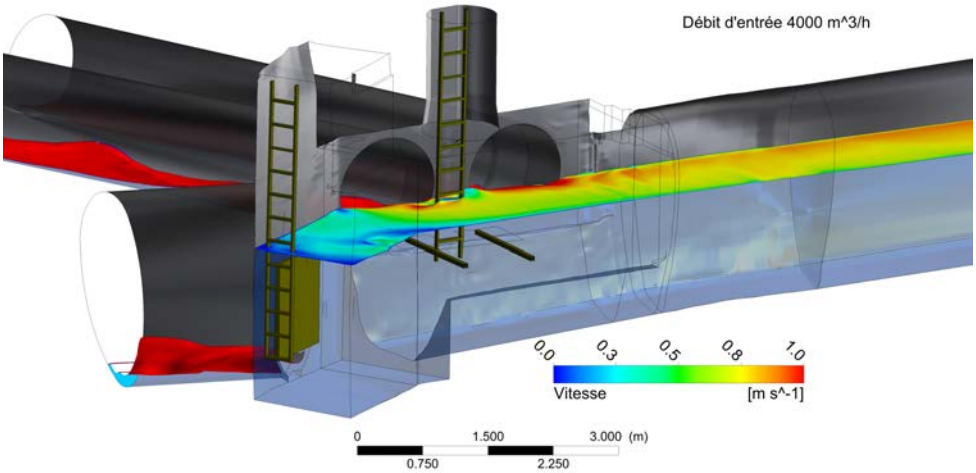
Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2020LYSEI083/these.pdf
© [A. Claro Barreto], [2020], INSA Lyon, tous droits réservés



(a)



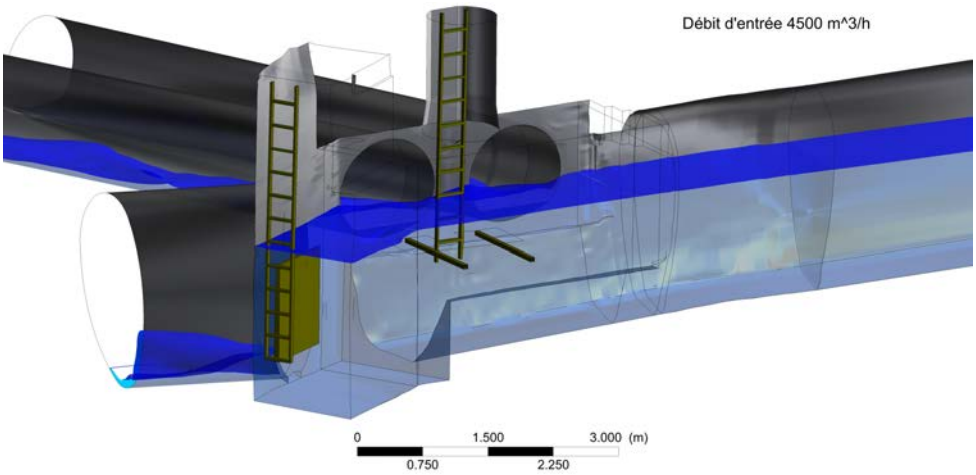
(b)



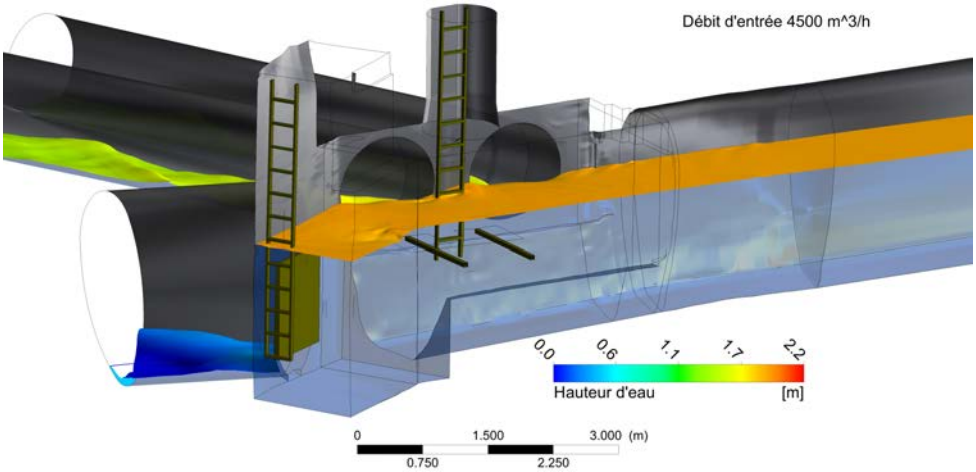
(c)

Figure A.15 – La surface libre (Figs. A.15a-A.15b) et la vitesse au niveau de la surface libre (Fig. A.15c) pour un débit d'entrée $D_E = 4000\ m^3/h$.

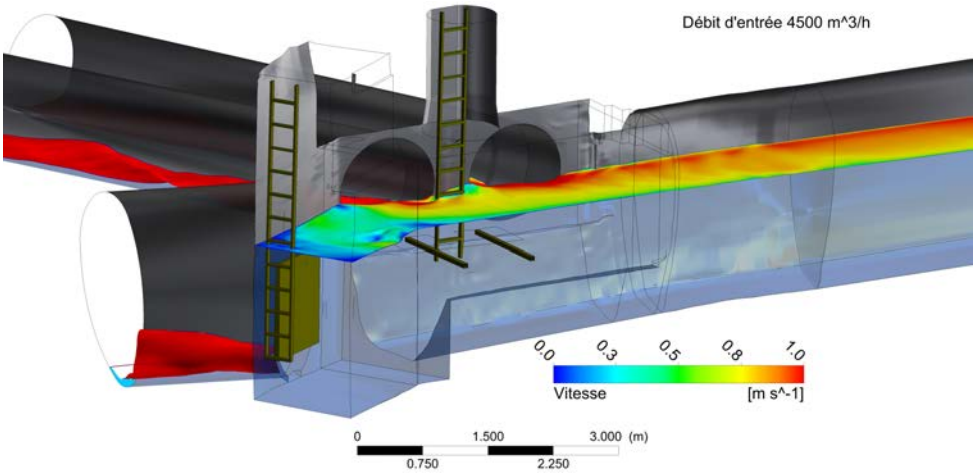
Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2020LYSEI083/these.pdf
© [A. Claro Barreto], [2020], INSA Lyon, tous droits réservés



(a)



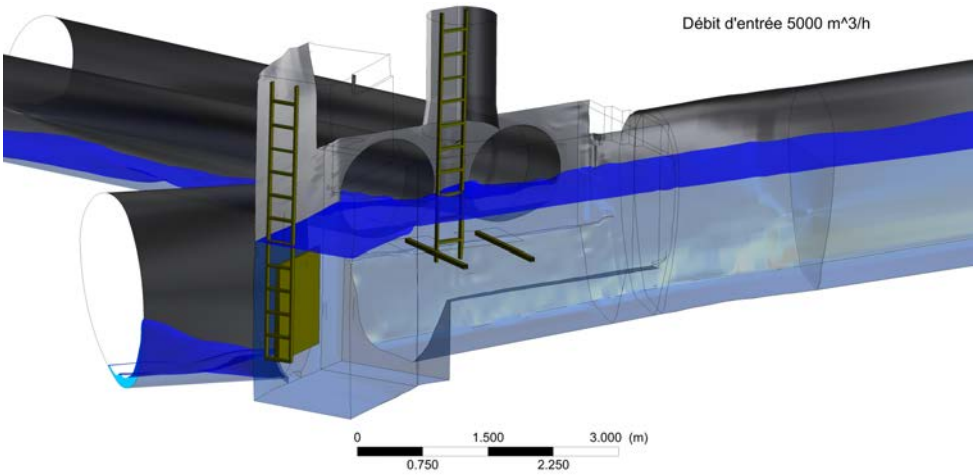
(b)



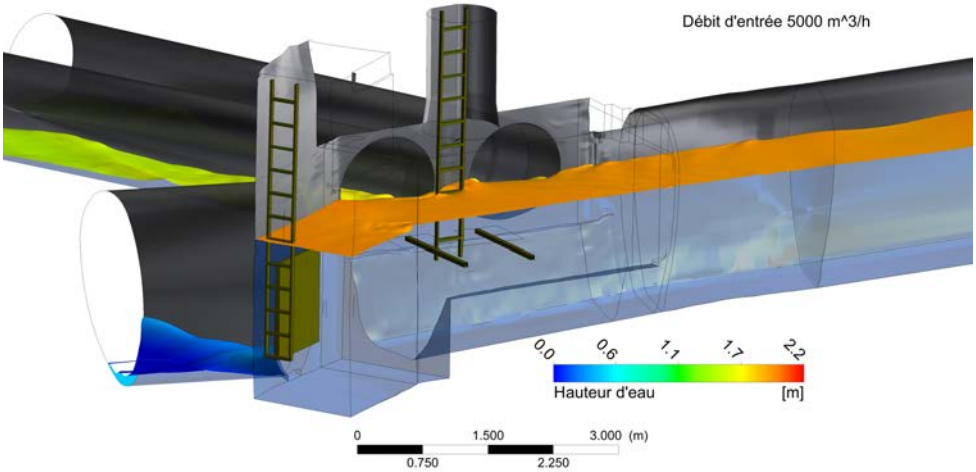
(c)

Figure A.16 – La surface libre (Figs. A.16a-A.16b) et la vitesse au niveau de la surface libre (Fig. A.16c) pour un débit d'entrée $D_E = 4500\ m^3/h$.

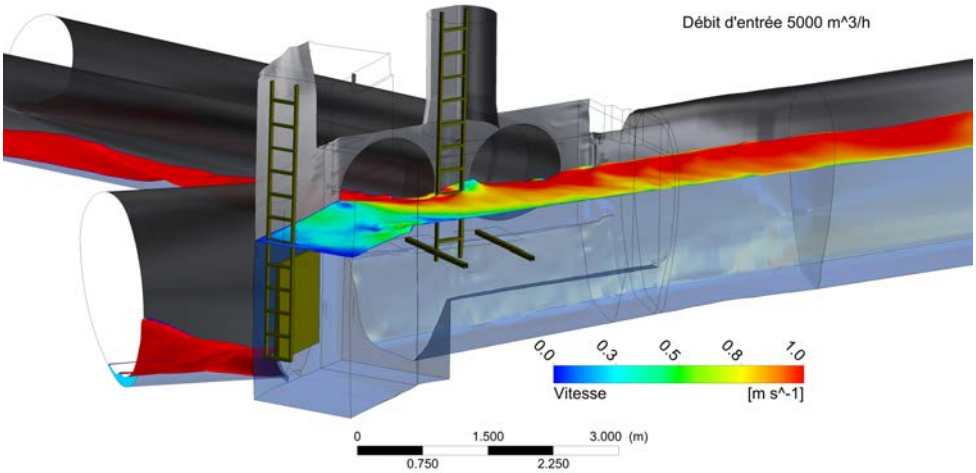
Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2020LYSEI083/these.pdf
© [A. Claro Barreto], [2020], INSA Lyon, tous droits réservés



(a)



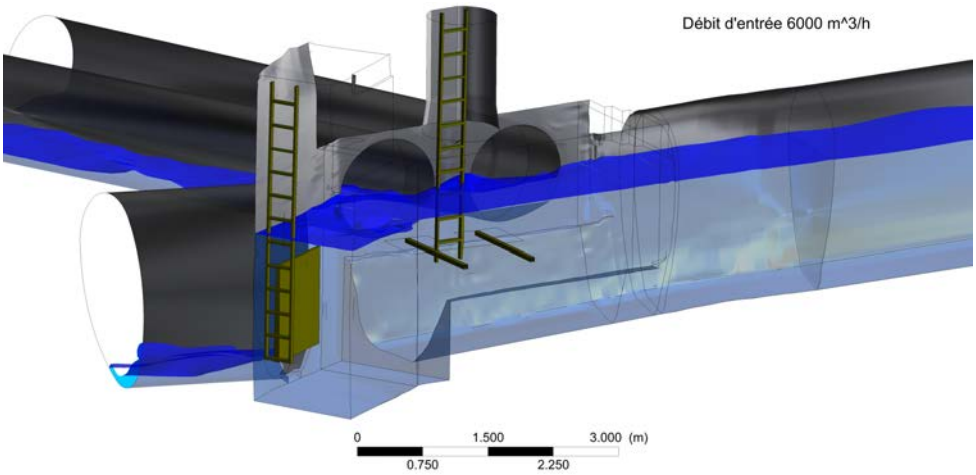
(b)



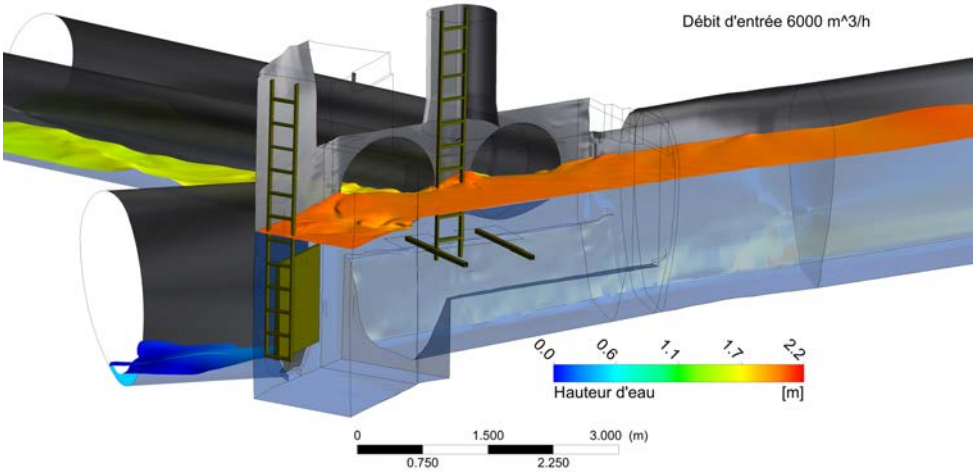
(c)

Figure A.17 – La surface libre (Figs. A.17a-A.17b) et la vitesse au niveau de la surface libre (Fig. A.17c) pour un débit d'entrée $D_E = 5000\ m^3/h$.

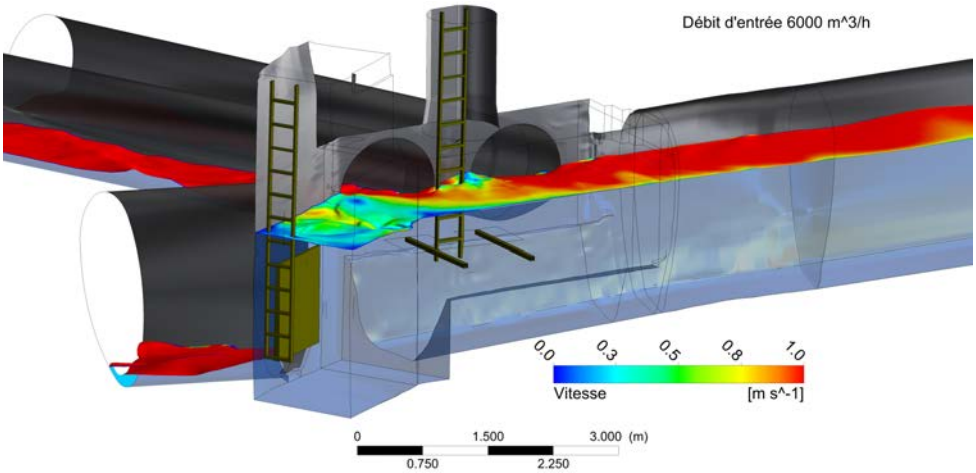
Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2020LYSEI083/these.pdf
© [A. Claro Barreto], [2020], INSA Lyon, tous droits réservés



(a)



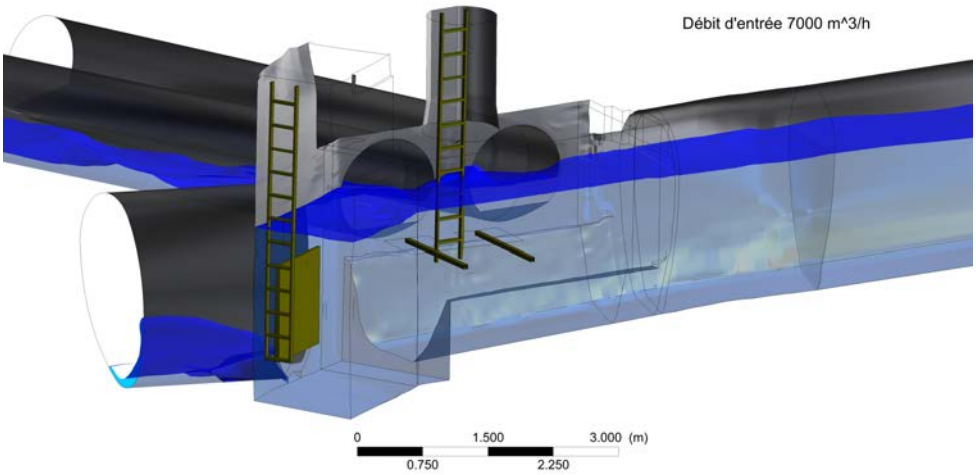
(b)



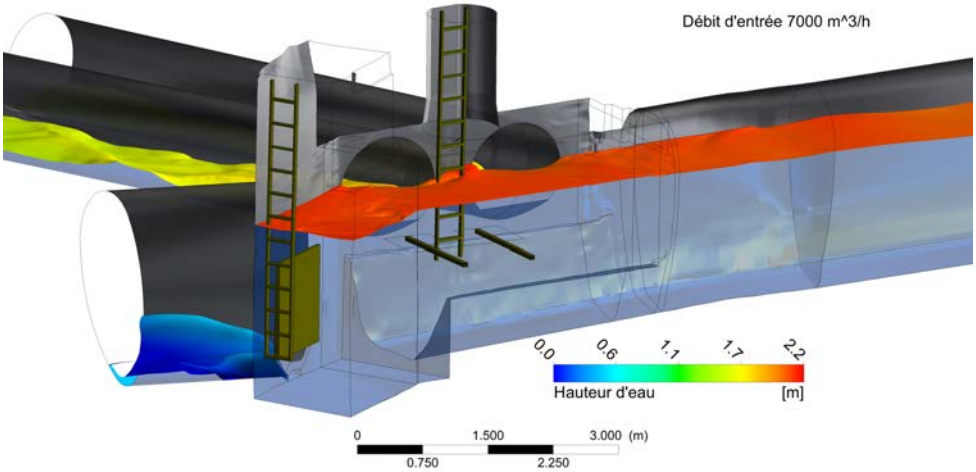
(c)

Figure A.18 – La surface libre (Figs. A.18a-A.18b) et la vitesse au niveau de la surface libre (Fig. A.18c) pour un débit d'entrée $D_E = 6000\ m^3/h$.

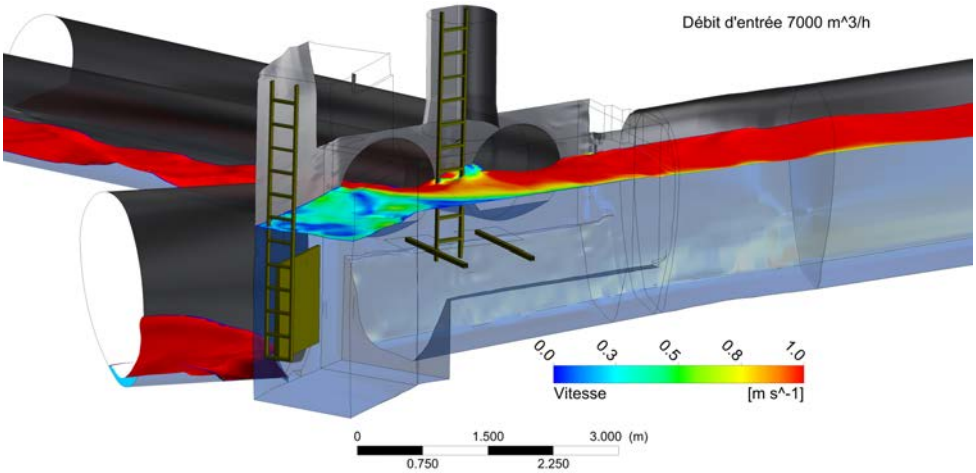
Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2020LYSEI083/these.pdf
© [A. Claro Barreto], [2020], INSA Lyon, tous droits réservés



(a)



(b)



(c)

Figure A.19 – La surface libre (Figs. A.19a-A.19b) et la vitesse au niveau de la surface libre (Fig. A.19c) pour un débit d'entrée $D_E = 7000\ m^3/h$.

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2020LYSEI083/these.pdf
© [A. Claro Barreto], [2020], INSA Lyon, tous droits réservés

Base de données de l'hydrodynamique du déversoir latéral à échelle réduite

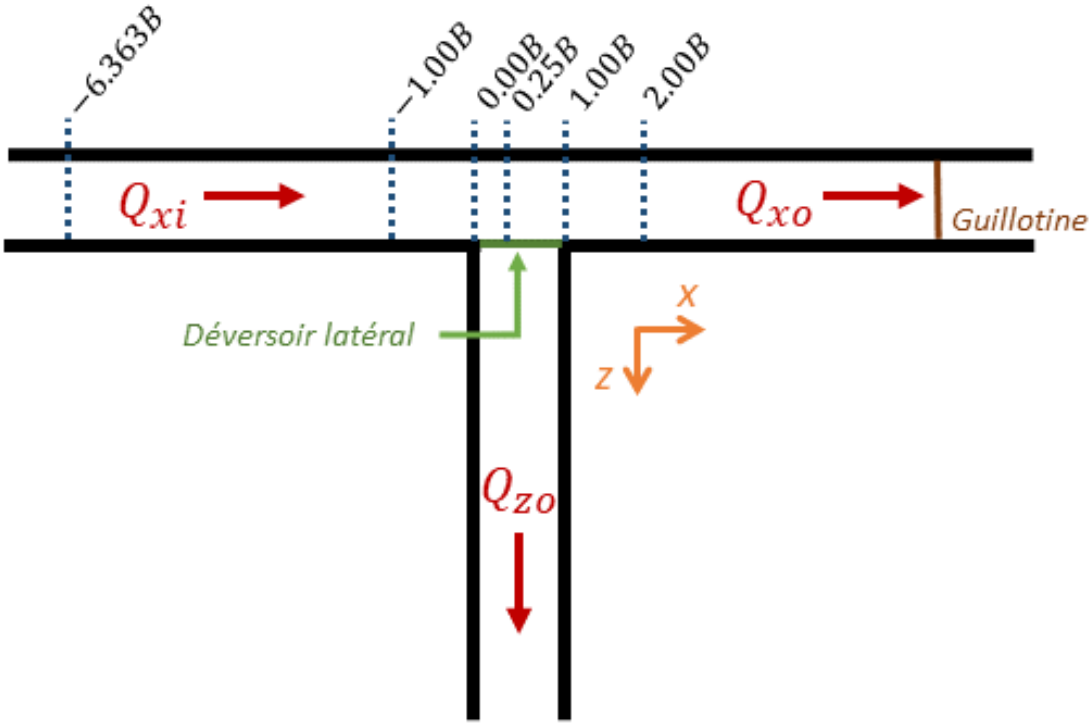


Figure B.1 – Les plans 2D de mesure des vitesses instantanées à l'aide du capteur ADV.

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2020LYSEI083/these.pdf
© [A. Claro Barreto], [2020], INSA Lyon, tous droits réservés

z	y	$\overline{u}$	$\overline{v}$	$\overline{w}$	$\overline{u'u'}$	$\overline{v'v'}$	$\overline{w'w'}$	$\overline{u'v'}$	$\overline{u'w'}$	$\overline{v'w'}$
(m)			(m/s)				$\left(m^2/s^2\right)\times 10^{-3}$			
0.065	0.011	0.223	0.010	-0.019	1.395	0.721	0.333	0.675	0.675	0.333
		[0.001]	[0.011]	[0.011]	[0.046]	[0.037]	[0.041]	[0.053]	[0.106]	[0.041]
0.065	0.016	0.238	0.027	-0.018	1.308	0.640	0.285	0.435	0.435	0.285
		[0.002]	[0.012]	[0.012]	[0.041]	[0.030]	[0.035]	[0.052]	[0.089]	[0.035]
0.065	0.026	0.232	0.040	-0.009	1.176	0.783	0.250	0.506	0.506	0.250
		[0.002]	[0.012]	[0.012]	[0.039]	[0.033]	[0.024]	[0.030]	[0.079]	[0.024]
0.065	0.036	0.209	0.038	0.001	1.122	0.980	0.254	0.507	0.507	0.254
		[0.002]	[0.011]	[0.011]	[0.036]	[0.033]	[0.016]	[0.012]	[0.073]	[0.016]
0.065	0.046	0.201	0.037	0.008	1.116	1.031	0.278	0.495	0.495	0.278
		[0.002]	[0.010]	[0.011]	[0.037]	[0.034]	[0.014]	[0.008]	[0.069]	[0.014]
0.065	0.056	0.177	0.023	0.014	1.027	1.248	0.269	0.201	0.201	0.269
		[0.001]	[0.009]	[0.009]	[0.020]	[0.018]	[0.014]	[0.019]	[0.062]	[0.014]
0.065	0.066	0.190	-0.002	0.015	1.450	1.462	0.273	-0.509	-0.509	0.273
		[0.001]	[0.010]	[0.010]	[0.052]	[0.052]	[0.010]	[0.009]	[0.093]	[0.010]
0.065	0.076	0.251	-0.026	0.009	2.697	1.399	0.430	-1.038	-1.038	0.430
		[0.001]	[0.013]	[0.013]	[0.102]	[0.102]	[0.010]	[0.072]	[0.176]	[0.010]
0.099	0.011	0.344	0.014	0.016	0.320	0.230	0.138	0.019	0.019	0.138
		[0.001]	[0.017]	[0.018]	[0.015]	[0.011]	[0.016]	[0.013]	[0.028]	[0.016]
0.099	0.016	0.347	0.006	0.010	0.217	0.220	0.113	-0.024	-0.024	0.113
		[0.001]	[0.017]	[0.017]	[0.008]	[0.006]	[0.009]	[0.006]	[0.019]	[0.009]
0.099	0.026	0.374	-0.001	0.010	0.331	0.246	0.119	-0.191	-0.191	0.119
		[0.001]	[0.019]	[0.019]	[0.011]	[0.011]	[0.004]	[0.005]	[0.027]	[0.004]
0.099	0.036	0.425	-0.009	0.010	0.323	0.217	0.103	-0.212	-0.212	0.103
		[0.001]	[0.022]	[0.022]	[0.012]	[0.013]	[0.004]	[0.006]	[0.028]	[0.004]
0.099	0.046	0.465	-0.011	0.003	0.272	0.183	0.104	-0.155	-0.155	0.104
		[0.001]	[0.024]	[0.023]	[0.009]	[0.009]	[0.005]	[0.003]	[0.021]	[0.005]
0.099	0.056	0.504	-0.015	-0.009	0.454	0.429	0.143	-0.151	-0.151	0.143
		[0.001]	[0.026]	[0.025]	[0.005]	[0.004]	[0.002]	[0.007]	[0.036]	[0.002]
0.099	0.066	0.497	-0.024	-0.012	1.581	0.751	0.335	0.547	0.547	0.335
		[0.001]	[0.025]	[0.025]	[0.051]	[0.052]	[0.008]	[0.037]	[0.105]	[0.008]
0.099	0.076	0.430	-0.032	-0.008	2.457	1.242	0.700	1.074	1.074	0.700
		[0.002]	[0.022]	[0.022]	[0.098]	[0.097]	[0.014]	[0.063]	[0.178]	[0.014]

Tableau B.1 – Les vitesses et contraintes de Reynolds locales au niveau de la section transversale $x/B = -6.363$.

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2020LYSEI083/these.pdf
© [A. Claro Barreto], [2020], INSA Lyon, tous droits réservés

z	y	$\overline{u}$	$\overline{v}$	$\overline{w}$	$\overline{u'u'}$	$\overline{v'v'}$	$\overline{w'w'}$	$\overline{u'v'}$	$\overline{u'w'}$	$\overline{v'w'}$
(m)			(m/s)				$\left(m^2/s^2\right)\times 10^{-3}$			
0.125	0.011	0.359	0.001	-0.027	0.644	0.340	0.237	-0.259	-0.259	0.237
		[0.001]	[0.018]	[0.018]	[0.024]	[0.023]	[0.013]	[0.021]	[0.042]	[0.013]
0.125	0.016	0.369	-0.006	-0.020	0.602	0.358	0.234	-0.273	-0.273	0.234
		[0.001]	[0.019]	[0.019]	[0.025]	[0.025]	[0.010]	[0.018]	[0.040]	[0.010]
0.125	0.026	0.396	-0.019	-0.012	0.715	0.471	0.291	-0.255	-0.255	0.291
		[0.001]	[0.020]	[0.020]	[0.026]	[0.025]	[0.016]	[0.016]	[0.043]	[0.016]
0.125	0.036	0.412	-0.021	-0.007	1.235	0.505	0.376	-0.177	-0.177	0.376
		[0.001]	[0.021]	[0.020]	[0.039]	[0.021]	[0.036]	[0.051]	[0.071]	[0.036]
0.125	0.046	0.428	-0.020	-0.005	1.795	0.466	0.434	-0.103	-0.103	0.434
		[0.001]	[0.021]	[0.021]	[0.054]	[0.016]	[0.054]	[0.084]	[0.098]	[0.054]
0.125	0.056	0.443	-0.015	-0.000	2.138	0.405	0.511	-0.067	-0.067	0.511
		[0.001]	[0.022]	[0.022]	[0.065]	[0.015]	[0.064]	[0.113]	[0.123]	[0.064]
0.125	0.066	0.457	-0.004	0.001	2.526	0.410	0.601	-0.141	-0.141	0.601
		[0.000]	[0.022]	[0.023]	[0.079]	[0.018]	[0.078]	[0.136]	[0.143]	[0.078]
0.125	0.076	0.487	0.005	-0.001	2.185	0.381	0.485	-0.044	-0.044	0.485
		[0.000]	[0.025]	[0.025]	[0.060]	[0.013]	[0.061]	[0.115]	[0.135]	[0.061]
0.180	0.011	0.228	0.013	0.014	0.331	0.335	0.172	-0.033	-0.033	0.172
		[0.001]	[0.012]	[0.012]	[0.008]	[0.009]	[0.011]	[0.007]	[0.022]	[0.011]
0.180	0.016	0.219	0.009	0.010	0.372	0.350	0.176	-0.078	-0.078	0.176
		[0.001]	[0.011]	[0.011]	[0.009]	[0.008]	[0.011]	[0.006]	[0.021]	[0.011]
0.180	0.026	0.238	0.005	0.005	0.407	0.296	0.161	-0.043	-0.043	0.161
		[0.000]	[0.012]	[0.012]	[0.011]	[0.004]	[0.011]	[0.010]	[0.024]	[0.011]
0.180	0.036	0.254	0.007	0.005	0.483	0.391	0.205	-0.076	-0.076	0.205
		[0.000]	[0.013]	[0.013]	[0.016]	[0.005]	[0.015]	[0.011]	[0.029]	[0.015]
0.180	0.046	0.278	0.011	0.007	0.509	0.418	0.253	-0.172	-0.172	0.253
		[0.001]	[0.014]	[0.014]	[0.020]	[0.012]	[0.016]	[0.011]	[0.033]	[0.016]
0.180	0.056	0.306	0.010	0.007	0.590	0.591	0.350	-0.317	-0.317	0.350
		[0.001]	[0.015]	[0.015]	[0.023]	[0.022]	[0.017]	[0.010]	[0.047]	[0.017]
0.180	0.066	0.368	0.017	0.010	0.593	0.539	0.315	-0.422	-0.422	0.315
		[0.001]	[0.018]	[0.019]	[0.023]	[0.024]	[0.011]	[0.006]	[0.052]	[0.011]
0.180	0.076	0.449	0.024	0.014	0.604	0.346	0.174	-0.298	-0.298	0.174
		[0.001]	[0.023]	[0.022]	[0.018]	[0.015]	[0.012]	[0.011]	[0.048]	[0.012]
0.240	0.011	0.093	-0.011	-0.006	0.744	0.737	0.276	-0.288	-0.288	0.276
		[0.001]	[0.005]	[0.005]	[0.028]	[0.027]	[0.008]	[0.005]	[0.032]	[0.008]
0.240	0.016	0.109	-0.015	-0.000	0.963	0.904	0.382	-0.428	-0.428	0.382
		[0.001]	[0.005]	[0.006]	[0.040]	[0.039]	[0.009]	[0.006]	[0.045]	[0.009]
0.240	0.026	0.139	-0.015	0.005	1.177	0.975	0.472	-0.481	-0.481	0.472
		[0.001]	[0.007]	[0.007]	[0.041]	[0.041]	[0.004]	[0.007]	[0.054]	[0.004]
0.240	0.036	0.166	-0.011	0.007	1.331	0.954	0.553	-0.454	-0.454	0.553
		[0.001]	[0.008]	[0.009]	[0.043]	[0.040]	[0.018]	[0.019]	[0.061]	[0.018]
0.240	0.046	0.196	-0.010	0.006	1.455	1.075	0.572	-0.415	-0.415	0.572
		[0.001]	[0.010]	[0.010]	[0.042]	[0.035]	[0.030]	[0.025]	[0.077]	[0.030]
0.240	0.056	0.238	-0.010	0.010	1.532	1.199	0.620	-0.410	-0.410	0.620
		[0.001]	[0.012]	[0.012]	[0.049]	[0.032]	[0.045]	[0.034]	[0.095]	[0.045]
0.240	0.066	0.269	-0.006	0.012	1.531	1.122	0.560	-0.417	-0.417	0.560
		[0.001]	[0.014]	[0.013]	[0.048]	[0.033]	[0.042]	[0.039]	[0.099]	[0.042]
0.240	0.076	0.298	-0.003	0.009	1.101	0.906	0.403	-0.185	-0.185	0.403
		[0.001]	[0.015]	[0.015]	[0.033]	[0.019]	[0.035]	[0.028]	[0.079]	[0.035]

Tableau B.2 – Les vitesses et contraintes de Reynolds locales au niveau de la section transversale $x/B = -6.363$. (Continuation)

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2020LYSEI083/these.pdf
© [A. Claro Barreto], [2020], INSA Lyon, tous droits réservés

z	y	$\overline{u}$	$\overline{v}$	$\overline{w}$	$\overline{u'u'}$	$\overline{v'v'}$	$\overline{w'w'}$	$\overline{u'v'}$	$\overline{u'w'}$	$\overline{v'w'}$
(m)			(m/s)				$\left(m^2/s^2\right)\times 10^{-3}$			
0.060	0.011	0.280	-0.008	-0.004	0.782	0.491	0.298	-0.015	-0.015	0.298
		[0.001]	[0.014]	[0.014]	[0.016]	[0.020]	[0.016]	[0.024]	[0.059]	[0.016]
0.060	0.011	0.302	-0.002	-0.006	0.710	0.367	0.265	-0.101	-0.101	0.265
		[0.000]	[0.016]	[0.015]	[0.016]	[0.017]	[0.013]	[0.026]	[0.047]	[0.013]
0.060	0.016	0.323	-0.000	-0.007	0.000	0.445	0.240	-0.000	-0.000	0.240
		[0.000]	[0.016]	[0.015]	[0.001]	[0.010]	[0.010]	[0.044]	[0.015]	[0.010]
0.060	0.016	0.330	-0.002	-0.007	0.879	0.452	0.237	0.133	0.133	0.237
		[0.000]	[0.016]	[0.017]	[0.021]	[0.010]	[0.021]	[0.030]	[0.058]	[0.021]
0.060	0.026	0.328	-0.002	-0.003	1.076	0.591	0.267	0.334	0.334	0.267
		[0.000]	[0.017]	[0.017]	[0.033]	[0.021]	[0.030]	[0.036]	[0.072]	[0.030]
0.060	0.026	0.329	0.014	-0.000	1.087	0.788	0.258	0.311	0.311	0.258
		[0.001]	[0.017]	[0.017]	[0.033]	[0.026]	[0.025]	[0.021]	[0.073]	[0.025]
0.060	0.036	0.318	0.004	0.004	1.154	0.760	0.270	0.297	0.297	0.270
		[0.000]	[0.016]	[0.016]	[0.030]	[0.020]	[0.025]	[0.027]	[0.075]	[0.025]
0.060	0.036	0.318	-0.004	0.003	1.019	0.821	0.258	0.121	0.121	0.258
		[0.000]	[0.016]	[0.016]	[0.021]	[0.005]	[0.020]	[0.012]	[0.062]	[0.020]
0.100	0.046	0.363	0.019	0.020	1.225	0.822	0.593	-0.661	-0.661	0.593
		[0.001]	[0.018]	[0.019]	[0.030]	[0.051]	[0.039]	[0.034]	[0.102]	[0.039]
0.100	0.046	0.389	0.013	0.020	1.017	0.630	0.478	-0.598	-0.598	0.478
		[0.001]	[0.019]	[0.020]	[0.030]	[0.040]	[0.029]	[0.028]	[0.073]	[0.029]
0.100	0.056	0.424	-0.003	0.016	0.658	0.356	0.331	-0.162	-0.162	0.331
		[0.001]	[0.022]	[0.022]	[0.010]	[0.012]	[0.007]	[0.016]	[0.032]	[0.007]
0.100	0.056	0.432	-0.007	0.012	0.604	0.372	0.339	-0.074	-0.074	0.339
		[0.001]	[0.023]	[0.022]	[0.008]	[0.007]	[0.008]	[0.013]	[0.028]	[0.008]
0.100	0.066	0.437	-0.008	0.012	0.674	0.416	0.411	-0.066	-0.066	0.411
		[0.001]	[0.022]	[0.023]	[0.009]	[0.005]	[0.010]	[0.012]	[0.029]	[0.010]
0.100	0.066	0.440	-0.008	0.012	0.721	0.423	0.460	-0.024	-0.024	0.460
		[0.001]	[0.022]	[0.022]	[0.015]	[0.003]	[0.015]	[0.014]	[0.029]	[0.015]
0.100	0.076	0.443	-0.013	0.012	0.709	0.421	0.445	-0.005	-0.005	0.445
		[0.001]	[0.022]	[0.022]	[0.013]	[0.002]	[0.013]	[0.014]	[0.027]	[0.013]
0.100	0.076	0.443	-0.011	0.014	0.733	0.374	0.485	-0.025	-0.025	0.485
		[0.001]	[0.023]	[0.023]	[0.003]	[0.002]	[0.003]	[0.018]	[0.027]	[0.003]
0.110	0.011	0.346	-0.005	-0.012	0.933	0.483	0.482	-0.147	-0.147	0.482
		[0.001]	[0.018]	[0.017]	[0.026]	[0.026]	[0.020]	[0.030]	[0.056]	[0.020]
0.110	0.016	0.367	-0.005	-0.013	0.839	0.447	0.430	-0.150	-0.150	0.430
		[0.001]	[0.019]	[0.019]	[0.025]	[0.021]	[0.019]	[0.026]	[0.046]	[0.019]
0.110	0.026	0.385	-0.003	-0.015	0.810	0.493	0.426	-0.048	-0.048	0.426
		[0.001]	[0.019]	[0.020]	[0.023]	[0.013]	[0.023]	[0.020]	[0.040]	[0.023]
0.110	0.036	0.393	-0.003	-0.014	0.785	0.512	0.411	0.127	0.127	0.411
		[0.001]	[0.020]	[0.019]	[0.025]	[0.011]	[0.026]	[0.019]	[0.036]	[0.026]
0.110	0.046	0.393	-0.003	-0.010	0.855	0.640	0.442	0.298	0.298	0.442
		[0.001]	[0.020]	[0.020]	[0.034]	[0.023]	[0.030]	[0.019]	[0.042]	[0.030]
0.110	0.056	0.387	0.007	-0.005	0.804	0.678	0.460	0.178	0.178	0.460
		[0.001]	[0.020]	[0.020]	[0.027]	[0.018]	[0.022]	[0.012]	[0.038]	[0.022]
0.110	0.066	0.379	0.001	-0.002	0.903	0.724	0.479	0.242	0.242	0.479
		[0.000]	[0.019]	[0.019]	[0.032]	[0.019]	[0.026]	[0.016]	[0.043]	[0.026]
0.110	0.076	0.371	-0.003	0.001	0.920	0.654	0.425	0.224	0.224	0.425
		[0.000]	[0.019]	[0.018]	[0.028]	[0.014]	[0.024]	[0.019]	[0.046]	[0.024]
0.125	0.011	0.375	0.007	-0.015	0.347	0.002	0.152	0.008	0.008	0.152
		[0.001]	[0.019]	[0.018]	[0.004]	[0.001]	[0.003]	[0.030]	[0.016]	[0.003]

Tableau B.3 – Les vitesses et contraintes de Reynolds locales au niveau de la section transversale $x/B = -1.00$.

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2020LYSEI083/these.pdf
© [A. Claro Barreto], [2020], INSA Lyon, tous droits réservés

z	y	$\overline{u}$	$\overline{v}$	$\overline{w}$	$\overline{u'u'}$	$\overline{v'v'}$	$\overline{w'w'}$	$\overline{u'v'}$	$\overline{u'w'}$	$\overline{v'w'}$
(m)			(m/s)				$\left(m^2/s^2\right) \times 10^{-3}$			
0.180	0.016	0.269	0.016	0.023	1.774	0.796	0.560	-0.330	-0.330	0.560
		[0.001]	[0.014]	[0.014]	[0.061]	[0.023]	[0.058]	[0.070]	[0.109]	[0.058]
0.180	0.026	0.284	0.007	0.020	1.762	0.694	0.635	-0.112	-0.112	0.635
		[0.001]	[0.014]	[0.014]	[0.062]	[0.015]	[0.065]	[0.073]	[0.092]	[0.065]
0.180	0.036	0.294	0.010	0.017	1.701	0.668	0.620	-0.033	-0.033	0.620
		[0.001]	[0.015]	[0.015]	[0.063]	[0.012]	[0.064]	[0.070]	[0.089]	[0.064]
0.180	0.046	0.297	0.014	0.012	1.619	0.793	0.644	0.046	0.046	0.644
		[0.001]	[0.015]	[0.015]	[0.057]	[0.015]	[0.058]	[0.058]	[0.077]	[0.058]
0.180	0.056	0.297	0.013	0.007	1.420	0.876	0.624	0.087	0.087	0.624
		[0.001]	[0.015]	[0.015]	[0.048]	[0.024]	[0.049]	[0.042]	[0.066]	[0.049]
0.180	0.066	0.296	-0.002	0.005	1.372	1.089	0.684	0.169	0.169	0.684
		[0.000]	[0.015]	[0.015]	[0.045]	[0.043]	[0.058]	[0.035]	[0.066]	[0.058]
0.180	0.076	0.300	0.003	0.004	1.158	0.932	0.603	-0.092	-0.092	0.603
		[0.000]	[0.015]	[0.015]	[0.028]	[0.024]	[0.037]	[0.025]	[0.053]	[0.037]
0.180	0.011	0.313	0.000	0.007	1.252	0.903	0.590	-0.243	-0.243	0.590
		[0.000]	[0.016]	[0.015]	[0.039]	[0.027]	[0.031]	[0.018]	[0.055]	[0.031]
0.240	0.011	0.237	0.014	0.003	0.522	0.652	0.180	-0.259	-0.259	0.180
		[0.001]	[0.012]	[0.012]	[0.016]	[0.017]	[0.010]	[0.016]	[0.034]	[0.010]
0.240	0.016	0.246	0.004	0.000	0.526	0.481	0.169	-0.176	-0.176	0.169
		[0.000]	[0.012]	[0.012]	[0.013]	[0.011]	[0.010]	[0.006]	[0.032]	[0.010]
0.240	0.026	0.263	-0.007	0.000	0.650	0.497	0.188	-0.199	-0.199	0.188
		[0.000]	[0.013]	[0.013]	[0.015]	[0.015]	[0.009]	[0.008]	[0.041]	[0.009]
0.240	0.036	0.276	-0.013	0.001	0.673	0.411	0.197	-0.178	-0.178	0.197
		[0.001]	[0.014]	[0.014]	[0.016]	[0.016]	[0.008]	[0.018]	[0.041]	[0.008]
0.240	0.046	0.293	-0.008	0.002	0.659	0.495	0.202	-0.217	-0.217	0.202
		[0.000]	[0.015]	[0.015]	[0.015]	[0.016]	[0.007]	[0.008]	[0.040]	[0.007]
0.240	0.056	0.296	-0.018	0.004	0.710	0.470	0.208	-0.078	-0.078	0.208
		[0.001]	[0.015]	[0.015]	[0.010]	[0.013]	[0.010]	[0.016]	[0.045]	[0.010]
0.240	0.066	0.307	-0.013	0.007	0.713	0.431	0.191	-0.162	-0.162	0.191
		[0.001]	[0.016]	[0.016]	[0.013]	[0.013]	[0.007]	[0.017]	[0.043]	[0.007]
0.240	0.076	0.315	-0.012	0.009	0.676	0.392	0.173	-0.150	-0.150	0.173
		[0.001]	[0.016]	[0.016]	[0.011]	[0.011]	[0.004]	[0.016]	[0.042]	[0.004]

Tableau B.4 – Les vitesses et contraintes de Reynolds locales au niveau de la section transversale $x/B = -1.00$. (Continuation)

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2020LYSEI083/these.pdf
© [A. Claro Barreto], [2020], INSA Lyon, tous droits réservés

z	y	$\overline{u}$	$\overline{v}$	$\overline{w}$	$\overline{u'u'}$	$\overline{v'v'}$	$\overline{w'w'}$	$\overline{u'v'}$	$\overline{u'w'}$	$\overline{v'w'}$
(m)			(m/s)				$\left(m^2/s^2\right)\times 10^{-3}$			
0.060	0.011	0.320	0.006	-0.005	1.108	0.638	0.220	0.312	0.312	0.220
		[0.000]	[0.016]	[0.016]	[0.032]	[0.022]	[0.024]	[0.035]	[0.073]	[0.024]
0.060	0.016	0.314	0.004	-0.003	1.077	0.703	0.217	0.276	0.276	0.217
		[0.000]	[0.016]	[0.016]	[0.028]	[0.019]	[0.021]	[0.030]	[0.067]	[0.021]
0.060	0.026	0.312	0.003	-0.003	1.030	0.676	0.224	0.317	0.317	0.224
		[0.000]	[0.015]	[0.016]	[0.028]	[0.021]	[0.019]	[0.026]	[0.065]	[0.019]
0.060	0.036	0.304	0.002	-0.002	0.977	0.682	0.220	0.292	0.292	0.220
		[0.000]	[0.015]	[0.016]	[0.025]	[0.019]	[0.018]	[0.023]	[0.064]	[0.018]
0.060	0.046	0.287	0.061	-0.002	0.857	3.146	0.208	0.787	0.787	0.208
		[0.003]	[0.015]	[0.015]	[0.065]	[0.070]	[0.037]	[0.605]	[0.072]	[0.037]
0.085	0.056	0.317	-0.005	-0.007	1.122	0.521	0.460	-0.072	-0.072	0.460
		[0.001]	[0.016]	[0.016]	[0.029]	[0.027]	[0.031]	[0.042]	[0.068]	[0.031]
0.085	0.056	0.341	-0.002	-0.010	0.932	0.473	0.408	-0.200	-0.200	0.408
		[0.001]	[0.017]	[0.017]	[0.027]	[0.026]	[0.020]	[0.033]	[0.051]	[0.020]
0.085	0.066	0.361	-0.001	-0.011	0.772	0.470	0.359	-0.110	-0.110	0.359
		[0.001]	[0.018]	[0.019]	[0.020]	[0.017]	[0.017]	[0.021]	[0.041]	[0.017]
0.085	0.066	0.370	0.003	-0.012	0.640	0.484	0.329	0.035	0.035	0.329
		[0.001]	[0.019]	[0.018]	[0.015]	[0.011]	[0.018]	[0.015]	[0.033]	[0.018]
0.085	0.071	0.374	0.008	-0.010	0.659	0.587	0.321	0.116	0.116	0.321
		[0.001]	[0.019]	[0.018]	[0.018]	[0.011]	[0.016]	[0.009]	[0.032]	[0.016]
0.085	0.071	0.365	0.005	-0.007	0.789	0.573	0.357	0.245	0.245	0.357
		[0.001]	[0.018]	[0.018]	[0.024]	[0.020]	[0.020]	[0.018]	[0.046]	[0.020]
0.085	0.076	0.360	0.000	-0.004	0.773	0.573	0.337	0.259	0.259	0.337
		[0.000]	[0.018]	[0.018]	[0.024]	[0.019]	[0.014]	[0.016]	[0.040]	[0.014]
0.085	0.076	0.350	-0.001	0.001	0.763	0.548	0.337	0.237	0.237	0.337
		[0.000]	[0.017]	[0.017]	[0.019]	[0.017]	[0.009]	[0.015]	[0.038]	[0.009]
0.085	0.086	0.337	0.038	0.007	0.744	2.536	0.326	0.748	0.748	0.326
		[0.002]	[0.017]	[0.017]	[0.063]	[0.067]	[0.025]	[0.808]	[0.059]	[0.025]
0.126	0.086	0.344	-0.006	-0.007	1.057	0.573	0.515	-0.291	-0.291	0.515
		[0.001]	[0.018]	[0.018]	[0.034]	[0.033]	[0.023]	[0.040]	[0.062]	[0.023]
0.126	0.011	0.365	-0.004	-0.009	0.984	0.492	0.446	-0.230	-0.230	0.446
		[0.001]	[0.019]	[0.018]	[0.029]	[0.028]	[0.018]	[0.035]	[0.050]	[0.018]
0.126	0.016	0.384	-0.004	-0.010	0.736	0.449	0.385	-0.133	-0.133	0.385
		[0.001]	[0.019]	[0.020]	[0.020]	[0.017]	[0.016]	[0.021]	[0.036]	[0.016]
0.126	0.076	0.391	-0.001	-0.010	0.660	0.475	0.343	0.011	0.011	0.343
		[0.001]	[0.019]	[0.019]	[0.013]	[0.008]	[0.015]	[0.014]	[0.031]	[0.015]
0.126	0.086	0.392	0.000	-0.008	0.591	0.536	0.332	0.082	0.082	0.332
		[0.000]	[0.020]	[0.020]	[0.014]	[0.006]	[0.013]	[0.008]	[0.027]	[0.013]
0.126	0.011	0.388	-0.001	-0.004	0.678	0.550	0.354	0.204	0.204	0.354
		[0.000]	[0.020]	[0.020]	[0.020]	[0.015]	[0.014]	[0.012]	[0.033]	[0.014]
0.126	0.011	0.376	-0.003	0.001	0.737	0.557	0.391	0.249	0.249	0.391
		[0.000]	[0.019]	[0.019]	[0.022]	[0.018]	[0.013]	[0.015]	[0.035]	[0.013]
0.126	0.016	0.373	-0.004	0.002	0.756	0.530	0.377	0.225	0.225	0.377
		[0.000]	[0.019]	[0.019]	[0.022]	[0.017]	[0.013]	[0.016]	[0.037]	[0.013]
0.126	0.017	0.363	-0.005	0.005	0.746	0.513	0.378	0.227	0.227	0.378
		[0.000]	[0.018]	[0.018]	[0.022]	[0.018]	[0.013]	[0.018]	[0.036]	[0.013]
0.126	0.026	0.350	0.074	0.012	0.824	1.167	0.363	0.733	0.733	0.363
		[0.004]	[0.017]	[0.018]	[0.054]	[0.052]	[0.014]	[0.276]	[0.054]	[0.014]

Tableau B.5 – Les vitesses et contraintes de Reynolds locales au niveau de la section transversale $x/B = 0.00$.

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2020LYSEI083/these.pdf
© [A. Claro Barreto], [2020], INSA Lyon, tous droits réservés

z	y	$\overline{u}$	$\overline{v}$	$\overline{w}$	$\overline{u'u'}$	$\overline{v'v'}$	$\overline{w'w'}$	$\overline{u'v'}$	$\overline{u'w'}$	$\overline{v'w'}$
(m)			(m/s)				$\left(m^2/s^2\right) \times 10^{-3}$			
0.154	0.026	0.330	0.009	0.037	1.293	0.580	0.585	-0.274	-0.274	0.585
		[0.002]	[0.017]	[0.017]	[0.042]	[0.019]	[0.039]	[0.048]	[0.062]	[0.039]
0.154	0.036	0.341	0.010	0.035	1.445	0.527	0.636	-0.157	-0.157	0.636
		[0.002]	[0.017]	[0.017]	[0.053]	[0.013]	[0.053]	[0.062]	[0.065]	[0.053]
0.154	0.036	0.352	0.009	0.032	1.485	0.618	0.634	-0.057	-0.057	0.634
		[0.002]	[0.018]	[0.018]	[0.055]	[0.008]	[0.055]	[0.061]	[0.065]	[0.055]
0.154	0.046	0.350	0.011	0.028	1.424	0.451	0.630	0.013	0.013	0.630
		[0.002]	[0.018]	[0.017]	[0.054]	[0.006]	[0.054]	[0.066]	[0.060]	[0.054]
0.154	0.046	0.354	0.011	0.027	1.327	0.515	0.639	-0.022	-0.022	0.639
		[0.001]	[0.018]	[0.018]	[0.049]	[0.003]	[0.049]	[0.053]	[0.053]	[0.049]
0.154	0.056	0.349	0.006	0.026	1.126	0.558	0.002	-0.021	-0.021	0.002
		[0.001]	[0.018]	[0.018]	[0.001]	[0.001]	[0.001]	[0.035]	[0.075]	[0.001]
0.154	0.056	0.354	0.005	0.024	0.236	0.015	1.835	0.005	0.005	1.835
		[0.001]	[0.018]	[0.018]	[0.018]	[0.002]	[0.018]	[0.025]	[0.389]	[0.018]
0.154	0.066	0.359	0.009	0.026	1.221	0.790	0.641	-0.142	-0.142	0.641
		[0.001]	[0.018]	[0.018]	[0.045]	[0.012]	[0.043]	[0.033]	[0.049]	[0.043]
0.154	0.066	0.356	0.003	0.025	1.352	0.735	0.663	-0.078	-0.078	0.663
		[0.001]	[0.018]	[0.018]	[0.051]	[0.007]	[0.051]	[0.044]	[0.056]	[0.051]
0.154	0.076	0.360	0.001	0.026	1.309	0.711	0.650	-0.088	-0.088	0.650
		[0.001]	[0.018]	[0.018]	[0.046]	[0.010]	[0.046]	[0.042]	[0.055]	[0.046]
0.154	0.076	0.364	0.289	0.028	1.353	4.027	0.601	-1.630	-1.630	0.601
		[0.015]	[0.019]	[0.023]	[0.136]	[0.135]	[0.063]	[0.290]	[0.107]	[0.063]
0.200	0.086	0.366	-0.007	0.008	1.109	0.518	0.599	-0.337	-0.337	0.599
		[0.001]	[0.019]	[0.018]	[0.032]	[0.032]	[0.012]	[0.039]	[0.052]	[0.012]
0.200	0.086	0.415	-0.015	0.005	0.924	0.500	0.584	-0.029	-0.029	0.584
		[0.001]	[0.021]	[0.022]	[0.017]	[0.007]	[0.017]	[0.027]	[0.034]	[0.017]
0.200	0.011	0.383	-0.009	0.009	1.067	0.476	0.530	-0.234	-0.234	0.530
		[0.001]	[0.019]	[0.019]	[0.026]	[0.023]	[0.012]	[0.036]	[0.047]	[0.012]
0.200	0.076	0.400	-0.012	0.009	0.954	0.524	0.514	-0.134	-0.134	0.514
		[0.001]	[0.020]	[0.020]	[0.022]	[0.014]	[0.017]	[0.026]	[0.039]	[0.017]
0.200	0.011	0.407	-0.013	0.007	0.950	0.560	0.529	-0.095	-0.095	0.529
		[0.001]	[0.020]	[0.020]	[0.026]	[0.011]	[0.025]	[0.026]	[0.037]	[0.025]
0.200	0.016	0.410	-0.009	0.006	0.952	0.572	0.527	-0.040	-0.040	0.527
		[0.001]	[0.021]	[0.021]	[0.025]	[0.005]	[0.025]	[0.023]	[0.037]	[0.025]
0.200	0.026	0.411	-0.014	0.004	0.970	0.626	0.583	-0.122	-0.122	0.583
		[0.001]	[0.021]	[0.021]	[0.030]	[0.016]	[0.029]	[0.026]	[0.038]	[0.029]
0.200	0.036	0.415	-0.015	0.004	0.917	0.566	0.539	-0.044	-0.044	0.539
		[0.001]	[0.022]	[0.021]	[0.023]	[0.007]	[0.023]	[0.024]	[0.034]	[0.023]
0.200	0.046	0.413	0.050	0.006	1.004	3.013	0.610	0.710	0.710	0.610
		[0.003]	[0.021]	[0.021]	[0.051]	[0.053]	[0.015]	[0.507]	[0.054]	[0.015]

Tableau B.6 – Les vitesses et contraintes de Reynolds locales au niveau de la section transversale $x/B = 0.00$. (Continuation)

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2020LYSEI083/these.pdf
© [A. Claro Barreto], [2020], INSA Lyon, tous droits réservés

z	y	$\overline{u}$	$\overline{v}$	$\overline{w}$	$\overline{u'u'}$	$\overline{v'v'}$	$\overline{w'w'}$	$\overline{u'v'}$	$\overline{u'w'}$	$\overline{v'w'}$
(m)			(m/s)				$\left(m^2/s^2\right) \times 10^{-3}$			
0.215	0.056	0.253	0.008	0.008	0.733	0.409	0.341	-0.255	-0.255	0.341
		[0.001]	[0.013]	[0.013]	[0.022]	[0.021]	[0.009]	[0.021]	[0.035]	[0.009]
0.215	0.067	0.261	0.008	0.011	0.724	0.425	0.372	-0.264	-0.264	0.372
		[0.001]	[0.013]	[0.013]	[0.022]	[0.022]	[0.011]	[0.016]	[0.035]	[0.011]
0.215	0.071	0.274	0.013	0.015	0.788	0.514	0.454	-0.301	-0.301	0.454
		[0.001]	[0.014]	[0.014]	[0.026]	[0.027]	[0.013]	[0.019]	[0.035]	[0.013]
0.215	0.076	0.285	0.015	0.018	0.809	0.557	0.497	-0.258	-0.258	0.497
		[0.001]	[0.014]	[0.014]	[0.020]	[0.023]	[0.014]	[0.019]	[0.034]	[0.014]
0.215	0.086	0.296	0.019	0.023	0.811	0.602	0.485	-0.296	-0.296	0.485
		[0.001]	[0.015]	[0.015]	[0.024]	[0.027]	[0.012]	[0.015]	[0.035]	[0.012]
0.215	0.011	0.305	0.017	0.028	0.818	0.496	0.485	-0.225	-0.225	0.485
		[0.002]	[0.015]	[0.015]	[0.019]	[0.021]	[0.010]	[0.019]	[0.033]	[0.010]
0.215	0.016	0.317	0.013	0.032	0.825	0.624	0.452	-0.296	-0.296	0.452
		[0.002]	[0.016]	[0.017]	[0.025]	[0.026]	[0.006]	[0.015]	[0.038]	[0.006]
0.215	0.026	0.325	0.005	0.037	0.810	0.563	0.403	-0.246	-0.246	0.403
		[0.002]	[0.017]	[0.016]	[0.025]	[0.024]	[0.004]	[0.014]	[0.038]	[0.004]
0.215	0.036	0.336	-0.347	0.042	0.909	3.111	0.431	-1.441	-1.441	0.431
		[0.017]	[0.016]	[0.024]	[0.110]	[0.111]	[0.026]	[0.201]	[0.083]	[0.026]
0.220	0.046	0.235	0.009	0.012	0.840	0.347	0.331	-0.251	-0.251	0.331
		[0.001]	[0.011]	[0.012]	[0.017]	[0.018]	[0.008]	[0.034]	[0.054]	[0.008]
0.220	0.051	0.255	0.006	0.012	0.688	0.068	0.348	-0.053	-0.053	0.348
		[0.001]	[0.013]	[0.013]	[0.006]	[0.005]	[0.005]	[0.052]	[0.040]	[0.005]
0.220	0.056	0.330	0.004	0.038	0.812	0.536	0.398	-0.114	-0.114	0.398
		[0.002]	[0.017]	[0.016]	[0.021]	[0.021]	[0.007]	[0.015]	[0.050]	[0.007]
0.220	0.066	0.335	-0.349	0.043	0.822	2.421	0.402	-1.445	-1.445	0.402
		[0.017]	[0.017]	[0.025]	[0.105]	[0.106]	[0.030]	[0.181]	[0.090]	[0.030]
0.240	0.071	0.233	0.009	0.009	0.627	0.409	0.164	-0.264	-0.264	0.164
		[0.001]	[0.012]	[0.012]	[0.017]	[0.018]	[0.007]	[0.015]	[0.046]	[0.007]
0.240	0.076	0.240	0.006	0.007	0.704	0.306	0.198	-0.186	-0.186	0.198
		[0.001]	[0.012]	[0.012]	[0.013]	[0.014]	[0.006]	[0.028]	[0.047]	[0.006]
0.240	0.086	0.261	0.006	0.008	0.716	0.506	0.218	-0.275	-0.275	0.218
		[0.001]	[0.013]	[0.013]	[0.020]	[0.021]	[0.009]	[0.014]	[0.047]	[0.009]
0.240	0.016	0.278	0.006	0.009	0.840	0.563	0.262	-0.247	-0.247	0.262
		[0.001]	[0.014]	[0.014]	[0.022]	[0.025]	[0.012]	[0.020]	[0.054]	[0.012]
0.240	0.026	0.302	0.017	0.013	0.710	0.532	0.213	-0.335	-0.335	0.213
		[0.001]	[0.015]	[0.016]	[0.026]	[0.028]	[0.011]	[0.010]	[0.045]	[0.011]
0.240	0.036	0.311	0.009	0.017	0.921	0.628	0.313	-0.024	-0.024	0.313
		[0.001]	[0.016]	[0.016]	[0.019]	[0.024]	[0.022]	[0.027]	[0.068]	[0.022]
0.240	0.046	0.335	0.011	0.031	0.751	0.581	0.270	-0.323	-0.323	0.270
		[0.002]	[0.017]	[0.017]	[0.029]	[0.029]	[0.007]	[0.013]	[0.050]	[0.007]
0.240	0.056	0.340	0.008	0.037	0.770	0.598	0.260	-0.365	-0.365	0.260
		[0.002]	[0.017]	[0.017]	[0.030]	[0.030]	[0.005]	[0.012]	[0.053]	[0.005]
0.240	0.066	0.348	0.001	0.041	0.696	0.532	0.256	-0.279	-0.279	0.256
		[0.002]	[0.017]	[0.017]	[0.024]	[0.024]	[0.006]	[0.012]	[0.050]	[0.006]
0.240	0.086	0.350	-0.372	0.045	0.635	3.892	0.233	-1.646	-1.646	0.233
		[0.019]	[0.018]	[0.026]	[0.107]	[0.109]	[0.026]	[0.433]	[0.095]	[0.026]

Tableau B.7 – Les vitesses et contraintes de Reynolds locales au niveau de la section transversale $x/B = 0.00$. (Continuation)

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2020LYSEI083/these.pdf
© [A. Claro Barreto], [2020], INSA Lyon, tous droits réservés

z	y	$\overline{u}$	$\overline{v}$	$\overline{w}$	$\overline{u'u'}$	$\overline{v'v'}$	$\overline{w'w'}$	$\overline{u'v'}$	$\overline{u'w'}$	$\overline{v'w'}$
(m)			(m/s)				$\left(m^2/s^2\right) \times 10^{-3}$			
0.200	0.011	0.231	0.019	0.020	1.078	0.567	0.552	-0.359	-0.359	0.552
		[0.001]	[0.012]	[0.012]	[0.031]	[0.028]	[0.015]	[0.036]	[0.051]	[0.015]
0.200	0.016	0.241	0.023	0.022	1.057	0.551	0.579	-0.329	-0.329	0.579
		[0.002]	[0.012]	[0.012]	[0.030]	[0.026]	[0.015]	[0.035]	[0.048]	[0.015]
0.200	0.026	0.260	0.027	0.027	0.994	0.297	0.621	-0.163	-0.163	0.621
		[0.002]	[0.013]	[0.013]	[0.021]	[0.014]	[0.017]	[0.049]	[0.039]	[0.017]
0.200	0.036	0.271	0.034	0.033	0.928	0.487	0.550	-0.210	-0.210	0.550
		[0.002]	[0.014]	[0.014]	[0.025]	[0.018]	[0.019]	[0.031]	[0.038]	[0.019]
0.200	0.046	0.279	0.036	0.039	0.902	0.442	0.001	-0.179	-0.179	0.001
		[0.003]	[0.014]	[0.014]	[0.015]	[0.015]	[0.001]	[0.032]	[0.067]	[0.001]
0.200	0.056	0.291	0.037	0.047	1.000	0.618	0.563	-0.214	-0.214	0.563
		[0.003]	[0.015]	[0.015]	[0.026]	[0.019]	[0.017]	[0.025]	[0.042]	[0.017]
0.200	0.066	0.297	0.039	0.055	0.940	0.088	0.528	-0.055	-0.055	0.528
		[0.003]	[0.015]	[0.015]	[0.014]	[0.005]	[0.013]	[0.061]	[0.040]	[0.013]
0.200	0.071	0.311	0.028	0.065	0.830	0.099	0.453	-0.025	-0.025	0.453
		[0.004]	[0.016]	[0.016]	[0.013]	[0.003]	[0.012]	[0.075]	[0.054]	[0.012]
0.200	0.076	0.320	0.025	0.069	0.736	0.534	0.416	1.800	1.800	0.416
		[0.004]	[0.016]	[0.016]	[0.014]	[0.010]	[0.011]	[0.051]	[0.175]	[0.011]
0.200	0.086	0.326	-0.069	0.072	0.911	14.120	0.241	-0.176	-0.176	0.241
		[0.005]	[0.017]	[0.017]	[0.081]	[0.082]	[0.021]	[1.313]	[0.102]	[0.021]
0.235	0.011	0.209	0.022	0.009	0.625	0.302	0.081	-0.165	-0.165	0.081
		[0.001]	[0.011]	[0.010]	[0.014]	[0.014]	[0.003]	[0.022]	[0.039]	[0.003]
0.235	0.016	0.223	0.025	0.008	0.630	0.278	0.173	-0.152	-0.152	0.173
		[0.001]	[0.011]	[0.011]	[0.013]	[0.013]	[0.006]	[0.024]	[0.037]	[0.006]
0.235	0.026	0.241	0.032	0.009	0.684	0.259	0.211	-0.183	-0.183	0.211
		[0.002]	[0.012]	[0.012]	[0.016]	[0.016]	[0.005]	[0.029]	[0.040]	[0.005]
0.235	0.036	0.258	0.045	0.014	0.404	0.015	0.145	-0.026	-0.026	0.145
		[0.002]	[0.013]	[0.013]	[0.002]	[0.002]	[0.001]	[0.024]	[0.016]	[0.001]
0.235	0.046	0.275	0.066	0.023	0.053	0.004	0.105	-0.001	-0.001	0.105
		[0.003]	[0.013]	[0.014]	[0.000]	[0.000]	[0.000]	[0.004]	[0.003]	[0.000]
0.235	0.056	0.284	0.079	0.041	0.859	0.473	0.291	-0.416	-0.416	0.291
		[0.005]	[0.015]	[0.015]	[0.037]	[0.036]	[0.007]	[0.027]	[0.053]	[0.007]
0.235	0.066	0.294	0.090	0.078	1.000	0.556	0.310	-0.450	-0.450	0.310
		[0.006]	[0.015]	[0.016]	[0.039]	[0.038]	[0.009]	[0.026]	[0.060]	[0.009]
0.235	0.076	0.299	0.526	0.106	0.892	16.053	0.229	-0.012	-0.012	0.229
		[0.027]	[0.016]	[0.030]	[0.041]	[0.110]	[0.105]	[17.464]	[0.435]	[0.105]
0.235	0.081	0.306	0.085	0.139	0.857	0.514	0.224	-0.297	-0.297	0.224
		[0.008]	[0.017]	[0.016]	[0.029]	[0.029]	[0.008]	[0.012]	[0.049]	[0.008]
0.235	0.086	0.313	0.067	0.176	0.194	0.765	0.025	-0.101	-0.101	0.025
		[0.009]	[0.018]	[0.016]	[0.008]	[0.008]	[0.001]	[0.031]	[0.017]	[0.001]

Tableau B.8 – Les vitesses et contraintes de Reynolds locales au niveau de la section transversale $x/B = 0.25$.

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2020LYSEI083/these.pdf
© [A. Claro Barreto], [2020], INSA Lyon, tous droits réservés

z	y	$\overline{u}$	$\overline{v}$	$\overline{w}$	$\overline{u'u'}$	$\overline{v'v'}$	$\overline{w'w'}$	$\overline{u'v'}$	$\overline{u'w'}$	$\overline{v'w'}$
(m)			(m/s)				$\left(m^2/s^2\right)\times 10^{-3}$			
0.060	0.011	0.185	-0.009	0.001	1.047	0.652	0.223	-0.109	-0.109	0.223
		[0.000]	[0.009]	[0.009]	[0.018]	[0.017]	[0.013]	[0.024]	[0.060]	[0.013]
0.060	0.016	0.202	-0.005	0.001	1.120	0.646	0.240	-0.099	-0.099	0.240
		[0.000]	[0.010]	[0.010]	[0.022]	[0.016]	[0.018]	[0.031]	[0.064]	[0.018]
0.060	0.026	0.229	-0.006	0.001	1.192	0.621	0.227	-0.069	-0.069	0.227
		[0.000]	[0.012]	[0.011]	[0.021]	[0.013]	[0.019]	[0.037]	[0.068]	[0.019]
0.060	0.036	0.240	-0.005	0.002	1.242	0.630	0.214	-0.022	-0.022	0.214
		[0.000]	[0.013]	[0.012]	[0.022]	[0.010]	[0.021]	[0.042]	[0.075]	[0.021]
0.060	0.046	0.246	-0.002	0.002	1.264	0.681	0.216	0.067	0.067	0.216
		[0.000]	[0.012]	[0.012]	[0.021]	[0.007]	[0.022]	[0.042]	[0.072]	[0.022]
0.060	0.056	0.250	0.002	0.001	1.320	0.685	0.217	0.145	0.145	0.217
		[0.000]	[0.013]	[0.013]	[0.025]	[0.011]	[0.023]	[0.041]	[0.079]	[0.023]
0.060	0.066	0.249	0.000	0.002	1.338	0.716	0.226	0.227	0.227	0.226
		[0.000]	[0.013]	[0.013]	[0.029]	[0.017]	[0.022]	[0.041]	[0.079]	[0.022]
0.060	0.071	0.243	-0.001	0.002	1.316	0.715	0.230	0.203	0.203	0.230
		[0.000]	[0.012]	[0.012]	[0.026]	[0.014]	[0.023]	[0.040]	[0.077]	[0.023]
0.060	0.076	0.234	0.001	0.002	1.271	0.761	0.234	0.241	0.241	0.234
		[0.000]	[0.012]	[0.012]	[0.026]	[0.017]	[0.021]	[0.034]	[0.078]	[0.021]
0.060	0.081	0.232	0.002	0.002	1.231	0.793	0.234	0.250	0.250	0.234
		[0.000]	[0.012]	[0.012]	[0.028]	[0.020]	[0.020]	[0.030]	[0.075]	[0.020]
0.060	0.086	0.225	0.000	0.001	1.257	0.685	0.232	0.188	0.188	0.232
		[0.000]	[0.011]	[0.012]	[0.024]	[0.013]	[0.021]	[0.038]	[0.076]	[0.021]
0.101	0.056	0.291	0.005	0.037	1.701	0.744	0.600	-0.480	-0.480	0.600
		[0.002]	[0.015]	[0.015]	[0.036]	[0.035]	[0.009]	[0.061]	[0.092]	[0.009]
0.101	0.061	0.317	0.003	0.036	1.368	0.579	0.546	-0.365	-0.365	0.546
		[0.002]	[0.016]	[0.016]	[0.027]	[0.027]	[0.009]	[0.047]	[0.068]	[0.009]
0.101	0.066	0.337	0.003	0.038	1.195	0.475	0.394	-0.261	-0.261	0.394
		[0.002]	[0.017]	[0.017]	[0.019]	[0.019]	[0.004]	[0.043]	[0.062]	[0.004]
0.101	0.071	0.352	0.001	0.040	0.769	0.435	0.327	-0.109	-0.109	0.327
		[0.002]	[0.018]	[0.018]	[0.008]	[0.007]	[0.003]	[0.021]	[0.037]	[0.003]
0.101	0.076	0.354	0.001	0.042	0.648	0.461	0.317	-0.005	-0.005	0.317
		[0.002]	[0.018]	[0.018]	[0.003]	[0.003]	[0.002]	[0.012]	[0.029]	[0.002]
0.101	0.081	0.350	0.001	0.045	0.688	0.478	0.312	0.084	0.084	0.312
		[0.002]	[0.018]	[0.018]	[0.009]	[0.010]	[0.003]	[0.014]	[0.032]	[0.003]
0.101	0.086	0.344	-0.002	0.049	0.827	0.457	0.334	0.114	0.114	0.334
		[0.002]	[0.017]	[0.017]	[0.013]	[0.012]	[0.004]	[0.022]	[0.038]	[0.004]
0.101	0.011	0.337	-0.002	0.052	0.818	0.475	0.357	0.127	0.127	0.357
		[0.003]	[0.017]	[0.017]	[0.015]	[0.014]	[0.004]	[0.022]	[0.038]	[0.004]
0.101	0.016	0.332	-0.003	0.054	0.868	0.464	0.361	0.139	0.139	0.361
		[0.003]	[0.017]	[0.017]	[0.015]	[0.014]	[0.005]	[0.027]	[0.042]	[0.005]
0.101	0.026	0.319	-0.006	0.059	0.962	0.405	0.402	0.051	0.051	0.402
		[0.003]	[0.016]	[0.016]	[0.010]	[0.010]	[0.010]	[0.030]	[0.044]	[0.010]

Tableau B.9 – Les vitesses et contraintes de Reynolds locales au niveau de la section transversale $x/B = 1.00$.

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2020LYSEI083/these.pdf
© [A. Claro Barreto], [2020], INSA Lyon, tous droits réservés

z	y	$\overline{u}$	$\overline{v}$	$\overline{w}$	$\overline{u'u'}$	$\overline{v'v'}$	$\overline{w'w'}$	$\overline{u'v'}$	$\overline{u'w'}$	$\overline{v'w'}$
(m)			(m/s)				$\left(m^2/s^2\right)\times 10^{-3}$			
0.125	0.036	0.225	-0.006	0.012	1.659	0.710	0.561	-0.363	-0.363	0.561
		[0.001]	[0.012]	[0.011]	[0.042]	[0.041]	[0.013]	[0.059]	[0.085]	[0.013]
0.125	0.046	0.248	-0.002	0.011	1.711	0.641	0.575	-0.382	-0.382	0.575
		[0.001]	[0.013]	[0.012]	[0.042]	[0.040]	[0.018]	[0.065]	[0.087]	[0.018]
0.125	0.056	0.281	-0.001	0.010	1.496	0.559	0.501	-0.314	-0.314	0.501
		[0.001]	[0.014]	[0.014]	[0.035]	[0.034]	[0.016]	[0.060]	[0.077]	[0.016]
0.125	0.066	0.306	0.001	0.009	1.112	0.519	0.412	-0.171	-0.171	0.412
		[0.001]	[0.015]	[0.015]	[0.022]	[0.021]	[0.018]	[0.038]	[0.053]	[0.018]
0.125	0.076	0.324	0.001	0.010	0.796	0.451	0.331	-0.077	-0.077	0.331
		[0.001]	[0.016]	[0.016]	[0.012]	[0.013]	[0.012]	[0.023]	[0.037]	[0.012]
0.125	0.081	0.331	0.004	0.011	0.648	0.449	0.268	0.016	0.016	0.268
		[0.001]	[0.017]	[0.017]	[0.008]	[0.006]	[0.009]	[0.014]	[0.032]	[0.009]
0.125	0.086	0.329	0.001	0.014	0.632	0.443	0.252	0.102	0.102	0.252
		[0.001]	[0.017]	[0.016]	[0.010]	[0.008]	[0.007]	[0.013]	[0.031]	[0.007]
0.125	0.011	0.326	0.001	0.016	0.679	0.437	0.253	0.136	0.136	0.253
		[0.001]	[0.016]	[0.017]	[0.010]	[0.010]	[0.005]	[0.015]	[0.034]	[0.005]
0.125	0.016	0.322	0.000	0.018	0.672	0.439	0.253	0.144	0.144	0.253
		[0.001]	[0.016]	[0.016]	[0.011]	[0.011]	[0.004]	[0.016]	[0.033]	[0.004]
0.125	0.026	0.314	-0.001	0.019	0.773	0.433	0.259	0.178	0.178	0.259
		[0.001]	[0.016]	[0.016]	[0.015]	[0.014]	[0.003]	[0.021]	[0.039]	[0.003]
0.125	0.036	0.308	-0.001	0.023	0.824	0.393	0.251	0.168	0.168	0.251
		[0.001]	[0.016]	[0.015]	[0.013]	[0.012]	[0.004]	[0.027]	[0.043]	[0.004]
0.148	0.046	0.300	0.004	0.053	1.388	0.589	0.596	-0.265	-0.265	0.596
		[0.003]	[0.015]	[0.015]	[0.025]	[0.022]	[0.016]	[0.049]	[0.063]	[0.016]
0.148	0.056	0.319	0.002	0.055	1.131	0.527	0.497	-0.163	-0.163	0.497
		[0.003]	[0.016]	[0.016]	[0.018]	[0.012]	[0.014]	[0.037]	[0.050]	[0.014]
0.148	0.066	0.330	0.002	0.056	1.021	0.512	0.423	-0.105	-0.105	0.423
		[0.003]	[0.017]	[0.016]	[0.016]	[0.007]	[0.015]	[0.030]	[0.043]	[0.015]
0.148	0.071	0.333	-0.000	0.057	0.849	0.536	0.403	-0.039	-0.039	0.403
		[0.003]	[0.017]	[0.017]	[0.012]	[0.005]	[0.013]	[0.019]	[0.035]	[0.013]
0.148	0.076	0.333	-0.001	0.060	0.883	0.525	0.462	-0.006	-0.006	0.462
		[0.003]	[0.017]	[0.017]	[0.017]	[0.008]	[0.018]	[0.024]	[0.036]	[0.018]
0.148	0.081	0.329	-0.003	0.063	0.830	0.481	0.453	0.033	0.033	0.453
		[0.003]	[0.017]	[0.017]	[0.011]	[0.009]	[0.012]	[0.023]	[0.034]	[0.012]
0.148	0.086	-0.269	0.108	0.057	83.693	-53.860	0.515	136.029	136.029	0.515
		[0.006]	[0.014]	[0.015]	[1.586]	[1.634]	[0.816]	[18.821]	[16.302]	[0.816]
0.150	0.011	0.280	0.004	0.050	1.498	0.697	0.684	-0.357	-0.357	0.684
		[0.003]	[0.014]	[0.014]	[0.031]	[0.028]	[0.015]	[0.049]	[0.068]	[0.015]
0.150	0.066	-0.072	-0.234	0.051	57.297	15.732	0.360	134.048	134.048	0.360
		[0.012]	[0.005]	[0.013]	[1.509]	[1.507]	[0.117]	[17.754]	[15.228]	[0.117]
0.150	0.076	0.325	0.381	0.094	0.310	27.053	1.110	0.179	0.179	1.110
		[0.019]	[0.017]	[0.026]	[0.042]	[0.540]	[0.538]	[17.146]	[1.575]	[0.538]
0.150	0.081	0.327	0.336	0.068	0.771	34.141	0.452	0.935	0.935	0.452
		[0.017]	[0.016]	[0.023]	[0.112]	[0.272]	[0.254]	[18.704]	[0.475]	[0.254]
0.150	0.086	0.323	0.500	0.065	0.296	42.126	0.227	0.868	0.868	0.227
		[0.025]	[0.017]	[0.030]	[0.067]	[0.122]	[0.101]	[25.182]	[0.646]	[0.101]

Tableau B.10 – Les vitesses et contraintes de Reynolds locales au niveau de la section transversale $x/B = 1.00$. (Continuation)

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2020LYSEI083/these.pdf
© [A. Claro Barreto], [2020], INSA Lyon, tous droits réservés

z	y	$\overline{u}$	$\overline{v}$	$\overline{w}$	$\overline{u'u'}$	$\overline{v'v'}$	$\overline{w'w'}$	$\overline{u'v'}$	$\overline{u'w'}$	$\overline{v'w'}$
(m)			(m/s)				$\left(m^2/s^2\right) \times 10^{-3}$			
0.210	0.016	0.107	0.011	0.046	5.503	1.799	1.911	-0.797	-0.797	1.911
		[0.002]	[0.006]	[0.005]	[0.179]	[0.073]	[0.162]	[0.235]	[0.242]	[0.162]
0.210	0.026	0.137	0.016	0.057	4.558	1.572	1.411	-0.574	-0.574	1.411
		[0.003]	[0.007]	[0.007]	[0.128]	[0.054]	[0.117]	[0.193]	[0.212]	[0.117]
0.210	0.036	0.171	0.019	0.068	3.550	1.369	1.294	-0.443	-0.443	1.294
		[0.004]	[0.009]	[0.009]	[0.089]	[0.043]	[0.083]	[0.142]	[0.159]	[0.083]
0.210	0.046	0.203	0.017	0.073	2.388	1.135	1.026	-0.135	-0.135	1.026
		[0.004]	[0.011]	[0.011]	[0.062]	[0.017]	[0.062]	[0.077]	[0.094]	[0.062]
0.210	0.056	0.236	0.018	0.076	1.582	0.953	0.664	-0.052	-0.052	0.664
		[0.004]	[0.012]	[0.012]	[0.035]	[0.003]	[0.035]	[0.043]	[0.064]	[0.035]
0.210	0.066	0.241	0.016	0.078	1.544	0.949	0.635	-0.091	-0.091	0.635
		[0.004]	[0.012]	[0.012]	[0.035]	[0.008]	[0.034]	[0.037]	[0.061]	[0.034]
0.210	0.076	0.247	0.014	0.081	1.328	0.901	0.527	0.022	0.022	0.527
		[0.004]	[0.013]	[0.012]	[0.030]	[0.009]	[0.031]	[0.030]	[0.054]	[0.031]
0.210	0.011	0.254	0.012	0.085	1.200	0.756	0.515	-0.033	-0.033	0.515
		[0.004]	[0.014]	[0.013]	[0.031]	[0.009]	[0.032]	[0.028]	[0.050]	[0.032]
0.210	0.016	0.257	0.015	0.085	1.226	0.703	0.473	-0.072	-0.072	0.473
		[0.004]	[0.014]	[0.013]	[0.032]	[0.007]	[0.033]	[0.034]	[0.057]	[0.033]
0.210	0.026	0.259	0.138	0.086	1.259	73.412	0.498	-0.343	-0.343	0.498
		[0.008]	[0.014]	[0.015]	[0.092]	[0.119]	[0.092]	[15.153]	[0.381]	[0.092]
0.237	0.036	0.141	0.011	0.065	3.089	1.505	0.938	-0.050	-0.050	0.938
		[0.003]	[0.008]	[0.007]	[0.075]	[0.015]	[0.074]	[0.100]	[0.136]	[0.074]
0.237	0.046	0.151	0.012	0.070	2.620	1.344	0.817	-0.037	-0.037	0.817
		[0.004]	[0.008]	[0.008]	[0.063]	[0.015]	[0.065]	[0.077]	[0.113]	[0.065]
0.237	0.056	0.157	0.013	0.077	2.189	1.472	0.697	-0.079	-0.079	0.697
		[0.004]	[0.009]	[0.008]	[0.052]	[0.021]	[0.056]	[0.049]	[0.097]	[0.056]
0.237	0.066	0.168	0.012	0.083	2.008	1.405	0.630	-0.087	-0.087	0.630
		[0.004]	[0.010]	[0.009]	[0.056]	[0.018]	[0.058]	[0.047]	[0.088]	[0.058]
0.237	0.071	0.176	0.011	0.088	1.843	1.345	0.542	-0.039	-0.039	0.542
		[0.004]	[0.010]	[0.009]	[0.052]	[0.012]	[0.053]	[0.043]	[0.081]	[0.053]
0.237	0.076	0.186	0.011	0.091	1.714	1.166	0.453	0.007	0.007	0.453
		[0.005]	[0.011]	[0.009]	[0.049]	[0.007]	[0.050]	[0.043]	[0.081]	[0.050]
0.237	0.086	0.192	0.003	0.091	1.724	0.182	0.423	-0.080	-0.080	0.423
		[0.005]	[0.011]	[0.010]	[0.049]	[0.006]	[0.048]	[0.084]	[0.084]	[0.048]

Tableau B.11 – Les vitesses et contraintes de Reynolds locales au niveau de la section transversale $x/B = 1.00$. (Continuation)

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2020LYSEI083/these.pdf
© [A. Claro Barreto], [2020], INSA Lyon, tous droits réservés

z	y	$\overline{u}$	$\overline{v}$	$\overline{w}$	$\overline{u'u'}$	$\overline{v'v'}$	$\overline{w'w'}$	$\overline{u'v'}$	$\overline{u'w'}$	$\overline{v'w'}$
(m)			(m/s)				$\left(m^2/s^2\right) \times 10^{-3}$			
0.100	0.011	0.173	0.001	-0.001	1.002	0.547	0.351	-0.284	-0.284	0.351
		[0.000]	[0.009]	[0.009]	[0.028]	[0.028]	[0.003]	[0.029]	[0.048]	[0.003]
0.100	0.016	0.185	0.001	-0.001	1.109	0.536	0.378	-0.319	-0.319	0.378
		[0.000]	[0.009]	[0.009]	[0.032]	[0.032]	[0.005]	[0.035]	[0.052]	[0.005]
0.100	0.026	0.208	0.001	-0.002	1.058	0.525	0.366	-0.325	-0.325	0.366
		[0.000]	[0.011]	[0.011]	[0.033]	[0.033]	[0.004]	[0.034]	[0.054]	[0.004]
0.100	0.036	0.237	0.000	-0.003	0.978	0.451	0.331	-0.278	-0.278	0.331
		[0.000]	[0.012]	[0.012]	[0.028]	[0.028]	[0.005]	[0.034]	[0.050]	[0.005]
0.100	0.046	0.265	-0.000	-0.002	1.778	0.363	0.256	-0.244	-0.244	0.256
		[0.000]	[0.013]	[0.014]	[0.023]	[0.024]	[0.006]	[0.101]	[0.114]	[0.006]
0.100	0.056	0.282	-0.001	-0.002	3.370	0.294	0.183	-0.184	-0.184	0.183
		[0.000]	[0.014]	[0.014]	[0.017]	[0.017]	[0.006]	[0.218]	[0.230]	[0.006]
0.100	0.066	0.288	-0.001	-0.002	3.410	0.260	0.140	-0.106	-0.106	0.140
		[0.000]	[0.014]	[0.015]	[0.010]	[0.010]	[0.005]	[0.229]	[0.241]	[0.005]
0.100	0.076	0.281	-0.001	-0.002	1.554	0.258	0.138	0.035	0.035	0.138
		[0.000]	[0.014]	[0.014]	[0.006]	[0.003]	[0.006]	[0.094]	[0.106]	[0.006]
0.100	0.086	0.268	0.002	0.000	1.024	0.273	0.179	0.040	0.040	0.179
		[0.000]	[0.014]	[0.013]	[0.008]	[0.005]	[0.006]	[0.054]	[0.065]	[0.006]
0.145	0.011	0.192	0.000	-0.009	0.965	0.476	0.375	-0.234	-0.234	0.375
		[0.000]	[0.010]	[0.010]	[0.025]	[0.025]	[0.007]	[0.033]	[0.047]	[0.007]
0.145	0.016	0.205	0.001	-0.007	1.026	0.458	0.390	-0.250	-0.250	0.390
		[0.000]	[0.010]	[0.010]	[0.026]	[0.026]	[0.007]	[0.037]	[0.048]	[0.007]
0.145	0.026	0.228	0.001	-0.003	1.093	0.420	0.382	-0.262	-0.262	0.382
		[0.000]	[0.012]	[0.011]	[0.026]	[0.026]	[0.006]	[0.044]	[0.054]	[0.006]
0.145	0.036	0.252	0.000	-0.001	0.991	0.339	0.344	-0.220	-0.220	0.344
		[0.000]	[0.012]	[0.013]	[0.021]	[0.022]	[0.006]	[0.043]	[0.051]	[0.006]
0.145	0.046	0.271	0.000	-0.000	0.838	0.291	0.290	-0.178	-0.178	0.290
		[0.000]	[0.014]	[0.014]	[0.018]	[0.019]	[0.006]	[0.036]	[0.042]	[0.006]
0.145	0.056	0.289	-0.000	0.001	1.489	0.233	0.199	-0.156	-0.156	0.199
		[0.000]	[0.015]	[0.015]	[0.016]	[0.016]	[0.006]	[0.088]	[0.094]	[0.006]
0.145	0.066	0.301	-0.000	0.003	0.447	0.192	0.158	-0.076	-0.076	0.158
		[0.000]	[0.015]	[0.015]	[0.009]	[0.009]	[0.006]	[0.017]	[0.023]	[0.006]
0.145	0.076	0.306	-0.000	0.005	0.325	0.181	0.120	-0.007	-0.007	0.120
		[0.000]	[0.015]	[0.016]	[0.003]	[0.004]	[0.004]	[0.010]	[0.016]	[0.004]
0.145	0.086	0.300	-0.001	0.008	0.322	0.168	0.122	0.054	0.054	0.122
		[0.000]	[0.015]	[0.015]	[0.004]	[0.004]	[0.002]	[0.010]	[0.016]	[0.002]

Tableau B.12 – Les vitesses et contraintes de Reynolds locales au niveau de la section transversale $x/B = 2.00$.

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2020LYSEI083/these.pdf
© [A. Claro Barreto], [2020], INSA Lyon, tous droits réservés

z	y	$\overline{u}$	$\overline{v}$	$\overline{w}$	$\overline{u'u'}$	$\overline{v'v'}$	$\overline{w'w'}$	$\overline{u'v'}$	$\overline{u'w'}$	$\overline{v'w'}$
(m)			(m/s)				$\left(m^2/s^2\right) \times 10^{-3}$			
0.175	0.011	0.181	0.001	-0.015	1.547	0.920	0.678	-0.461	-0.461	0.678
		[0.001]	[0.009]	[0.009]	[0.049]	[0.043]	[0.028]	[0.041]	[0.070]	[0.028]
0.175	0.016	0.196	0.002	-0.006	1.748	0.914	0.631	-0.519	-0.519	0.631
		[0.000]	[0.010]	[0.010]	[0.054]	[0.048]	[0.025]	[0.050]	[0.082]	[0.025]
0.175	0.026	0.227	0.004	0.004	1.797	0.801	0.628	-0.566	-0.566	0.628
		[0.000]	[0.012]	[0.011]	[0.051]	[0.050]	[0.013]	[0.063]	[0.089]	[0.013]
0.175	0.036	0.259	0.003	0.009	1.272	0.620	0.500	-0.374	-0.374	0.500
		[0.001]	[0.013]	[0.013]	[0.033]	[0.032]	[0.007]	[0.041]	[0.062]	[0.007]
0.175	0.046	0.281	0.002	0.013	0.783	0.429	0.357	-0.220	-0.220	0.357
		[0.001]	[0.014]	[0.014]	[0.019]	[0.018]	[0.005]	[0.023]	[0.036]	[0.005]
0.175	0.056	0.293	0.001	0.016	0.499	0.326	0.282	-0.098	-0.098	0.282
		[0.001]	[0.015]	[0.014]	[0.009]	[0.007]	[0.005]	[0.013]	[0.020]	[0.005]
0.175	0.066	0.301	0.001	0.020	0.363	0.271	0.224	-0.036	-0.036	0.224
		[0.001]	[0.015]	[0.015]	[0.004]	[0.004]	[0.004]	[0.007]	[0.015]	[0.004]
0.175	0.076	0.304	-0.001	0.023	0.292	0.236	0.175	-0.003	-0.003	0.175
		[0.001]	[0.015]	[0.016]	[0.002]	[0.003]	[0.003]	[0.005]	[0.013]	[0.003]
0.175	0.086	0.304	-0.000	0.026	0.292	0.195	0.163	0.006	0.006	0.163
		[0.001]	[0.015]	[0.016]	[0.001]	[0.002]	[0.002]	[0.007]	[0.013]	[0.002]
0.200	0.011	0.207	0.002	-0.016	1.002	0.567	0.450	-0.312	-0.312	0.450
		[0.001]	[0.011]	[0.011]	[0.032]	[0.032]	[0.007]	[0.030]	[0.049]	[0.007]
0.200	0.016	0.219	0.002	-0.013	1.071	0.544	0.446	-0.295	-0.295	0.446
		[0.001]	[0.011]	[0.011]	[0.030]	[0.031]	[0.008]	[0.036]	[0.053]	[0.008]
0.200	0.026	0.243	0.001	-0.006	1.023	0.474	0.402	-0.281	-0.281	0.402
		[0.000]	[0.012]	[0.012]	[0.028]	[0.029]	[0.008]	[0.038]	[0.051]	[0.008]
0.200	0.036	0.261	0.000	-0.003	0.924	0.397	0.344	-0.243	-0.243	0.344
		[0.000]	[0.013]	[0.013]	[0.024]	[0.025]	[0.007]	[0.036]	[0.047]	[0.007]
0.200	0.046	0.279	-0.001	0.000	0.704	0.311	0.274	-0.160	-0.160	0.274
		[0.000]	[0.014]	[0.014]	[0.016]	[0.017]	[0.008]	[0.027]	[0.035]	[0.008]
0.200	0.056	0.289	-0.000	0.004	0.546	0.289	0.234	-0.120	-0.120	0.234
		[0.000]	[0.015]	[0.015]	[0.013]	[0.014]	[0.008]	[0.019]	[0.027]	[0.008]
0.200	0.066	0.297	-0.001	0.007	0.408	0.247	0.190	-0.088	-0.088	0.190
		[0.000]	[0.015]	[0.015]	[0.011]	[0.011]	[0.008]	[0.013]	[0.020]	[0.008]
0.200	0.076	0.303	-0.002	0.011	0.316	0.219	0.151	-0.035	-0.035	0.151
		[0.001]	[0.016]	[0.015]	[0.006]	[0.007]	[0.006]	[0.008]	[0.015]	[0.006]
0.200	0.086	0.303	-0.003	0.015	0.296	0.193	0.129	0.008	0.008	0.129
		[0.001]	[0.015]	[0.015]	[0.002]	[0.003]	[0.004]	[0.007]	[0.014]	[0.004]

Tableau B.13 – Les vitesses et contraintes de Reynolds locales au niveau de la section transversale $x/B = 2.00$. (Continuation)

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2020LYSEI083/these.pdf
© [A. Claro Barreto], [2020], INSA Lyon, tous droits réservés

z	y	$\overline{u}$	$\overline{v}$	$\overline{w}$	$\overline{u'u'}$	$\overline{v'v'}$	$\overline{w'w'}$	$\overline{u'v'}$	$\overline{u'w'}$	$\overline{v'w'}$
(m)			(m/s)				$\left(m^2/s^2\right) \times 10^{-3}$			
0.240	0.011	0.225	-0.028	-0.014	0.751	0.814	0.303	-0.279	-0.279	0.303
		[0.002]	[0.011]	[0.012]	[0.022]	[0.021]	[0.012]	[0.006]	[0.044]	[0.012]
0.240	0.016	0.234	-0.031	-0.007	0.805	0.758	0.354	-0.315	-0.315	0.354
		[0.002]	[0.012]	[0.012]	[0.024]	[0.023]	[0.014]	[0.010]	[0.046]	[0.014]
0.240	0.026	0.252	-0.028	0.003	0.820	0.667	0.355	-0.334	-0.334	0.355
		[0.001]	[0.013]	[0.013]	[0.024]	[0.025]	[0.011]	[0.014]	[0.047]	[0.011]
0.240	0.036	0.270	-0.025	0.006	0.791	0.585	0.303	-0.282	-0.282	0.303
		[0.001]	[0.014]	[0.013]	[0.021]	[0.022]	[0.008]	[0.018]	[0.044]	[0.008]
0.240	0.046	0.286	-0.022	0.009	0.700	0.415	0.233	-0.196	-0.196	0.233
		[0.001]	[0.015]	[0.015]	[0.013]	[0.014]	[0.006]	[0.020]	[0.040]	[0.006]
0.240	0.056	0.297	-0.019	0.009	0.515	0.301	0.160	-0.104	-0.104	0.160
		[0.001]	[0.015]	[0.015]	[0.006]	[0.006]	[0.003]	[0.015]	[0.029]	[0.003]
0.240	0.066	0.305	-0.015	0.010	0.423	0.257	0.128	-0.049	-0.049	0.128
		[0.001]	[0.016]	[0.015]	[0.003]	[0.002]	[0.002]	[0.013]	[0.024]	[0.002]
0.240	0.076	0.308	-0.011	0.011	0.304	0.191	0.115	-0.028	-0.028	0.115
		[0.001]	[0.015]	[0.016]	[0.002]	[0.000]	[0.002]	[0.009]	[0.018]	[0.002]
0.240	0.086	0.311	-0.005	0.012	0.270	0.172	0.108	-0.024	-0.024	0.108
		[0.001]	[0.016]	[0.016]	[0.002]	[0.000]	[0.002]	[0.008]	[0.016]	[0.002]

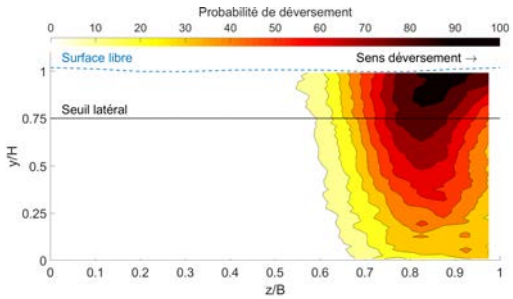
Tableau B.14 – Les vitesses et contraintes de Reynolds locales au niveau de la section transversale $x/B = 2.00$. (Continuation)

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2020LYSEI083/these.pdf
© [A. Claro Barreto], [2020], INSA Lyon, tous droits réservés

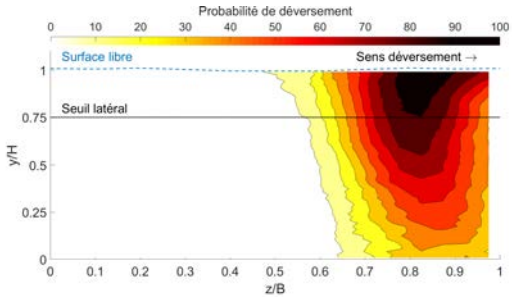
Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2020LYSEI083/these.pdf
© [A. Claro Barreto], [2020], INSA Lyon, tous droits réservés

Les probabilité de déversement 2D des lignes de courant du déversoir latéral à échelle réduite

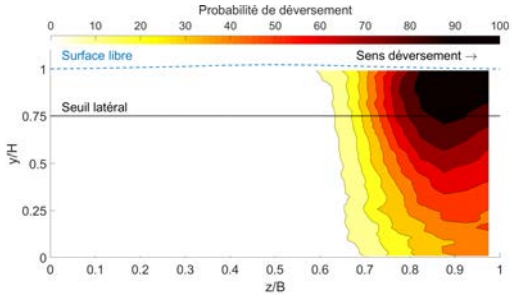
Les Figs. C.1 et C.2 présentent la probabilité de déversement des particules d'eau obtenue pour les trois maillages avec les modèles de turbulence RNG k-ϵ et SST k-ω, respectivement. La section transversale présentée est localisée à l'entrée du canal amont du déversoir latéral à échelle réduite (Chapitre 3).



(a) Résolution N° 1



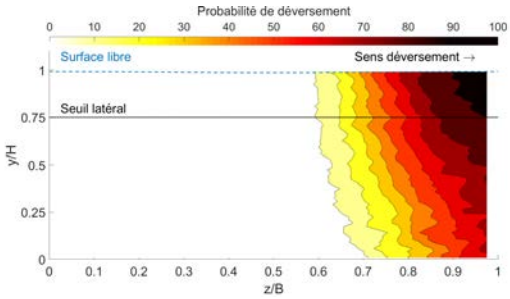
(b) Résolution N° 2



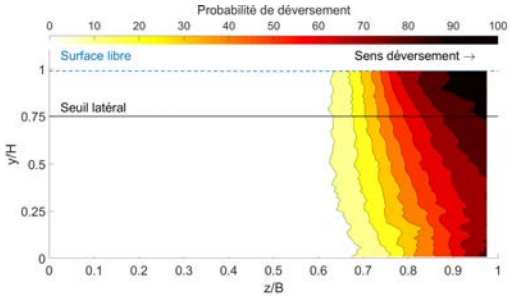
(c) Résolution N° 3

Figure C.1 – Probabilité de déversement de l'écoulement pour le modèle de turbulence RNG k-ϵ pour les résolutions grossière (Fig. C.1a), moyenne (Fig. C.1b) et fin (Fig. C.1c).

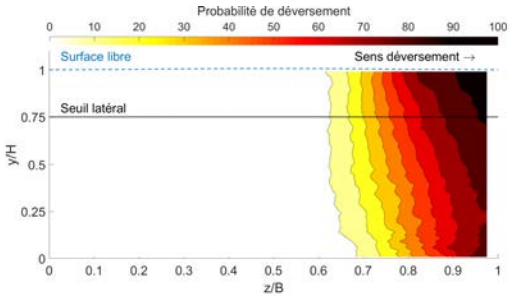
Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2020LYSEI083/these.pdf
© [A. Claro Barreto], [2020], INSA Lyon, tous droits réservés



(a) SST - Résolution N° 1



(b) SST - Résolution N° 2



(c) SST - Résolution N° 3

Figure C.2 – La probabilité de déversement des lignes de courants pour le modèle de turbulence SST k-ω pour les résolutions grossières (Fig. C.2a), moyenne (Fig. C.2b) et fin (Fig. C.2c).

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2020LYSEI083/these.pdf
© [A. Claro Barreto], [2020], INSA Lyon, tous droits réservés

Hydrodynamique de la conduite amont du déversoir d'orage « Gambetta »

D.1 Introduction

Le déversoir d'orage (DO) « Gambetta » est le principal ouvrage de dérivation du système de collecte de la ville de Valence. Le fonctionnement hydraulique de cet ouvrage en temps de pluie est étudié à l'aide d'une approche numérique tridimensionnelle. L'approche numérique choisie est basée sur la mécanique des fluides numérique (CFD, en anglais). L'approche CFD requit spécifier la gamme du débit d'entrée de l'ouvrage en temps de pluie comme condition limite d'entrée afin de comparer et de valider le débit déversé calculé par rapport aux données *in-situ*. L'étude hydraulique 1D de la conduite d'entrée a montré que le capteur submergé de vitesse *in-situ* sous-estime la vitesse moyenne de l'écoulement en temps sec et temps de pluie (voir le Chapitre 2). Afin de spécifier la gamme du débit à l'entrée du DO en temps de pluie, il s'avère nécessaire de simuler le fonctionnement hydraulique de la conduite à l'amont du DO « Gambetta ». L'approche CFD est choisie pour simuler le fonctionnement hydraulique de cette conduite, car la rugosité de la conduite à l'aval du capteur de hauteur d'eau *in-situ* est modifiée par le système de fixation du capteur submergé de vitesse *in-situ*. Le débit dans la conduite sera déterminé grâce à une comparaison des hauteurs d'eau numérique et expérimentale.

D.2 Matériel et méthodes

L'hydrodynamique de la conduite amont du DO « Gambetta » est simulée numériquement à l'aide de l'approche CFD présenté dans le Chapitre 3 : résolution numérique des équations de Navier-Stokes moyennées dans le temps (RANS, en anglais) par la méthode des volumes finis couplée au modèle de turbulence RNG k-ϵ. Le modèle numérique 3D de la conduite amont du déversoir d'orage (DO) « Gambetta » est divisé en 3 étapes principales (MENTOR 2011) : (i) le pré-traitement, (ii) la résolution numérique et (iii) le post-traitement. Le pré-traitement consiste à reproduire la géométrie et à créer les différents maillages. La résolution numérique correspond à la définition de tous les modèles mathématiques nécessaires pour reproduire l'écoulement (i.e. le modèle de turbulence, le modèle de surface libre, etc.), les conditions limites et initiales, et le calcul numérique. Le post-traitement permet de vérifier la convergence de tous les résultats, l'indépendance au maillage et l'incertitude des résultats numériques.

La conduite à l'amont du DO est simulée en 3D afin d'obtenir une loi H-Q (i.e. Hauteur-Débit) qui permettra de définir la gamme des débits d'entrée du DO « Gambetta ».

L'incertitude de chacune des régressions est obtenue par la méthode de moindre carrés selon la méthode GUM (voir la Section D.2.4).

D.2.1 Le pré-traitement

D.2.1.1 La géométrie

Un schéma 3D de la géométrie de la conduite ovoïde est présenté dans la Fig. D.1. Le sens de l'écoulement, de droit à gauche, est indiqué par les flèches rouges. La pente moyenne de la conduite ovoïde a été

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2020LYSEI083/these.pdf
© [A. Claro Barreto], [2020], INSA Lyon, tous droits réservés

mesuré à l'aide d'un inclinomètre électronique, $I_{\text{Amont}} = 1.3\%$. L'écoulement est torrentiel si la hauteur d'eau est comprise entre 0.100 m et 1.700 m, car la pente *in situ* correspond à une pente forte. Les parois de la conduite sont en béton en bon état (inspection *in situ*). Une tôle en inox couvre le radier jusqu'à 0.613 m de hauteur et elle sert de support à la sonde submergée de vitesse *in situ*.

Pour la gamme des hauteur d'eau $H_{\text{Amont}} \in [0.100, 1.700]\,m$, la longueur « fictive » varie respectivement entre 20.3 à 6.7 fois la largeur au miroir B. Cette longueur a permis d'assurer un profil de vitesse complètement développé au niveau de la sonde *in situ* de hauteur d'eau, localisé à 2 m à l'amont de la sonde de vitesse submergée, selon les recommandations de la littérature (e.g. Bonakdari et al. 2007b; Lipeme Kouyi 2004).

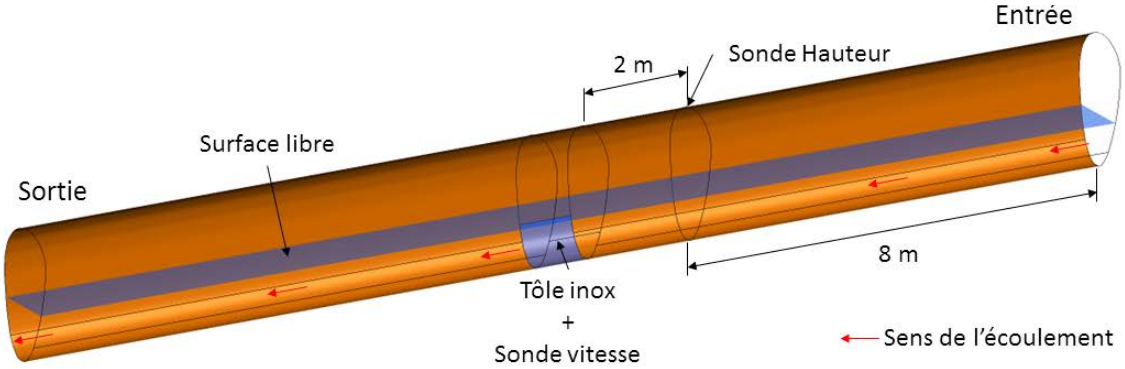


Figure D.1 – Schéma 3D de la géométrie de la conduite à l'amont du déversoir d'orage «Gambetta».

D.2.1.2 Le maillage

Le fonctionnement hydraulique de cette conduite est étudiée à l'aide de 3 maillages indépendants, illustrés dans la Figure D.2), selon les recommandations de l'ASME (2008). Tous les maillages sont composés uniquement d'éléments hexaèdres et conçus à l'aide du logiciel ANSYS ICEM CFD™(version 16.2). Le nombre d'éléments de chaque résolution est indiqué dans le Tableau D.1. Le domaine de simulation, présenté dans la Fig. D.1, correspond à un volume de 47.2597 m^3.

(a) N°1 - Grossier (b) N°2 - Intermédiaire (c) N°3 - Fin

Figure D.2 – Les trois résolution spatiales au niveau de la section transversale du modèle à l'amont du déversoir d'orage «Gambetta»

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2020LYSEI083/these.pdf
© [A. Claro Barreto], [2020], INSA Lyon, tous droits réservés

Résolution		
N° 1	N° 2	N° 3
Grossier	Intermediaire	Fin
3 433 859	7 780 104	17 519 796

Tableau D.1 – Nombre d'éléments héxaèdres selon la résolution pour le modèle numérique de l'amont du DO « Gambetta ».

D.2.2 La résolution numérique

L'écoulement de la conduite à l'amont (Section D.2.1) du déversoir d'orage « Gambetta » est simulé à l'aide de la mécanique de fluides numérique (CFD, en anglais). La CFD permet d'obtenir une solution approchée des équations de Navier-Stokes : conservation de la masse (Eq. 3.12) et de la quantité de mouvement (Eq. 3.14), voir Sec. 3.2.3.4. Les équations sont discrétisées dans l'espace selon la méthode de volumes finis (Section 3.2.3.3). Cette méthode Eulérienne permet de conserver la masse et la quantité de mouvement au sein de chacun des volumes de contrôle (i.e. les mailles).

Le schéma de discrétisation employé pour le couplage Vitesse-Pression et les schémas de discrétisation spatiale employés pour la quantité de mouvement, des gradients, la pression, l'énergie cinétique turbulente k, le taux de dissipation de l'énergie cinétique turbulente ϵ, et la fraction volumique α_{eau} sont présentés dans la Tableau D.2.

	Schéma de discretisation	Reférence
Couplage Vitesse-Pression	SIMPLE	Patankar et Spalding 1983
Quantité de mouvement	2ième ordre à l'amont	
Gradient	Moindres carrés sur maille	
Pression	Force de volume pondérée	
k	2ième ordre à l'amont	
ϵ		
Fraction volumique α_{eau}	HRIC	Park et al. 2009

Tableau D.2 – Les schémas de discrétisation spatiaux et du couplage Vitesse-Pression.

D.2.2.1 Le modèle de turbulence

La turbulence de l'écoulement est simulée à l'aide du modèle de turbulence RNG $k-\epsilon$ (Section 3.2.3.5 - Chapitre 3). La capacité du modèle RNG $k-\epsilon$ à reproduire les champs de vitesses et de contraintes de Reynolds est validée pour un déversoir latéral rectangulaire en régime fluvial (Chapitre 3). Ce modèle de turbulence est, en outre, l'un de plus employés en hydrologie urbaine (e.g. Dufresne et al. 2010 ; Isel et al. 2014a,b ; Lipeme Kouyi et al. 2011, 2005).

D.2.2.2 La surface libre

La surface libre (i.e. l'interphase eau-air) est simulée à l'aide du modèle « Volume-Of-Fluid » (VOF) proposé par Hirt et Nichols (1981), voir la Section 3.2.3.6. La fraction volumique de l'eau α_{eau} est transporté selon l'Eq. 3.46. La surface de libre correspond à $\alpha_{\text{eau}} = 0.5$.

D.2.2.3 Les conditions limites et initiales

Les conditions limites utilisées dans le modèle numérique sont : (i) débit massique pour l'entrée, (ii) pression de sortie pour la sortie, et (iii) non glissement pour toutes les parois. A l'entrée du modèle, la hauteur d'eau est définie en fonction du débit d'entrée D_{E} à l'aide de la formule de Manning-Strickler (Eq. D.1). Le profil de pression à la condition de sortie est calculé en extrapolant la pression de la maille

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2020LYSEI083/these.pdf
© [A. Claro Barreto], [2020], INSA Lyon, tous droits réservés

voisine à l'amont de la condition limite. Une description détaillée de ces conditions limites est présentée dans la Section 3.2.3.7 du Chapitre 3.

L'écoulement de proche paroi est simulé à l'aide de la loi de parois « Standard » proposée par B. Launder et Spalding (1974) et présenté dans le Chapitre 3 - Section 3.2.3.7. Le champ de vitesse est définit par l'Eq. 3.51 ; l'énergie cinétique turbulente k et son taux de dissipation ϵ sont définis par les Eq. 3.54-3.55 et l'Eq. 3.56, respectivement.

L'énergie cinétique turbulente k et le taux de dissipation de l'énergie cinétique turbulente ϵ au niveau de la condition limite sont définis respectivement selon les Eqs. 3.60 3.62.

La conduite est initialement remplie d'eau selon la hauteur d'eau de la condition d'entrée. Le profil de pression dans l'ensemble de l'ouvrage est égal aux profil hydrostatique en fonction du fluide (i.e. l'air et l'eau). Le champ de vitesses est initialisé égal à zero dans l'ensemble du modèle et l'énergie k et sa dissipation ϵ sont définies selon les Eqs. 3.60-3.62, respectivement.

D.2.2.4 La campagne de simulation

La conduite est initialement simulée pour le débit minimum jusqu'au obtenir un résultat convergé, selon les critères du Tableau D.3. Ensuite, un débit plus élevé est simulé en partant de la solution convergée précédente jusqu'au attendre à nouveau la convergence. Cette procédure est répétée jusqu'à attendre le débit maximum. Les débits d'entrée D_E minimum et maximum simulés sont respectivement 160 m^3/h et 33 000 m^3/h.

L'ensemble de débits d'entrée est simulé avec la maillage intermédiaire (i.e. la résolution N°2). Ensuite, les champs des vitesses, des contraintes de Reynolds, de la pression et de la fraction volumique sont interpolés dans les maillages grossier et fin (i.e. les résolutions N°1 et N°3, respectivement) afin de diminuer le temps de calcul pour atteindre la convergence. Cette méthodologie d'interpolation est réalisée pour certains débits d'entrée afin (i) de vérifier l'indépendant au maillage et (i) de quantifier l'incertitude liée au maillage et à la solution approchée.

D.2.3 Le post-traitement

La convergence des résultats numériques est évaluée selon les critères de la Section D.2.3.1. Ensuite, l'incertitude liée au maillage et à la solution approchée est calculée comme indiqué dans la Section D.2.3.2. Enfin, le débit est calculé en fonction de la hauteur d'eau et des caractéristiques de la conduite, selon la formule de Gauckler-Manning-Strickler (Eq. D.1).

D.2.3.1 Critères de convergence

Chaque simulation est jugée convergé selon les seuils du bilan de masse présentés dans le Tableau D.3. La conservation globale de la masse E_D correspond à la somme du flux massique de la phase liquide (i.e. $\alpha_\mathrm{eau} \geq 0.5$) d'entrée et sortie. La valeur moyenne $\overline{E_\mathrm{D}}$, l'écart-type σ_x et le coefficient de variation CV $= \sigma_x/\overline{x}$ sont calculés à l'aide des $N = 2000$ dernières itérations avec un intervalle d'échantillonnage $\Delta N = 100$.

	$\overline{E_\mathrm{D}}/D_\mathrm{E}$	CV	σ_x/D_E
Globale	5%	0.1	2.5%
Sortie	-	0.1	2.5%

Tableau D.3 – Les critères de convergence sur le bilan de masse du modèle numérique 3D de la conduite amont du déversoir d'orage « Gambetta ».

D.2.3.2 L'incertitude liée au maillage modifiée

L'incertitude liée au maillage et à la solution approchée obtenue par calcul itératif est évaluée selon l'approche présenté dans le Chapitre 3 - Section 3.2.3.11. L'incertitude due au maillage (i.e. la discrétisation

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2020LYSEI083/these.pdf
© [A. Claro Barreto], [2020], INSA Lyon, tous droits réservés

spatiale) est évaluée à l'aide du critère GCI (ASME 2008). L'incertitude due à la solution approchée est estimée en prenant en compte la distribution de probabilité des résultats numériques.

Le résultat final (i.e. le débit de sortie) pour chaque débit d'entrée D_E correspond à la solution extrapolée du maillage fin ϕ_{ext}^{21} ou à la solution obtenue avec le maillage intermédiaire ϕ_2. La solution extrapolée ϕ_{ext}^{21} est utilisée si l'on dispose d'une solution pour chacun des 3 maillages utilisés.

L'incertitude liée au maillage modifiée σ_{GCI} est égale à $\sigma_{\phi_{ext}^{21}}$ ou la valeur maximale entre CV_2 et $\overline{CV}_{GCI}$, selon le nombre de maillages utilisés pour un D_E donnée. Les CV_2 et $\overline{CV}_{GCI}$ correspondent au coefficient de variation (CV) de la solution ϕ_2 (i.e. le maillage intermédiaire) et au CV moyen de tous les ϕ_{ext}^{21}, respectivement.

D.2.4 L'incertitude élargie selon la méthode GUM

La méthode GUM (ISO/IEC Guide 98-1 2009), déjà présentée dans le Chapitre 2 - Section 4.2.5, est utilisée afin d'estimer l'écart-type $u_c(y)$ et l'incertitude élargie $U(y) = 2u_c(y)$ - à l'intervalle de confiance à 95% - de l'approximation par moindres carrés d'une variable dépendante y.

D.2.4.1 La formule de Gauckler-Manning-Strickler

La formule de Gauckler-Manning-Strickler (GMS) permet de calculer le débit moyen $\overline{D} \equiv y$ dans une section de contrôle si la hauteur d'eau $H \equiv x$ au niveau de la section transversale est égale à la hauteur normale H_N. La formule GMS est définie comme

$$\overline{D} = f(K_s, A, R_h, I) = K_s\, A(x)\, R_h(x)^{2/3}\, I^{1/2}, \tag{D.1}$$

avec K_s le coefficient de rugosité de Strickler ($m^{1/3}/s$), $I^{1/2}$ la pente géométrique de la conduite, $A(x)$ la surface mouillée et $R_h(x)$ le rayon hydraulique de la section de contrôle.

La surface mouillée $A(x)$ et le rayon hydraulique $R_h(x)$ sont approximés par un polynôme d'ordre 4 (voir les Eqs. 2.5 et 2.6).

Les dérivées partielles de la formule GMS sont

$$\frac{\partial f}{\partial K_s} = A(x)\, R_h^{2/3}(x)\, I^{1/2} \tag{D.2}$$

$$\frac{\partial f}{\partial A(x)} = K_s\, R_h^{2/3}(x)\, I^{1/2} \tag{D.3}$$

$$\frac{\partial f}{\partial R_h(x)} = \frac{2}{3} K_s\, R_h^{-1/3}(x)\, I^{1/2} \tag{D.4}$$

$$\frac{\partial f}{\partial I} = \frac{1}{2} K_s\, R_h^{-1/3}(x)\, I^{-1/2} \tag{D.5}$$

L'écart-type de la pente I est définie par la précision la mesure, $u(I) = 0.01/\sqrt{3}$. L'écart-type de la surface mouillée $u(A(x))$ et du rayon hydraulique $u(R_h(x))$ sont calculés selon l'Eq. 2.18. L'écart-type du coefficient de rugosité de Strickler $u(K_s)$ est calculé par l'Eq. 2.16. La covariance des paramètres de la fonction f est définie par l'Eq. 2.17.

D.3 Vérification et Incertitude du modèle numérique 3D

D.3.1 Vérification : La conservation de la masse

La convergence pour tous les débits simulés dans tous les maillages est jugée atteint vis-à-vis des critères de convergence (Tableau D.3). L'erreur relative E_D/D_E est comprise dans l'intervalle de $\pm 5\%$, indifféremment de la résolution utilisée, pour tous les débits simulés (voir Fig. D.3). Cette erreur est même dans l'intervalle à $\pm 1\%$, seuil utilisé couramment dans la littérature (e.g. Dufresne et al. 2010; Lipeme Kouyi et al. 2011, 2005). En outre, l'écart-type relatif σ_E/D_E est inférieur au seuil de 2.5% pour tous les débits d'entrée et les 3 résolutions utilisées (voir Fig. D.4).

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2020LYSEI083/these.pdf
© [A. Claro Barreto], [2020], INSA Lyon, tous droits réservés

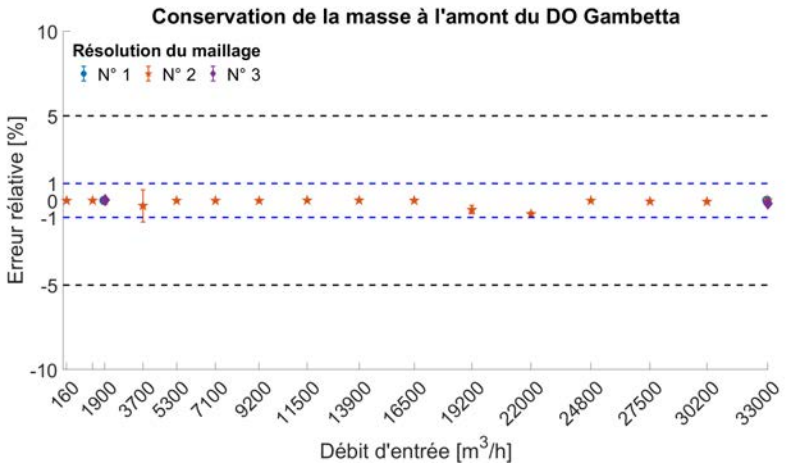


Figure D.3 – L'erreur relative (E_X/X) de la conservation de la masse (E_D) en fonction du débit à l'amont du DO « Gambetta ».

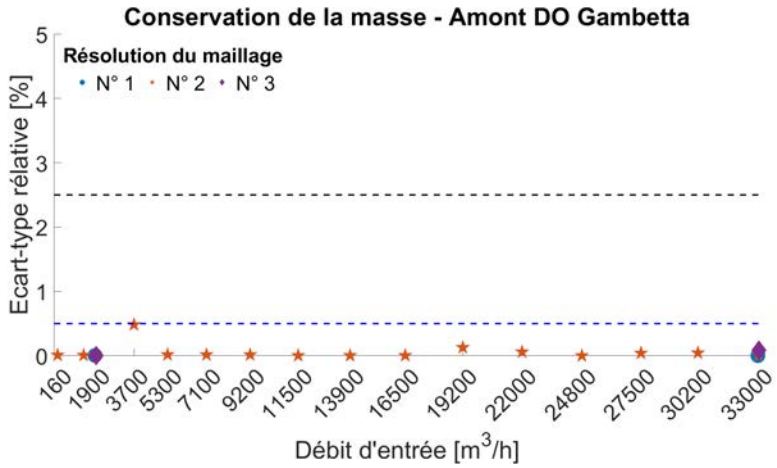


Figure D.4 – L'écart-type relatif (σ_X/X) de la conservation de la masse (E_D) en fonction du débit à l'amont du DO « Gambetta » D_E.

D.3.2 L'incertitude liée au maillage - Critère GCI

L'incertitude des résultats numériques varie entre 0.0716 m^3/h à 1.5213 m^3/h pour les débits nominaux d'entrée de 1 900 m^3/h et 33 000 m^3/h, respectivement. Cette incertitude est maximale pour le maillage intermédiaire et le débit 1 930 m^3/h, $\mathrm{GCI}_{32} = 1.60\%$ (voir le Tableau D.4). Le pourcentage de non-oscillation P_NO pour ces deux débits est égal à 100% car les intervalles de confiance à 95% des 3 maillages ne se chevauchent pas et ils ont une tendance croissante : $\phi_{3-\mathrm{Grossier}} < \phi_{2-\mathrm{Intermdiaire}} < \phi_{1-\mathrm{Fin}}$ (voir Fig. D.5).

La hauteur d'eau et le débit, pour l'ensemble des résultats numériques, sont présentés dans le Tableau D.5. L'écart-type sur le débit D_Amont est calculé selon la procédure GCI (Section D.2.3.2. La dispersion liée aux itérations est inférieure que la dispersion liée au maillage (i.e. $\sigma_\mathrm{iter} < \sigma_\mathrm{GCI}$) pour la plupart des résultats numériques avec la résolution N°2, la méthode de calcul de l'écart-type σ est du type « Global ».

La dispersion $\sigma_\mathrm{iter} > \sigma_\mathrm{GCI}$ seulement pour les débits d'entrée $D_\mathrm{E} = 19\,274$ m^3/h et $D_\mathrm{E} = 22\,105$ m^3/h, valeurs en rouge du Tableau D.5. Ces deux résultats numériques sont jugés aberrants, car la hauteur d'eau obtenue $\overline{H}_\mathrm{Amont}$ est supérieure à la hauteur critique H_C du canal à pente forte (i.e. $I_\mathrm{radier} > I_C$) et sans influence aval. En outre, ces simulations n'ont pas encore convergé parce qu'elles ont des coefficients de variation $\sigma_{D_\mathrm{Amont}}/\overline{D}_\mathrm{Amont}$ très élevés. Pourtant, la conservation de la masse est respectée pour ces résul-

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2020LYSEI083/these.pdf
© [A. Claro Barreto], [2020], INSA Lyon, tous droits réservés

Débit nominal $[m^3/h]$	1 900		33 000	
	GCI_{32}	GCI_{21}	GCI_{32}	GCI_{21}
Moyenne	0	0	0	0
Ecart-type (%)	1,60	1,00	0,06	0,03
	ϕ_{ext}^{32}	ϕ_{ext}^{21}	ϕ_{ext}^{32}	ϕ_{ext}^{21}
Moyenne (m^3/h)	1 930		33 004	
Ecart-type (m^3/h)	0,07		1,52	

Tableau D.4 – Le GCI et la solution extrapolée $\phi_{\text{ext}^{ij}}$ moyens et ses écart-types pour les maillages intermédiaire (Résolution N°2 - GCI_{32} et ϕ_{ext}^{32}) et fin (Résolution N°3 - GCI_{21} et ϕ_{ext}^{21}) en fonction du débit à l'amont du déversoir d'orage « Gambetta ».

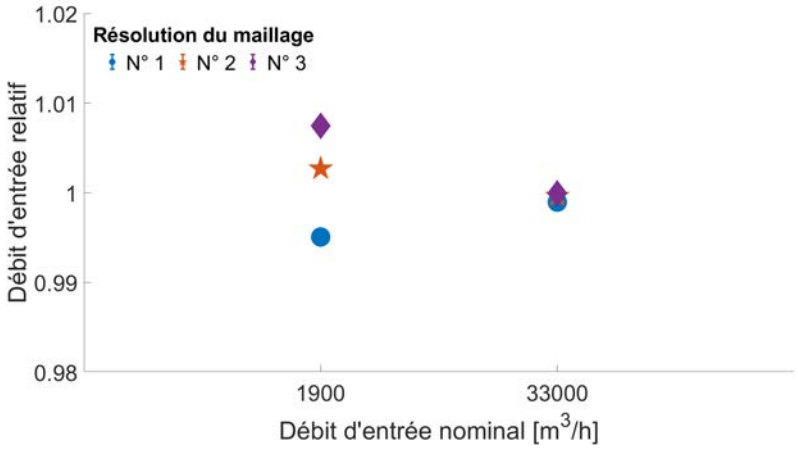


Figure D.5 – Le débit d'entrée relatif (D_E/D_N) en fonction du débit d'entrée nominale D_N à l'amont du déversoir d'orage « Gambetta ».

tats ($E_D/D_E < 1\%$, voir Fig. D.3).

Le coefficient de variation $CV_{95\%}$ du débit D_{Amont} varie entre 0.0074% et 0.0092%, avec $\overline{CV_{95\%}} = 0.0084\% \pm 0.0008\%$. La Fig. D.6 présente le $CV_{95\%}$ du débit D_{Amont} pour l'ensemble des simulation numériques. Les valeurs élevées du coefficient de variation $CV_{95\%}$ des résultats numériques aberrants sont dues à la dispersion $\sigma_{\text{iter}} > \sigma_{\text{GCI}}$.

D.4 Résultat : La loi Hauteur-Débit

La vérification de la convergence et le calcul de l'incertitude des résultats numériques permettent d'établir la loi de fonctionnement hydraulique de la conduite amont du déversoir d'orage (DO) « Gambetta ». Pour rappel, la conduite amont du DO « Gambetta » est étudiée afin de définir la gamme du débit d'entrée du modèle numérique du DO « Gambetta ».

Les valeurs moyennes et les écart-types numériques obtenus au niveau de la section de contrôle, indiqués dans le Tableau D.5, sont utilisés pour définir une loi qui relie le débit $D_{\text{Amont}} \equiv D_E$ à la hauteur d'eau H_{Amont}. La hauteur H_{Amont} est mesurée dans la section de contrôle à l'amont du DO « Gambetta ». La formule de Gauckler-Manning-Strickle (GMS) est utilisée pour représenter cette relation entre la hauteur d'eau H_{Amont} et le débit $D_{\text{Amont}} \equiv D_E$ au niveau de la section de contrôle.

La formule GMS est choisie parce que l'écoulement dans la conduite est permanent et uniforme. L'étude hydraulique 1D du Chapitre 2 a montré que la conduite ne présente pas une influence aval, car le ressaut hydraulique crée par la vanne à l'aval de la chambre du DO « Gambetta » n'arrive pas à remonter jusqu'à la condition de sortie du modèle numérique de l'amont du DO « Gambetta ». La pente *in-situ* de la conduite

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2020LYSEI083/these.pdf
© [A. Claro Barreto], [2020], INSA Lyon, tous droits réservés

$\overline{H}_{\text{Amont}}$ (m)	$\sigma_{H_{\text{Amont}}}$ (m) x10^{-7}	$\overline{D}_{\text{Amont}}$ (m^3/h)	$\sigma_{D_{\text{Amont}}}$ (m^3/h) x10^{-3}	Type σ
0,095	6	153	6	Global
0,302	111	1368	60	Local
0,385	72	1929	72	GCI
0,509	55	3697	154	Global
0,613	9	5274	219	Global
0,717	1	7084	295	Global
0,820	4	9128	380	Global
0,923	1	11375	473	Global
1,026	1	13804	574	Global
1,129	2	16385	681	Global
1,514	804661	19274	110138	Local
1,980	1137593	22105	73509	Local
1,436	8	24670	1026	Global
1,538	65	27446	1141	Global
1,641	77	30107	1252	Global
1,747	629	33004	1521	GCI

Tableau D.5 – La hauteur d'eau moyenne avec son écart-type et le débit d'entrée moyen ($\overline{\phi_{\text{ext}}^{21}}$ si Type σ est «GCI» sinon $\overline{\phi_2}$) avec son écart-type au niveau de la section de contrôle à l'amont du DO «Gambetta». Les valeurs en rouge correspondent à des résultats numériques incorrectes.

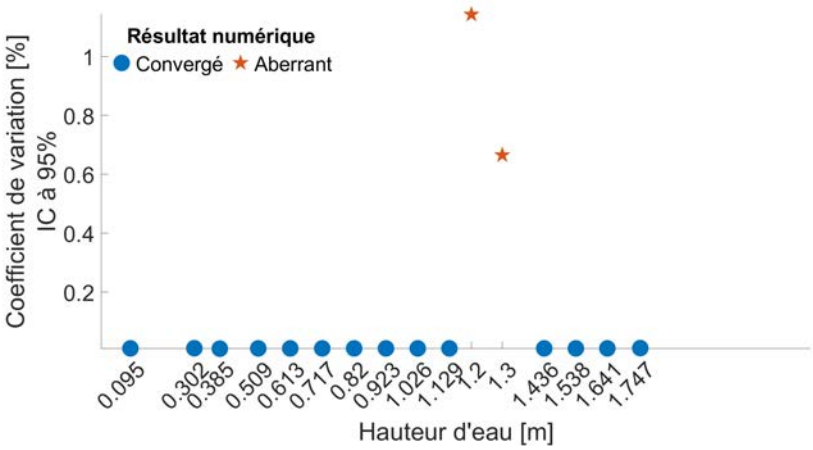


Figure D.6 – Le coefficient de variation à l'intervalle de confiance au 95% $\left(CV_{95\%} = k * u_c(X)/X \text{ avec } k = 2\right)$ du débit à l'amont du DO «Gambetta» (D_{Amont}) en fonction de la hauteur d'eau au niveau de la section de contrôle (H_{Amont}).

ovoïde ($I_{\text{Amont}} = 1,3\%$, canal à pente forte) permet de supposer un écoulement torrentiel et une hauteur d'eau H_{Amont} égale à la hauteur normal H_N, si la hauteur d'eau est comprise entre 0.100 m et 1.700 m.

Le seul paramètre à calibrer dans la formule GMS correspond au coefficient de rugosité de Strickler K_s $\left[m^{1/3}/s\right]$ car tous les paramètres géométriques (i.e. la surface mouillée, le rayon hydraulique et la pente du radier) de la conduite ovoïde sont connus à l'avance. La surface mouillé A_{Amont} et le rayon hydraulique $R_{h_{\text{Amont}}}$ sont calculées selon les Eqs. 2.5-2.6, respectivement.

La Fig. D.7 présente (i) les valeurs moyennes des couples $D_{\text{E}} - H_{\text{Amont}}$ obtenus numériquement après application de l'approche GCI (Tableau D.5) et (ii) la formule GMS calée sur ces valeur numériques (hors les résultats aberrants). Les intervalles de confiance à 95% des données numériques ne sont pas présentés afin de rendre la Fig. D.7 plus lisible. Le coefficient de variation du débit d'entrée D_{E} est $CV_{95\%} \approx$

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2020LYSEI083/these.pdf
© [A. Claro Barreto], [2020], INSA Lyon, tous droits réservés

$0,0084\% \pm 0,0008\%$.

Le coefficient de rugosité de Strickler K_s obtenu est égal à 70.99 ± 1.99 m$^{1/3}$/s. La rugosité obtenue correspond (i) à une paroi en béton en état entre bon ($K_s = 85$ m$^{1/3}$/s) et moyen ($K_s = 65$ m$^{1/3}$/s) selon Chow (1959 - d'après Hager 2010) ou (ii) à une paroi en béton avec plâtre de ciment lisse intact ($K_s \in [80 - 90]$ m$^{1/3}$/s) ou sans crépi ($K_s \in [65 - 70]$ m$^{1/3}$/s) selon Naudascher (1987 - d'après Hager 2010). Le coefficient de rugosité issue du calage montre que le modèle numérique 3D a bien reproduit le comportement hydraulique de l'ouvrage en régime permanent parce que les parois de la conduite ovoïde *in-situ* sont en béton principalement lisse.

L'incertitude-type élargie relative à 95% du débit, $U(X)/X = k_{\text{GUM}} \dot{u}_c(X)/X$ avec $k_{\text{GUM}} = 2$, en fonction de la hauteur d'eau au niveau de la section de contrôle est présentée dans la Fig. D.8. Cette incertitude est maximale vers les fiables hauteurs d'eau ($U(X)/X \approx 6,3\%$) et sa valeur minimale est $U(X)/X \approx 5,1\%$ dans l'intervalle $H_{\text{Amont}} \in [0,05 - 1,70]$ m. A noter que, depuis l'année 2011, les valeurs minimale et maximale de la hauteur d'eau H_{Amont} sont 0.064 m et 1.485 m, respectivement. La sonde hauteur d'eau *in-situ* permet ainsi de calculer le débit à l'amont du DO « Gambetta » avec une incertitude élargie relative d'environ 6.1% dans l'intervalle $H_{\text{Amont}} \in [0,05 - 1,70]$ m.

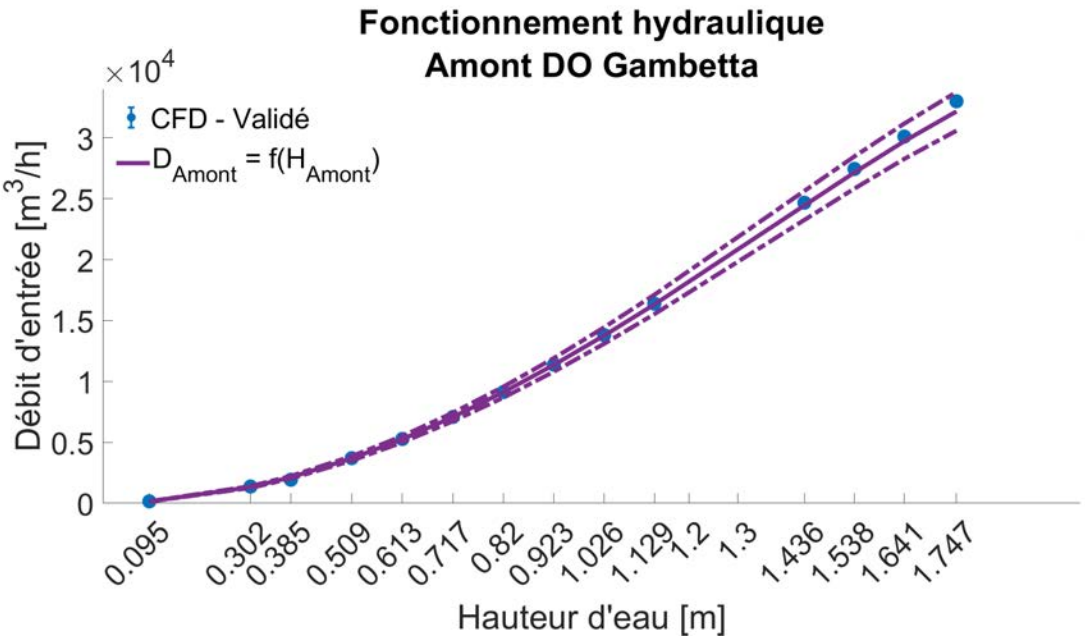


Figure D.7 – Le débit à l'amont du déversoir d'orage « Gambetta » (D_{E}) en fonction de la hauteur d'eau au niveau de la section de contrôle (H_{Amont}).

D.5 Conclusion

Le modèle 3D la conduite amont du déversoir d'orage (DO) « Gambetta » a permis de spécifier la gamme du débit d'entrée du DO *in-situ*. La loi de fonctionnement hydraulique « Hauteur-Débit » de la conduite est basée sur la formule de Gauckler-Manning-Strickler (GMS) grâce à l'étude hydraulique du Chapitre 2 et les caractéristiques *in-situ*. Le coefficient de rugosité de Strickler de la formule GMS obtenu numériquement est similaire au type de paroi *in-situ*.

La loi de fonctionnement hydraulique obtenue pour cette conduite permet au service d'assainissement de la ville de Valence de connaître le débit en temps sec et temps de pluie à l'aide du capteur de hauteur d'eau *in-situ* déjà installé. L'incertitude de cette loi de fonctionnement est inférieure à celle observée pour le couplage « Hauteur-Vitesse » généralement utilisé en réseau d'assainissement (Bertrand-Krajewski et al. 2000 ; Joannis et al. 2009).

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2020LYSEI083/these.pdf
© [A. Claro Barreto], [2020], INSA Lyon, tous droits réservés

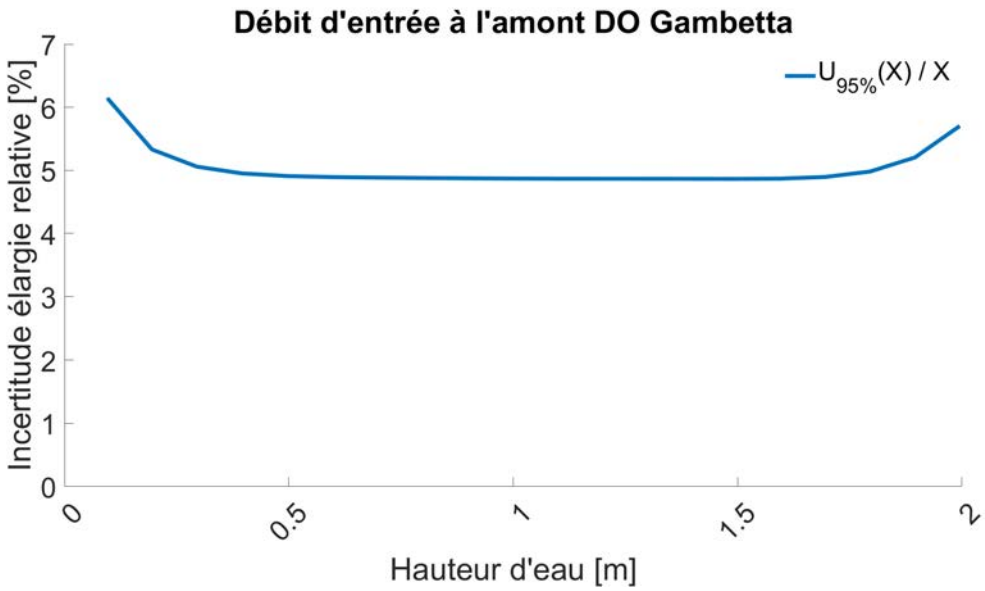


Figure D.8 – L'incertitude élargie relative $\left(U_{95\%}(X)/X\right)$ du débit d'entrée $D_{\text{Amont}} \equiv D_{\text{E}}$ en fonction de la hauteur d'eau au niveau de la section de contrôle H_{Amont}.

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2020LYSEI083/these.pdf
© [A. Claro Barreto], [2020], INSA Lyon, tous droits réservés

Les probabilités d'oscillation du modèle numérique du déversoir d'orage « Gambetta »

La probabilité de non oscillation P_{NO} (Eq. 3.74) pour les débits déversés en fonction du débit d'entrée D_{E} du modèle numérique 3D du déversoir d'orage « Gambetta » est présenté dans le Tableau E.1. Les probabilités P_{NO} obtenues sont en accord avec les intervalles de confiance (IC) à 95% des débits déversé relatifs $(D_{\text{i}}/D_{\text{E}})$ des conduites de décharge « Droit » D_{D} (Fig. E.1a) et « Gauche » D_{G} (Fig. E.1b). La probabilité P_{NO} est nulle pour le débit d'entrée à 6000 m^3/h de la conduite « Gauche », car l'IC de la résolution « N°2 » ne se chevauche pas avec les deux autres (voir la Fig. E.1b).

Débit déversé	**Débit d'entrée** $\left[m^3/h\right]$				
	3000	4000	5000	6000	7000
Droit	15,2	11,1	21,6	20,8	24,3
Gauche	25,0	2,5	2,3	0,0	1,3
Total	14,5	0,5	3,3	0,0	2,9

Tableau E.1 – La probabilité de non-oscillation P_{NO} en (%) selon la procédure GCI en fonction du débit d'entrée et du débit déversé.

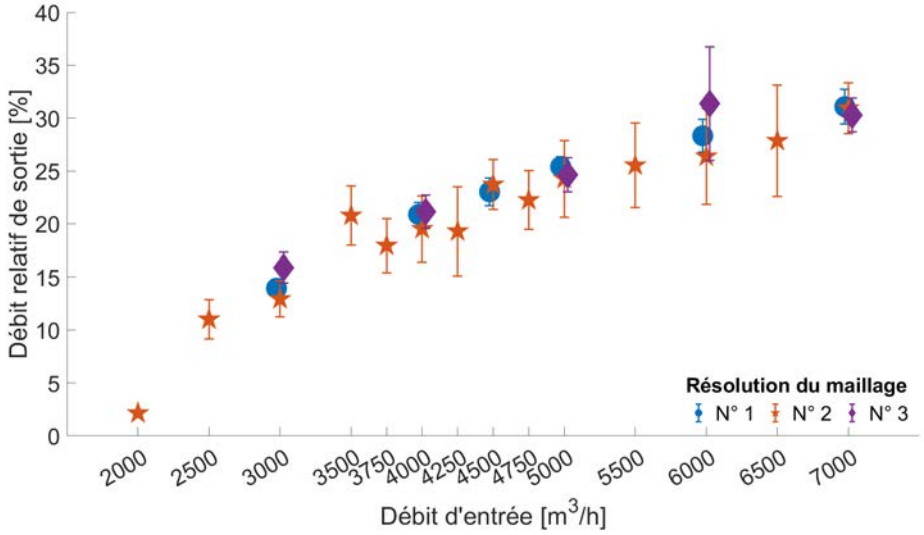
L'ensemble des probabilités P_{NO} dans la sortie « Gauche » sont plus faibles par rapport à la sortie « Droit ». Ceci est expliqué, en partie, par la localisation des intervalles de confiance (i.e. valeur moyenne et l'écart-type) entre les trois maillages utilisés. Par exemple, en prenant en compte le débit d'entrée égal à 3000 m^3/h, la probabilité que le débit déversé avec la résolution « N°3 » soit inférieur aux deux autres résolutions est plus faible dans la sortie « Droit » que dans la sortie « Gauche ». En effet, l'intervalle de confiance obtenu avec la résolution « N°3 » (diamond violet) pour la sortie « Droit » est presque toujours supérieur que les IC des résolutions « N°1 » et « N°2 » (cercle bleu et étoile rouge, respectivement - Fig. E.1a). Tandis que l'intervalle de confiance avec la résolution « N°3 » pour la sortie « Gauche » (Fig. E.1b) se chevauche avec les deux autres résolutions.

Débit déversé	**Débit d'entrée** $\left[m^3/h\right]$				
	3000	4000	5000	6000	7000
Droit	45,6	33,3	64,9	62,5	73,0
Gauche	75,0	7,5	6,9	0,0	3,9
Total	43,5	1,5	9,9	0,0	8,7

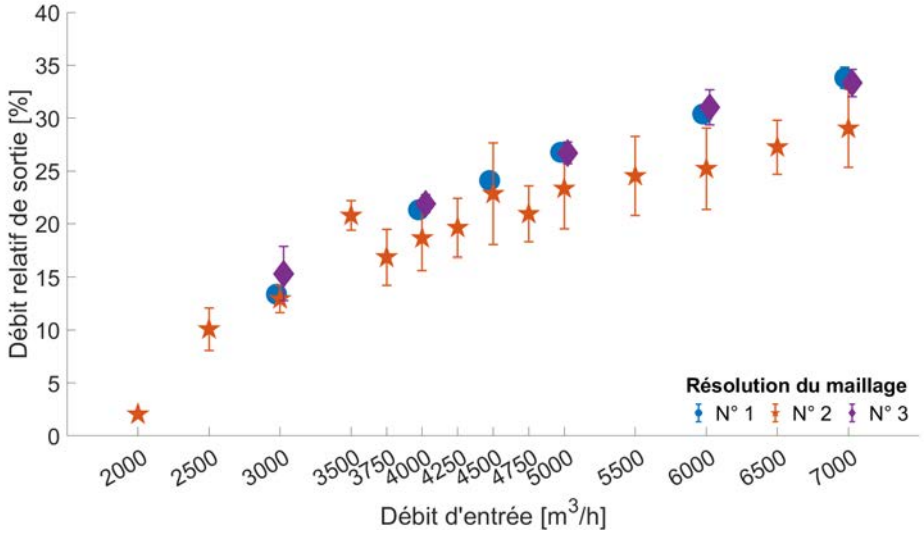
Tableau E.2 – La probabilité de non-oscillation relative $\hat{P}_{\text{NO}}$ en (%) selon la procédure GCI en fonction du débit d'entrée et du débit déversé.

Les probabilités de non-oscillation P_{NO} présentées dans le Tableau E.1 doivent être comparées à la probabilité de non-oscillation théorique $\left(P_{\text{NO,T}} \approx 33,3\%\right)$ à l'aide de la probabilité de non-oscillation relative $\hat{P}_{\text{NO}} = P_{\text{NO}}/P_{\text{NO,T}}$. La probabilité de non-oscillation théorique $P_{\text{NO,T}}$ correspond à la probabilité que $x_1 > x_2 > x_3$, avec $x_i \sim \mathcal{N}\left(\mu, \sigma^2\right)$. La probabilité relative ($\hat{P}_{\text{NO}}$) est présentée dans le Tableau

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2020LYSEI083/these.pdf
© [A. Claro Barreto], [2020], INSA Lyon, tous droits réservés



(a) Débit déversé - Conduite « Droit »



(b) Débit déversé - Conduite « Gauche »

Figure E.1 – Le débit déversé relatif D_i/D_E dans les conduites de décharge « Droit » D_D et « Gauche » D_G en fonction du débit d'entrée D_E dans le DO « Gambetta ».

E.2. Les probabilités P_{NO} plus élevées dans la sortie « Droit » par rapport à la sortie « Gauche » sont dues principalement aux pourcentages de chevauchement des IC à 95% et la tendance (i.e. croissante ou décroissante) de la valeur moyenne des débits déversés.

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2020LYSEI083/these.pdf
© [A. Claro Barreto], [2020], INSA Lyon, tous droits réservés

Base de données des campagnes de mesure du flux de pollution du déversoir d'orage « Gambetta »

L'ensemble des mesures réalisées dans le cadre du présent projet de recherche afin d'évaluer le flux de pollution déversé par le déversoir d'orage « Gambetta » en temps de pluie est présenté dans les tableaux ci-dessous.

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2020LYSEI083/these.pdf
© [A. Claro Barreto], [2020], INSA Lyon, tous droits réservés

Campagne de mesure du 2018/10/29

	Amont						Aval					
Heure	MES	MVS	COT	DCO	DBO5	Turb.	MES	MVS	COT	DCO	DBO5	Turb.
	mg/L		mg/L	mg O_2/L		NTU	mg/L		mg/L	mg O_2/L		NTU
10:41			22 (2.2)	163 (16.3)	27 (2.7)							
10:57			16 (1.6)	118 (11.8)	26 (2.6)							
11:11			22 (2.2)	117 (11.7)	43 (4.3)							
11:22			26 (2.6)	183 (18.3)	21 (2.1)							
11:33			35 (3.5)	170 (17.0)	34 (3.4)							
11:52			39 (3.9)	195 (19.5	46 (4.6)				50 (5.0)	337 (33.7)	46 (4.6)	
12:01			48 (4.8)	240 (24.0)	43 (4.3)				43 (4.3)	538 (53.8)	53 (5.3)	
14:56							77 (7.7)	56 (5.6)				
15:19							79 (7.9)	65 (6.5)				
15:24	78 (7.8)	55 (5.5)										
15:34	74 (7.4)	58 (5.8)										
15:45	73 (7.3)	50 (5.0)										
15:55							604 (60.4)	373 (37.3)				
16:16	190 (19.0)	122 (12.2)					374 (37.4)	229 (22.9)				
16:20	131 (13.1)	85 (8.5)										
16:48	172 (17.2)	116 (11.6)										
17:11	140 (14.0)	92 (9.2)										
19:01	89 (8.9)	72 (7.2)										

Tableau F.1 – Moyen et écart-type (entre parenthèses) des différents paramètres physico-chimiques des échantillons collectés à l'amont et à l'aval du déversoir d'orage « Gambetta ». Événement pluvieux du 2018/10/29.

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2020LYSEI083/these.pdf
© [A. Claro Barreto], [2020], INSA Lyon, tous droits réservés

Campagne de mesure du 2018/10/29

	Gauche						Droit					
Heure	MES	MVS	COT	DCO	DBO5	Turb.	MES	MVS	COT	DCO	DBO5	Turb.
	mg/L		mg/L	mg O_2/L		NTU	mg/L		mg/L	mg O_2/L		NTU
10:11									17 (1.7)	78 (7.8)	8 (0.8)	
10:41									24 (2.4)	145 (14.5)	38 (3.8)	
10:57									18 (1.8)	135 (13.5)	30 (3.0)	
11:11									22 (2.2)	113 (11.3)	25 (2.5)	
11:22										121 (12.1)		
11:33									29 (2.9)	160 (16.0)	39 (3.9)	
11:52									38 (3.8)	183 (18.3)	46 (4.6)	
12:01									47 (4.7)	145 (14.5)	49 (4.9)	
14:56							77 (7.7)					
15:19							79 (7.9)					
15:55							604 (60.4)					
16:16							374 (37.4)					
17:11							132 (13.2)	96 (9.6)				
17:42							74 (7.4)	58 (5.8)				
17:50							146 (14.6)	90 (9.0)				
18:33							75 (8.0)	56 (8.7)				
19:26							27 (2.7)	18 (1.8)				

Tableau F.2 – Moyen et écart-type (entre parenthèses) des différents paramètres physico-chimiques des échantillons collectés dans les conduites de décharge « Gauche » et « Droite » du déversoir d'orage « Gambetta ». Événement pluvieux du 2018/10/29.

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2020LYSEI083/these.pdf
© [A. Claro Barreto], [2020], INSA Lyon, tous droits réservés

Campagne de mesure du 2018/11/06

	Amont						Aval					
Heure	MES	MVS	COT	DCO	DBO5	Turb.	MES	MVS	COT	DCO	DBO5	Turb.
	mg/L		mg/L	mg O_2/L		NTU	mg/L		mg/L	mg O_2/L		NTU
10:27	211	74	20	123	14							
	(21.1)	(7.4)	(2.0)	(1.4)	(1.4)							
10:43	127	22	26	103	13	323						
	(12.7)	(2.2)	(2.6)	(2.8)	(1.3)	(32.3)						
10:54	77	27	18	107	15							
	(7.7)	(2.7)	(1.8)	(40.2)	(1.5)							

Tableau F.3 – Moyen et écart-type (entre parenthèses) des différents paramètres physico-chimiques des échantillons collectés à l'amont et à l'aval du déversoir d'orage « Gambetta ». Événement pluvieux du 2018/11/06.

Campagne de mesure du 2018/11/06

	Gauche						Droit					
Heure	MES	MVS	COT	DCO	DBO5	Turb.	MES	MVS	COT	DCO	DBO5	Turb.
	mg/L		mg/L	mg O_2/L		NTU	mg/L		mg/L	mg O_2/L		NTU
09:03											410	228
											(41.0)	(0.3)
09:09											310	183
											(31.0)	(0.5)
09:18										930	280	132
										(93.0)	(28.0)	(0.7)
09:41										577	41	
										(57.7)	(4.1)	
10:03							156	88	270	199	55	165
							(15.6)	(8.8)	(27.0)	(19.9)	(5.5)	(0.2)
10:27							148	69	240	186	15	
							(14.8)	(6.9)	(24.0)	(18.6)	(1.5)	
10:43							148	42	200	102	16	
							(14.8)	(4.2)	(20.0)	(10.2)	(1.6)	
10:54							75	8	19	115	14	
							(7.5)	(0.8)	(1.9)	(11.5)	(1.4)	

Tableau F.4 – Moyen et écart-type (entre parenthèses) des différents paramètres physico-chimiques des échantillons collectés dans les conduites de décharge « Gauche » et « Droite » du déversoir d'orage « Gambetta ». Événement pluvieux du 2018/11/06.

Campagne de mesure du 2018/12/19

	Amont						Aval					
Heure	MES	MVS	COT	DCO	DBO5	Turb.	MES	MVS	COT	DCO	DBO5	Turb.
	mg/L		mg/L	mg O_2/L		NTU	mg/L		mg/L	mg O_2/L		NTU
13:21	284	172	20	475	15	463						
	(28.4)	(17.2)	(2.0)	(142.6)	(1.5)	(3.2)						

Tableau F.5 – Moyen et écart-type (entre parenthèses) des différents paramètres physico-chimiques des échantillons collectés à l'amont et à l'aval du déversoir d'orage « Gambetta ». Événement pluvieux du 2018/12/19.

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2020LYSEI083/these.pdf
© [A. Claro Barreto], [2020], INSA Lyon, tous droits réservés

Campagne de mesure du 2018/12/19

Heure	Gauche						Droit					
	MES	MVS	COT	DCO	DBO5	Turb.	MES	MVS	COT	DCO	DBO5	Turb.
	mg/L		mg/L	mg O_2/L		NTU	mg/L		mg/L	mg O_2/L		NTU
12:21							698 (69.8)	544 (54.4)	117 (11.7)	951 (95.1)	250 (25.0)	583 (0.4)
12:31							655 (65.5)	436 (43.6)	38 (3.8)	945 (94.5)	300 (30.0)	522 (4.7)
12:41							622 (62.2)	383 (38.3)	85 (8.5)	928 (1.2)	230 (23.0)	818 (5.0)
12:51							563 (56.3)	358 (35.8)	98 (9.8)	814 (49.0)	240 (24.0)	924 (6.9)
13:01							406 (40.6)	246 (24.6)	38 (3.8)	597 (37.2)	150 (15.0)	611 (12.6)
13:11							207 (20.7)	133 (13.3)	26 (2.6)	308 (10.1)	75 (7.5)	417 (0.7)
13:21							171 (0.6)	96 (5.8)	38 (3.8)	285 (19.3)	14 (1.4)	381 (18.7)
13:31							220 (16.3)	147 (23.0)	23 (2.3)	327 (12.7)	15 (1.5)	490 (3.4)
13:41							158 (15.8)	110 (11.0)	17 (1.7)	251 (48.8)	57 (5.7)	580 (1.3)
13:51							116 (11.6)	60 (6.0)	30 (3.0)	174 (2.8)	29 (2.9)	429 (2.9)
14:01							90 (9.0)	44 (4.4)	19 (1.9)	173 (1.9)	60 (6.0)	416 (1.1)
15:01							104 (10.4)	64 (6.4)	17 (1.7)	176 (8.2)	47 (4.7)	434 (1.5)

Tableau F.6 – Moyen et écart-type (entre parenthèses) des différents paramètres physico-chimiques des échantillons collectés dans les conduites de décharge « Gauche » et « Droite » du déversoir d'orage « Gambetta ». Événement pluvieux du 2018/12/19.

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2020LYSEI083/these.pdf
© [A. Claro Barreto], [2020], INSA Lyon, tous droits réservés

Campagne de mesure du 2019/03/07

	Gauche						Droit					
Heure	MES	MVS	COT	DCO	DBO5	Turb.	MES	MVS	COT	DCO	DBO5	Turb.
	mg/L		mg/L	mg O_2/L		NTU	mg/L		mg/L	mg O_2/L		NTU
03:48	1127	895		2068		613						
	(112)	(89.5)		(40.3)		(4.3)						
03:58	1247	991	410	2216	520	596	1178	886	350	1936	92	518
	(124)	(99.1)	(41.0)	(129.4)	(52.0)	(0.3)	(118)	(88.6)	(35.0)	(312)	(9.2)	(0.8)
04:08							1646	1227	300	2955	350	436
							(165)	(123)	(30.0)	(185)	(35.0)	(0.3)
04:28	403	308	170	685	180	247	451	335	130	753	150	216
	(40.3)	(30.8)	(17.0)	(87.3)	(18.0)	(0.4)	(45.1)	(33.5)	(13.0)	(91.7)	(15.0)	(0.1)
04:38	371	264		579			253	175	92	383	100	154
	(37.1)	(26.4)		(57.3)			(25.3)	(17.5)	(9.2)	(13.4)	(10.0)	(0.1)
04:48	231	197	71	419	110	1279	204	163	81	360	82	137
	(23.1)	(19.7)	(7.1)	(12.0)	(11.0)	(14.1)	(20.4)	(16.3)	(8.1)	(12.0)	(8.2)	(0.1)
04:58	154	147	110	413	85	123	174	130	96	440	89	156
	(15.4)	(14.7)	(11.0)	(41.3)	(8.5)	(0.9)	(17.4)	(13.0)	(9.6)	(26.2)	(8.9)	(0.1)
05:08	221	215	78	530	87	120	152	118	75	368	67	133
	(22.1)	(21.5)	(7.8)	(53.0)	(8.7)	(1.2)	(15.2)	(11.8)	(7.5)	(21.9)	(6.7)	(0.1)
05:18	150	115		285		38						
	(15.0)	(11.5)		(28.5)		(0.4)						
05:28	153	127		419								
	(15.3)	(12.7)		(41.9)								

Tableau F.7 – Moyen et écart-type (entre parenthèses) des différents paramètres physico-chimiques des échantillons collectés dans les conduites de décharge « Gauche » et « Droite » du déversoir d'orage « Gambetta ». Événement pluvieux du 2019/03/07.

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2020LYSEI083/these.pdf
© [A. Claro Barreto], [2020], INSA Lyon, tous droits réservés

Références Bibliographiques

2000/60/CE. (2000). Directive 2000/60/CE du Parlement européen et du Conseil : établissant un cadre pour une politique communautaire dans le domaine de l'eau.

Adamsson, Å., Stovin, V. R. & Bergdahl, L. (2003). Bed shear stress boundary condition for storage tank sedimentation. *Journal of Environmental Engineering*, *129*(7), 651-658.

AFNOR. (1997). *Analyse de l'eau. Lignes directrices pour le dosage du carbone organique total (TOC) et le carbone organique dissous (COD)*. NF EN1484.

AFNOR. (1998). *Qualité de l'eau - Détermination de la demande biochimique en oxygène après n jours (DBOn) : Partie 1 : méthode par dilution et ensemencement avec apport d'allylthio-urée*. NF EN 1899-1 (T90-103-1).

AFNOR. (2001). *Qualité de l'eau. Détermination de la demande chimique en oxygène (DCO)*. NF T 90-101.

AFNOR. (2005a). *Essais des eaux. Détermination des matières en suspension, par filtration.* NF T90-105.

AFNOR. (2005b). *Qualité de l'eau. Détermination des résidus à secs.* NF T90-029.

AFNOR. (2015). *Reconnaissance et essais géotechniques - Essais de laboratoire sur les sols : Partie 3 : Détermination de la masse volumique des particules solides*. Norme Française. Version NF EN ISO 17892-3.

Aghayari, F., Honar, T. & Keshavarzi, A. (2009). A study of spatial variation of discharge coefficient in broad-crested inclined side weirs. *Irrigation and Drainage : The journal of the International Commission on Irrigation and Drainage*, *58*(2), 246-254.

Ahm, M., Thorndahl, S., Nielsen, J. E. & Rasmussen, M. R. (2016). Estimation of combined sewer overflow discharge : a software sensor approach based on local water level measurements. *Water Science and Technology*, *74*(11), 2683-2696. doi :10.2166/wst.2016.361. eprint : https://iwaponline.com/wst/article-pdf/74/11/2683/457130/wst074112683.pdf

Akbari, M., Salmasi, F., Arvanaghi, H., Karbasi, M. & Farsadizadeh, D. (2019). Application of Gaussian Process Regression Model to Predict Discharge Coefficient of Gated Piano Key Weir. *Water Resources Management*, *33*(11), 3929-3947. cited By 0. doi :10.1007/s11269-019-02343-3

Ali, S. Z. & Dey, S. (2016). Mechanics of advection of suspended particles in turbulent flow. *Proceedings of the Royal Society A : Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, *472*(2195), 20160749.

Aljure, D., Calafell, J., Baez, A. & Oliva, A. (2018). Flow over a realistic car model : Wall modeled large eddy simulations assessment and unsteady effects. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, *174*, 225-240.

AMS ENVOLURE. (2018). *Manuel d'utilisation : Enverdi(R) BOD*. Version 4.

Anderson, J. D. & Wendt, J. (1995). *Computational fluid dynamics*. Springer.

ANSYS. (2015a). *ANSYS Fluent Theory Guide*. Version Release 16.0. Southpointe. Récupérée à partir de http://www.ansys.com

ANSYS. (2015b). *ANSYS Fluent User's Guide*. Version Release 16.0. Southpointe. Récupérée à partir de http://www.ansys.com

Arrêté du 21 juillet. (2015). Arrêté du 21 juillet 2015 relatif aux systèmes d'assainissement collectif et aux installations d'assainissement non collectif, à l'exception des installations d'assainissement non collectif recevant une charge brute de pollution organique inférieure ou égale à 1,2 kg/j de DBO5. Récupérée à partir de https://www.legifrance.gouv.fr/eli/arrete/2015/7/21/DEVL1429608A/jo#JORFARTI000031052834

Arrêté du 22 juin. (2007). Arrêté du 22 juin 2007 relatif à la collecte, au transport et au traitement des eaux usées des agglomérations d'assainissement ainsi qu'à la surveillance de leur fonctionnement et de leur efficacité, et aux dispositifs d'assainissement non collectif recevant une charge brute de

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2020LYSEI083/these.pdf
© [A. Claro Barreto], [2020], INSA Lyon, tous droits réservés

pollution organique supérieure à 1,2 kg/j de DBO5. Récupérée à partir de https://www.legifrance.gouv.fr/affichTexte.do?cidTexte=JORFTEXT000000276647

Arrêté du 24 août. (2017). Arrêté du 24 août 2017 modifiant l'arrêté du 21 juillet 2015 relatif aux systèmes d'assainissement collectif et aux installations d'assainissement non collectif, à l'exception des installations d'assainissement non collectif recevant une charge brute de pollution organique inférieure ou égale à 1,2 kg/j de DBO5. Récupérée, à partir de https://www.legifrance.gouv.fr/affichTexte.do?cidTexte=JORFTEXT000035607115&categorieLien=id

Ashley, R. M., Bertrand-Krajewski, J.-L., Hvitved-Jacobsen, T. & Verbanck, M. (2004). *Solids in sewers* (IWA Publishing, Éd.).

ASME. (2008). Procedure for Estimation and Reporting of Uncertainty Due to Discretization in CFD Applications. *Journal of Fluids Engineering*, *130*(7), 4. doi :10.1115/1.2960953

Averill, D., Mack-Mumford, D., Marsalek, J., Andoh, R. & Weatherbe, D. (1997). Field facility for research and demonstration of SCO treatment technologies. *Water science and technology*, *36*(8-9), 391-396.

Aydin, M. C. (2012). CFD simulation of free-surface flow over triangular labyrinth side weir. *Advances in Engineering Software*, *45*(1), 159-166.

Aydin, M. C. & Emiroglu, M. E. (2013). Determination of capacity of labyrinth side weir by CFD. *Flow Measurement and Instrumentation*, *29*, 1-8.

Azamathulla, H., Haghiabi, A. & Parsaie, A. (2016). Prediction of side weir discharge coefficient by support vector machine technique. *Water Science and Technology : Water Supply*, *16*(4), 1002-1016. cited By 41. doi :10.2166/ws.2016.014

Azimi, H., Shabanlou, S. & Kardar, S. (2018). Turbulent flow in the vicinity of side weirs in subcritical conditions. *Mathematical Models and Computer Simulations*, *10*(6), 784-797.

Azimi, H., Shabanlou, S. & Salimi, M. S. (2014). Free surface and velocity field in a circular channel along the side weir in supercritical flow conditions. *Flow Measurement and Instrumentation*, *38*, 108-115.

Bagheri, S. & Heidarpour, M. (2012). Characteristics of flow over rectangular sharp-crested side weirs. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, *138*(6), 541-547.

Bagnold, R. A. (1966). *An approach to the sediment transport problem from general physics*. US government printing office.

Balachandar, S. & Eaton, J. K. (2010). Turbulent dispersed multiphase flow. *Annual review of fluid mechanics*, *42*, 111-133.

Balouchi, B. & Rakhshandehroo, G. (2018). Using Physical and Soft Computing Models to Evaluate Discharge Coefficient for Combined Weir–Gate Structures Under Free Flow Conditions. *Iranian Journal of Science and Technology - Transactions of Civil Engineering*, *42*(4), 427-438. cited By 2. doi :10.1007/s40996-018-0117-0

Batchelor, G. (2000). *An introduction to fluid dynamics*. Cambridge university press.

Beckers, L.-M., Busch, W., Krauss, M., Schulze, T. & Brack, W. (2018). Characterization and risk assessment of seasonal and weather dynamics in organic pollutant mixtures from discharge of a separate sewer system. *Water research*, *135*, 122-133.

Becouze-Lareure, C., Thiebaud, L., Bazin, C., Namour, P., Breil, P. & Perrodin, Y. (2016). Dynamics of toxicity within different compartments of a peri-urban river subject to combined sewer overflow discharges. *Science of The Total Environment*, *539*, 503-514. doi :https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.08.128

Bennett, N. D., Croke, B. F., Guariso, G., Guillaume, J. H., Hamilton, S. H., Jakeman, A. J., … Andreassian, V. (2013). Characterising performance of environmental models. *Environmental Modelling & Software*, *40*, 1-20. doi :https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2012.09.011

Bersinger, T., Le Hécho, I., Bareille, G. & Pigot, T. (2015). Assessment of erosion and sedimentation dynamic in a combined sewer network using online turbidity monitoring. *Water Science and Technology*, *72*(8), 1375-1382. doi :10.2166/wst.2015.350. eprint : https://iwaponline.com/wst/article-pdf/72/8/1375/466562/wst072081375.pdf

Bertrand-Krajewski, J.-L., Laplace, D., Joannis, C. & Chebbo, G. (2000). *Mesures en hydrologie urbaine et assainissement* (T. et Doc - Lavoisier, Éd.).

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2020LYSEI083/these.pdf
© [A. Claro Barreto], [2020], INSA Lyon, tous droits réservés

Bertrand-Krajewski, J.-L. & Maruéjouls, T. (2019). Estimer les flux polluants rejetés par un déversoir à partir des flux polluants mesurés en entrée de station d'épuration. *Techniques Sciences Méthodes*, *5*, 125-136.

Best, J., Bennett, S., Bridge, J. & Leeder, M. (1997). Turbulence modulation and particle velocities over flat sand beds at low transport rates. *Journal of Hydraulic Engineering*, *123*(12), 1118-1129.

Bhatnagar, P. L., Gross, E. P. & Krook, M. (1954). A model for collision processes in gases. I. Small amplitude processes in charged and neutral one-component systems. *Physical review*, *94*(3), 511.

Bilhan, O., Emiroglu, M. E. & Kisi, O. (2010). Application of two different neural network techniques to lateral outflow over rectangular side weirs located on a straight channel. *Advances in Engineering Software*, *41*(6), 831-837.

Bonakdari, H., Larrarte, F. & Bardiaux, J.-B. (2007a). Experimental and computational study of velocity fields in narrow or compound section sewers. *Water Practice and Technology*, *2*(2).

Bonakdari, H., Larrarte, F. & Bardiaux, J.-B. (2007b). Experimental and computational study of velocity fields in narrow or compound section sewers. *Water Practice and Technology*, *2*(2). doi :10.2166/wpt.2007.040. eprint : https://iwaponline.com/wpt/article-pdf/2/2/wpt2007040/130998/40.pdf

Borghei, S., Jalili, M. & Ghodsian, M. (1999). Discharge coefficient for sharp-crested side weir in subcritical flow. *Journal of Hydraulic Engineering*, *125*(10), 1051-1056.

Boussinesq, J. (1877). *Essai sur la théorie des eaux courantes*. Imprimerie Nationale. Récupérée à partir de https://fr.wikisource.org/wiki/Essai_sur_la_th%C3%A9orie_des_eaux_courantes

Braud, I., Breil, P., Thollet, F., Lagouy, M., Branger, F., Jacqueminet, C., ... Michel, K. (2013). Evidence of the impact of urbanization on the hydrological regime of a medium-sized periurban catchment in France. *Journal of hydrology*, *485*, 5-23.

Brennen, C. E. (2005). *Fundamentals of multiphase flow*. Cambridge university press.

Brent, R. P. (1973). Algorithms for Minimization without Derivatives, chap. 4. Prentice-Hall, Englewood Cliffs, NJ.

Bridoux, G., Villeroux, A., Riotte, M. & Huau, M. (1998). Optimised lamellae settling process for run off water treatment. *Water science and technology*, *38*(10), 107-114.

Broglia, R., Pascarelli, A. & Piomelli, U. (2003). Large-eddy simulations of ducts with a free surface. *Journal of Fluid Mechanics*, *484*, 223-253.

Brombach, H. & Fuchs, S. (2003). Datenpool gemessener Verschmutzungskonzentrationen in Misch-und Trennkanalisationen. *KA. Wasserwirtschaft, Abwasser, Abfall*, *50*(4), 441-450.

Brown, D. & Hutchinson, P. (1979). The interaction of solid or liquid particles and turbulent fluid flow fields—a numerical simulation.

Butler, D., Thedchanamoorthy, S. & Payne, J. (1992). Aspects of surface sediment characteristics on an urban catchment in London. *Water Science and Technology*, *25*(8), 13-19.

Carbone, M., Garofalo, G. & Piro, P. (2014). Comparison between CFD and Surface Overflow Rate Models to Predict Particulate Matter Separation in Unit Operations for Combined Sewer Overflows. *Journal of Environmental Engineering*, *140*(12), 1-11. doi :10.1061/(ASCE)EE.1943-7870.0000857.

Celik, I., Ghia, U., Roache, P. J. et al. (2008). Procedure for estimation and reporting of uncertainty due to discretization in CFD applications. *Journal of fluids {Engineering-Transactions} of the {ASME}*, *130*(7).

Celik, I., Li, J., Hu, G. & Shaffer, C. (2005). Limitations of Richardson extrapolation and some possible remedies. *Journal of Fluids Engineering*, *127*(4), 795-805.

Chanson, H. (2004). *Hydraulics of open channel flow*. Elsevier.

Chanson, H. (2012). Momentum Considerations in Hydraulic Jumps and Bores. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, *138*(4), 382-385. doi :10.1061/(ASCE)IR.1943-4774.0000409. eprint : https://ascelibrary.org/doi/pdf/10.1061/%28ASCE%29IR.1943-4774.0000409

Chebbo, G., Bachoc, A., Laplace, D. & Le Guennec, B. (1995). The transfer of solids in combined sewer networks. *Water science and technology*, *31*(7), 95-105.

Chebbo, G., Musquere, P., Milisic, V. & Bachoc, A. (1990). Characterization of solids transferred into sewer trunks during wet weather. *Water science and technology*, *22*(10-11), 231-238.

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2020LYSEI083/these.pdf
© [A. Claro Barreto], [2020], INSA Lyon, tous droits réservés

Chen, Q., Xie, P. & Chen, Q. (1979). Experiment on hydraulic characteristics of side weir. *Journal Fuzhou University*, *19*(00), 26-29.

Chen, S. & Doolen, G. D. (1998). Lattice Boltzmann method for fluid flows. *Annual review of fluid mechanics*, *30*(1), 329-364. doi :https://doi.org/10.1146/annurev.fluid.30.1.329

Chen, Z., Han, S., Zhou, F.-Y. & Wang, K. (2013). A CFD modeling approach for municipal sewer system design optimization to minimize emissions into receiving water body. *Water resources management*, *27*(7), 2053-2069.

Cheng, N.-S. & Chiew, Y.-M. (1999). Analysis of initiation of sediment suspension from bed load. *Journal of Hydraulic Engineering*, *125*(8), 855-861.

Cheong, H.-F. (1991). Discharge coefficient of lateral diversion from trapezoidal channel. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, *117*(4), 461-475.

Chocat, B. (1997a). Aménagement urbain et hydrologie. *La Houille Blanche*, (7), 12-19.

Chocat, B. (1997b). Le rôle possible de l'urbanisation dans l'aggravation du risque d'inondation : l'exemple de l'Yseron à Lyon/The potential role of urbanization in increasing the risk of flooding : the example of the Yzeron in Lyon. *Géocarrefour*, *72*(4), 273-280.

Chocat, B., Bertrand-Krajewski, J.-L. & Barraud, S. (2007). Eaux pluviales urbaines et rejets urbains par temps de pluie.

Chow, V. (1959). *Open-channel hydraulics*. McGraw-Hill New York.

Claro Barreto, A., Lipeme Kouyi, G., Krause, M. J., Nathen, P. & Rivière, N. (2017a). Large-eddy simulation coupled with wall models for turbulent channel flows at high Reynolds numbers with a Lattice Boltzmann Method. In *26th International Conference on Discrete Simulation of Fluid Dynamics*, Erlangen, Allemagne.

Claro Barreto, A., Lipeme Kouyi, G., Rivière, N. & Krause, M. J. (2017b). Validation of Large-Eddy simulation of open channel flow at high Reynolds number with a Lattice Boltzmann method. In *Proceedings of the 14th ICUD-International Conference on Urban Drainage*, Prague, République Tchèque.

Claro Barreto, A., Lipeme Kouyi, G. & Vacherie, S. (2015). Utilisation du Leaping-Weir comme dispositif de piégeage de sédiments en temps de pluie et de mesure de faibles débits. In *Rencontres Universitaires de Génie Civil*.

Claro Barreto, A., Rivière, N. & Lipeme Kouyi, G. (2016). La méthode Lattice Boltzmann couplée au modèle LES pour la simulation des écoulements à surface libre - résultats préliminaires. In *7èmes Journées Doctorales en Hydrologie Urbaine (JDHU)*, Nantes, France.

Coimbra, C., Shirolkar, J. & Queiroz McQuay, M. (1998). Modeling particle dispersion in a turbulent, multiphase mixing layer. *Journal of Wind Engineering & Industrial Aerodynamics*, *73*(1), 79-97.

Commentaire Technique de l'Arrêté du 21 juillet. (2015). Commentaire Technique de l'arrêté du 21 juillet 2015 : Partie 3 - Evaluation de la conformité réglementaire des systèmes d'assainissement.

Corson, D., Jaiman, R. & Shakib, F. (2009). Industrial application of RANS modelling : capabilities and needs. *International journal of Computational Fluid dynamics*, *23*(4), 337-347.

Coşar, A. & Agaccioglu, H. (2004). Discharge coefficient of a triangular side-weir located on a curved channel. *Journal of irrigation and drainage engineering*, *130*(5), 410-423.

De Marchi, G. (1934). Essay on the performance of lateral weirs. *L'Energia Elettrica, Milan, Italy*, *11*, 849-860.

Delporte, C., Pujol, R. & Vion, P. (1995). Optimized lamellae settling for urban stormwater waste. *Water science and technology*, *32*(1), 127.

Dey, S., Ali, S. Z. & Padhi, E. (2018). Advances in analytical modeling of suspended sediment transport. *Journal of hydro-environment research*, *20*, 110-126.

Diaz-Fierros, T. F., Puerta, J., Suarez, J. & Diaz-Fierros, V. F. (2002). Contaminant loads of CSOs at the wastewater treatment plant of a city in NW Spain. *Urban Water*, *4*(3), 291-299. doi :https://doi.org/10.1016/S1462-0758(02)00020-1

Dickenson, J. A. & Sansalone, J. J. (2009). Discrete phase model representation of particulate matter (PM) for simulating PM separation by hydrodynamic unit operations. *Environmental science & technology*, *43*(21), 8220-8226.

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2020LYSEI083/these.pdf
© [A. Claro Barreto], [2020], INSA Lyon, tous droits réservés

Dinesh Kumar, E., Sannasiraj, S. A. & Sundar, V. (2019). Lattice Boltzmann simulation of free surface flow impact on a structure. *Phys. Rev. E*, *99*, 023308. doi :10.1103/PhysRevE.99.023308

Drazin, P. G. & Riley, N. (2006). *The Navier-Stokes equations : a classification of flows and exact solutions*. Cambridge University Press.

Duchaine, F., Segui, L., De Laborderie, J., Odier, N., Dombard, J. & Gicquel, L. (2019). Large-Eddy Simulations of turbomachinery flows : from wall-resolved academic configurations to wall-modeled industrial geometries. *Bulletin of the American Physical Society*.

Dufresne, M., Terfous, A., Ghenaim, A., Poulet, J.-B. & Vazquez, J. (2010). Modélisation 3D du transport solide dans les déversoirs d'eau excédentaire. *La Houille Blanche*, (1), 90-96.

Dufresne, M., Vazquez, J., Terfous, A., Ghenaim, A. & Poulet, J.-B. (2009a). CFD modeling of solid separation in three combined sewer overflow chambers. *Journal of environmental engineering*, *135*(9), 776-787.

Dufresne, M., Vazquez, J., Terfous, A., Ghenaim, A. & Poulet, J.-B. (2009b). Experimental investigation and CFD modelling of flow, sedimentation, and solids separation in a combined sewer detention tank. *Computers & Fluids*, *38*(5), 1042-1049.

Durand, C. (2003). *Caractérisation physico-chimique des produits de l'assainissement pluvial. Origine et dévenir des métaux traces et des polluants organiques.* (Thèse de doct.).

Dutta, S., Tokyay, T. E., Cataño-Lopera, Y. A., Serafino, S. & Garcia, M. H. (2014). Application of computational fluid dynamic modelling to improve flow and grit transport in Terrence J. O'Brien Water Reclamation Plant, Chicago, Illinois. *Journal of Hydraulic Research*, *52*(6), 759-774.

Ebeling, J. M., Sibrell, P. L., Ogden, S. R. & Summerfelt, S. T. (2003). Evaluation of chemical coagulation–flocculation aids for the removal of suspended solids and phosphorus from intensive recirculating aquaculture effluent discharge. *Aquacultural Engineering*, *29*(1-2), 23-42.

Eganhouse, R. & Sherblom, P. (2001). Anthropogenic organic contaminants in the effluent of a combined sewer overflow : impact on Boston Harbor. *Marine Environmental Research*, *51*(1), 51-74.

Egis eau. (2011). *Schéma directeur de gestion et d'évacuation des eaux de la ville de Valence*. Egis Eau.

El Kadi Abderrezzak, K., Moran, A. D., Mosselman, E., Bouchard, J.-P., Habersack, H. & Aelbrecht, D. (2014). A physical, movable-bed model for non-uniform sediment transport, fluvial erosion and bank failure in rivers. *Journal of hydro-environment research*, *8*(2), 95-114.

Elghobashi, S. (1991). Particle-laden turbulent flows : direct simulation and closure models. In *Computational fluid Dynamics for the Petrochemical Process Industry* (p. 91-104). Springer.

Ellis, J. B. & Yu, W. (1995). Bacteriology of urban runoff : the combined sewer as a bacterial reactor and generator. *Water Science and Technology*, *31*(7), 303-310.

Emiroglu, M. E., Agaccioglu, H. & Kaya, N. (2011a). Discharging capacity of rectangular side weirs in straight open channels. *Flow Measurement and Instrumentation*, *22*(4), 319-330.

Emiroglu, M. E., Bilhan, O. & Kisi, O. (2011b). Neural networks for estimation of discharge capacity of triangular labyrinth side-weir located on a straight channel. *Expert Systems with Applications*, *38*(1), 867-874. doi :https://doi.org/10.1016/j.eswa.2010.07.058

Emiroglu, M. E., Kaya, N. & Agaccioglu, H. (2009). Discharge capacity of labyrinth side weir located on a straight channel. *Journal of irrigation and drainage engineering*, *136*(1), 37-46.

EPA, U. (2004). *Report to Congress on Impacts and Control of Combined Sewer Overflows and Sanitary Sewer Overflows*. Environmental Protection Agency (EPA). Récupérée à partir de https://doi.org/10.1227/01.NEU.0000028680.51299.00

Fach, S., Sitzenfrei, 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 Science and Technology*, *60*(12), 3035-3043. doi :10.2166/wst.2009.752. eprint : https://iwaponline.com/wst/article-pdf/60/12/3035/447445/3035.pdf

Fernandino, M., Beronov, K. & Ytrehus, T. (2009). Large eddy simulation of turbulent open duct flow using a lattice Boltzmann approach. *Mathematics and Computers in Simulation*, *79*(5), 1520-1526.

Ferziger, J. H. & Peric, M. (2012). *Computational methods for fluid dynamics*. Springer Science & Business Media.

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2020LYSEI083/these.pdf
© [A. Claro Barreto], [2020], INSA Lyon, tous droits réservés

Forsythe, G., Malcolm, M. & Moler, C. (1977). Computer methods for mathematical computation prentice-hall. *Englewood Cliffs, New Jersey*.

Francey, M., Deletic, A., Fletcher, T. & Duncan, H. P. (2004). Monitoring of stormwater runoff in Melbourne. In E. J. S. W. Data & I. U. W. Modelling (Éd.).

García, J. T., Espín-Leal, P., Vigueras-Rodriguez, A., Castillo, L. G., Carrillo, J. M., Martínez-Solano, P. D. & Nevado-Santos, S. (2017). Urban Runoff Characteristics in Combined Sewer Overflows (CSOs) : Analysis of Storm Events in Southeastern Spain. *Water*, *9*(5). doi :10.3390/w9050303

Garcia, M. (1999). Sedimentation and Erosion hydraulics. In M.-H. Education (Éd.), *Hydraulic Design Handbook* (Chap. 6).

Gasperi, J., Garnaud, S., Rocher, V. & Moilleron, R. (2008). Priority pollutants in wastewater and combined sewer overflow. *Science of the total environment*, *407*(1), 263-272.

Gasperi, J., Gromaire, M.-C., Kafi, M., Moilleron, R. & Chebbo, G. (2010). Contributions of wastewater, runoff and sewer deposit erosion to wet weather pollutant loads in combined sewer systems. *Water Research*, *44*(20), 5875-5886. doi :https://doi.org/10.1016/j.watres.2010.07.008

Gasperi, J., Laborie, B. & Rocher, V. (2012a). Treatment of combined sewer overflows by ballasted flocculation : Removal study of a large broad spectrum of pollutants. *Chemical Engineering Journal*, *211*, 293-301.

Gasperi, J., Sebastian, C., Ruban, V., Delamain, M., Percot, S., Wiest, L., … Kessoo, M. D. K. et al. (2014). Micropollutants in urban stormwater : occurrence, concentrations, and atmospheric contributions for a wide range of contaminants in three French catchments. *Environmental Science and Pollution Research*, *21*(8), 5267-5281.

Gasperi, J., Zgheib, S., Cladière, M., Rocher, V., Moilleron, R. & Chebbo, G. (2012b). Priority pollutants in urban stormwater : Part 2–Case of combined sewers. *Water Research*, *46*(20), 6693-6703.

Gavrilakis, S. (1992). Numerical simulation of low-Reynolds-number turbulent flow through a straight square duct. *Journal of Fluid Mechanics*, *244*, 101-129.

El-Gendy, A. S., Li, J. G. & Biswas, N. (2008). Treatment of combined sewer overflow using retention treatment basin assisted with polymer chemical coagulation. *Water environment research*, *80*(9), 774-783.

Ghodsian, M. (2003). Supercritical flow over a rectangular side weir. *Canadian Journal of Civil Engineering*, *30*(3), 596-600.

Gooré Bi, E., Monette, F., Gachon, P., Gaspéri, J. & Perrodin, Y. (2015). Quantitative and qualitative assessment of the impact of climate change on a combined sewer overflow and its receiving water body. *Environmental Science and Pollution Research*, *22*(15), 11905-11921.

Goring, D. G. & Nikora, V. I. (2002). Despiking acoustic Doppler velocimeter data. *Journal of hydraulic engineering*, *128*(1), 117-126.

Gorrick, S. & Rodríguez, J. F. (2012). Sediment dynamics in a sand bed stream with riparian vegetation. *Water Resources Research*, *48*(2).

Gorrick, S. & Rodríguez, J. F. (2014). Scaling of sediment dynamics in a laboratory model of a sand-bed stream. *Journal of hydro-environment research*, *8*(2), 77-87.

Grady, C. L. J., Daigger, G. T., Love, N. G. & Filipe, C. D. (2011). *Biological wastewater treatment*. CRC press.

Granata, F., Gargano, R. & Santopietro, S. (2016). A flow field characterization in a circular channel along a side weir. *Flow Measurement and Instrumentation*, *52*, 92-100.

Gromaire-Mertz, M.-C. (2000). Urban wet weather pollution in combined sewer networks- Characteristics and origins. *Houille Blanche*, (2), 66-70.

Gromaire-Mertz, M.-C., Chebbo, G. & Saad, M. (1998). Origins and characteristics of urban wet weather pollution in combined sewer systems : The experimental urban catchment "Le Marais" in Paris. *Water Science and Technology*, *37*(1), 35-43. The Sewer as a Physical, Chemical and Biological Reactor II. doi :https://doi.org/10.1016/S0273-1223(97)00753-1

Gromaire, M.-C., Chebbo, G., Saad, M. & Mouchet, J. (1997). The experimental urban catchment area of the Marais in Paris : origin and characteristics of the pollution of rain water in the combined sewer. *La Houille Blanche-Revue internationale de l'eau*, *52*(7), 52-58.

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2020LYSEI083/these.pdf
© [A. Claro Barreto], [2020], INSA Lyon, tous droits réservés

Gromaire, M.-C., Garnaud, S., Saad, M. & Chebbo, G. (2001). Contribution of different sources to the pollution of wet weather flows in combined sewers. *Water research*, *35*(2), 521-533.

Gruber, G., Winkler, S. & Pressl, A. (2005). Continuous monitoring in sewer networks an approach for quantification of pollution loads from CSOs into surface water bodies. *Water Science and Technology*, *52*(12), 215-223. doi :10 . 2166 / wst . 2005 . 0466. eprint : https : / / iwaponline . com / wst / article - pdf/52/12/215/433201/215.pdf

Guo, J. (2002). Hunter rouse and shields diagram. In *Advances in Hydraulics and Water Engineering : Volumes I & II* (p. 1096-1098). World Scientific.

Guo, Z., Zheng, C. & Shi, B. (2002a). An extrapolation method for boundary conditions in lattice Boltzmann method. *Physics of Fluids*, *14*(6), 2007-2010. doi :10.1063/1.1471914. eprint : https://doi.org/10.1063/1.1471914

Guo, Z., Zheng, C. & Shi, B. (2002b). Discrete lattice effects on the forcing term in the lattice Boltzmann method. *Physical Review E*, *65*(4), 46308. doi :10.1103/PhysRevE.65.046308

Hager, W. H. (2010). *Wastewater hydraulics : Theory and practice*. Springer Science & Business Media.

Haider, A. & Levenspiel, O. (1989). Drag coefficient and terminal velocity of spherical and nonspherical particles. *Powder technology*, *58*(1), 63-70.

Han, S.-S., Chen, Z., Zhou, F.-Y. & Lu, X.-Q. (2014). Assessment of suspended solid removal in a surface flow constructed wetland using a three-dimensional numerical model. *Water resources management*, *28*(10), 3111-3125.

Hanjalic, K. (2005). Will RANS survive LES ? A view of perspectives. *Journal of fluids engineering*, *127*(5), 831-839.

Hannouche, A. [A.], Chebbo, G. & Joannis, C. (2014). Dynamics of pollutant discharge in combined sewer systems during rain events : chance or determinism ? *Water Science and Technology*, *69*(8), 1751-1758. doi :10.2166/wst.2014.088. eprint : https://iwaponline.com/wst/article-pdf/69/8/1751/471517/1751.pdf

Hannouche, A., Chebbo, G. & Joannis, C. (2014). Assessment of the contribution of sewer deposits to suspended solids loads in combined sewer systems during rain events. *Environmental Science and Pollution Research*, *21*(8), 5311-5317.

Haussmann, M., Claro Barreto, A., Lipeme Kouyi, G., Rivière, N., Nirschl, H. & Krause, M. J. (2019). Large-eddy simulation coupled with wall models for turbulent channel flows at high Reynolds numbers with a lattice Boltzmann method—Application to Coriolis mass flowmeter. *Computers & Mathematics with Applications*, *78*(10), 3285-3302. doi :https://doi.org/10.1016/j.camwa.2019.04.033

He, C. & Marsalek, J. (2009). Hydraulic optimization of a combined sewer overflow (CSO) storage facility using numerical and physical modeling. A paper submitted to the Journal of Environmental Engineering and Science. *Canadian Journal of Civil Engineering*, *36*(2), 363-373. doi :10 . 1139 / S08 - 050. eprint : https://doi.org/10.1139/S08-050

He, C., Marsalek, J., Rochfort, Q. & Krishnappan, B. G. (2006). Case Study : Refinement of Hydraulic Operation of a Complex CSO Storage/Treatment Facility by Numerical and Physical Modeling. *Journal of Hydraulic Engineering*, *132*(2), 131-139. doi :10.1061/(ASCE)0733-9429(2006)132:2(131). eprint : https://ascelibrary.org/doi/pdf/10.1061/%28ASCE%290733-9429%282006%29132%3A2%28131%29

He, X. & Luo, L.-S. (1997). Theory of the lattice Boltzmann method : From the Boltzmann equation to the lattice Boltzmann equation. *Phys. Rev. E*, *56*, 6811-6817. doi :10.1103/PhysRevE.56.6811

Hedges, P., Lockley, P. & Martin, J. (1993). The relationship between field and model studies of an hydrodynamic separator combined sewer overflow. In *6th International Conference on Urban Storm Drainage* (p. 1537-1542).

Hemmerle, N. (2014). *Sédiment en réseau : Relation entre dynamique sédimentaire et conditions hydrodynamiques locales* (thèse de doct., Ecole Centrale de Nantes). Spécialité : Sciences Pour l'Ingénieur, Géosciences, Architecture.

Hirt, C. & Nichols, B. (1981). Volume of fluid (VOF) method for the dynamics of free boundaries. *Journal of Computational Physics*, *39*(1), 201-225. doi :https://doi.org/10.1016/0021-9991(81)90145-5

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2020LYSEI083/these.pdf
© [A. Claro Barreto], [2020], INSA Lyon, tous droits réservés

Hoyas, S. & Jiménez, J. (2006). Scaling of the velocity fluctuations in turbulent channels up to Re τ = 2003. *Physics of fluids*, *18*(1), 011702.

Hu, K., Meng, J., Zhang, H., Gu, X.-J., Emerson, D. R. & Zhang, Y. (2017). A comparative study of boundary conditions for lattice Boltzmann simulations of high Reynolds number flows. *Computers & Fluids*, *156*, 1-8. Ninth International Conference on Computational Fluid Dynamics (ICCFD9). doi :https://doi.org/10.1016/j.compfluid.2017.06.008

Huang, H., Sukop, M. C., Lu, X.-Y. et al. (2015). *Multiphase lattice Boltzmann methods : Theory and application*. Wiley Online Library.

Hunt, J. (1954). The turbulent transport of suspended sediment in open channels. *Proceedings of the Royal Society of London. Series A. Mathematical and Physical Sciences*, *224*(1158), 322-335.

IJINUS. (2017). *Gamme capteurs de niveau autonomes avec modem intégré LNU10V3*. Version K0V00151-01A2. Récupérée, à partir de https://www.ijinus.com/produit/capteurs/capteurs-de-niveau-ultrason-lnu06v3/#tab-download_tab

Isel, S., Dufresne, M., Bardiaux, J., Fischer, M. & Vazquez, J. (2014a). Computational fluid dynamics based assessment of discharge-water depth relationships for combined sewer overflows. *Urban Water Journal*, *11*(8), 631-640. doi :10.1080/1573062X.2013.806561. eprint : https://doi.org/10.1080/1573062X.2013.806561

Isel, S., Dufresne, M., Fischer, M. & Vazquez, J. (2014b). Assessment of the overflow discharge in complex CSO chambers with water level measurements – On-site validation of a CFD-based methodology. *Flow Measurement and Instrumentation*, *35*, 39-43. doi :https://doi.org/10.1016/j.flowmeasinst.2013.11.003

Isel, S., Dufresne, M. & Vazquez, J. (2013). An original methodology to instrument non-standard sewer works using water level measurements. *NOVATECH 2013*.

Isenmann, G. (2016). *Approche Euler-Lagrange pour la modélisation du transport solide dans les ouvrages de décantation* (thèse de doct., Strasbourg).

ISO/IEC Guide 98-1. (2009). *ISO/IEC Guide 98-1 :2009 (JCGM/WG1/104) - Uncertainty of measurement*. International Organization for Standardization. Génève, Suisse.

Jafari, S. & Rahnama, M. (2011). Shear-improved Smagorinsky modeling of turbulent channel flow using generalized Lattice Boltzmann equation. *International Journal for Numerical Methods in Fluids*, *67*(6), 700-712.

Jahanshaloo, L., Pouryazdanpanah, E. & Che Sidik, N. A. (2013). A review on the application of the lattice Boltzmann method for turbulent flow simulation. *Numerical Heat Transfer, Part A : Applications*, *64*(11), 938-953.

Janßen, C. F., Bengel, S., Rung, T. & Dankowski, H. (2013a). A fast numerical method for internal flood water dynamics to simulate water on deck and flooding scenarios of ships. In *ASME 2013 32nd International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering*. American Society of Mechanical Engineers Digital Collection.

Janßen, C. F., Grilli, S. T. & Krafczyk, M. (2013b). On enhanced non-linear free surface flow simulations with a hybrid LBM–VOF model. *Computers & Mathematics with Applications*, *65*(2), 211-229.

Janßen, C. F. & Krafczyk, M. (2011a). Free surface flow simulations on GPGPUs using the LBM. *Computers & Mathematics with Applications*, *61*(12), 3549-3563.

Janßen, C. & Krafczyk, M. (2011b). Free surface flow simulations on GPGPUs using the LBM. *Computers & Mathematics with Applications*, *61*(12), 3549-3563. Mesoscopic Methods for Engineering and Science — Proceedings of ICMMES-09. doi :https://doi.org/10.1016/j.camwa.2011.03.016

Jesson, M., Sterling, M. & Bridgeman, J. (2013). Despiking velocity time-series—Optimisation through the combination of spike detection and replacement methods. *Flow Measurement and Instrumentation*, *30*, 45-51.

Jiménez, J. & García-Mayoral, R. (2011). Direct simulations of wall-bounded turbulence. In *Direct and Large-Eddy Simulation VIII* (p. 3-8). Springer.

Joannis, C., Hannouche, A. & Chebbo, G. (2015). An assessment of the respective contributions of flow-rate and concentration variations to mass discharge variations at the outlets of two combined catch-

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2020LYSEI083/these.pdf
© [A. Claro Barreto], [2020], INSA Lyon, tous droits réservés

ments during rain events. *Urban Water Journal*, *12*(8), 653-659. doi :10.1080/1573062X.2014.939662. eprint : https://doi.org/10.1080/1573062X.2014.939662

Joannis, C., Vazquez, J. & Zug, M. (2009). Modélisation et métrologie des déversoirs d'orage. *Techniques de l'ingénieur Gestion des eaux par les collectivités territoriales, base documentaire : TIB444DUO.*(ref. article : w6902). fre. eprint : basedocumentaire : TIB444DUO.. Récupérée à partir de https://www.techniques-ingenieur.fr/base-documentaire/environnement-securite-th5/gestion-des-eaux-par-les-collectivites-territoriales-42444210/modelisation-et-metrologie-des-deversoirs-d-orage-w6902/

Jouanneau, S., Recoules, L., Durand, M., Boukabache, A., Picot, V., Primault, Y., … Thouand, G. (2014). Methods for assessing biochemical oxygen demand (BOD) : A review. *Water Research*, *49*, 62-82. doi :https://doi.org/10.1016/j.watres.2013.10.066

Julien, P. Y. (2002). *River mechanics*. Cambridge University Press.

Julien, P. Y. (2009). Fluvial transport of suspended solids.

Kaczmarek, L. M., Biegowski, J. & Sobczak, Ł. (2019). Modeling of Sediment Transport in Steady Flow over Mobile Granular Bed. *Journal of Hydraulic Engineering*, *145*(4), 04019009.

Kallwass, G. (1964). *Beitrag zur hydraulischen Berechnung gedrosselter Regenüberläufe (Contribution à la conception hydraulique de dérversoirs latéraux de décharge avec vanne d'étranglement)* (thèse de doct., TH Karlsruhe).

Karimi, M., Attari, J., Saneie, M. & Jalili Ghazizadeh, M. R. (2018). Side weir flow characteristics : Comparison of piano key, labyrinth, and linear types. *Journal of Hydraulic Engineering*, *144*(12), 04018075.

Kehrwiller, J. (1995). Etude comparative de l'efficacité des déversoirs d'orage. *Mémoire de fin d'études, Ecole Nationale du Génie de l'Eau et de l'Environnement de Strasbourg, France*.

El-Khashab, A. & Smith, K. V. (1976). Experimental investigation of flow over side weirs. *Journal of the Hydraulics Division*, *102*(9), 1255-1268.

Kim, J., Moin, P. & Moser, R. (1987). Turbulence statistics in fully developed channel flow at low Reynolds number. *Journal of fluid mechanics*, *177*, 133-166.

Klemetson, S. L. (1985). Factors affecting stream transport of combined sewer overflow sediments. *Journal of Water Pollution Control Federation*, *57*(5), 390-397.

Kronebusch, K., Zhu, D. & Rajaratnam, N. (2010). Hydraulic model study of Highlands CSO structure. *Department of Civil and Environmental Engineering, University of Alberta*.

Krüger, T., Kusumaatmaja, H., Kuzmin, A., Shardt, O., Silva, G. & Viggen, E. M. (2017). *The lattice Boltzmann method*. Springer.

Kuang, S., Zhou, M. & Yu, A. (2019). CFD-DEM modelling and simulation of pneumatic conveying : A review. *Powder Technology*.

Lacour, C., Joannis, C. & Chebbo, G. (2009). Assessment of annual pollutant loads in combined sewers from continuous turbidity measurements : Sensitivity to calibration data. *Water Research*, *43*(8), 2179-2190. doi :https://doi.org/10.1016/j.watres.2009.02.017

Larrarte, F., Bardiaux, J.-B. & Bonakdari, H. (2005). Computational and experimental study of velocity profiles in sewers. In *10th International Conference on Urban Drainage*.

Larsen, T., Nielsen, L., Jensen, B. & Christensen, E. D. (2008). Numerical 3-D modelling of overflows. In *11th International Conference on Urban Drainage* (p. 1-7). Citeseer.

Latt, J., Chopard, B., Malaspinas, O., Deville, M. & Michler, A. (2008). Straight velocity boundaries in the lattice Boltzmann method. *Phys. Rev. E*, *77*, 056703. doi :10.1103/PhysRevE.77.056703

Launay, M., Dittmer, U. & Steinmetz, H. (2016). Contribution of combined sewer overflows to micropollutant loads discharged into urban receiving water. In NOVATECH (Éd.), *NOVATECH 2016*, Lyon, France.

Launder, B. & Spalding, D. B. (1974). The numerical computation of turbulent flows. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, *3*(2), 269-289. doi :https://doi.org/10.1016/0045-7825(74)90029-2

Launder, B. E. & Spalding, D. B. (1983). The numerical computation of turbulent flows. In *Numerical prediction of flow, heat transfer, turbulence and combustion* (p. 96-116). Elsevier.

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2020LYSEI083/these.pdf
© [A. Claro Barreto], [2020], INSA Lyon, tous droits réservés

Lee, M. & Moser, R. D. (2015). Direct numerical simulation of turbulent channel flow up to $Re_\tau \approx 5200$. *Journal of Fluid Mechanics*, *774*, 395-415. doi :10.1017/jfm.2015.268

Lévêque, E., Toschi, F., Shao, L. & Bertoglio, J.-P. (2007). Shear-improved Smagorinsky model for large-eddy simulation of wall-bounded turbulent flows. *Journal of Fluid Mechanics*, *570*, 491-502.

Li, Z., Wei, J. & Yu, B. (2015). Direct Numerical Study of the Effects of Particle Parameters on a Particle-Laden Flow. *Particulate Science and Technology*, *33*(4), 357-368.

Lipeme Kouyi, G. (2004). *Expérimentations et modélisations tridimensionnelles de l'hydrodynamique et de la separation particulaire dans les déversoirs d'orage* (Thèse de doctorant, Université de Strasbourg 1, Strasourg, France).

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 Science and Technology*, *64*(2), 521-527. doi :10.2166/wst.2011.162. eprint : https://iwaponline.com/wst/article-pdf/64/2/521/444142/521.pdf

Lipeme Kouyi, G., Vazquez, J., Gallin, Y., Rollet, D. & Sadowski, A. (2005). Use of 3D modelling and several ultrasound sensors to assess overflow rate. *Water Science and Technology*, *51*(2), 187-194. doi :10.2166/wst.2005.0047. eprint : https://iwaponline.com/wst/article-pdf/51/2/187/434833/187.pdf

Lipeme Kouyi, G., Vazquez, J. & Poulet, J. (2003). 3D free surface measurement and numerical modelling of flows in storm overflows. *Flow measurement and instrumentation*, *14*(3), 79-87.

Luyckx, G., Guido, V. & Berlamont, J. (2002). Surface load as predominant factor for CSO efficiency. In *Global Solutions for Urban Drainage* (p. 1-14).

Luyckx, G., Vaes, G. & Berlamont, J. (1998). Experimental investigation on the efficiency of a hydrodynamic separator. In *Novatech, Date : 1998/05/01-1998/05/01, Location : Lyon, France*.

Luyckx, G., Vaes, G. & Berlamont, J. (1999). Experimental investigation on the efficiency of a high side weir overflow. *Water Science and Technology*, *39*(2), 61.

Ma, Y., Hao, S., Zhao, H., Fang, J., Zhao, J. & Li, X. (2018). Pollutant transport analysis and source apportionment of the entire non-point source pollution process in separate sewer systems. *Chemosphere*, *211*, 557-565.

Macke, E., Hartmann, A. & VON KOERBEI, N. (2002). Zur Schmutzfracht von Regenwasser in großen, flach verlegten Mischwassernetzen. *KA. Wasserwirtschaft, Abwasser, Abfall*, *49*(1), 40-48.

Macke, E., Koerber, N. v. & Sander, T. (1987). Schmutzuntersuchungen im Mischwassernetz der Stadt Braunschweig. *Mitteilungen des Leichtweiß-Institutes für Wasserbau der TU Braunschweig*, (94).

Madoux-Humery, A. S., Dorner, S., Sauvé, S., Aboulfadl, K., Galarneau, M., Servais, P. & Prévost, M. (2015). Temporal analysis of E. coli, TSS and wastewater micropollutant loads from combined sewer overflows : implications for management. *Environmental Sciences : Processes and Impacts*, *17*(5), 965-974.

Magnin, A., Muller, M., Yoris, A., Guérin, S., Rocher, V. & Dudal, Y. (2015). Validation of a BOD5 alternative method. In *17th International Congress of Metrology* (p. 07009). EDP Sciences.

Malaspinas, O. & Sagaut, P. (2014). Wall model for large-eddy simulation based on the lattice Boltzmann method. *Journal of Computational Physics*, *275*, 25-40.

Marsalek, P., Watt, W., Marsalek, J. & Anderson, B. (2000). Winter flow dynamics of an on-stream stormwater management pond. *Water Quality Research Journal*, *35*(3), 505-524.

Maruéjouls, T., Granger, D., Aouichat, F., Lafficher, C., Chadoutaud, E., Pouly, N. & Binet, G. (2017). Suivi de la qualité des eaux unitaires à l'échelle du bassin versant urbain par la mesure en continu. *TSM*, (10), 35-44. doi :10.1051/tsm/201710035

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. doi :https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2018.03.043

McCarthy, D. T., Zhang, K., Westerlund, C., Viklander, M., Bertrand-Krajewski, J.-L., Fletcher, T. D. & Deletic, A. (2018). Assessment of sampling strategies for estimation of site mean concentrations of stormwater pollutants. *Water Research*, *129*, 297-304. doi :https://doi.org/10.1016/j.watres.2017.10.001

Menter, F. R. (1994). Two-equation eddy-viscosity turbulence models for engineering applications. *AIAA journal*, *32*(8), 1598-1605.

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2020LYSEI083/these.pdf
© [A. Claro Barreto], [2020], INSA Lyon, tous droits réservés

Menter, F. R., Kuntz, M. & Langtry, R. (2003). Ten years of industrial experience with the SST turbulence model. *Turbulence, heat and mass transfer*, *4*(1), 625-632.

MENTOR. (2011). Méthodologie et outils opérationnels de conception et de qualification de sites de mesures en réseau d'assainissement. Récupérée à partir de http://wikhydro.developpement-durable.gouv.fr/index.php/Autosurveillance_et_diagnostic_en_r%C3%A9seau_d%27assainissement_-_Projet_MENTOR

Métadier, M. & Bertrand-Krajewski, J.-L. (2012). The use of long-term on-line turbidity measurements for the calculation of urban stormwater pollutant concentrations, loads, pollutographs and intra-event fluxes. *Water research*, *46*(20), 6836-6856.

Métadier, M. [Marjolaine]. (2011). *Traitement et analyse de séries chronologiques continues de turbidité pour la formulation et le test de modèles des rejets urbains par temps de pluie.* (Thèse de Doctorat, INSA de Lyon).

Métadier, M. [Marjolaine] & Bertrand-Krajewski, J.-L. (2011). Assessing dry weather flow contribution in TSS and COD storm events loads in combined sewer systems. *Water Science and Technology*, *63*(12), 2983-2991. doi :10.2166/wst.2011.185. eprint : https://iwaponline.com/wst/article-pdf/63/12/2983/443881/2983.pdf

Mignot, E., Bonakdari, H., Knothe, P., Lipeme Kouyi, G., Bessette, A., Rivière, N. & Bertrand-Krajewski, J.-L. (2012). Experiments and 3D simulations of flow structures in junctions and their influence on location of flowmeters. *Water Science and Technology*, *66*(6), 1325-1332. doi :10 . 2166 / wst . 2012 . 319. eprint : https://iwaponline.com/wst/article-pdf/66/6/1325/443385/1325.pdf

Mignot, E., Doppler, D., Rivière, N., Vinkovic, I., Gence, J.-N. & Simoens, S. (2014). Analysis of Flow Separation Using a Local Frame Axis : Application to the Open-Channel Bifurcation. *Journal of Hydraulic Engineering*, *140*(3), 280-290. doi :10 . 1061 / (ASCE) HY . 1943 - 7900 . 0000828. eprint : https : //ascelibrary.org/doi/pdf/10.1061/%28ASCE%29HY.1943-7900.0000828

Ming, L., Xiao-Peng, C. & Premnath, K. N. (2012). Comparative study of the large eddy simulations with the lattice Boltzmann method using the wall-adapting local eddy-viscosity and Vreman subgrid scale models. *Chinese Physics Letters*, *29*(10), 104706.

Mohamad, A. & Succi, S. (2009). A note on equilibrium boundary conditions in lattice Boltzmann fluid dynamic simulations. *The European Physical Journal Special Topics*, *171*(1), 213-221.

Momplot, A., Lipeme Kouyi, G., Mignot, E., Rivière, N. & Bertrand-Krajewski, J.-L. (2017). Typology of the flow structures in dividing open channel flows. *Journal of Hydraulic Research*, *55*(1), 63-71.

Moukalled, F., Mangani, L. & Darwish, M. (2016). *The Finite Volume Method in Computational Fluid Dynamics, An Advanced Introduction with OpenFOAM® and Matlab*. Springer International Publishing.

Mourad, M. [M.], Bertrand-Krajewski, J.-L. & Chebbo, G. (2005). Sensitivity to experimental data of pollutant site mean concentration in stormwater runoff. *Water Science and Technology*, *51*(2), 155-162. doi :10.2166/wst.2005.0043. eprint : https://iwaponline.com/wst/article-pdf/51/2/155/434801/155.pdf

Mourad, M. [Mohammad]. (2005). *Modélisation de la qualité des rejets urbains de temps de pluie : sensibilité aux données expérimentales et adéquation aux besoins opérationnels* (Thèse de Doctorat, Institut National des Sciences Appliquées de Lyon).

Muller, M., Bellaton, S., Yoris, A., Guérin-Rechdaoui, S., Clousier, L. & Rocher, V. (2017). New outlook in BOD measurement and bioprocess management : the Enverdi® kit. In *18th International Congress of Metrology* (p. 11002). EDP Sciences.

Muller, M., Bouguelia, S., Goy, R.-A., Yoris, A., Berlin, J., Meche, P., … Dudal, Y. (2014). International cross-validation of a BOD5 surrogate. *Environmental Science and Pollution Research*, *21*(23), 13642-13645.

Musker, A. (1979). Explicit expression for the smooth wall velocity distribution in a turbulent boundary layer. *AIAA Journal*, *17*(6), 655-657.

Muslu, Y. (2001). Numerical analysis for lateral weir flow. *Journal of irrigation and drainage engineering*, *127*(4), 246-253.

Muste, M., Yu, K., Fujita, I. & Ettema, R. (2009). Two-phase flow insights into open-channel flows with suspended particles of different densities. *Environmental fluid mechanics*, *9*(2), 161-186.

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2020LYSEI083/these.pdf
© [A. Claro Barreto], [2020], INSA Lyon, tous droits réservés

Muzaferija, S., Peric, M., Sames, P. & Schellin, T. (1999). A two-fluid Navier-Stokes solver to simulate water entry. In *Proceedings of 22nd symposium on Naval hydrodynamics, 1998* (p. 638-651). National Academy Press.

Naudascher, E. (1987). *Hydraulik der Gerinne und Gerinnebauwerke* [L'hydraulique des cannaux et des structures hydrauliques]. Springer-Verlag.

Navier, C. L. M. H. (1822). *Mémoire sur les lois du mouvement des fluides* (M. de l'Académie des sciences, Éd.). Récupérée, à partir de https : / / fr. wikisource . org / wiki / M % C3 % A9moire _ sur _ les _ lois _ du _ mouvement_des_fluides

Nezu, I. (2005). Open-channel flow turbulence and its research prospect in the 21st century. *Journal of Hydraulic Engineering*, *131*(4), 229-246.

Nezu, I. & Azuma, R. (2004). Turbulence characteristics and interaction between particles and fluid in particle-laden open channel flows. *Journal of Hydraulic Engineering*, *130*(10), 988-1001.

Noguchi, K. & Nezu, I. (2009). Particle–turbulence interaction and local particle concentration in sediment-laden open-channel flows. *Journal of Hydro-environment Research*, *3*(2), 54-68.

NORTEK. (2017). *Comprehensive Manual*.

Nourgaliev, R. R., Dinh, T.-N., Theofanous, T. G. & Joseph, D. (2003). The lattice Boltzmann equation method : theoretical interpretation, numerics and implications. *International Journal of Multiphase Flow*, *29*(1), 117-169.

Orszag, S. A., Yakhot, V., Flannery, W. S. & Boysan, F. (1993). Renormalization group modeling and turbulence simulations. (p. 1031). International Conference, Near-Wall turbulent flows. Tempe, Arizona, USA : Elsevier.

Pal, D. & Ghoshal, K. (2017). Hydrodynamic interaction in suspended sediment distribution of open channel turbulent flow. *Applied Mathematical Modelling*, *49*, 630-646. doi :https://doi.org/10.1016/j.apm.2017.02.045

Park, I., Kim, K., Kim, J. & Van, S. (2009). A volume-of-fluid method for incompressible free surface flows. *International Journal for Numerical Methods in Fluids*, *61*(12), 1331-1362.

Passerat, J., Ouattara, N. K., Mouchel, J.-M., Rocher, V. & Servais, P. (2011). Impact of an intense combined sewer overflow event on the microbiological water quality of the Seine River. *Water Research*, *45*(2), 893-903. doi :https://doi.org/10.1016/j.watres.2010.09.024

Patankar, S. V. & Spalding, D. B. (1983). A calculation procedure for heat, mass and momentum transfer in three-dimensional parabolic flows. In *Numerical Prediction of Flow, Heat Transfer, Turbulence and Combustion* (p. 54-73). Elsevier.

Patel, T., Gill, L. & Faram, M. G. (2011). Grit removal from wastewater using secondary currents in open-channel flow around bends. *Journal of Environmental Engineering*, *137*(11), 1026-1039.

Pathapati, S.-S. & Sansalone, J. J. (2009a). CFD modeling of a storm-water hydrodynamic separator. *Journal of Environmental Engineering*, *135*(4), 191-202.

Pathapati, S.-S. & Sansalone, J. J. (2009b). CFD modeling of particulate matter fate and pressure drop in a storm-water radial filter. *Journal of Environmental Engineering*, *135*(2), 77-85.

Pattison, M. J., Premnath, K. N. & Banerjee, S. (2009). Computation of turbulent flow and secondary motions in a square duct using a forced generalized lattice Boltzmann equation. *Physical Review E*, *79*(2), 026704.

Peltier, Y., Rivière, N., Proust, S., Mignot, E., Paquier, A. & Shiono, K. (2013). Estimation of the error on the mean velocity and on the Reynolds stress due to a misoriented ADV probe in the horizontal plane : Case of experiments in a compound open-channel. *Flow Measurement and Instrumentation*, *34*, 34-41.

Perumal, D. A. & Dass, A. K. (2015). A Review on the development of lattice Boltzmann computation of macro fluid flows and heat transfer. *Alexandria Engineering Journal*, *54*(4), 955-971.

Phillips, P. J., Chalmers, A. T., Gray, J. L., Kolpin, D. W., Foreman, W. T. & Wall, G. R. (2012). Combined Sewer Overflows : An Environmental Source of Hormones and Wastewater Micropollutants. *Environmental Science & Technology*, 5336-5343. doi :10.1021/es3001294

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2020LYSEI083/these.pdf
© [A. Claro Barreto], [2020], INSA Lyon, tous droits réservés

Piro, P., Carbone, M., Garofalo, G. & Sansalone, J. J. (2007). CSO treatment strategy based on constituent index relationships in a highly urbanised catchment. *Water Science and Technology*, *56*(12), 85-91. doi :10.2166/wst.2007.758. eprint : https://iwaponline.com/wst/article-pdf/56/12/85/477962/85.pdf

Piro, P., Carbone, M., Garofalo, G. & Sansalone, J. J. (2010). Size distribution of wet weather and dry weather particulate matter entrained in combined flows from an urbanizing sewershed. *Water, air, and soil pollution*, *206*(1-4), 83-94.

Plum, V., Dahl, C. P., Bentsen, L., Petersen, C. R., Napstjert, L. & Thomsen, N. (1998). The actiflo method. *Water Science and technology*, *37*(1), 269-275.

Pollert, J. & Stránský, D. (2003). Combination of computational techniques-evaluation of CSO efficiency for suspended solids separation. *Water Science and Technology*, *47*(4), 157-166.

Polomé, P., Mignot, E., Nasri, A., Lipeme Kouyi, G., Campan, L., Hooge, C. & Rivière, N. (2015). Urban domestic wastewater : how to reduce individual injection ? *Water Science and Technology*, *73*(1), 144-152. doi :10.2166/wst.2015.473. eprint : https://iwaponline.com/wst/article-pdf/73/1/144/464499/wst073010144.pdf

Poraver. (2017). *Technical Data Sheet - Lightweight aggregate according to DIN EN 13055-1*. Récupérée, à partir de https://www.poraver.com/us/technical-data-poraver/

Postel, S. L., Daily, G. C. & Ehrlich, P. R. (1996). Human appropriation of renewable fresh water. *Science*, *271*(5250), 785-788.

Premnath, K. N., Pattison, M. J. & Banerjee, S. (2009). Dynamic subgrid scale modeling of turbulent flows using lattice-Boltzmann method. *Physica A : Statistical Mechanics and its Applications*, *388*(13), 2640-2658.

Ramamurthy, A. S., Carballada, L. & Subramanya, K. (1978). Uniformly discharging lateral weirs. *Journal of the Irrigation and Drainage Division*, *104*(4), 399-412.

Randrianarimanana, J. (2016). *Etude expérimentale de la représentativité spatiale des vitesses et des polluants particulaires en réseau d'assainissement* (thèse de doct., Université de Nantes).

Ranga Raju, K. G., Gupta, S. K. & Prasad, B. (1979). Side weir in rectangular channel. *Journal of the Hydraulics Division*, *105*(5), 547-554.

Règlement (CE) No 166/2006. (2006). Règlement (CE) no 166/2006 du Parlement européen et du Conseil du 18 janvier 2006 : concernant la création d'un registre européen des rejets et des transferts de polluants, et modifiant les directives 91/689/CEE et 96/61/CE du Conseil.

Richardson, L. F. (1911). IX. The approximate arithmetical solution by finite differences of physical problems involving differential equations, with an application to the stresses in a masonry dam. *Phil. Trans. R. Soc. Lond. A*, *210*(459-470), 307-357.

Richardson, L. F. & Gaunt, J. A. (1927). VIII. The deferred approach to the limit. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series A*, *226*(636-646), 299-361.

Riechel, M., Matzinger, A., Pawlowsky-Reusing, E., Sonnenberg, H., Uldack, M., Heinzmann, B., … Rouault, P. (2016). Impacts of combined sewer overflows on a large urban river – Understanding the effect of different management strategies. *Water Research*, *105*, 264-273. doi :https://doi.org/10.1016/j.watres.2016.08.017

Rivière, N., Travin, G. & Perkins, R. J. (2011). Subcritical open channel flows in four branch intersections. *Water Resources Research*, *47*(10).

Roache, P. J. (1998). Verification of codes and calculations. *AIAA journal*, *36*(5), 696-702.

Roache, P. J. (2003). Conservatism of the grid convergence index in finite volume computations on steady-state fluid flow and heat transfer. *Journal of Fluids Engineering*, *125*(4), 731-732.

Roger, M. & Tonghini, M. (2010). Estimation des charges déversées au milieu naturel lors d'épisodes pluvieux - Une application de la turbidimétrie aux réseaux unitaires de Dole (Jura). *TSM*, 84-87. doi :10.1051/tsm/201001084

Rouse, H. (1937). Modern Conceptions of the Mechanics of Fluid Turbulence. In *Proceedings of the American Society of Civil Engineers* (T. 62, p. 21-64). ASCE.

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2020LYSEI083/these.pdf
© [A. Claro Barreto], [2020], INSA Lyon, tous droits réservés

Ruban, G., Yuperd, Y., Laveau, B. & Lucas, E. (2001). Self-monitoring of water quality in sewer systems using absorbance of ultraviolet and visible light. *Water Science and Technology*, *44*(2-3), 269-276. doi :10.2166/wst.2001.0779. eprint : https://iwaponline.com/wst/article-pdf/44/2-3/269/430279/269.pdf

Samiee, S., Heidarpour, M. & Bagheri, S. (2016). Flow characteristics of rectangular sharp-crested side weirs in the presence of guide vanes. *ISH Journal of Hydraulic Engineering*, *22*(1), 109-114.

Al-Sammarraee, M., Chan, A., Salim, S. M. & Mahabaleswar, U. (2009). Large-eddy simulations of particle sedimentation in a longitudinal sedimentation basin of a water treatment plant. Part I : particle settling performance. *Chemical Engineering Journal*, *152*(2-3), 307-314.

Saul, A. J. & Ellis, D. (1992). Sediment deposition in storage tanks. *Water Science and Technology*, *25*(8), 189-198.

Scheible, K., Rittenhouse, B., O'Connor, T. & Pakenas, L. (2002). *Continuous Deflection Separation Fuzzy Filter and UV Treatment of SSO-Type Wastewaters : Pilot Study Results*. U.S. Environnemental Protection Agency (EPA).

Schilichting, H. & Gersten, K. (1979). *Boundary Layer Theory* (K. Mayes, Trad.). Berlin : Springer.

Schmitt, L. (1988). *Grobstruktursimulation turbulenter Grenzschicht-, Kanal- und Stufenstromungen* (Thèse de doctorat, Université Technique de Munich).

Schmitt, V. (2013). *Investigation expérimentale et numérique d'un ouvrage de séparation particulaire en assainissement* (thèse de doct., Strasbourg).

Schulz, O. & Macke, E. (1995). *Gebietsspezifische Schmutzfrachtpotentiale flach verlegter und vorentlasteter Mischwassernetze*. Leichtweiss-Inst. für Wasserbau.

Schulz, W., Brechenmacher, M. & Wirth, H. (1994). Combined sewer overflow from the city area of Munich. *Science of The Total Environment*, *146-147*, 493-498. Highway Pollution. doi :https://doi.org/10.1016/0048-9697(94)90274-7

Schwer, L. E. (2008). Is your mesh refined enough ? Estimating discretization error using GCI. *7th LS-DYNA Anwenderforum*, *1*(1), 50.

Seco, I., Gómez Valentín, M., Schellart, A. & Tait, S. (2013). Erosion resistance and behaviour of highly organic in-sewer sediment. *Water Science and Technology*, *69*(3), 672-679.

Selbig, W. R. (2015). Characterizing the distribution of particles in urban stormwater : advancements through improved sampling technology. *Urban Water Journal*, *12*(2), 111-119.

Selbig, W. R. & Bannerman, R. T. (2011). Development of a Depth-Integrated Sample Arm to Reduce Solids Stratification Bias in Stormwater Sampling. *Water Environment Research*, *83*(4), 347-357.

Selbig, W. R., Cox, A. & Bannerman, R. T. (2012). Verification of a depth-integrated sample arm as a means to reduce solids stratification bias in urban stormwater sampling. *Journal of Environmental Monitoring*, *14*(4), 1137-1143.

Shams, M., Ahmadi, G. & Smith, D. H. (2002). Computational modeling of flow and sediment transport and deposition in meandering rivers. *Advances in water resources*, *25*(6), 689-699.

Shan, X., Yuan, X.-F. & Chen, H. (2006). Kinetic theory representation of hydrodynamics : a way beyond the Navier–Stokes equation. *Journal of Fluid Mechanics*, *550*, 413-441. doi :10.1017/S0022112005008153

Shi, J., Thomas, T. & Williams, J. (1999). Large-eddy simulation of flow in a rectangular open channel. *Journal of Hydraulic Research*, *37*(3), 345-361.

Singh, R., Manivannan, D. & Satyanarayana, T. (1994). Discharge coefficient of rectangular side weirs. *Journal of irrigation and drainage engineering*, *120*(4), 814-819.

Slater, J. W. (2008). Examining Spatial (Grid) Convergence. Récupérée, à partir de https://www.grc.nasa.gov/WWW/wind/valid/tutorial/spatconv.html

Smagorinsky, J. (1963). General circulation experiments with the primitive equations : I. The basic experiment. *Monthly weather review*, *91*(3), 99-164.

Smits, A. J. & Marusic, I. (2013). Wall-bounded turbulence. *Phys. Today*, *66*(9), 25-30.

Springer, F., Carrera, L., Lipeme Kouyi, G., Claro Barreto, A. & Buffiere, P. (2020). The liquid-gas mass transfer coefficient in open channel flow is correlated to the turbulent kinetic energy at the interface. *The Canadian Journal of Chemical Engineering*, *98*(5), 1191-1201. doi :10.1002/cjce.23704

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2020LYSEI083/these.pdf
© [A. Claro Barreto], [2020], INSA Lyon, tous droits réservés

Stokes, G. G. (1845). On the theories of the internal friction of fluids in motion, and of the equilibrium and motion of elastic solids. *Transactions of the Cambridge Philosophical Society*, *8*.

Stovin, V. R. (1996). *The prediction of sediment deposition in storage chambers based on laboratory observations and numerical simulation* (thèse de doct., University of Sheffield).

Stovin, V. R. & Saul, A. J. (1998). A computational fluid dynamics (CFD) particle tracking approach to efficiency prediction. *Water Science and Technology*, *37*(1), 285-293.

Stovin, V. R. & Saul, A. J. (2000). Computational fluid dynamics and the design of sewage storage chambers. *Water and Environment Journal*, *14*(2), 103-110.

Suarez, J. & Puertas, J. (2005). Determination of COD, BOD, and suspended solids loads during combined sewer overflow (CSO) events in some combined catchments in Spain. *Ecological Engineering*, *24*(3), 199-217.

Succi, S. [Sauro]. (2001). *The lattice Boltzmann equation : for fluid dynamics and beyond*. Oxford university press.

Suga, K., Kuwata, Y., Takashima, K. & Chikasue, R. (2015). A D3Q27 multiple-relaxation-time lattice Boltzmann method for turbulent flows. *Computers & Mathematics with Applications*, *69*(6), 518-529.

Swamee, P. K., Pathak, S. K., Mohan, M., Agrawal, S. K. & Ali, M. S. (1994). Subcritical flow over rectangular side weir. *Journal of irrigation and drainage engineering*, *120*(1), 212-217.

Taubmann, K.-C. (1972). Regenüberläufe (Déversoirs latéraux de décharge). *Gas-Wasser-Abwasser*, *52*(10), 297-308.

Trias, F. X., Gorobets, A., Zhang, H. & Oliva, A. (2013). New differential operators and discretization methods for eddy-viscosity models for LES. *Procedia Engineering*, *61*, 179-184.

Uyumaz, A. (1992). Side weir in triangular channel. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, *118*(6), 965-970.

Uyumaz, A. (1997). Side weir in U-shaped channels. *Journal of Hydraulic Engineering*, *123*(7), 639-646.

Uyumaz, A. & Muslu, Y. (1985). Flow over side weirs in circular channels. *Journal of Hydraulic Engineering*, *111*(1), 144-160.

Valence Romans Agglo. (2013a). *Lois empiriques des matières en suspension et la demande chimique en oxygène du déversoir d'orage « Gambetta »*. Valence Romans Agglo.

Valence Romans Agglo. (2013b). *Système d'assanissement Valence 1*. Valence Romans Agglo.

Valence Romans Agglo. (2014). *Système d'assanissement Valence 1*. Valence Romans Agglo.

Valence Romans Agglo. (2015). *Système d'assanissement Valence 1*. Valence Romans Agglo.

Valence Romans Agglo. (2016). *Système d'assanissement Valence 1*. Valence Romans Agglo.

Valence Romans Agglo. (2017). *Système d'assanissement Valence 1*. Valence Romans Agglo.

Valence Romans Agglo. (2018). *Système d'assanissement Valence 1*. Valence Romans Agglo.

Van Daal-Rombouts, P., Tralli, A., Verhaart, F., Langeveld, J. & Clemens, F. (2017). Validation of computational fluid dynamics for deriving weir discharge relationships with scale model experiments and prototype measurements. *Flow Measurement and Instrumentation*, *58*, 52-61. doi :https://doi.org/10.1016/j.flowmeasinst.2017.09.011

Van Driest, E. (1956). On turbulent flow near a wall. *Journal of the aeronautical sciences*, *23*(11), 1007-1011.

Van Poucke, L., Huygens, M. & Verhoeven, R. (1970). Physical model study of a vortex separator overflow. *WIT Transactions on Engineering Sciences*, *29*.

Van Wachem, B. & Almstedt, A.-E. (2003). Methods for multiphase computational fluid dynamics. *Chemical Engineering Journal*, *96*(1-3), 81-98.

van Rijn, L. C. (1984). Sediment transport, part II : suspended load transport. *Journal of hydraulic engineering*, *110*(11), 1613-1641.

van Rijn, L. C. (1993). *Principles of sediment transport in rivers, estuaries and coastal seas*. Aqua publications Amsterdam.

Vandelannoote, F. & Desetables, F. (2010). La mesure en continu de la turbidité pour la surveillance des rejets en Seine-Saint-Denis. *TSM*, 72-75. doi :10.1051/tsm/201001072

Vazquez, J. (2010). Hydraulique à Surface Libre. Récupérée, à partir de https://engees.unistra.fr/fileadmin/user_upload/pdf/shu/cours_HSL_FI_2010.pdf

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2020LYSEI083/these.pdf
© [A. Claro Barreto], [2020], INSA Lyon, tous droits réservés

Vazquez, J., Zug, M., Phan, L. & Zobrist, C. (2006). *Guide technique sur le fonctionnement des déversoirs d'orage : Guide Technique*. ENGEES / VEOLIA WATER ANJOU RECHERCHE.

Verbanck, M. A. (2000). Computing near-bed solids transport in sewers and similar sediment-carrying open-channel flows. *Urban Water*, *2*(4), 277-284.

Verbanck, M. A., Ashley, R. M. & Bachoc, A. (1994). International workshop on origin, occurrence and behaviour of sediments in sewer systems : summary of conclusions. *Water research*, *28*(1), 187-194.

Vermeulen, B., Boersema, M., Hoitink, A., Sieben, J., Sloff, C. & Van der Wal, M. (2014). River scale model of a training dam using lightweight granulates. *Journal of Hydro-environment Research*, *8*(2), 88-94.

Versini, P. A., Hannouche, A., Joannis, C. & Chebbo, G. (2015). *Projet Mentor : Tâche 7. Comment estimer les incertitudes affectant les mesures de concentrations et de flux polluants en réseau d'assainissement*. IFSTTAR - Institut Francais des Sciences et Technologies des Transports, de l'Aménagement et des Réseaux. Récupérée à partir de https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01571128

Versteeg, H. K. & Malalasekera, W. (2007). *An introduction to computational fluid dynamics : the finite volume method*. Pearson Education.

Viggen, E. M. (2014). The lattice Boltzmann method : Fundamentals and acoustics.

Viviano, G., Valsecchi, S., Polesello, S., Capodaglio, A., Tartari, G. & Salerno, F. (2017). Combined Use of Caffeine and Turbidity to Evaluate the Impact of CSOs on River Water Quality. *Water, Air, & Soil Pollution*.

Wahl, T. L. (2003). Discussion of "Despiking acoustic doppler velocimeter data" by Derek G. Goring and Vladimir I. Nikora. *Journal of Hydraulic Engineering*, *129*(6), 484-487.

Wang, X., Yang, L., Sun, Y., Song, L., Zhang, M. & Cao, Y. (2008). Three-dimensional simulation on the water flow field and suspended solids concentration in the rectangular sedimentation tank. *Journal of Environmental Engineering*, *134*(11), 902-911.

Wang, Y., Wang, W., Hu, X. & Liu, F. (2018). Experimental and numerical research on trapezoidal sharp-crested side weirs. *Flow Measurement and Instrumentation*, *64*, 83-89.

Weber, L. J., Schumate, E. D. & Mawer, N. (2001). Experiments on flow at a 90 open-channel junction. *Journal of Hydraulic Engineering*, *127*(5), 340-350.

Weiß, G. J. (1997). Vortex separator : proposal of a dimensioning method. *Water science and technology*, *36*(8-9), 201-206.

Weiß, G. J. & Michelbach, S. (1996). Vortex separator : dimensionless properties and calculation of annual separation efficiencies. *Water Science and Technology*, *33*(9), 277-284.

Werner, H. & Wengle, H. (1993). Large-eddy simulation of turbulent flow over and around a cube in a plate channel. In *Turbulent shear flows 8* (p. 155-168). Springer.

Weyrauch, P., Matzinger, A., Pawlowsky-Reusing, E., Plume, S., von Seggern, D., Heinzmann, B., … Rouault, P. (2010). Contribution of combined sewer overflows to trace contaminant loads in urban streams. *Water Research*, *44*(15), 4451-4462. doi :https://doi.org/10.1016/j.watres.2010.06.011

Wilcox, D. C. (1998). *Turbulence modeling for CFD*. DCW industries La Canada, CA.

Wissocq, G., Gourdain, N., Malaspinas, O. & Eyssartier, A. (2017). Regularized characteristic boundary conditions for the Lattice-Boltzmann methods at high Reynolds number flows. *Journal of Computational Physics*, *331*, 1-18. doi :https://doi.org/10.1016/j.jcp.2016.11.037

Wojtenko, I., Stinson, M. K. & Supply, W. (2003). *CSO Disinfection Pilot Study : Spring Creek CSO Storage Facility Upgrade*. National Risk Management Research Laboratory, Office of Research et Development, US Environmental Protection Agency.

Xu, Z., Xiong, L., Li, H., Yin, H., Wu, J., Xu, J. & Zhang, J. (2017). Pollution characterization and source analysis of the wet weather discharges in storm drainages. *Desalin Water Treat*, *72*, 169-181.

Yakhot, V., Orszag, S. A., Thangam, S., Gatski, T. B. & Speziale, C. G. (1992). Development of turbulence models for shear flows by a double expansion technique. *Physics of Fluids A : Fluid Dynamics*, *4*(7), 1510-1520.

Yan, H. (2013). *Experiments and 3D modelling of hydrodynamics, sediment transport, settling and resuspension under unsteady conditions in an urban stormwater detention basin* (thèse de doct., INSA de Lyon).

Yan, H., Lipeme Kouyi, G., Gonzalez-Merchan, C., Becouze-Lareure, C., Sebastian, C., Barraud, S. & Bertrand-Krajewski, J.-L. (2014). Computational fluid dynamics modelling of flow and particulate contami-

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2020LYSEI083/these.pdf
© [A. Claro Barreto], [2020], INSA Lyon, tous droits réservés

nants sedimentation in an urban stormwater detention and settling basin. *Environmental Science and Pollution Research*, *21*(8), 5347-5356.

Yang, S.-Q., Tan, S.-K. & Lim, S.-Y. (2004). Velocity distribution and dip-phenomenon in smooth uniform open channel flows. *Journal of hydraulic engineering*, *130*(12), 1179-1186.

Yoris, A. & Muller, M. (2018). *Pré-étude Enverdi® DBO*. AMS Envolure. Grand Lyon Métropole.

Zagustin, K. (1968). Sediment distribution in turbulent flow. *Journal of Hydraulic Research*, *6*(2), 163-172.

Zaji, A., Bonakdari, H. & Shamshirband, S. (2018). Standard equations for predicting the discharge coefficient of a modified high-performance side weir. *Scientia Iranica*, *25*(3A), 1057-1069. cited By 1. doi :10.24200/sci.2017.4198

Zgheib, S., Moilleron, R. & Chebbo, G. (2011). Influence of the land use pattern on the concentrations and fluxes of priority pollutants in urban stormwater. *Water Science and Technology*, *64*(7), 1450-1458. doi :10.2166/wst.2011.770. eprint : https://iwaponline.com/wst/article-pdf/64/7/1450/444690/1450.pdf

Zgheib, S., Moilleron, R. & Chebbo, G. (2012). Priority pollutants in urban stormwater : Part 1–Case of separate storm sewers. *Water research*, *46*(20), 6683-6692.

Zhang, W. & Li, T. (2015). Particle size distributions in combined sewer overflows in a high-intensity urban catchment in Shanghai, China. *Desalination and Water Treatment*, *56*(3), 655-664. doi :10.1080/19443994.2014.942703. eprint : https://doi.org/10.1080/19443994.2014.942703

Zhao-Li, G., Chu-Guang, Z. & Bao-Chang, S. (2002). Non-equilibrium extrapolation method for velocity and pressure boundary conditions in the lattice Boltzmann method. *Chinese Physics*, *11*(4), 366-374. doi :10.1088/1009-1963/11/4/310

Zhu, X., Claro Barreto, A. & Lipeme Kouyi, G. (2016). Design and performance evaluation of Hydrocyclone and Lamella Settler for Urban Stormwater Sediments. In *8th International Conference on Sewer Process and Networks (SPN8)*, Rotterdam, Pays-Bas.

Zhuo, C. & Zhong, C. (2016). LES-based filter-matrix lattice Boltzmann model for simulating fully developed turbulent channel flow. *International Journal of Computational Fluid Dynamics*, *30*(7-10), 543-553.

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2020LYSEI083/these.pdf
© [A. Claro Barreto], [2020], INSA Lyon, tous droits réservés

FOLIO ADMINISTRATIF

THESE DE L'UNIVERSITE DE LYON OPEREE AU SEIN DE L'INSA LYON

NOM : CLARO BARRETO DATE de SOUTENANCE : 05/10/2020

Prénoms : Alejandro

TITRE : Expérimentation et modélisation de l'hydrodynamique et la dispersion de la pollution particulaire au sein des déversoirs latéraux

NATURE : Doctorat Numéro d'ordre : 2020LYSEI083

Ecole doctorale : Mécanique, Energétique, Génie Civil et Acoustique - MEGA

Spécialité : Génie Civil

RESUME : Les déversoirs d'orages (DO) d'un système de collecte sont la principale source de pollution des milieux récepteurs en temps de pluie. La maîtrise des flux de pollution déversés par ces DO requiert l'étude de l'hydrodynamique et du transport de polluants véhiculés généralement sous forme particulaire en suspension. L'ensemble des travaux expérimentaux et numériques s'est intéressé à l'hydrodynamique et à la dispersion des polluants particulaires au niveau des déversoirs latéraux aux échelles laboratoire et terrain. L'écoulement tridimensionnel est caractérisé grâce aux données suivantes : la hauteur d'eau, le débit, le champ de vitesse et l'énergie cinétique turbulente. La dispersion des polluants particulaires est étudiée à l'aide de la répartition massique à l'échelle pilote et de la concentration et du flux de pollution en DBO_5 déversés à l'échelle terrain. Cette étude a permis de valider pour la première fois, à notre connaissance, l'approche numérique 3D basée sur la mécanique des fluides numérique (CFD, en anglais) appliquée au cas d'un déversoir latéral complexe soumis à l'autosurveillance réglementaire grâce aux données in situ de hauteurs d'eau, débits amont et débits déversés, collectées par Valence Romans Agglo. Les résultats d'analyse des premières campagnes montrent que le critère de conformité réglementaire lié au flux de pollution déversé en temps de pluie s'avère être adapté au fonctionnement du système de collecte de la ville de Valence. En effet, la concentration en DBO5 déversée par le principal DO est inférieure à celle mesurée en entrée de la station de traitement. Ces travaux confirment l'emploi de l'approche CFD et des essais en laboratoire comme outils opérationnels permettant (i) de comprendre le comportement hydrodynamique d'un DO en temps de pluie, (ii) d'analyser la conformité d'un système de collecte et (iii) d'évaluer et d'améliorer la mise en place de l'autosurveillance.

MOTS-CLÉS : déversoir d'orage latéral; transport particulaire ; caractérisation hydrodynamique ; simulation numérique ; qualité des rejets d'un déversoir d'orage.

Laboratoire (s) de recherche : Déchets Eaux Environnement Pollution – DEEP ; Laboratoire de Mécanique des Fluides et d'Acoustique – LMFA.

Directeur de thèse: Gislain LIPEME KOUYI
Co-Directeur de thèse: Nicolas RIVIERE

Président de jury : Pierre BUFIERRE

Composition du jury : Abdellah GHENAIM, Frédérique LARRARTE, Pierre BUFIERRE, Ghassan CHEBBO, Gislain LIPEME KOUYI, Nicolas RIVIERE, Franck BIOTEAU

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2020LYSEI083/these.pdf
© [A. Claro Barreto], [2020], INSA Lyon, tous droits réservés