



HAL
open science

Mise en place de l'autosurveillance du réseau d'assainissement de la communauté d'agglomération Vichy-Val d'Allier en particulier au niveau des déversoirs d'orage

Marion Frelat

► **To cite this version:**

Marion Frelat. Mise en place de l'autosurveillance du réseau d'assainissement de la communauté d'agglomération Vichy-Val d'Allier en particulier au niveau des déversoirs d'orage. Sciences de l'ingénieur [physics]. 2015. dumas-03701909

HAL Id: dumas-03701909

<https://dumas.ccsd.cnrs.fr/dumas-03701909>

Submitted on 22 Jun 2022

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.



3D EAU



RAPPORT STAGE - MASTERE EPA 2014/2015

**MISE EN PLACE DE L'AUTO-SURVEILLANCE DU RESEAU
D'ASSAINISSEMENT DE LA COMMUNAUTE D'AGGLOMERATION
VICHY-VAL D'ALLIER EN PARTICULIER AU NIVEAU DES
DEVERSOIRS D'ORAGE**

Marion FRELAT

Société d'accueil :

3D EAU

4 rue Boussingault

67000 Strasbourg

Lieu du stage :

3 rue des Camélias 75014 Paris

Maitre de stage : Jonathan Wertel

Confidentiel jusqu'au 30 avril 2016

Date de soutenance : 17 novembre 2015

Date du stage : 04 Mai au 03 Novembre 2015



Résumé

L'évaluation des débits déversés vers le milieu naturel est un besoin exprimé par de nombreux acteurs de l'eau mais aussi une obligation requise par l'Arrêté du 21 juillet 2015 sur l'autosurveillance des ouvrages. Dans ce contexte, la Communauté d'Agglomération de Vichy Val d'Allier a engagé l'autosurveillance de 9 déversoirs d'orage. Ce rapport présente l'élaboration des dispositifs d'instrumentation de ces ouvrages au cas par cas. Diverses méthodes de modélisation, allant de formules semi-empiriques (loi de seuil, guide COACHS...) à la modélisation 3D des écoulements au sein de l'ouvrage (CFD), sont utilisées pour évaluer le débit déversé à partir de mesures de hauteur d'eau uniquement. L'emplacement des capteurs, une loi d'étalonnage (h/Q) et l'incertitude associée sont ainsi établis pour chaque ouvrage.

Mots-clefs : Autosurveillance, Installation capteurs, Courbe de remous, Modélisation CFD, Déversoirs d'orage, Incertitude

Abstract

The evaluation of the flow rate in sewer systems is a need met by many stakeholders in water management as well as an obligation by European legislation. In France, a decree published on the 21st of July 2015 requires to implement a continuous monitoring system to evaluate waste water discharge to the environment. In this context, the metropolitan area of Vichy Val d'Allier decided to install sensors to measure water flow discharge from 9 of their combined sewer overflows (CSOs). This report explains the implementation of the instrumentation of some of these CSO by different methods of modelling: empirical formula, 1D or 3D models. The idea is to use only water level sensors combined with a calibration curve established from modelling. Locations of sensors, calibration curve and uncertainties are given for each CSO.

Keywords: Continuous flow monitoring system, Instrumentation, Backwater curves, CFD model, Combined Sewer Overflow (CSO), Uncertainties

Sommaire

Table des Figures	4
Table des Tableaux	6
Introduction	7
I. Problématique : la mesure du débit en réseau hydraulique	8
I.1. Contexte général : un besoin	8
I.2. Contexte réglementaire : Autosurveillance	8
II. Méthodes existantes pour la mesure de débits	10
II.1. Etat de l'art : Dispositifs standards de mesure de débits.....	10
II.1.1. Mesure de vitesse de l'eau.....	10
II.1.2. Mesure de hauteur d'eau.....	12
II.1.3. Conclusion	15
II.2. Utilisation de la modélisation 3D pour l'évaluation du débit	15
II.2.1. Approche théorique générale	16
II.2.2. Mise en œuvre de la 3D : de la géométrie 3D au post-traitement des données.....	18
II.2.3. Validation expérimentale de la méthode.....	19
II.2.4. Calcul d'incertitude	20
II.2.5. Conclusion	20
II.3. Synthèse des méthodes	20
III. Illustrations à travers l'élaboration de l'autosurveillance de la Communauté d'Agglomération Vichy-Val D'Allier	22
III.1. Présentation de Vichy-Val d'Allier.....	22
III.2. Problématiques de l'étude	22
III.3. Cas d'études : résultats et discussions	23
III.3.1. Modèles 1D : cas du déversoir d'orage CUSSET	24
III.3.2. Modèle empirique : cas du déversoir d'orage RESISTANCE.....	33
III.3.3. Modèle 3D : cas de la surverse de la station de pompage Bel Air	39
III.3.4. Modèles 3D : cas du déversoir d'orage F. Glénard.....	50
III.4. Conclusions et suites à donner.....	59
Conclusion générale	61
Bibliographie	62
ANNEXES	64

Table des Figures

Figure 1. Émission de l'onde ultrasonore par la sonde (1), rémission par une particule (2) et calcul de la vitesse de la particule (3) (source : Thèse J.Wertel).....	10
Figure 2 : Illustration du FLO-DAR par Hach (gauche) ou Raven-Eye par Flow-Tronic (droite) (source COMETEC).....	11
Figure 3 : Principe d'un appareil de mesure à cordes de vitesse (gauche) ; photo de 3 sondes réparties verticalement dans une canalisation de Chambéry Métropole (droite). (Source : GRAIE, 2009)	11
Figure 4 : Schéma en perspective d'un seuil triangulaire avec p : hauteur de pelle, h1 : lame déversante (source : CETMEF).....	13
Figure 5. Schéma d'un canal venturi vu de dessus et principe de fonctionnement	14
Figure 6. Méthode H2Q.....	15
Figure 7. Profil de vitesses dans la couche limite.....	17
Figure 8. Illustration d'une interface eau/air (0 correspond à l'air et 1 à l'eau)	18
Figure 9. Exemple de géométrie 3D de canalisations avec un seuil.....	18
Figure 10. Exemple de maillage: vue intérieure (Gauche); vue extérieure avec raffinement (Droite).	19
Figure 11. Méthodologie pour déterminer la technologie la plus adaptée pour évaluer un débit déversé	21
Figure 12. Schéma du réseau d'assainissement de Vichy Val d'Allier	22
Figure 13. Démarche de l'étude pour la mise en place de l'autosurveillance de VVA	23
Figure 14. Schéma du DO Cusset, vue de dessus	26
Figure 15. Cas possibles d'écoulements qui entraînent un déversement (pente faible) ; hc : hauteur critique	26
Figure 16. Profil en long DO Cusset (I : pente (%))	27
Figure 17. Schéma de l'évacuation de la canalisation de déversement du DO CUSSET	28
Figure 18. Méthodologie des calculs pour le DO Cusset (écoulement fluvial à l'amont)	29
Figure 19. Courbe de remous le long de la crête du déversoir Cusset.....	30
Figure 20. Schéma d'installation du capteur avec le cône de détection.....	30
Figure 21. Loi de déversement $Q_{\text{déversé}}=f(h \text{ aval capteur})$, emplacement du capteur à 42cm du mur aval	31
Figure 22. Evolution de l'incertitude avec le débit déversé (calculé par la loi de déversement), pour un intervalle de confiance de 95%	31
Figure 23. DO Cusset, vue de dessus (gauche) et vue de profil (droite)	32
Figure 24. Vue de profil du DO Résistance	35
Figure 25. Application de lois empiriques au DO Résistance	35
Figure 26. Méthodologie des calculs pour le DO Résistance dans le cas d'un écoulement à surface libre.....	36
Figure 27. Emplacement du capteur	37
Figure 28. Loi de déversement du DO Résistance	37
Figure 29. Emplacement du capteur	38
Figure 30. Vue de dessus du DO Bel Air dans le poste de pompage (gauche) ; Vue de profil du seuil (droite).....	41

Figure 31. Méthodologie pour élaborer la loi de déversement avec la modélisation 3D.....	42
Figure 32. Vue extérieure du maillage : raffinement au niveau de l'entonnement et du seuil.....	43
Figure 33. Vue intérieure du maillage.....	43
Figure 34. Bilan de masse (exemple de la simulation 4, $Q=1,9 \text{ m}^3/\text{s}$).....	44
Figure 35. Localisation des 3 sections-tests pour la comparaison du débit présentée en Figure 32 ...	44
Figure 36. Comparaison des débits d'entrée, déversé et dans la chambre (exemple simulation $Q=1,9\text{m}^3/\text{s}$)	44
Figure 37. Résultat de surface libre pour $Q=1,4\text{m}^3/\text{s}$	45
Figure 38. Superposition de surfaces libres pour les débits :.....	46
Figure 39. Analyse de la vitesse de l'écoulement dans l'ouvrage : visualisation des zones tranquillisées	46
Figure 40. Stabilité spatiale pour la zone choisie pour l'emplacement du capteur (exemple $Q=0,4\text{m}^3/\text{s}$)	47
Figure 41. Variation de la hauteur d'eau à l'emplacement défini pour le capteur	47
Figure 42. Emplacement du capteur US pour le DO Bel Air	48
Figure 43. Loi de déversement pour le D.O bel Air	48
Figure 44. DO Cusset, vue de dessus.....	49
Figure 45. Schéma de la géométrie du DO F. Glénard	52
Figure 46. Géométrie 3D du nouveau seuil du DO F. Glénard	52
Figure 47. Maillage de l'ouvrage. Raffinement plus élevé au niveau du seuil	53
Figure 48. Modélisation 3D de l'ouvrage ($Q=1,2\text{m}^3/\text{s}$ et $h_{\text{aval}}=0,4\text{m}$)	54
Figure 49. Surfaces libres sans influence aval	54
Figure 50. Surfaces libres pour un débit de $0,5 \text{ m}^3/\text{s}$	55
Figure 51. Placement des capteurs de mesure de hauteur d'eau.....	55
Figure 52. Notation des hauteurs dans l'ouvrage	55
Figure 53. Cas d'écoulement en seuil noyé.....	56
Figure 54. Loi de seuil dénoyé et seuil noyé avec $h_2/h_1 < 0,41$	56
Figure 55. Loi de seuil noyé pour $h_2/h_1 > 0,41$	57
Figure 56. Comparaison des lois empiriques et des résultats de la modélisation 3D.....	58
Figure 57. Schéma du DO F. Glénard, vue de dessus	58
Figure 58. Schéma du DO F. Glénard, vue de profil	59
Figure 59. Récapitulatif des lois de déversement et d'incertitude (Q est en m^3/s et h en mètre)	59
Figure 60. Visualisation des écoulements ($Q=0,4\text{m}^3/\text{s}$) et le passage par un écoulement torrentiel... ..	72
Figure 61. Géométrie de l'ouvrage avec la canalisation de décharge du DO Cusset.....	72
Figure 62. Evolution de la vitesse dans la surverse du DO Bel Air ($Q_{\text{Bel Air}}= 0,4\text{m}^3/\text{s}$; $Q_{\text{Cusset}}=0,1\text{m}^3/\text{s}$) .	73

Table des Tableaux

Tableau 1. Obligations Article 17 de l'Arrêté du 21 juillet 2015	9
Tableau 2. Synthèse des technologies de mesure de vitesse d'eau	12
Tableau 3. Synthèse des limnimètres possibles	13
Tableau 4. Synthèse des technologies couplées à une mesure de hauteur d'eau	15
Tableau 5. Débits et volumes mensuels et décennaux pour le déversoir d'orage Cusset.....	27
Tableau 6. Conditions limites pour la modélisation du DO Cusset	29
Tableau 7. Loi de déversement du DO Cusset pour une hauteur d'eau mesurée à 42cm de la paroi aval	32
Tableau 8. Débits mensuels et décennaux pour le déversoir d'orage Résistance	35
Tableau 9. Domaine d'application pour l'écoulement à surface libre du DO Résistance	36
Tableau 10. Loi de déversement du DO Résistance	38
Tableau 11. Débits déversés possibles par analyse hydraulique	41
Tableau 12. Conditions limites pour la modélisation du DO Bel Air	43
Tableau 13. Récapitulatif des lois d'incertitude et de déversement.....	49
Tableau 14. Débit mensuels et décennaux pour le déversoir d'orage F. Glénard	52
Tableau 15. Conditions limites pour la modélisation du DO F. Glénard	53
Tableau 16. Valeurs utilisées et résultats de la modélisation 1D pour le DO CUSSET	68
Tableau 17. Débits déversés possibles par analyse hydraulique	71
Tableau 18. Comparaison des débits déversés de Cusset et de Bel Air	71
Tableau 19. Comparaison avec la hauteur critique dans la chambre de surverse.....	72
Tableau 20. Comparaison avec la hauteur d'eau mesurée à l'emplacement du capteur.....	71
Tableau 21. Calculs du débit pleine-section des canalisations à l'aval	74
Tableau 22. Calculs du débit déversé avec plusieurs configurations de pompage.....	74
Tableau 23. Liste des simulations.....	75
Tableau 24. Résultats des 8 simulations	75
Tableau 25. Liste des simulations 3D	76
Tableau 26. Résultats des modélisations 3D.....	77
Tableau 27. Comparaison loi empirique et résultats de modélisation : cas de seuil dénoyé.....	78
Tableau 28. Comparaison loi empirique et résultats de modélisation : cas de seuil noyé.....	78

Introduction

Depuis la signature de la Directive européenne sur les Eaux Résiduaires Urbaines, l'encadrement des rejets des réseaux d'assainissement vers le milieu naturel n'a cessé d'être modernisé et complété par la réglementation française et européenne pour répondre à la préservation des ressources en eau et des écosystèmes aquatiques. Même si la qualité des eaux de surface a globalement été améliorée ces 10 dernières années, les efforts ne doivent pas être relâchés pour contrôler les déversements des eaux usées et pluviales vers le milieu naturel. Un nouvel arrêté sur l'autosurveillance des réseaux d'assainissement a été publié le 21 juillet 2015, abrogeant l'arrêté du 22 juin 2007. Il impose de nouvelles obligations de suivi des ouvrages hydrauliques susceptibles de déverser vers le milieu naturel, notamment au niveau des déversoirs d'orage.

C'est dans ce contexte que la communauté d'agglomération de Vichy-Val d'Allier (VVA) a engagé une démarche de mise en place de l'autosurveillance au niveau de ses déversoirs d'orage. L'étude, qui consiste en l'instrumentation de 9 ouvrages pour évaluer le débit déversé, a été confiée à la société 3DEAU, et fait l'objet de ce rapport.

Créée en 2014, 3D EAU est une start-up qui est spécialisée dans l'ingénierie conseil pour la conception, le diagnostic et l'instrumentation des ouvrages de gestion des eaux urbaines. Le savoir-faire de 3D EAU repose sur une méthode innovante d'évaluation du débit déversé grâce à l'utilisation de la modélisation 3D. Cette technique est issue du laboratoire ICube (ENGEES, INSA de Strasbourg, CNRS et Université de Strasbourg).

Ce rapport, concluant mon stage de fin d'études de Mastère Spécialisé au sein de la société 3D EAU, aborde la problématique de mesure des débits déversés en réseaux d'assainissement. De nombreuses technologies existent, avec leurs avantages et inconvénients, mais aucune technologie ne remporte l'unanimité auprès des exploitants de réseaux. L'objectif de ce rapport est de mettre en place une démarche pour déterminer la méthode d'évaluation du débit la plus adaptée à chaque ouvrage pour optimiser le triptyque: fiabilité/précision, faible maintenance et coût d'investissement. Le projet de mise en place de l'autosurveillance de Vichy Val d'Allier permet d'illustrer par des exemples la méthodologie mise en place. Un accent est mis en particulier sur la modélisation 3D développée par 3D EAU.

La première partie présente le contexte général et réglementaire lié à la mesure du débit en réseau d'assainissement.

La deuxième partie détaille l'ensemble des méthodes existantes pour mesurer un débit déversé avec leurs avantages et leurs contraintes. Les principes théoriques, la validation et la mise en œuvre de la modélisation 3D pour des applications hydrauliques y sont ensuite présentés. Enfin, une méthodologie aidant au choix de la technologie la plus adaptée à l'ouvrage conclut ce chapitre.

La dernière partie permet d'illustrer la démarche précédente par des cas concrets du réseau d'assainissement de Vichy-Val d'Allier. Quatre cas d'études, avec des méthodes de modélisations différentes, sont présentés en détail.

I. Problématique : la mesure du débit en réseau hydraulique

L'évaluation du débit dans les réseaux hydrauliques constitue un fort enjeu sur le plan scientifique, économique et écologique. Cette partie présente les enjeux de la mesure de débits pour de nombreux acteurs dans le domaine de l'eau, ainsi que le contexte réglementaire auxquels ils doivent faire face.

I.1. Contexte général : un besoin

La mesure de débit en réseaux d'assainissement répond à un fort besoin de la part des collectivités et des gestionnaires de réseaux.

Les collectivités ou Maîtres d'ouvrage portent un intérêt particulier à la mesure du débit dans leurs réseaux d'eau potable ou d'assainissement car « le prix du service de l'eau » est fortement dépendant de cette mesure de volume d'eau. En effet il est fonction de la quantité d'eau consommée, des redevances de l'Agence de l'eau, de l'entretien, de l'investissement sur le réseau de collecte et surtout de la quantité d'eau traitée et rejetée au milieu naturel. La mutualisation de certains réseaux hydrauliques, par exemple un réseau communal qui rejette dans un réseau à plus grande échelle avant de rejoindre la station de traitement d'eaux usées (STEU), rend indispensable une connaissance précise des débits de chaque collectivité pour une gestion optimale de la quantité d'effluents arrivant à la STEU et l'attribution exacte des taxes de l'Agence de l'eau.

Les gestionnaires de réseaux d'assainissement (privés ou publics) ont également besoin de connaître avec précision les débits circulant dans les réseaux pour des raisons techniques. Ces données sont utiles pour comprendre correctement le fonctionnement du réseau, gérer en temps réels certains ouvrages hydrauliques selon les conditions météorologiques (temps sec, évènement pluvieux de faible ou forte intensité...) et évaluer la fréquence d'entretien du réseau.

Enfin, certaines collectivités ont besoin de connaître les débits déversés vers le milieu naturel afin d'évaluer leur impact sur l'environnement. Il s'agit par exemple de collectivités en bord de zones de baignade ou récréatives.

I.2. Contexte réglementaire : Autosurveillance

Le besoin de mesurer le débit avec précision émis par les Maîtres d'ouvrage est renforcé par les contraintes réglementaires auxquelles sont soumises les collectivités.

Depuis la signature de la Directive européenne Eaux Résiduaires Urbaines (Directive CEE 21.05.91), l'état français est tenu de reporter à l'Union Européenne la qualité du fonctionnement des réseaux d'assainissement sur son territoire. Les systèmes de collecte d'eaux usées sont conçus pour éviter tout rejet direct dans le milieu naturel d'effluents non traités en temps sec et en temps de petites pluies. La responsabilité du suivi du fonctionnement des réseaux et des rejets des eaux usées et pluviales vers le milieu naturel est donnée aux Maîtres d'Ouvrage.

La Directive Cadre sur l'Eau (2000/60/DCE) renforce le cadre législatif et établit une obligation de résultats pour atteindre le bon état écologique et chimique des masses d'eau d'ici à 2015.

C'est dans ce contexte de directives européennes que la France a retranscrit en droit français des obligations sur la gestion des réseaux d'assainissement, notamment avec l'Arrêté du 22 juin 2007 sur l'autosurveillance. Cet arrêté impose le suivi des ouvrages qui sont susceptibles de déverser vers le milieu naturel et qui ont une charge organique supérieure à 120kg DBO₅/j. L'article 18 hiérarchise l'autosurveillance des ouvrages telle que :

- pour les ouvrages collectant une **charge brute de pollution organique comprise entre 120 et 600 kgDBO₅/jour** (soit 2000 à 10 000 Equivalent-Habitant (EH)), l'estimation des périodes de déversement et des débits est imposé.

- pour les ouvrages collectant une **charge brute de pollution organique supérieure à 600 kgDBO₅/jour** (soit >10 000EH), la mesure du débit déversé et l'estimation des charges organiques rejetées vers le milieu naturel sont obligatoires.

Le préfet a le pouvoir par un arrêté préfectoral de spécifier que seulement les ouvrages représentant 70% des déversements du réseau vers le milieu naturel sont suivis et instrumentés en débit.

Depuis juillet 2015, un nouvel arrêté sur l'autosurveillance est entré en vigueur et abroge le précédent. Il s'agit de l'arrêté du 21 juillet 2015. Ce nouveau texte (article 17) allège légèrement les obligations détaillées précédemment en ajoutant une subdivision de 10 jours de déversement pour les cas de charge brute de pollution organique supérieure à 600 kg DBO₅/jour. Ainsi le Tableau 1 ci-dessous récapitule les obligations :

Tableau 1. Obligations Article 17 de l'Arrêté du 21 juillet 2015

	Débits déversés	Flux de pollution
Charge entre 120 et 600 kgDBO₅/jour Ou >600 kgDBO₅/jour et moins de 10 jours de déversement/an (en moyenne quinquennale)	Estimation	/
>600 kgDBO₅/jour et plus de 10 jours de déversement/an (moyenne quinquennale)	Mesure et enregistrement	Estimation

Le préfet garde la possibilité de réaliser le suivi les ouvrages représentant 70% des déversements du réseau vers le milieu naturel. Toutefois tous les ouvrages ayant une charge supérieure à 600kgDBO₅/j et plus de 10 jours de déversement, doivent être instrumentés en mesure de débits. Les données sont fournies à l'Agence de l'eau sous le format SANDRE avant le 31 décembre 2015.

Une fois l'instrumentation d'autosurveillance mise en place, la note technique du 7 septembre 2015 de mise en œuvre de l'Arrêté du 21 juillet 2015 précise que la « conformité ERU » est donnée si une des 3 conditions suivantes est respectée :

- Les rejets par temps de pluie représentent moins de 5% des volumes d'eaux usées produits par l'agglomération d'assainissement durant l'année (condition de quantité) ;
- Les rejets par temps de pluie représentent moins de 5% des flux de pollution produits par l'agglomération d'assainissement durant l'année (condition de qualité) ;
- Moins de 20 jours de déversement ont été constatés durant l'année au niveau de chaque déversoir d'orage soumis à autosurveillance réglementaire

Ainsi, la mise en place de l'autosurveillance des déversoirs d'orage de Vichy-Val d'Allier qui est le projet décrit dans ce rapport, doit respecter le nouvel arrêté du 21 juillet 2015. La répartition de l'instrumentation des ouvrages selon la charge, réalisée avec l'ancien Arrêté, est toujours valable.

II. Méthodes existantes pour la mesure de débits

La mesure de débits est un enjeu primordial pour les gestionnaires de réseaux. De nombreuses méthodes et technologies existent pour répondre à cette problématique. Cette partie présente différentes technologies avec leurs avantages et inconvénients, ainsi qu'une nouvelle méthode innovante utilisant la modélisation 3D mise en œuvre par 3D EAU.

II.1. Etat de l'art : Dispositifs standards de mesure de débits

L'état de l'art suivant présente les différentes technologies existantes et leurs contraintes pour évaluer un débit. Les méthodes présentées sont celles appliquées en particulier dans les collecteurs et ouvrages hydrauliques des réseaux d'assainissement (déversoirs, canaux venturi...). Les différentes méthodes de mesure de débits sont divisées en 2 grandes familles :

- Mesure de la vitesse de l'eau et de la surface de la section de l'écoulement correspondante
- Mesure de hauteurs d'eau, associée à une courbe d'étalonnage.

II.1.1. Mesure de vitesse de l'eau

L'évaluation du débit par mesure de la vitesse de l'eau repose sur l'équation du débit qui s'écrit :

$$Q[m^3/s] = vitesse [m/s] * Surface [m^2]$$

Il s'agit alors de mesurer simultanément la vitesse de l'écoulement et la hauteur du tirant d'eau pour calculer la surface mouillée correspondante. Les technologies de mesure de vitesse sont couramment utilisées en réseaux d'assainissement grâce aux capteurs à effet Doppler.

II.1.1.a. Capteur Doppler à ondes ultrasonores

Les capteurs utilisant les ondes ultrasonores sont des instruments de mesure très répandus. Le capteur est immergé et fixé au fond de la canalisation. La sonde émet un faisceau d'ondes ultrasonores qui est réfléchi, avec une variation de longueur d'onde, par les particules en mouvement dans le fluide. Le capteur mesure la variation de fréquence entre l'onde émise et reçue puis calcule la vitesse (cf. Figure 1). Ce capteur Doppler est couplé à une mesure de hauteur d'eau pour calculer la surface mouillée de la section correspondante.

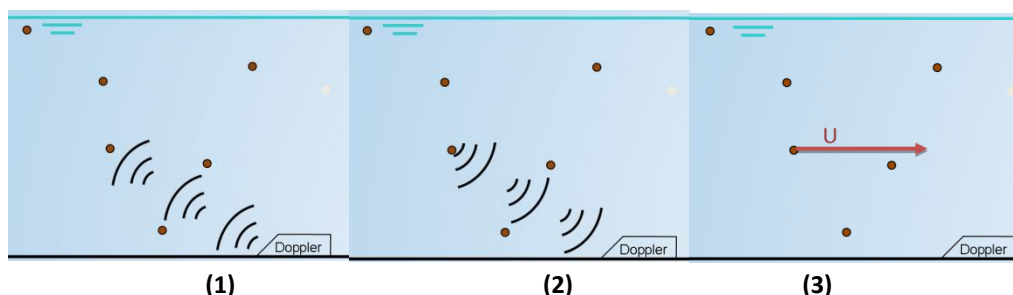


Figure 1. Émission de l'onde ultrasonore par la sonde (1), rémission par une particule (2) et calcul de la vitesse de la particule (3) (source : Thèse J.Wertel)

II.1.1.b. Capteur Doppler à ondes Radar

Cette nouvelle génération de capteurs Doppler est composée d'une sonde émergée, qui mesure la vitesse de la surface libre par émission d'ondes radar. Le principe de mesure est le même que celui

décrit précédemment avec les ondes ultrasonores. Ces sondes sont généralement couplées avec une mesure de hauteur d'eau par écho d'ondes ultrasonores pour calculer la surface mouillée. Quelques illustrations de cette technologie sont présentées dans la Figure 2 suivante.

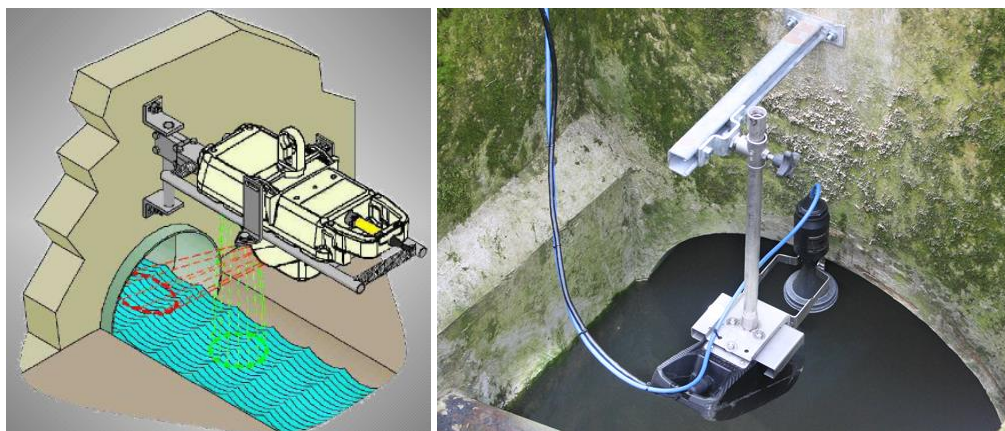


Figure 2 : Illustration du FLO-DAR par Hach (gauche) ou Raven-Eye par Flow-Tronic (droite) (source COMETEC)

II.1.1.c. Cordes de vitesse (ou méthode des temps de transit)

Une corde de vitesse est constituée de 2 capteurs ultrasons, chacun installé sur un bord opposé de la canalisation avec un angle β par rapport à la direction de l'écoulement (cf. Figure 3). Les sondes émettent alternativement l'une vers l'autre et le signal est reçu par le capteur opposé. La différence de temps de transit entre l'aller et le retour permet de calculer la vitesse moyenne de l'écoulement sur cette ligne fictive. Un appareil de mesure est donc constitué de plusieurs cordes de vitesses réparties à différentes hauteurs pour permettre de calculer une vitesse moyenne sur tout l'écoulement par interpolation. Plus il y a de cordes de vitesses plus la précision de mesure de vitesse sera élevée. Ces sondes sont couplées à une mesure de hauteur d'eau pour calculer la surface mouillée correspondante.

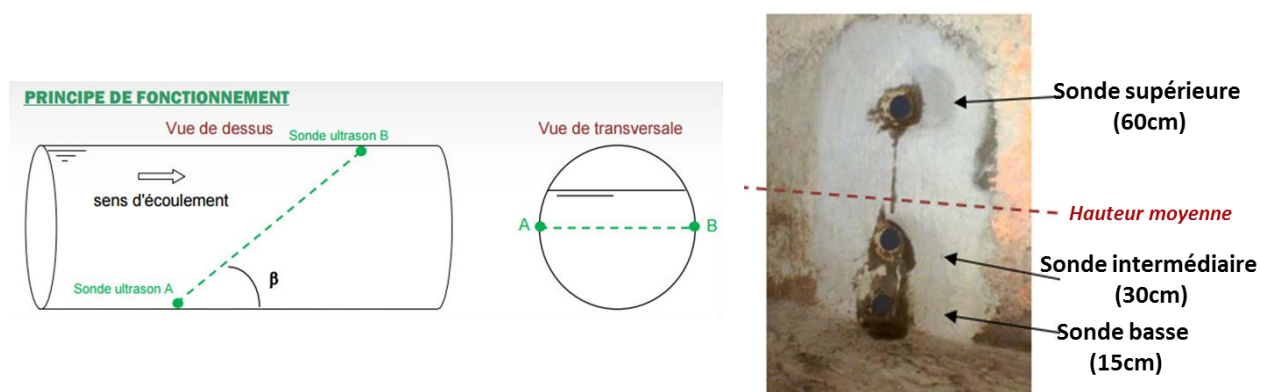


Figure 3 : Principe d'un appareil de mesure à cordes de vitesse (gauche) ; photo de 3 sondes réparties verticalement dans une canalisation de Chambéry Métropole (droite). (Source : GRAIE, 2009)

II.1.1.d. Contraintes associées aux technologies de mesure de vitesse

L'ensemble des technologies de mesure décrites précédemment demande une grande rigueur dans l'installation et la maintenance pour garantir une bonne précision de mesure de vitesses et donc de débits. Les contraintes à respecter pour chaque capteur proviennent des données constructeur, de normes internationales et surtout des problèmes rencontrés par les exploitants. Seuls les grands principes sont récapitulés dans ce rapport:

-les conditions d'installation. Il faut s'assurer que le capteur soit à une distance suffisante des singularités. Le site ne doit pas faire l'objet d'un fort risque de dépôts et présenter une hauteur et vitesses d'eau supérieures au minimum indiqué par le constructeur.

-la mise en place du capteur. Le choix des paramètres de mesure tels que l'angle du cône de mesure par rapport à l'horizontale, le volume sur lequel est réalisée la mesure, ainsi que les paramètres de pondération des signaux en post-traitement des informations mesurées, influencent la précision de la mesure. Le post-traitement des signaux est obligatoire pour lisser le bruit dû à la mesure. Il peut toutefois poser des problèmes de sous-estimation du débit lors de pics de débits.

-la maintenance des capteurs. Les technologies immergées dans le flux présentent de fortes contraintes opérationnelles. Il est obligatoire de nettoyer fréquemment les capteurs pour éviter que la fenêtre de mesure soit occultée.

-la composition du flux. Un flux trop chargé, ou au contraire peu chargé en particules diminue la précision des mesures. Dans le premier cas d'un fluide très turbide, notamment pour les ondes ultrasonores, la portée de l'onde est diminuée. Au contraire, dans un écoulement faiblement turbide, la réflexion de l'onde sur les particules est faible et pose des problèmes de mesure.

-le résultat de la vitesse. La vitesse mesurée est toujours une vitesse locale qui est étendue par interpolation à la vitesse moyenne sur la section du fluide.

II.1.1.e. Synthèse des technologies à mesure de vitesse d'eau

Les différentes technologies et leurs contraintes sont récapitulées dans le Tableau 2 ci-dessous.

Tableau 2. Synthèse des technologies de mesure de vitesse d'eau

Technologies	Immergées		Non-intrusif
	Doppler (US)	Corde de vitesse	Doppler (Radar)
Maintenance (/dépôt)	Fréquente	Régulière	Faible
Précision/Incertitudes	Difficile à évaluer	Bonne	Difficile à évaluer car interpolation vitesse de surface libre
Mise en œuvre	Facile	Difficile	Facile
Fonctionnement en charge	oui	oui	Zone morte
Sensibilité à l'environnement	Sensibilité à la composition, gradient de température...	Sensibilité aux bulles d'air et vagues	Faible
Coût d'investissement	Plus faible que les 2 autres (dépend du coût du tirage de câbles)	Elevée	Installation facile, sonde plus chère

II.1.2. Mesure de hauteur d'eau

La mesure de hauteur d'eau est une mesure courante et robuste en réseau d'assainissement. Elle doit toutefois être couplée à une courbe d'étalonnage qui permet de calculer le débit. La mesure de hauteur peut être effectuée soit par des capteurs immergés (capteur piézométrique), soit par des capteurs non-intrusifs par écho d'ondes ultrasonores (US) ou Radar. Le Tableau 3 ci-dessous

récapitule brièvement les avantages et les inconvénients de ces 3 techniques de mesure de hauteur d'eau.

Tableau 3. Synthèse des limnimètres possibles

	Non-intrusif		Immergés
	US (ultrason)	Radar	Piézomètre
Technologies	Echo ondes US	Echo onde Radar	Pression
Méthode de mesure	Echo ondes US	Echo onde Radar	Pression
Coût d'investissement	Faible	Elevé	Faible
Installation	Facile	Facile	Facile
Mise en charge	Zone morte	Zone morte	Oui
Sensibilité à l'environnement	Sensible aux gradients de température, brouillard/fumée	/	Sensible à l'encrassement + dépression liée à la vitesse
Maintenance	Très faible	Très faible	Régulier
Précision/Incertitude	Bonne	Bonne	Moyenne

Le choix du limnimètre dépend ainsi de l'environnement de l'ouvrage, de la possibilité de mise en charge ou non, ainsi que de la fréquence de la maintenance envisagée. Il faut ensuite déterminer la méthode utilisée pour établir la courbe d'étalonnage et relier la mesure de hauteur d'eau au débit. Plusieurs méthodes sont présentées ci-dessous.

II.1.2.a. Limnimètre couplé à un seuil

Le seuil constitue un obstacle transverse au sens d'écoulement. L'eau est alors contrainte de se déverser par ce seuil qui est suivi d'une chute. La courbe de remous passe alors obligatoirement par la hauteur critique, ce qui permet de déduire le débit lié à la hauteur d'eau (h_1) mesurée en amont du seuil (cf. Figure 4). La forme de la paroi transverse est aménagée pour optimiser le fonctionnement du seuil, par exemple une forme de crête en V, comme sur la Figure 4, peut fonctionner pour de faibles débits.

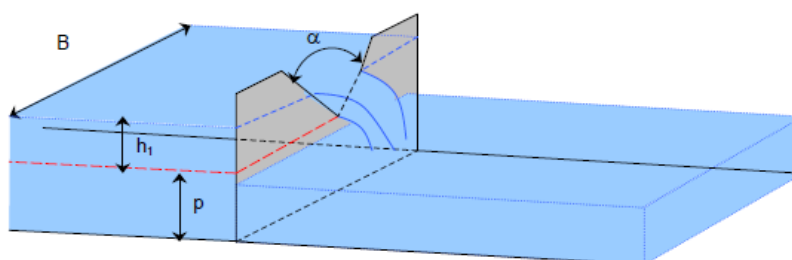


Figure 4 : Schéma en perspective d'un seuil triangulaire avec p : hauteur de pelle, h_1 : lame déversante (source : CETMEF)

L'installation d'un seuil provoque une élévation de la hauteur d'eau et pose les problèmes suivants:

- un ralentissement de la vitesse, ce qui favorise les dépôts. Un entretien régulier est donc nécessaire.

- une perturbation de la ligne d'eau qui peut provoquer une surverse inopinée d'un déversoir d'orage en amont.

L'utilisation d'un seuil correspond également une gamme de débits précise, ce qui peut être contraignant dans des réseaux d'assainissement unitaires où les débits peuvent varier fortement. Le seuil est en pratique très peu utilisé en réseau.

II.1.2.b. Limnimètre couplé à une vanne : mesure opportuniste

Le même principe de section de contrôle existe avec une vanne. La vanne n'est jamais rajoutée en réseau pour des raisons d'instrumentation car elle crée de fortes pertes de charge. Toutefois si une vanne est déjà mise en place pour des raisons de gestion, elle peut être utilisée de manière opportuniste pour installer un capteur de mesure de hauteurs d'eau. Les mêmes inconvénients que les seuils existent pour les vannes.

II.1.2.c. Limnimètre couplé à un canal venturi

Sur le même principe que le seuil, le canal venturi est un ouvrage hydraulique qui contraint l'écoulement à passer par la hauteur critique et donc permet le calcul du débit avec une mesure de hauteur d'eau amont. A la différence du seuil, le passage par la hauteur critique est réalisé par l'entonnement du fluide dans un col. Le régime d'écoulement amont est fluvial et torrentiel à l'aval (cf. Figure 5). Le principal désavantage de ce type d'ouvrage est la faible gamme de débits mesurés. Le canal venturi est très couramment utilisé en sortie de station de traitement des eaux usées.

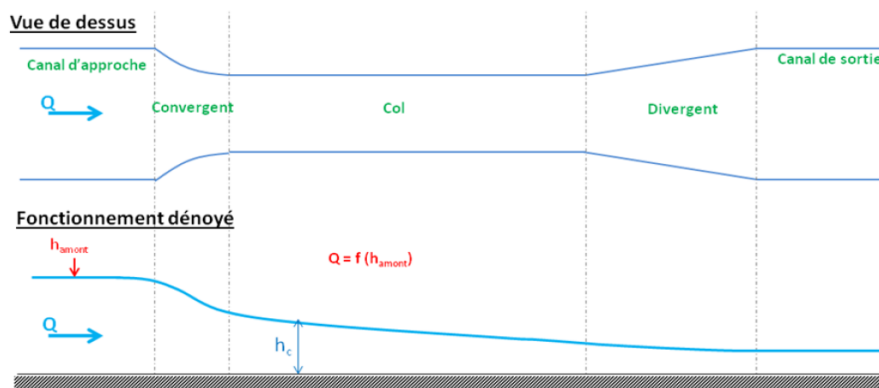


Figure 5. Schéma d'un canal venturi vu de dessus et principe de fonctionnement

II.1.2.d. Limnimètre couplé à une loi hauteur/débit établie à l'aide d'un modèle

Cette méthode consiste à établir une relation hauteur/débit par le calcul des lignes d'eau dans l'ouvrage. Ces lignes d'eau peuvent être approchées grâce à plusieurs types de modèles :

- **formules empiriques**, par exemple la formule de Kindsvater pour les seuils des déversoirs d'orage, une loi d'entonnement pour le passage de l'eau d'une chambre vers une canalisation plus étroite...
- **calcul des courbes de remous**, par exemple le calcul de la ligne d'eau sur un déversoir d'orage latéral avec la méthode de la charge spécifique constante.

Cette méthode permet de concevoir un dispositif robuste, où la gamme de débits testés peut être large. Toutefois cette méthode n'est possible que pour des configurations standards d'ouvrage et ne peut pas s'appliquer à des cas plus complexes d'écoulement.

II.1.2.e. Méthode H2Q : Deux limnimètres couplés à une loi hauteur/débit

La méthode H2Q repose sur la mise en place de deux capteurs de hauteur d'eau dans deux sections distinctes du collecteur afin d'évaluer un débit (cf. Figure 6). Le calcul de la courbe de remous pour différents débits permet d'établir une relation du type $Q = f(h_{amont}, h_{aval})$.

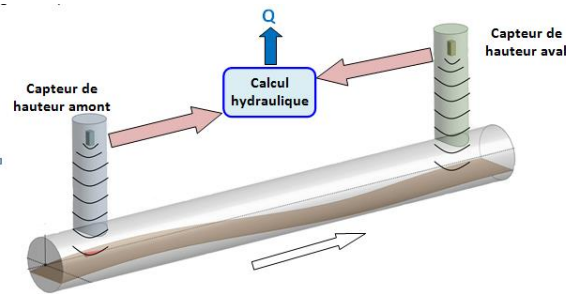


Figure 6. Méthode H2Q

Cette méthode n'est valable que dans les conditions suivantes :

- Le régime d'écoulement doit rester fluvial entre les deux mesures de hauteur d'eau
- Il n'y a pas d'apport d'eau significatif entre les deux mesures de hauteur
- Absence de dépôt (susceptible de modifier la section mouillée, voire la pente)
- Aucune singularité (type coude ou jonction), à l'aval ou/et à l'amont immédiat des points de mesure, qui perturbe la surface libre de l'écoulement
- Les deux capteurs doivent être suffisamment éloignés pour que la différence de niveau mesurée soit significative

II.1.2.f. Synthèse des technologies de mesure de hauteur d'eau

Les différentes technologies et leurs contraintes sont récapitulées dans le Tableau 4 ci-dessous.

Tableau 4. Synthèse des technologies couplées à une mesure de hauteur d'eau

Technologies	Seuil/vanne/ canal venturi	Modèle empirique ou 1D	H2Q
Précision/Incertitudes	Bonne	Bonne	Bonne
Génie civil	Elevé (sauf vanne déjà en place)	Faible	Faible
Gamme de débits	Faible	Grande	Moyenne (tirant d'eau pas trop petit)
Fonctionnement en charge	Non	Oui suivant choix limnimètre	Non
Maintenance (/dépôt)	Fréquente	Régulière	Régulière

II.1.3. Conclusion

Il existe ainsi un grand nombre de technologies pour évaluer un débit dans les réseaux d'assainissement mais il y a encore une nécessité pour le Maître d'ouvrage de trouver une méthode précise, robuste et présentant de faibles coûts de travaux et d'exploitation dans le cas d'écoulements complexes, notamment au niveau des déversoirs d'orage. Une méthode innovante, répondant à cet enjeu, a été mise au point par le laboratoire ICube (ENGEEES, INSA de Strasbourg, CNRS et Université de Strasbourg) et est mise en œuvre par la start-up 3D EAU qui en est issue. Sur le même principe que la mesure de hauteur d'eau couplée à la modélisation empirique ou 1D, cette méthode utilise la modélisation 3D pour répondre aux cas d'ouvrages complexes.

II.2. Utilisation de la modélisation 3D pour l'évaluation du débit

La modélisation 3D est une technologie qui est couramment utilisée pour la modélisation de mécanique des fluides dans les domaines de l'aéronautique, automobile ou encore prédiction météorologiques. 3D EAU, par son savoir-faire issu de la recherche, propose d'appliquer ces outils de

modélisation 3D aux problèmes d'écoulements complexes dans des ouvrages hydrauliques. Cette partie présente les principes théoriques généraux, la méthodologie à mettre en place et la validation expérimentale de cette méthode. Le calcul d'incertitudes sur l'estimation du débit sera également détaillé.

II.2.1. Approche théorique générale

La Modélisation Numérique 3D des Fluides (MNF) est communément nommée selon le sigle anglais CFD (Computational Fluid Dynamics). Elle est basée sur la résolution des équations fondamentales de mécanique des fluides dans une géométrie donnée, soit un ouvrage hydraulique dans notre cas. Le volume de l'ouvrage étudié est discrétisé en de nombreux petits blocs finis, appelés les mailles, et les équations de mécanique des fluides sont résolues dans chaque petit volume (méthode des volumes finis).

Les équations principales de CFD sont celles de Navier Stokes qui décrivent le mouvement de fluides newtoniens. Ces équations sont basées sur un bilan de force sur un élément de volume de fluide qui met en jeu la gravité, la pression et la viscosité du fluide (glissement du fluide sur lui-même). Elles lient alors les 4 inconnues définissant l'état d'un fluide en mouvement : les 3 composantes de la vitesse et la pression.

La résolution numérique directe (ou Direct Numerical Simulation, DNS) des équations de Navier Stokes pour des écoulements turbulents requièrent des discrétisations spatiales et temporelles très fines pour bien représenter la formation de tourbillons, ce qui nécessite ensuite une très grande puissance de calculs. Ceci n'est pas envisageable pour des applications pratiques avec des ouvrages en taille réelle dans le domaine de l'hydraulique. Les équations de Navier-Stokes sont alors transformées en injectant la décomposition statistique de la vitesse (terme moyen+ terme fluctuant) pour aboutir au modèle RANS (Reynolds Averaged Navier Stokes).

La résolution par le modèle RANS permet de dissocier des équations relatives au champ moyen de l'écoulement (3 équations de vitesse moyennées dans les 3 directions dans l'espace) et un terme lié à la turbulence. La relation entre la propagation de l'écoulement et la turbulence repose sur un échange d'énergie. Le champ moyen obtient l'énergie nécessaire pour mettre en mouvement l'écoulement grâce à la pente (force de gravité) et à la turbulence. La turbulence se divise en 2 grands phénomènes :

-un phénomène stable qui est appelé courants secondaires. Les courants secondaires sont des structures hélicoïdales qui accompagnent la propagation du fluide et se créent en fonction de la géométrie de la canalisation et de la rugosité.

-un phénomène instable de tourbillons. A la moindre singularité dans l'écoulement, les courants secondaires créent d'autres phénomènes de turbulence pour passer l'obstacle et gérer l'énergie associée à cette désorganisation de l'écoulement. Cette turbulence est basée sur la formation de petits tourbillons qui, soit s'agrandissent en plus grands tourbillons, se propagent et créent une agitation dans le fluide, soit les petits tourbillons dissipent l'énergie cinétique en chaleur et disparaissent. Dans le dernier cas, le champ moyen perd de l'énergie et est ralenti.

Ainsi pour calculer les vitesses moyennes par la méthode de RANS, il faut ajouter des équations supplémentaires pour prendre en compte la turbulence, mais aussi les conditions aux parois et la nature diphasique du fluide (interface eau/air).

II.2.1.a. Modèle de turbulence

Dans les réseaux d'assainissement, les écoulements sont principalement turbulents et donc les phénomènes de turbulence décrits précédemment se produisent. Il faut alors évaluer l'influence de la turbulence sur le champ moyen de vitesse à l'aide d'équations supplémentaires. Ces équations permettent de fermer le système d'équations moyennées de Navier Stokes et de les résoudre correctement. Il existe plusieurs familles de modèles de turbulence. Certains modèles sont plus complexes et résolvent les 6 équations de turbulence. D'autres modèles plus simples, regroupent toutes les équations en 2 équations, l'une pour calculer la propagation de l'énergie cinétique, l'autre pour calculer la dissipation visqueuse. Ces informations moyennées dans le temps sont suffisantes pour des applications hydrauliques où des variables globales telles que la hauteur d'eau ou le débit intéressent les Maîtres d'ouvrage. Ces modèles, les plus communément utilisés et validés, sont nommés modèles $k-\omega$ ou $k-\varepsilon$ avec k : énergie cinétique turbulente et ε ou ω : taux de dissipation de l'énergie cinétique. Le modèle $k-\omega$ réalise une meilleure estimation de l'écoulement en présence de fort gradient de pression, notamment dans la zone proche paroi.

II.2.1.b. Conditions aux parois

La modélisation de la turbulence pose des problèmes de calculs dans la zone proche de la paroi car la vitesse au niveau de la paroi est nulle. La couche limite est définie par la zone en contact avec la paroi qui présente un gradient de vitesses non nul (cf. Figure 7). En réalité, dans les canalisations, la couche limite est très grande car la variation de vitesse se produit dans toute la section de l'écoulement. La zone qui pose des problèmes de modélisation, est la zone proche paroi avec un fort gradient de vitesses où les effets visqueux du fluide ne sont alors plus négligeables.

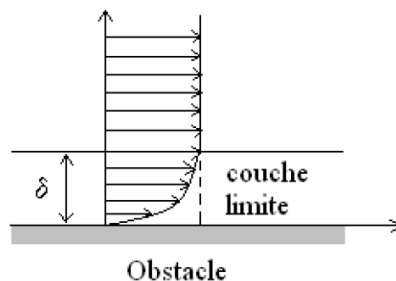


Figure 7. Profil de vitesses dans la couche limite

Pour la modélisation, la couche limite est divisée en 2 parties : une zone interne en contact avec la paroi où la viscosité est prédominante et une zone externe avec une influence forte de la diffusion turbulente. Ils existent 2 types de modèles qui jouent sur le nombre de mailles pour définir la zone interne. Le premier découpe cette zone avec des mailles très fines et résout les équations très précisément mais nécessite une forte capacité de calculs. Le second résume cette zone en une seule maille et traduit seulement les effets globaux. La capacité de calcul est alors plus faible. Le modèle utilisé lors de mon stage est appelé $k-\omega$ STT (Shear Stress Transport). Il calcule la distance à la paroi et adapte les équations utilisées, qui sont basées sur celles du modèle $k-\omega$.

II.2.1.c. Interface eau/air : volume of Fluid (VoF)

Les modélisations doivent également être capables de représenter l'écoulement du fluide à surface libre, ce qui constitue une interaction eau-air. La technique utilisée, appelée Volume of Fluid,

consiste à attribuer à chaque maille du modèle la fraction volumique 0 ou 1. 0 représente l'air et 1 l'eau. Cette valeur est ensuite transportée dans les calculs de champs de vitesse et pression pour déterminer le bon comportement.

Les cellules de la surface libre sont marquées par une valeur comprise entre 0 et 1, comme le montre la Figure 8 ci-dessous. Cela signifie que ces cellules sont remplies à la fois d'eau et d'air. La surface libre est alors facilement identifiable, mais sa précision dépend de l'échelle de la maille.

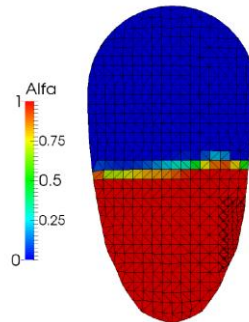


Figure 8. Illustration d'une interface eau/air (0 correspond à l'air et 1 à l'eau)

II.2.2. Mise en œuvre de la 3D : de la géométrie 3D au post-traitement des données

La mise en œuvre de la modélisation 3D nécessite quelques étapes clés pour bien représenter les caractéristiques de l'ouvrage hydraulique et comprendre son fonctionnement. Ces étapes sont primordiales pour garantir la fiabilité des calculs obtenus par CFD.

II.2.2.a. Création de la géométrie 3D

La géométrie de l'ouvrage est créée en 3D grâce à un logiciel de CAO (Conception Assistée par Ordinateur). Un exemple est donné en Figure 9 ci-dessous.

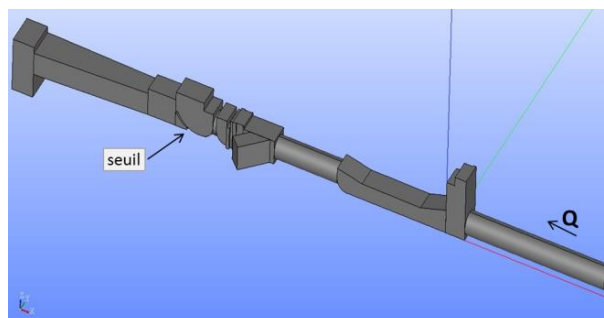


Figure 9. Exemple de géométrie 3D de canalisations avec un seuil

II.2.2.b. Maillage (Meshing)

La géométrie est divisée en un ensemble de volumes de tailles et de formes variées, appelées les mailles. La densité du maillage doit être suffisamment fine pour décrire précisément les spécificités de l'ouvrage, mais ne pas dépasser les capacités de calculs du processeur. Un compromis peut être trouvé en rendant le maillage hétérogène : certaines parties de l'ouvrage (par exemple un seuil...) sont raffinées pour avoir une taille de mailles plus fine aux endroits où les calculs doivent être plus précis. Un exemple est donné dans la Figure 10 suivante.

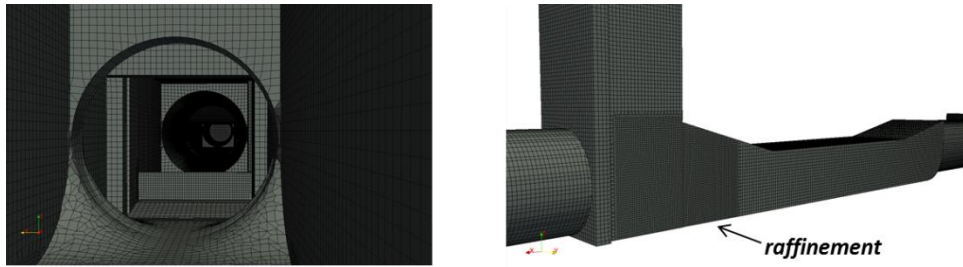


Figure 10. Exemple de maillage: vue intérieure (Gauche); vue extérieure avec raffinement (Droite)

II.2.2.c. Conditions aux limites

L'ouvrage modélisé est coupé du réseau d'assainissement avec lequel il interagit. Les conditions aux limites correspondent aux valeurs aux extrémités de l'ouvrage que le modélisateur doit imposer pour bien représenter la réalité. Il s'agit des régimes d'écoulement amont, des débits possibles, l'influence aval d'autres ouvrages, les apports d'eau possibles... Il est alors possible d'imposer au modèle une hauteur d'eau ou une vitesse (ou leurs dérivées pression et débit), en termes de constante ou gradient. Ces conditions sont établies après une analyse de l'environnement hydraulique de l'ouvrage.

La définition des conditions limites est primordiale car si elles sont mal définies, elles peuvent produire des résultats non conformes à la réalité.

II.2.2.d. Calcul et post-traitement des données

Lorsque ces 3 étapes sont réalisées, un processeur résout les équations de CFD. Un post-processeur permet ensuite de traiter et visualiser les données. La hauteur d'eau, le débit ainsi que la vitesse sont disponibles en tout point de l'ouvrage (avec plus ou moins de précision). Une équation du type $Q_{\text{déversé}} = f(\text{hauteur d'eau})$ est établie à l'emplacement du limnimètre dans l'ouvrage. Cette équation, souvent de type polynomiale, est directement enregistrée dans les automates du gestionnaire du réseau et le calcul du débit déversé est réalisé en continu.

II.2.3. Validation expérimentale de la méthode

Les calculs de CFD sont des calculs déterministes, contrairement aux modèles 1D conceptuels de Barré de Saint Venant qui sont largement utilisés pour la modélisation globale de réseaux d'assainissement (par exemple le logiciel CANOE). La construction de ces modèles 1D nécessite un calage de la pente (ajout d'une perte de charge) avant de réaliser des calculs pour ajuster les constantes du modèle avec la réalité des débits mesurés sur le terrain.

En modélisation 3D, aucun calage n'est nécessaire pour la résolution des calculs. Les constantes introduites dépendent des caractéristiques du fluide, de la turbulence etc. et sont paramétrées dans le code de calcul.

L'application de la modélisation 3D à l'écoulement dans un ouvrage hydraulique a été validée par la thèse de Lipeme Kouyi (2004). Des essais en pilote sur des écoulements simples en canaux rectangulaires puis des ressauts et des écoulements complexes de déversoirs ont été modélisés. Ces résultats sont comparés à la surface libre, aux débits déversés et conservés réels dans le pilote. L'erreur entre la modélisation et les mesures expérimentales sont inférieures à 10%. Des essais de

validation ont ensuite été réalisés dans les déversoirs d'orage de Fontainebleau, Sélestat et Clichy et présentent des résultats concluants.

II.2.4. Calcul d'incertitude

La détermination de la loi $Q_{\text{déversé}} = f(\text{hauteur d'eau})$ par modélisation 3D, pour un emplacement particulier de capteurs, s'accompagne d'une évaluation de l'incertitude sur les résultats de débits déversés. 3D EAU a mis en place une méthodologie conforme aux recommandations de la norme ISO IEC 98-3. L'incertitude est calculée pour un intervalle de confiance de 95%, c'est-à-dire qu'il y a 95% de chances que la valeur réelle du débit soit comprise dans cet intervalle.

Les sources d'incertitudes sur le débit déversé sont les suivantes :

- **L'incertitude de mesure de la hauteur d'eau** : celle-ci provient de l'incertitude des capteurs de mesure du niveau d'eau et des paramètres de pose.
- **L'incertitude de la formule mathématique reliant la hauteur d'eau aval au débit déversé** : celle-ci provient de l'interpolation des résultats par la loi $Q_{\text{déversé}} = f(\text{hauteur d'eau})$. Les résultats sont distribués autour de la courbe de tendance. Cette incertitude de calcul dépend donc du débit.
- **L'incertitude du modèle numérique** : celle-ci est due à la discrétisation du domaine de calcul en petits éléments de taille finie. Elle est évaluée au moyen d'une analyse de sensibilité au maillage et le calcul du Grid Convergence Index (GCI) selon la procédure de Roache (1994). L'incertitude diminue lorsque le nombre de cellules de calculs augmente. Néanmoins au-delà d'un certain nombre de mailles, ce paramètre présente un comportement asymptotique. L'incertitude du maillage représente l'écart entre les résultats obtenus et cette valeur de convergence.

II.2.5. Conclusion

La technologie de mesure de hauteur d'eau couplée à la modélisation 3D est une méthode qui permet de répondre aux enjeux rencontrés par les Maîtres d'ouvrage : robuste, précis, peu de coûts d'investissement et de maintenance. Elle s'applique notamment à des écoulements complexes avec une bonne précision. Cette méthode a été validée et expérimentée dans de nombreux ouvrages en France.

II.3. Synthèse des méthodes

Une multitude de méthodes d'évaluation de débits existent en réseaux d'assainissement pour répondre aux enjeux de l'autosurveillance. Il s'agit alors de déterminer la méthode la plus adaptée à chaque ouvrage en termes de fiabilité, précision de mesure, tout en répondant à des critères de faibles coûts d'investissement et de maintenance.

Le diagramme fonctionnel suivant a été établi pour aider au choix de la technologie de mesure du débit déversé (cf. Figure 11). Cette méthodologie a été mise en place et appliquée dans le cadre du projet de mise en place de l'autosurveillance des déversoirs d'orage de la Communauté d'Agglomération de Vichy Val d'Allier. Des exemples de cette étude sont ensuite présentés en illustration de cette méthodologie.

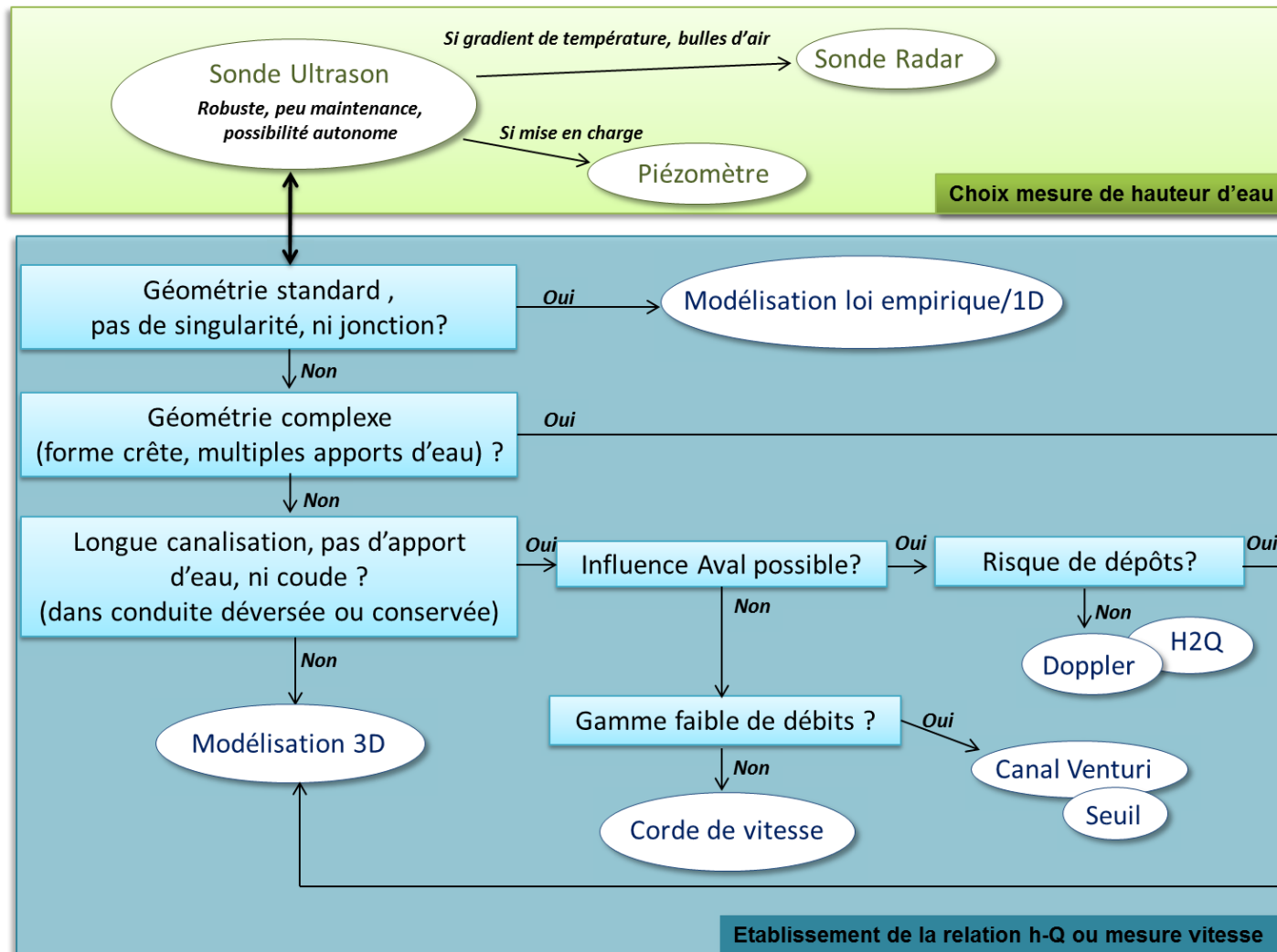


Figure 11. Méthodologie pour déterminer la technologie la plus adaptée pour évaluer un débit déversé

III. Illustrations à travers l'élaboration de l'autosurveillance de la Communauté d'Agglomération Vichy-Val D'Allier

La méthode décrite précédemment pour déterminer la technologie la mieux adaptée pour garantir une bonne estimation du débit en réseau d'assainissement, a été appliquée au projet de mise en place de l'autosurveillance de la communauté d'agglomération de Vichy-Val d'Allier. Cette partie a pour objet d'illustrer la démarche précédente et de présenter les résultats qui en découlent pour différents déversoirs d'orage. Les exemples résumés dans ce rapport sont des cas de modélisation avec des lois empiriques, 1D ou 3D. Pour chaque exemple, l'ensemble de l'étude n'est pas présenté en détail, car certains points seraient redondants ou ne présentent pas d'informations supplémentaires pour le questionnement sur la démarche.

III.1. Présentation de Vichy-Val d'Allier

La Communauté d'Agglomération Vichy-Val d'Allier (VVA) regroupe 23 communes sur un territoire de 320km² et 78 000 habitants. Le réseau d'assainissement est composé de 750km de canalisations dont 350km pour les eaux usées, 300km pour les eaux pluviales et 100km de réseau unitaire. VVA est située au bord de la rivière Allier dont la hauteur est régulée par un barrage en aval de la ville. Une grande galerie eaux pluviales (E.P.) récupère l'ensemble des eaux de pluie du réseau et les déverse dans le milieu naturel après le barrage de l'Allier (cf. Figure 12). Ce réseau est géré en régie depuis le début de l'année 2015.

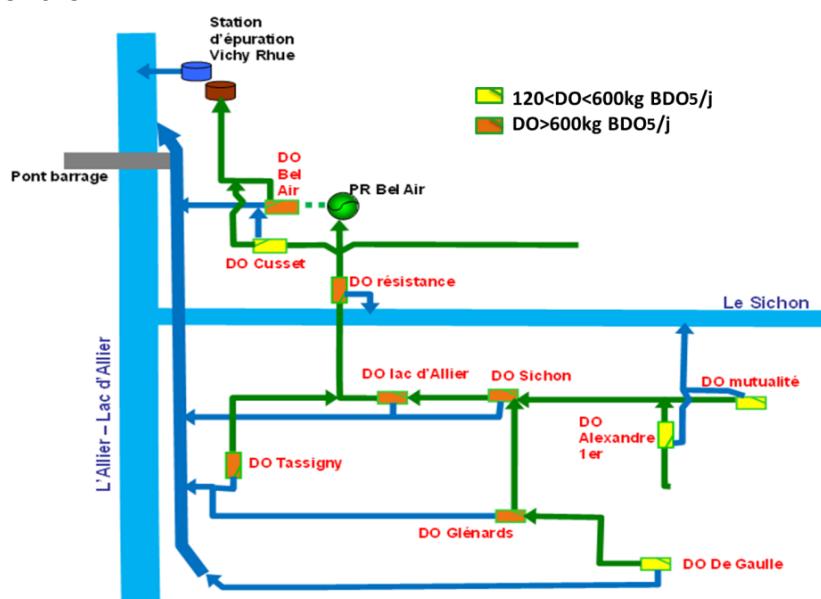


Figure 12. Schéma du réseau d'assainissement de Vichy Val d'Allier

III.2. Problématiques de l'étude

La Communauté d'Agglomération de Vichy Val d'Allier a engagé une démarche de mise en place de l'autosurveillance au niveau de ses déversoirs d'orage pour se mettre en conformité avec la réglementation (cf. Partie I.2).

Une étude amont a été réalisée par le bureau d'études Egis (Etude de gestion globale des eaux usées, des eaux pluviales, et du risque inondation sur le territoire de Vichy Val d'Allier) en 2012. Les informations utiles pour le projet d'autosurveillance ont été extraites de la précédente étude d'Egis, de la modélisation 1D PCSWMM, également réalisée lors de l'étude Egis, d'une visite terrain réalisée par 3D EAU (avril 2015) et de la mise à disposition du SIG de VVA.

L'étude consiste en l'instrumentation de 9 déversoirs d'orage. Des contraintes spécifiques à la ville thermale existent et doivent être prises en compte :

- présence d'eaux thermales qui peuvent engendrer de forts gradients de température et formation de brouillard dans certaines parties du réseau
- contraintes paysagères. Il n'est pas possible d'installer des armoires électriques partout dans la ville. Des capteurs autonomes seront préférés, sauf en cas d'électricité disponible à proximité.

III.3. Cas d'études : résultats et discussions

Pour chaque ouvrage de VVA, la démarche décrite par la Figure 13 ci-dessous est effectuée.

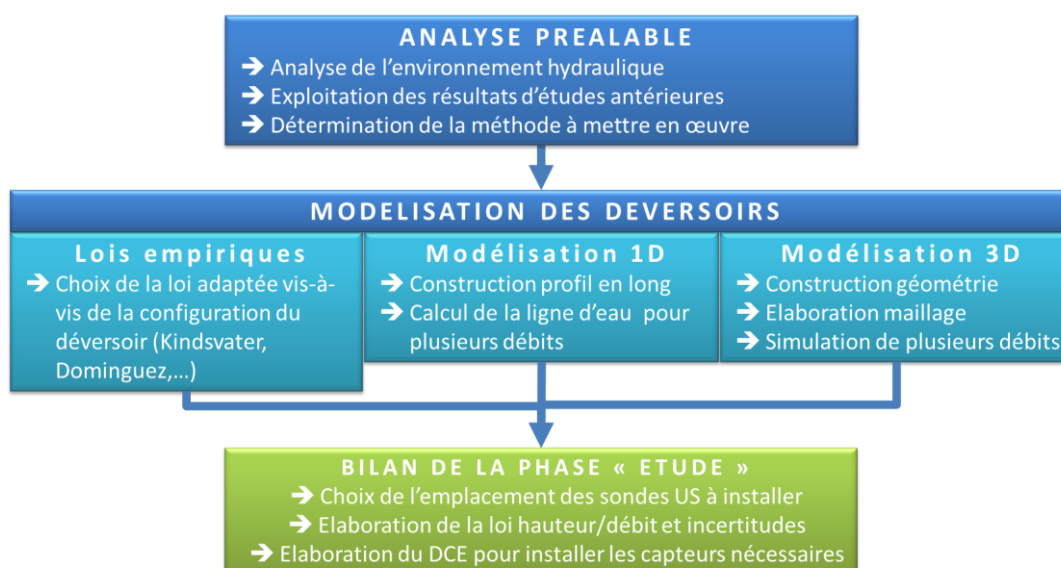


Figure 13. Démarche de l'étude pour la mise en place de l'autosurveillance de VVA

Quatre cas d'études de déversoirs d'orage sont présentés dans ce rapport. Les points détaillés pour chaque ouvrage sont choisis pour éviter la redondance entre les exemples tels que :

Cas du déversoir d'orage Cusset : Modélisation 1D

- Démarche de l'analyse de l'environnement hydraulique
- Méthode de la charge spécifique constante
- Exemple d'élaboration de lois d'incertitude

Cas du déversoir d'orage Résistance : Modélisation avec des lois empiriques

- Méthode avec des lois empiriques (loi de seuil et d'entonnement – Guide COACHS)

Cas de la surverse de la station de pompage Bel Air : Modélisation 3D

- Etapes initiales de la modélisation 3D : géométrie 3D, maillage
- Extraction des données : unicité de la hauteur d'eau pour un débit, stabilité spatiale et temporelle

Cas du déversoir d'orage F. Glénard : Modélisation 3D

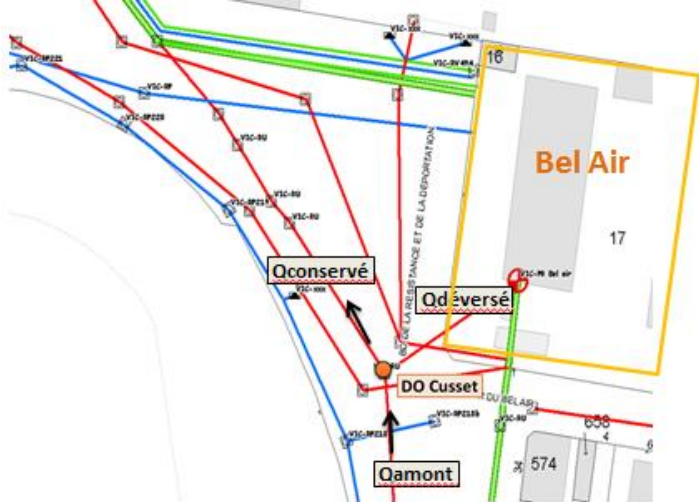
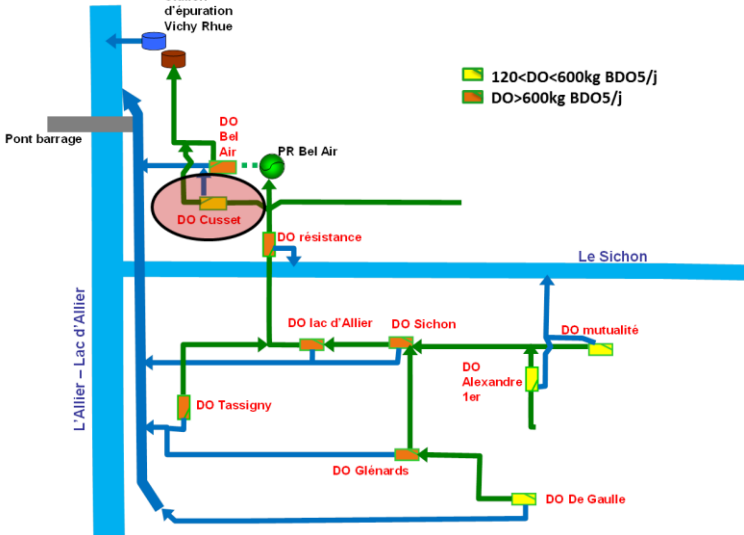
- Comparaison avec une loi de seuil empirique

III.3.1. Modèles 1D : cas du déversoir d'orage CUSSET

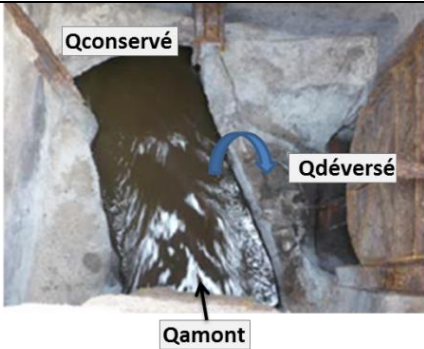
L'instrumentation du déversoir d'orage CUSSET consiste en l'installation de capteurs de mesure d'eau couplée à une modélisation 1D. La démarche à mettre en œuvre pour réaliser l'analyse de l'environnement hydraulique, ainsi que les calculs mis en jeu pour la modélisation 1D sont détaillés dans cet exemple.

III.3.1.a. Généralités

Localisation dans le réseau d'assainissement VVA

GENERALITES	
<p>Localisation dans le réseau d'assainissement de VVA</p>	<p>Le déversoir d'orage (DO) Cusset est situé à proximité du poste de pompage Bel air et déverse dans la surverse du poste de relèvement pour ensuite rejoindre la galerie d'eaux pluviales (E.P).</p> 
<p>Interaction du DO dans le réseau</p>	<p>Le DO Cusset est à l'aval du réseau de collecte des eaux usées de la ville de Cusset et il n'est pas influencé par d'autres DO en amont.</p> 
<p>Charge (kg DBO₅/j)</p>	<p>544 kgDBO₅/j (soit de 9061 Equivalent-Habitant) : Enjeu moyen</p>
<p>Objectif et intérêt de la mesure</p>	<p>Mise en place de l'auto surveillance Suivi en continu du débit déversé et estimation des charges rejetées</p>
<p>Déversements</p>	<p>Faible déversement pour des pluies mensuelles (très faible volume : 160m³) Déversement pour les pluies décennales (source : modèle PCSWMM calé pour le réseau de VVA (étude Egis (2012))</p>

Analyse de l'environnement hydraulique et choix de la méthode d'instrumentation

SINGULARITES ET CONTRAINTES DE L'OUVRAGE			
Type de déversoir	Déversoir latéral à crête haute		
Singularités amont	Régime d'écoulement fluvial		
Singularités aval	<p>Mise en charge de la conduite aval lors d'un déversement (hauteur d'eau supérieure à la hauteur de crête).</p> <p>Présence de 2 siphons dans la conduite conservée qui participent certainement à la mise en charge des canalisations jusqu'au DO.</p> <p>Pas d'influence aval possible dans la conduite déversée (vérification de la capacité d'évacuation des eaux par la Galerie E.P).</p> <p>(cf. détails dans III.3.1.b)</p>		
Géométrie particulière/ photo de la visite	<p>Vue de dessus :</p> 		
Autres contraintes	N/A		
ANALYSE COMPARATIVE DES METHODES DE MESURE DE DEBITS			
Techniques possibles		Méthodes pertinentes	Méthodes non applicables
Vélocimétrie	Doppler		Risque de dépôts
	Corde de vitesse		Place limitée dans le DO, difficile de mettre en place ces méthodes
Section de contrôle	Seuil		
	Vanne		
	Venturi		
Modèle	H2Q		N/A
	Modèle empirique ou 1D	Modèle 1D à charge spécifique constante	
	Modèle de trop-plein		N/A
	3D	Méthode possible, mais pas nécessaire	
MODELISATION ET TECHNOLOGIE RETENUES			
Méthode de modélisation	Modélisation 1D (méthode de la charge spécifique constante)		
Technologie du capteur	Capteur ultrason (US) autonome et GSM		

III.3.1.b. Analyse de l'environnement hydraulique

L'analyse de l'environnement hydraulique du déversoir d'orage est toujours la première étape à réaliser pour comprendre le fonctionnement et les écoulements possibles dans l'ouvrage. Si cette étape est erronée, toute la modélisation suivante est fautive. La démarche effectuée pour une telle analyse est présentée en détail sur cet exemple.

Présentation de la géométrie du déversoir d'orage

Le déversoir d'orage Cusset est un déversoir latéral à crête haute. La Figure 14 présente la géométrie de l'ouvrage vue de dessus.

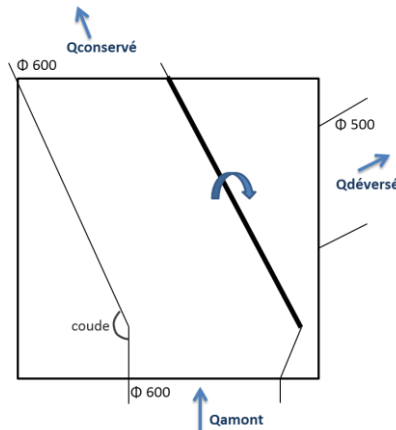


Figure 14. Schéma du DO Cusset, vue de dessus

La section du DO est en forme de U. La longueur de la crête mince est de 1,15m et sa hauteur est de 62cm. La conduite de décharge d'eaux pluviales est perpendiculaire à la direction de la crête et est située à 57cm de profondeur par rapport au sommet de cette dernière.

Le changement de direction dans l'ouvrage est un coude avec un rayon de courbure élevé. Lors de la visite de terrain, pas d'influence sur l'écoulement de l'eau a été constaté. La perte de charge singulière associée à cet obstacle reste négligeable.

Courbes de remous possibles dans le DO

Le fonctionnement d'un DO à crête haute est basé sur la mise en charge de la conduite aval lors d'un déversement (hauteur d'eau supérieure à la hauteur de crête). Le régime d'écoulement amont peut provoquer 3 cas de figures de déversement (cf. Figure 15). Ces courbes de remous sont basées sur la publication de Hager (1999).

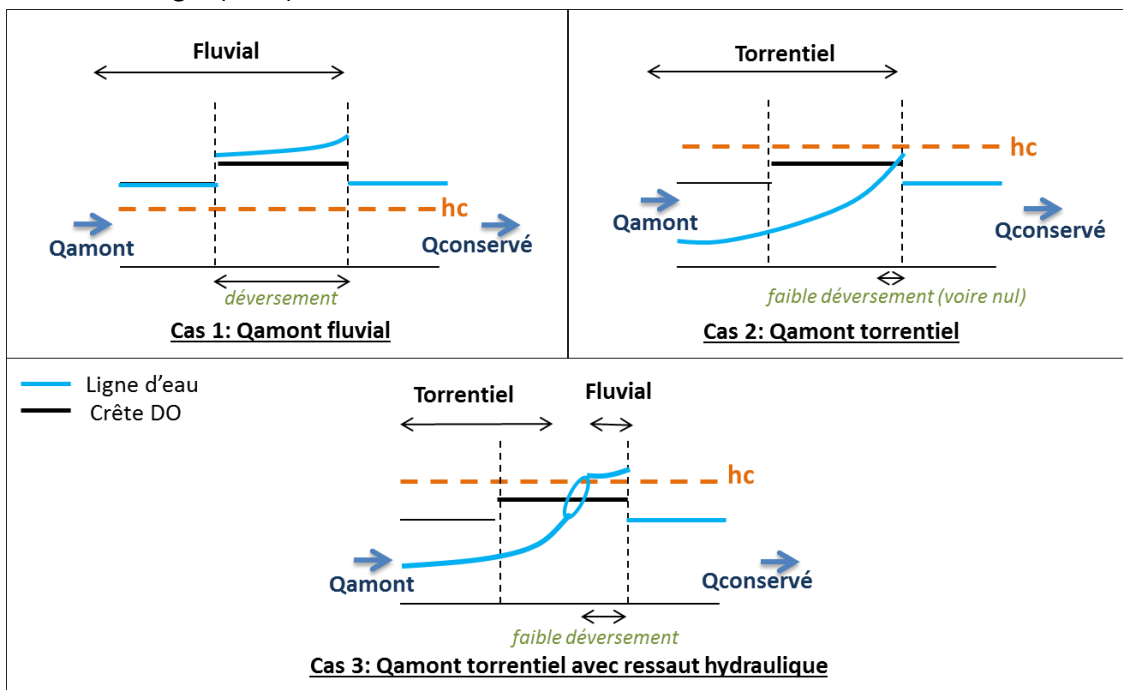


Figure 15. Cas possibles d'écoulements qui entraînent un déversement (pente faible) ; hc : hauteur critique

L'analyse du régime d'écoulement amont est donc primordiale pour évaluer la nature du déversement dans le DO Cusset.

Débits présents dans le DO d'après des études antérieures

Des modélisations ont été faites avec le modèle PCSWMM calé pour le réseau de VVA dans l'étude Egis (2012). Les débits et les volumes mensuels et décennaux sont présentés dans le Tableau 5 ci-dessous.

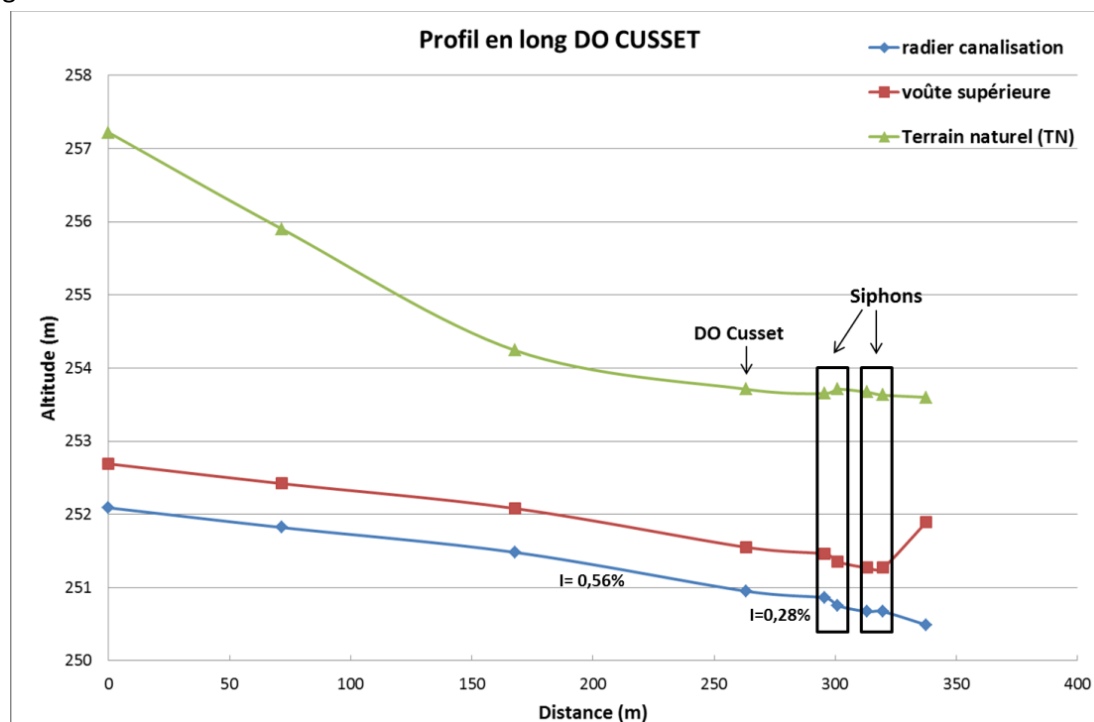
Tableau 5. Débits et volumes mensuels et décennaux pour le déversoir d'orage Cusset

Canalisation	Pluie mensuelle		Pluie T=10ans	
	Volume (m ³)	Débit max (m ³ /s)	Volume (m ³)	Débit max (m ³ /s)
Amont	5552	0,32	5052	0,34
Déversée	160	0,13	1275	0,19
Conservée	5380	0,28	3786	0,25

Le déversoir d'orage déverse pour les pluies mensuelles et décennales. Les volumes déversés sont plus précis que les débits car le logiciel PCSWMM gère difficilement les continuités d'écoulement au niveau des déversoirs. Le déversement mensuel représente un très faible volume, qui est probablement seulement un artefact de calculs de PCSWMM.

Analyse de l'Amont et de l'Aval conservé

Le profil en long des canalisations à l'amont et à l'aval du déversoir d'orage Cusset est présenté dans la Figure 16 ci-dessous.



Les pentes à l'amont et à l'aval du DO sont des pentes faibles. Le régime d'écoulement est fluvial dans les 2 canalisations pour la gamme de débits du DO, par calcul avec le logiciel d'hydraulique à surface libre HSL.

Dans la conduite conservée en aval du DO Cusset, 2 siphons ont été installés. Le premier permet le passage sous une canalisation ; le second délimitait, avant la création de la communauté d'Agglomération VVA, le réseau d'assainissement de Cusset à celui de Vichy. Le fonctionnement de ces 2 siphons est mal connu mais ils participent probablement à la mise en charge des canalisations en amont des siphons.

Analyse de l'aval déversé

La conduite de déversement du DO Cusset est évacuée dans la surverse du poste de pompage Bel Air, qui rejoint ensuite la galerie d'eaux pluviales. Il s'agit de vérifier qu'aucune influence aval provenant de la surverse Bel Air est possible. La Figure 17 ci-dessous présente l'emplacement de chaque ouvrage.

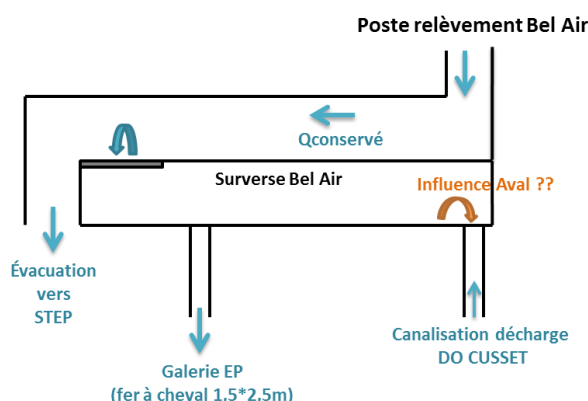


Figure 17. Schéma de l'évacuation de la canalisation de déversement du DO CUSSET

Lorsque toutes les pompes du poste de relèvement fonctionnent simultanément, le débit maximal dans la conduite conservée de Bel Air (ou ceinture de distribution) est de $6\text{ m}^3/\text{s}$. Or les canalisations en sortie de cette conduite permettent l'évacuation de $2,1\text{ m}^3/\text{s}$. Le débit déversé maximal est donc de $3,9\text{ m}^3/\text{s}$. La galerie d'eaux pluviales de décharge est capable d'évacuer la totalité de cette eau ($Q_{\text{pleine section}}=4,4\text{ m}^3/\text{s}$). Le niveau d'eau ne peut donc pas remonter jusqu'à la canalisation provenant du DO Cusset. Il n'y a donc pas d'influence aval possible sur le DO CUSSET.

Synthèse

Le régime d'écoulement est fluvial à l'amont du DO et il n'y a pas d'influence aval : le déversoir d'orage pilote la hauteur d'eau le long de la crête et donc le déversement.

III.3.1.c. Méthode de la charge spécifique constante

Le DO Cusset est un déversoir latéral à crête haute. L'aval du DO est toujours en charge lors d'un déversement. Un régime d'écoulement fluvial est présent dans la canalisation amont, ce qui signifie que la hauteur à l'aval de l'ouvrage est le point de contrôle de la hauteur d'eau dans l'ouvrage, notamment au niveau de la crête.

Méthodologie

La méthode de la charge spécifique constante repose sur la résolution de proche en proche d'équations différentielles définies par les lois de déversement et de définition de la charge spécifique. Les équations sont détaillées en Annexe 2. Cette méthode permet de connaître le débit et la hauteur d'eau en tout point de la crête. La hauteur d'eau étant pilotée par l'aval, le calcul des

équations différentielles est alors démarré à partir d'un couple de hauteur d'eau et de débit conservé à l'aval de la crête. Un pas d'espace de 1,15cm a été fixé pour la résolution des équations

La méthode est résumée en Figure 18 ci-dessous pour le cas d'un écoulement fluvial.

Schéma de la méthodologie des calculs (écoulement fluvial):

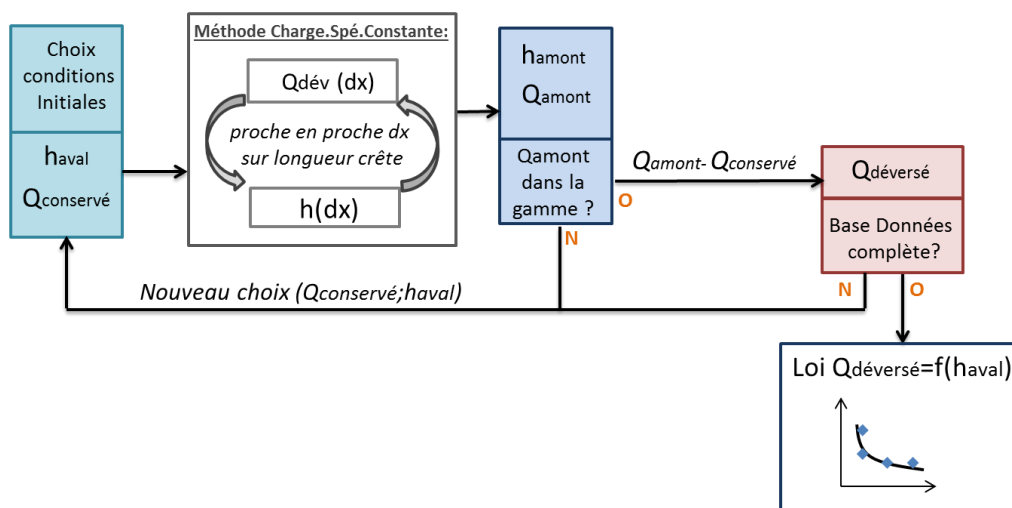


Figure 18. Méthodologie des calculs pour le DO Cusset (écoulement fluvial à l'amont)

Domaine d'application

Il est nécessaire de définir les conditions limites du modèle 1D pour couvrir la totalité des possibilités de débits présents dans le DO CUSSET. Les gammes des débits aval conservés ($Q_{\text{conservé}}$) et des hauteurs aval (h_{aval}) sont résumées dans le Tableau 6 suivant.

Tableau 6. Conditions limites pour la modélisation du DO Cusset

	Borne inférieure	Borne supérieure
$Q_{\text{conservé}} \text{ (m}^3\text{/s)}$	0,1	0,5
$h_{\text{aval}} \text{ (m)}$	0,63	1

Lors d'un déversement, la hauteur d'eau est supérieure à la hauteur de crête soit 63cm. La hauteur maximale est fixée à 1m. Le débit conservé est compris entre $0,1\text{m}^3\text{/s}$ et $0,5\text{m}^3\text{/s}$. La valeur maximale a été déterminée lors des calculs pour que le débit amont ne dépasse pas le débit de pleine section de la canalisation amont soit $0,42\text{m}^3\text{/s}$ ($\Phi 600$, $K_s=70$, pente 0,56%). En réalité, une marge de sécurité sur le débit amont jusqu'à $0,55\text{m}^3\text{/s}$ a été gardée car la valeur de K_s est théorique.

III.3.1.d. Elaboration de l'autosurveillance et calcul d'incertitudes

Après avoir défini la méthode et le domaine d'application, il s'agit de déterminer l'emplacement des capteurs et la loi d'étalonnage $Q_{\text{déversé}}=f(\text{hauteur d'eau})$ à implémenter dans les automates d'autosurveillance.

Analyse et validation des résultats de simulations

Les valeurs des couples (h_{aval} , $Q_{\text{conservé}}$) ont été définies aléatoirement dans le domaine d'application. Seules les valeurs plausibles de débits amont calculés sont gardées (inférieures à $0,55\text{m}^3\text{/s}$) (cf. III.3.1.c Domaine d'application). De plus, tous les résultats calculés vérifient la condition de régime d'écoulement fluvial ($h>h_c$, avec h_c : hauteur critique), (cf. Tableau 16 Annexe 3).

Identification de la position du/des capteur(s)

Le régime d'écoulement est fluvial dans l'ensemble du domaine d'application, un seul capteur ultrason est suffisant et doit être placé à l'aval. Ce type de capteur mesure sur un cône de détection et pas seulement sur la dernière cellule discrète haval. Il est important de vérifier l'allure de la surface libre. Le capteur doit être installé où les lignes d'eau sont planes pour une meilleure précision dans la mesure. L'allure de quelques courbes de remous le long de la crête du DO Cusset est présentée dans la Figure 19 suivante.

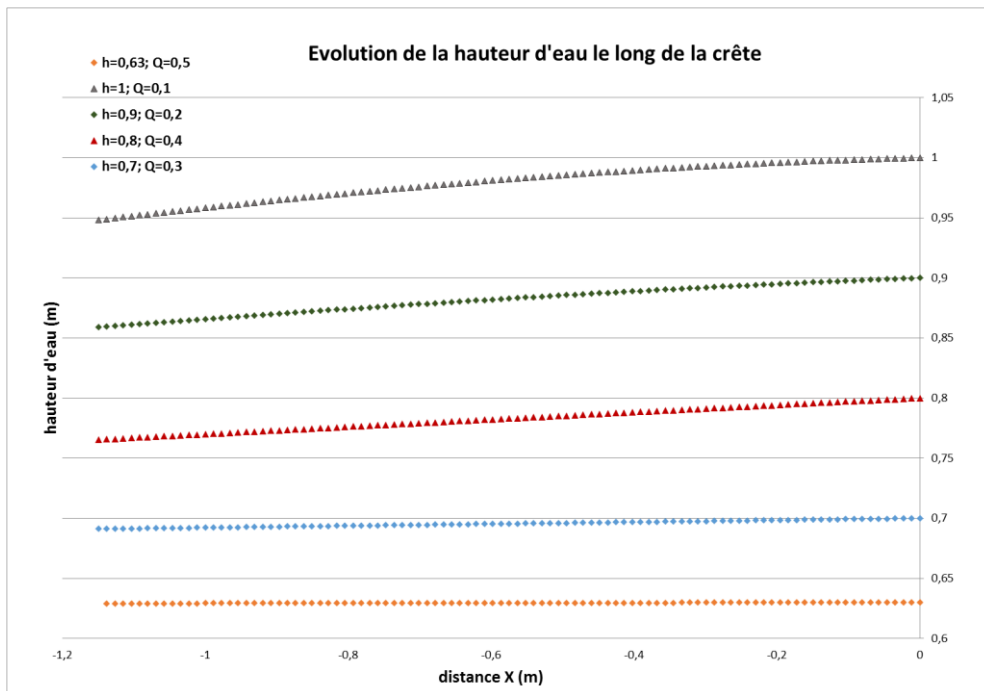


Figure 19. Courbe de remous le long de la crête du déversoir Cusset

Les courbes ne présentent pas de fortes variations de pente, notamment à proximité de la paroi. Le capteur est alors placé à 42cm de la paroi aval pour respecter un cône de détection de 30° et une distance de 5cm avec la paroi pour éviter les interférences des ultrasons avec cette dernière (cf. Figure 20).

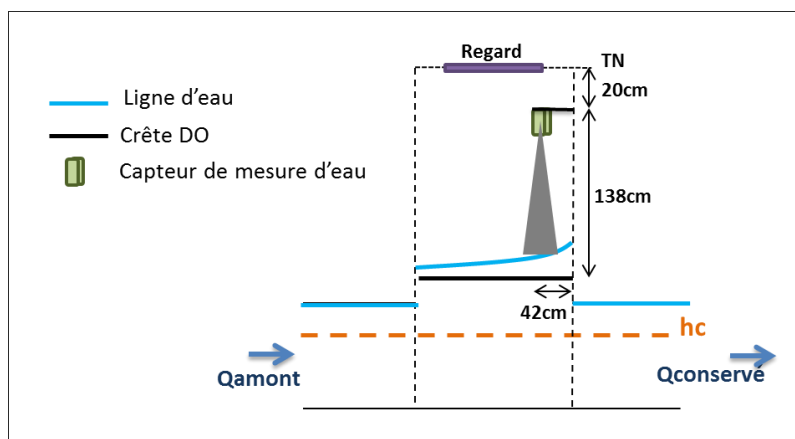


Figure 20. Schéma d'installation du capteur avec le cône de détection

Elaboration de la loi h-Q

La loi de déversement $Q_{\text{déversé}} = f(h_{\text{aval capteur}})$ est établie avec 60 couples $(h_{\text{aval}}, Q_{\text{conservé}})$ et est présentée dans la Figure 21 suivante. Les résultats sont détaillés dans le Tableau 16 en Annexe 3.

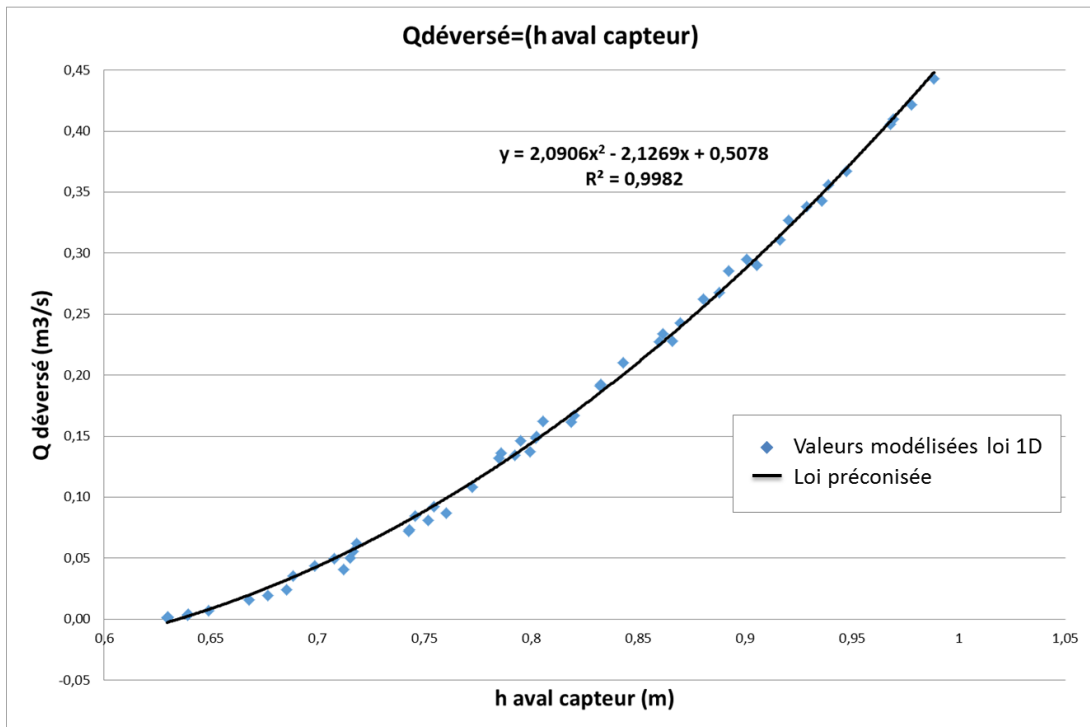


Figure 21. Loi de déversement $Q_{\text{déversé}}=f(h \text{ aval capteur})$, emplacement du capteur à 42cm du mur aval

Identification de l'incertitude associée à l'auto-surveillance

La méthode de calcul d'incertitudes est détaillée en Annexe 1. Le résultat de l'incertitude totale est présenté en fonction du débit déversé calculé dans la Figure 22 suivante.

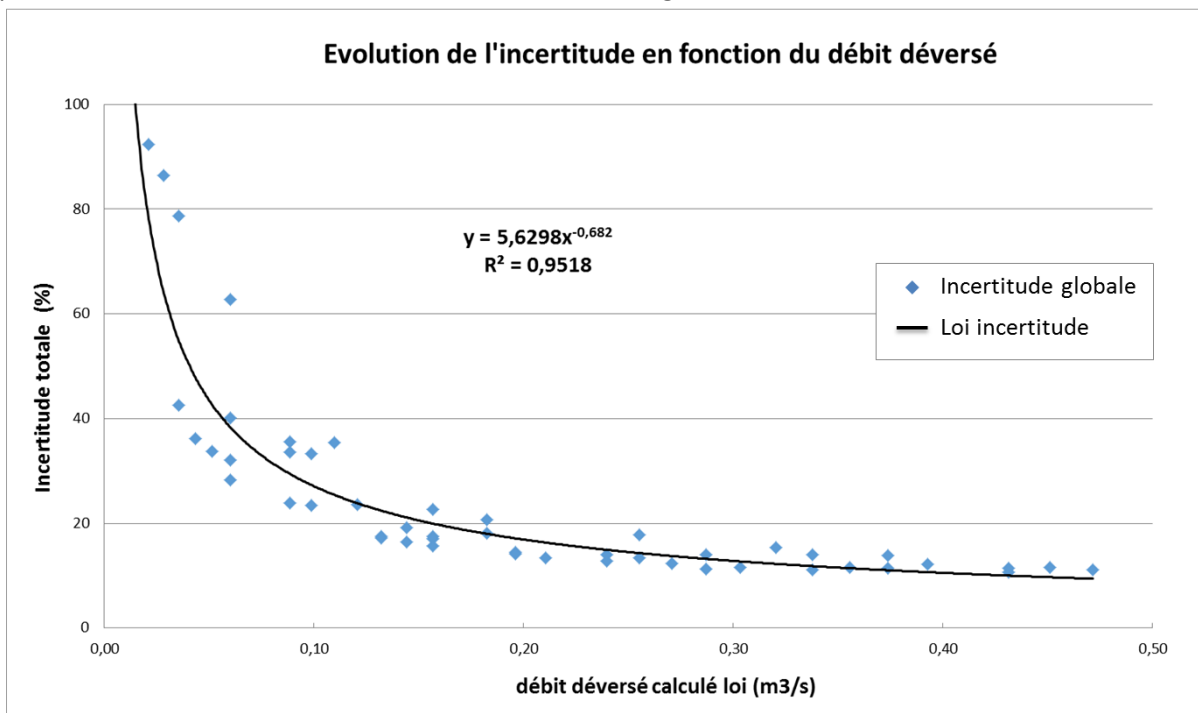


Figure 22. Evolution de l'incertitude avec le débit déversé (calculé par la loi de déversement), pour un intervalle de confiance de 95%

La forte incertitude aux faibles débits déversés est liée principalement à l'incertitude sur la mesure. En effet, un centimètre d'incertitude sur le capteur de mesure est plus significatif sur la mesure des faibles hauteurs d'eau de lame déversante, soit aux faibles débits déversés.

III.3.1.e. Synthèse sur la mise en place de l'autosurveillance

Principe de l'aménagement

L'aménagement consiste à la pose d'un capteur US de mesure de hauteur d'eau, sans modification conséquente de génie civil.

Position du capteur de mesure de hauteur d'eau

Un seul capteur suffit pour déterminer le débit déversé car l'écoulement est fluvial dans la gamme des débits possibles et le déversement est piloté par la hauteur à l'extrémité aval de la crête. Le capteur est placé à 42cm de la paroi aval pour respecter un cône de détection de 30° et une distance de 5cm. La Figure 23 ci-dessous récapitule l'emplacement du capteur.

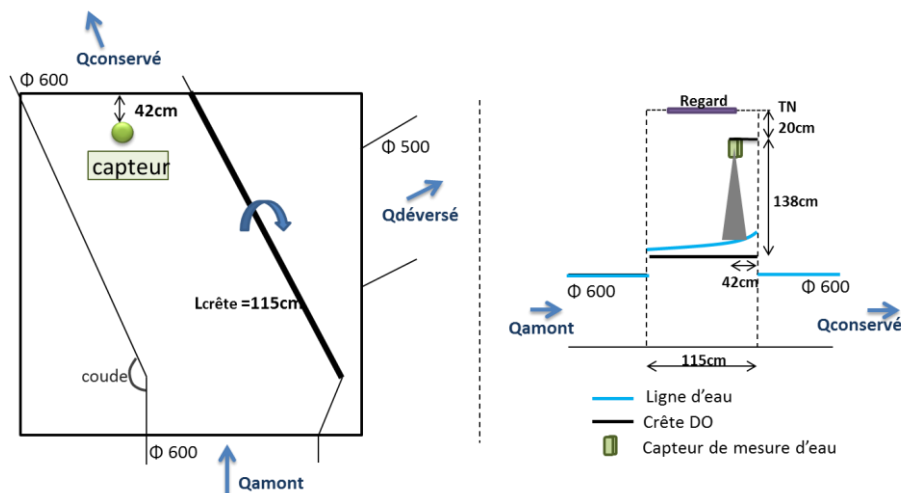


Figure 23. DO Cusset, vue de dessus (gauche) et vue de profil (droite)

Lois polynomiales de déversement à implémenter en supervision

Les lois de déversement et d'incertitude pour le DO Cusset sont récapitulées dans le Tableau 7 ci-dessous (Q en m³/s et h en m). L'incertitude est calculée pour un intervalle de confiance de 95%. Ces lois pourront être utilisées directement par la supervision de VVA pour évaluer l'incertitude sur le résultat du débit déversé.

Tableau 7. Loi de déversement du DO Cusset pour une hauteur d'eau mesurée à 42cm de la paroi aval

En fonction de :	Loi de déversement et incertitudes	R ²
Hauteur d'eau aval du capteur (m)	$Q_{\text{déversé}} = 2,0906 * (h_{\text{capteur}})^2 - 2,1269 * (h_{\text{capteur}}) + 0,5078$	0,9982
Débit déversé (m3/s)	Incertitude globale (%) = $5,6298 * Q_{\text{déversé}}^{(-0,682)}$	0,9518
Hauteur d'eau aval (m)	Incertitude globale (%) = $6,1015 * h_{\text{capteur}}^{(-6,274)}$	0,7841


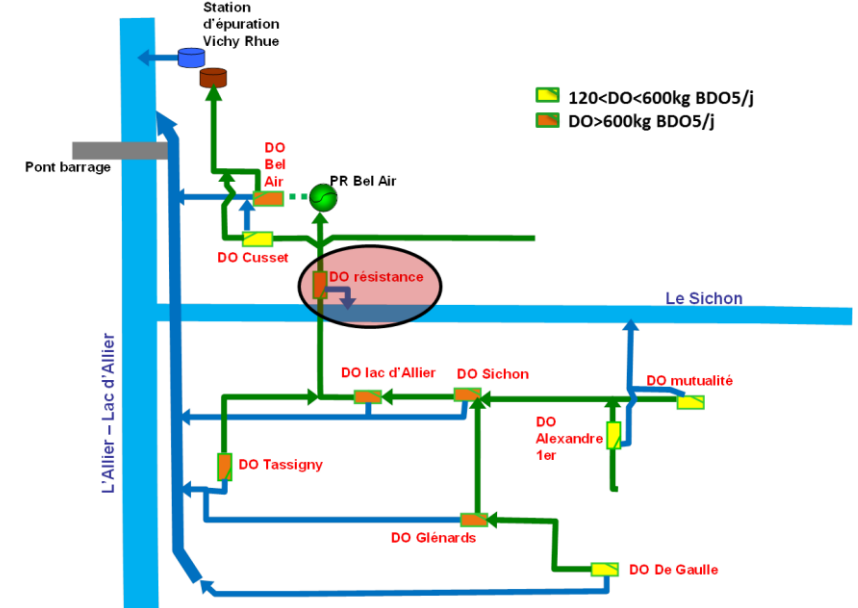
A noter que la relation hauteur-débit a été élaborée sur la base de hauteurs d'eau mesurées à partir du radier de la conduite conservée au niveau du capteur de mesure.

III.3.2. Modèle empirique : cas du déversoir d'orage RESISTANCE



Le déversoir d'orage Résistance est un cas d'ouvrage standard où des lois empiriques peuvent être appliquées pour élaborer la loi $Q_{\text{déversé}}=f(\text{hauteur d'eau})$.

III.3.2.a. Généralités

Localisation dans le réseau d'assainissement VVA

GENERALITES	
<p>Localisation dans le réseau d'assainissement de VVA</p>	<p>Le déversoir d'orage Résistance est situé juste avant le poste de pompage Bel Air et déverse dans le cours d'eau Sichon.</p> 
<p>Interaction du DO dans le réseau</p>	<p>Le DO Résistance est situé à l'aval des autres DOs de la ville de Vichy. Il joue le rôle de trop-plein pour la station de pompage.</p> 
<p>Charge (kg DBO₅/j)</p>	<p>4380 kgDBO₅/j (soit de 73000 Equivalent-Habitant) : Enjeu fort</p>
<p>Objectif et intérêt de la mesure</p>	<p>Mise en place de l'auto surveillance Suivi en continu du débit déversé et estimation des charges rejetées</p>
<p>Déversements</p>	<p>Pas de déversement pour des pluies mensuelles Déversement pour les pluies décennales (source : modèle PCSWMM calé pour le réseau de VVA (étude Egis (2012))</p>

Analyse de l'environnement hydraulique et choix de la méthode d'instrumentation

SINGULARITES ET CONTRAINTES DE L'OUVRAGE			
Type de déversoir	Trop-plein du poste de pompage Bel Air		
Singularités amont	Collecteur principal : ovoïde T1700, pentes faibles, pas de géométrie particulière => Régime d'écoulement fluvial (vérification logiciel HSL)		
Singularités aval	<p>Conduite conservée : régime d'écoulement fluvial</p> <p>Conduites de décharge : 2 collecteurs DN800, longueur 14m vers le Sichon, écoulement fluvial. Hypothèses formulées :</p> <ul style="list-style-type: none"> - pas d'influence aval due au milieu naturel (Sichon) car le niveau du cours d'eau est piloté par le barrage sur l'Allier qui maintient une hauteur d'eau constante. De plus, une vanne anti-crue sera installée dans la conduite de décharge et sera fermée en cas de crue pour éviter le remplissage de l'ouvrage et du réseau par le milieu naturel. - pas d'influence aval due à la géométrie rectangulaire de l'exutoire ou aux canalisations de décharge. 		
Géométrie particulière/ photo de la visite	<div style="display: flex; justify-content: space-around; align-items: center;">   </div> <p style="text-align: center; margin-top: 5px;">vue de dessus exutoire du DO dans le cours d'eau Sichon</p>		
Autres contraintes	Capteur US obligatoirement dans le regard (raisons d'accessibilité). Attention à la gamme de mesure du capteur (hauteur du regard 6,5m)		
ANALYSE COMPARATIVE DES METHODES DE MESURE DE DEBITS			
Techniques possibles		Méthodes pertinentes	Méthodes non applicables
Vélocimétrie	Doppler		Pas d'accès (complexe à installer)
	Corde de vitesse		Complicé à mettre en place et pas nécessaire
Section de contrôle	Seuil		
	Vanne		
Modèle	Venturi	Oui (installation vanne anti-crue)	
	H2Q		
	Modèle empirique ou 1D	Pas nécessaire	
Modèle de trop-plein			
	3D		
MODELISATION ET TECHNOLOGIE RETENUES			
Méthode de modélisation	Modélisation par lois empiriques		
Technologie du capteur	Capteur ultrason (US) autonome et GSM		

III.3.2.b. Méthode de modélisation par combinaison de lois empiriques

Présentation de la géométrie du déversoir d'orage

La géométrie du déversoir d'orage est présentée dans la Figure 24 ci-dessous.

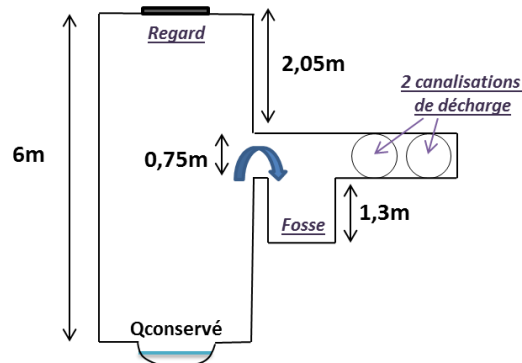


Figure 24. Vue de profil du DO Résistance

Lors d'un déversement, l'eau monte dans le regard et passe dans l'orifice à 4m du radier. La fosse se remplit rapidement puis l'eau subit un entonnement en entrant dans les 2 conduites de décharge.

Débits présents dans le DO d'après des études antérieures

Les débits mensuels et décennaux obtenus avec le modèle PCSWMM calé pour le réseau de VVA dans l'étude Egis (2012) sont présentés dans le Tableau 8 ci-dessous.

Tableau 8. Débits mensuels et décennaux pour le déversoir d'orage Résistance

	Pluie mensuelle	Pluie T=10ans
Q amont (m³/s)	1,67	4,93
Q déversé (m³/s)	0	0,43

L'ouvrage ne déverse pas pour les débits mensuels, mais un déversement a lieu pour les périodes de retour décennales avec un débit maximal de 0,5m³/s. Ces informations sont primordiales pour la définition des conditions limites de modélisation.

Méthodologie de modélisation avec des lois empiriques- Modèle de Trop-plein.

L'orifice de déversement se met en charge pour des débits supérieurs à 1m³/s, débit correspondant à une hauteur d'eau de 0,8m (hauteur de l'orifice). Ainsi, pour les débits déversés par le DO (inférieurs à 0,5m³/s), le régime d'écoulement est à surface libre i.e. le niveau d'eau est inférieur au plafond de l'orifice de déversement entre le regard et la fosse.

Le débit déversé est modélisé grâce à la combinaison de 2 lois empiriques (cf. Figure 25) : une loi de seuil et une loi d'entonnement. Il n'y a pas d'influence aval possible. Les notations de la Figure 25 sont celle utilisées dans la suite, les hauteurs sont exprimées à partir de la cote du bas de l'orifice entre le regard et la fosse.

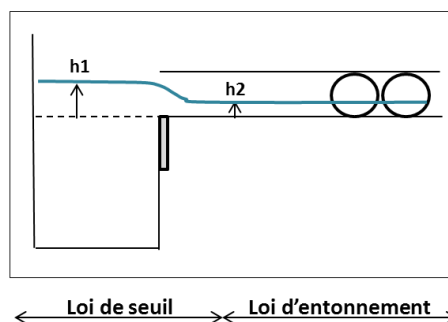


Figure 25. Application de lois empiriques au DO Résistance

Une loi d'entonnement (guide COACHS, 2014) est appliquée pour calculer le débit déversé qui entre dans les 2 canalisations de décharge. Cette loi est une loi semi-empirique, déterminée par modélisation 3D, qui s'exprime à partir de la hauteur d'eau à l'amont des conduites (h_2). L'écoulement de l'eau dans l'orifice entre le regard et la fosse respecte une loi de seuil empirique (CETMEF, 2006). La fosse est remplie en quelques secondes et le seuil est rapidement noyé. Une loi de seuil noyé est ainsi retenue pour calculer le débit déversé à l'entrée de l'ouvrage de décharge. Cette loi dépend de la hauteur d'eau à l'amont et à l'aval du seuil (h_1 et h_2).

Ces 2 lois empiriques sont alors combinées pour établir une loi de déversement en fonction du débit amont (h_1). La méthodologie est résumée dans la Figure 26 ci-dessous. Les équations sont détaillées dans l'Annexe 4.

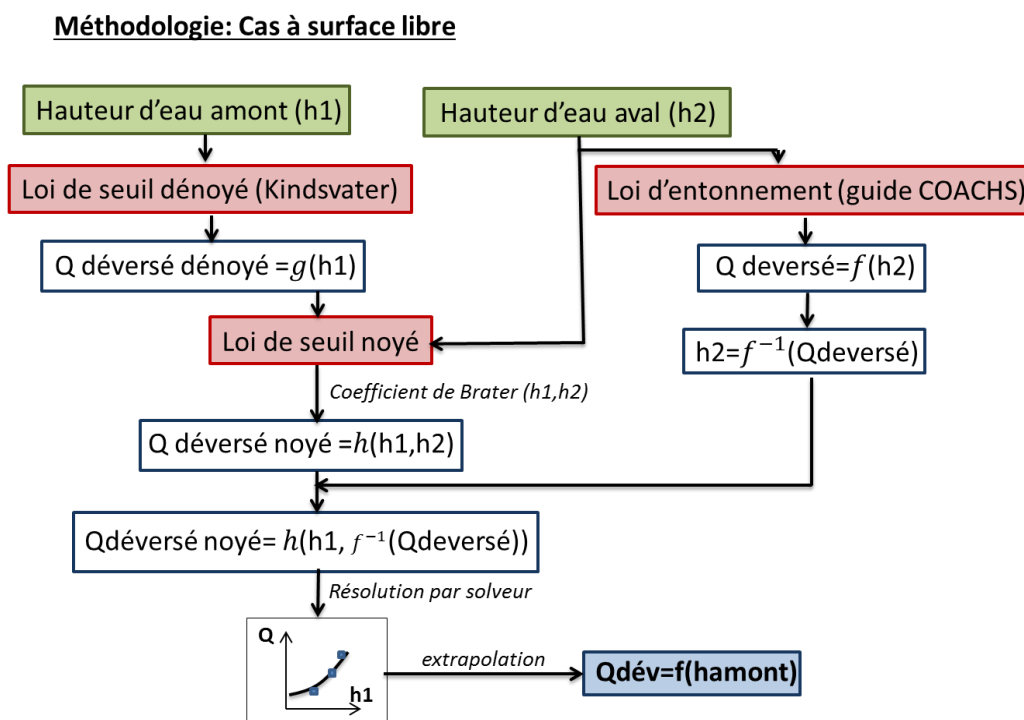


Figure 26. Méthodologie des calculs pour le DO Résistance dans le cas d'un écoulement à surface libre

A noter que le volume de la fosse est négligé ($2,6\text{m}^3$) et est considéré comme un délai dans le déversement de quelques secondes suivant le débit déversé et l'état initial de remplissage de la fosse.

Domaine d'application

Les conditions limites sont récapitulées dans le Tableau 9 suivant.

Tableau 9. Domaine d'application pour l'écoulement à surface libre du DO Résistance

	minimum	maximum
Q déversé (m^3/s)	0	0,5
h1 (m)	0,1	0,8

Le débit maximal correspond au débit décennal. La hauteur maximale est la hauteur de l'orifice, l'ouvrage se met en charge pour une hauteur d'eau supérieure.

III.3.2.c. Elaboration de l'autosurveillance

Identification de la position du/des capteur(s)

L'emplacement du capteur US doit obligatoirement être situé dans le regard du déversoir pour des raisons d'accessibilité. La Figure 27 ci-dessous schématise l'emplacement du capteur.

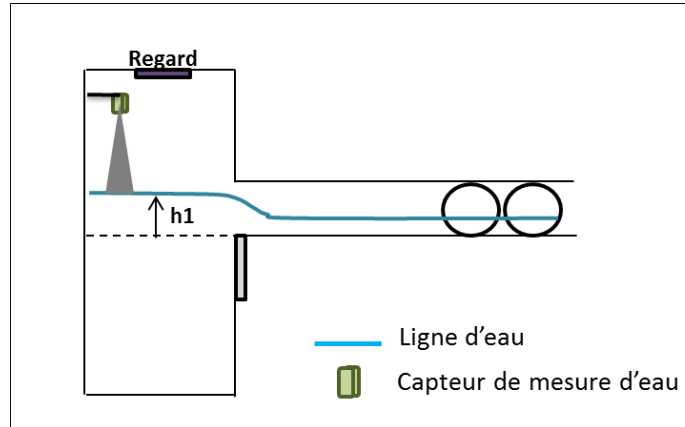


Figure 27. Emplacement du capteur

Elaboration de la loi h-Q

Les résultats calculés d'après la méthodologie précédente sont présentés dans la Figure 28 suivante.

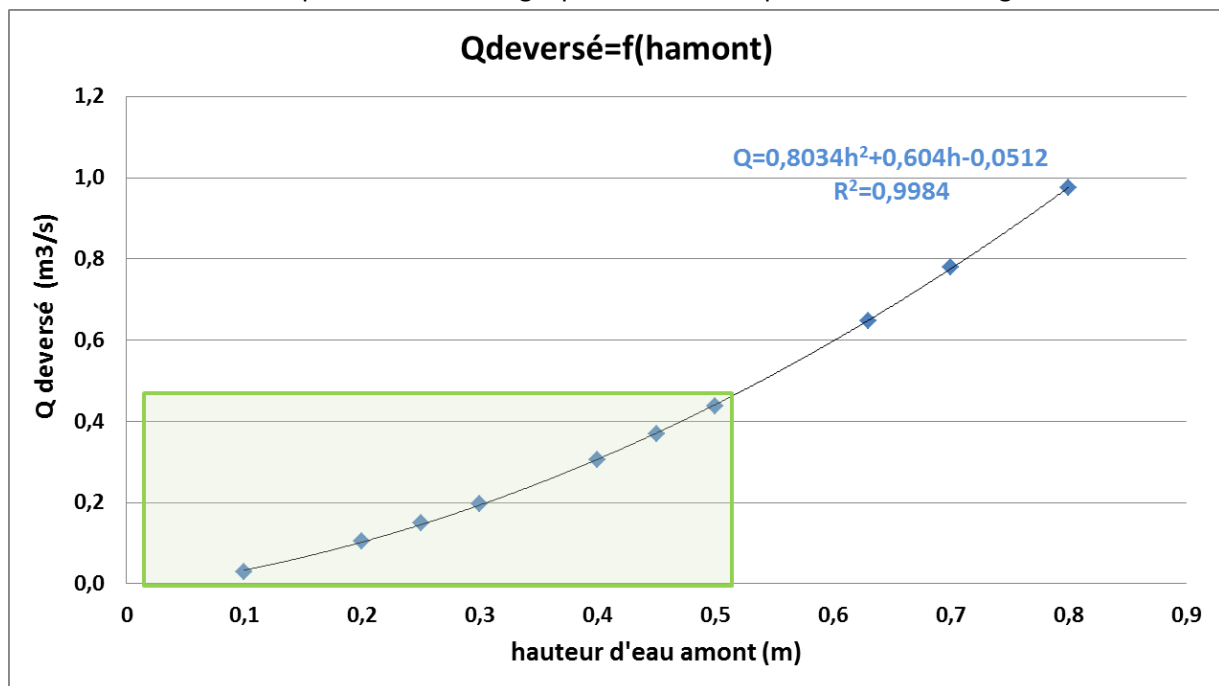


Figure 28. Loi de déversement du DO Résistance

La zone verte représente les débits déversés inférieurs à 0,5m³/s, soit le débit correspondant à une pluie de période de retour 10 ans. Cette loi d'étalonnage est accompagnée d'une loi d'incertitude qui est calculée comme présenté en Annexe 1. L'incertitude est inférieure à 20% pour un débit supérieur à 0,3m³/s.

III.3.2.c. Synthèse sur la mise en place de l'autosurveillance de l'ouvrage

Principe de l'aménagement

L'aménagement consiste en la pose d'un capteur US de mesure de hauteur d'eau, sans modification conséquente de génie civil.

Position du capteur de mesure de hauteur d'eau

Le déversoir d'orage Résistance est modélisé par 2 lois empiriques standards (loi d'entonnement du modèle de trop-plein et loi de seuil) pour des débits déversés inférieurs au débit décennal. Le capteur de mesure de hauteurs d'eau doit être installé dans le regard de l'ouvrage (cf. Figure 29). Un capteur US avec une gamme de mesures classiques est suffisant pour déterminer les débits de déversement car les hauteurs d'eau de la loi d'étalonnage sont définies à partir du radier de l'orifice entre le regard et la fosse. Si un suivi de temps sec est mis en place simultanément avec le même capteur, la gamme de mesure de hauteurs doit toutefois se situer entre 0 et 6,5m.

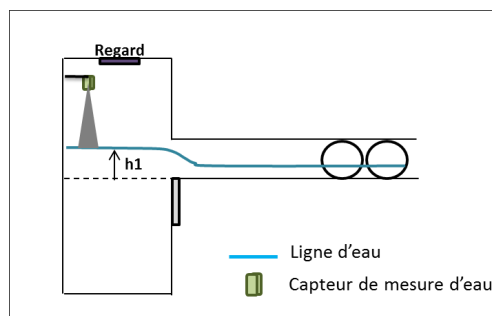


Figure 29. Emplacement du capteur

Lois polynomiales de déversement à implémenter en supervision

Les lois de déversement et d'incertitude pour le DO Résistance sont récapitulées dans le Tableau 10 ci-dessous (Q en m^3/s et h en m). L'incertitude est calculée pour un intervalle de confiance de 95%. Ces lois pourront être utilisées directement par la supervision de VVA pour évaluer l'incertitude sur le résultat du débit déversé.

Tableau 10. Loi de déversement du DO Résistance

Domaine d'application :	Loi de déversement et incertitudes	R^2
$Q_{dev}=[0 ; 0,5m^3/s]$	$Q_{déversé} = 0,8034 * h_{amont}^2 + 0,6040 * h_{amont} - 0,0512$	0,9984
$Q_{dev}=[0 ; 0,5m^3/s]$	$Incertitude\ globale\ (\%) = \frac{0,6819}{h_{amont}^2} + 15,9908$	

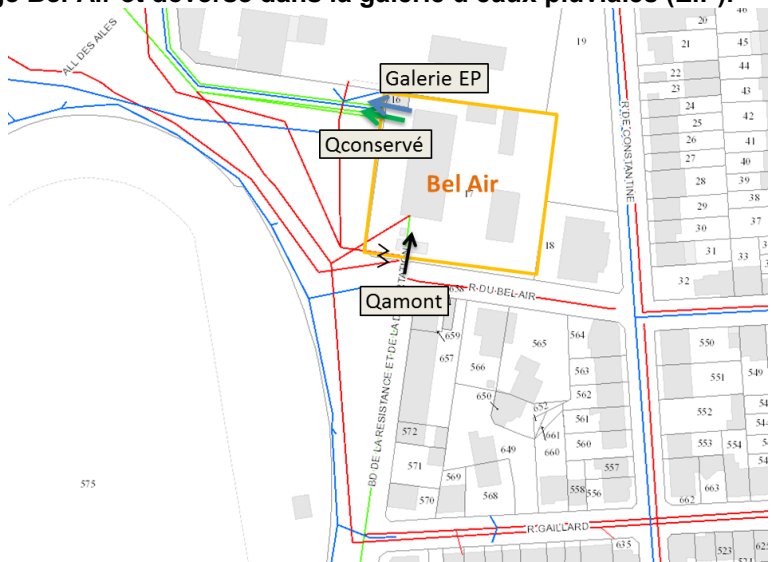
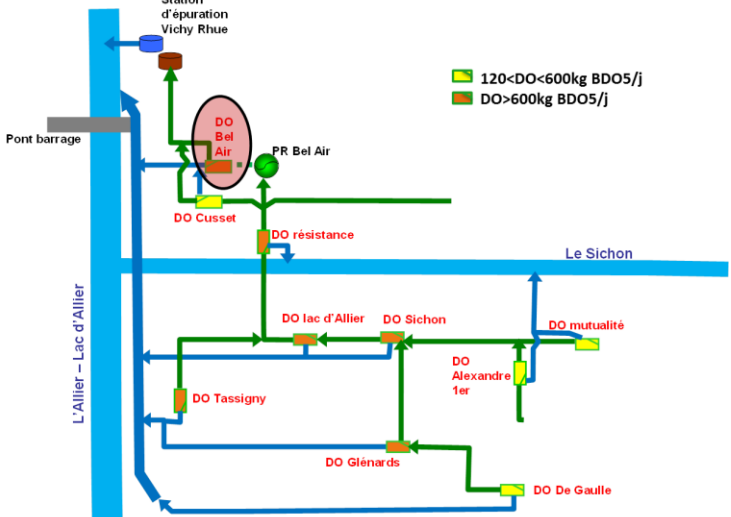
A noter que la relation hauteur-débit a été élaborée sur la base de hauteurs d'eau mesurées à partir du radier de l'orifice entre le regard et la fosse.

III.3.3. Modèle 3D : cas de la surverse de la station de pompage Bel Air


La géométrie de la surverse de la station de pompage Bel Air est complexe. La loi de déversement $Q=f(\text{hauteur})$ est élaborée par modélisation 3D.

III.3.3.a. Généralités

Localisation dans le réseau d'assainissement VVA

GENERALITES	
<p>Localisation dans le réseau d'assainissement de VVA</p>	<p>Le déversoir d'orage (DO) Bel Air correspond à la surverse du poste de pompage Bel Air et déverse dans la galerie d'eaux pluviales (E.P).</p> 
<p>Interaction du DO dans le réseau</p>	<p>La surverse Bel Air est à l'aval du réseau de collecte des eaux usées de VVA après pompage des effluents. Il permet de protéger la station de traitement de Vichy-Rhue située à l'aval de la station de pompage.</p> 
<p>Charge (kg DBO₅/j)</p>	<p>> 600 kgBDO5/j (soit >10000 Equivalent-Habitant) : Enjeu fort</p>
<p>Objectif et intérêt de la mesure</p>	<p>Mise en place de l'auto surveillance Suivi en continu du débit déversé et estimation des charges rejetées</p>
<p>Déversements</p>	<p>Faible déversement pour des pluies mensuelles (faible volume : 250m³) Déversement pour les pluies décennales (source : modèle PCSWMM calé pour le réseau de VVA (étude Egis (2012))</p>

Analyse de l'environnement hydraulique et choix de la méthode d'instrumentation

SINGULARITES ET CONTRAINTES DE L'OUVRAGE			
Type de déversoir	Déversoir latéral à 2 fenêtres avec un réhaussement du seuil de 0,77m*0,5m (longueur*hauteur) à l'extrémité aval		
Singularité amont	N.A		
Singularité aval	Chambre de surverse commune avec le DO Cusset avant de rejoindre la galerie EP. Pas d'influence aval possible par la Galerie E.P ni par le DO Cusset.		
Géométrie particulière/ photo de la visite			
Autres contraintes	N/A		
ANALYSE COMPARATIVE DES METHODES DE MESURE DE DEBITS			
	Techniques possibles	Méthodes pertinentes	Méthodes non applicables
Vélocimétrie	Doppler		Risque de dépôts
	Corde de vitesse		Présence de bulles d'air + coût élevé de génie civil
Section de contrôle	Seuil		Possible dans la galerie EP : Venturi sur mesure qui doit être calibré par modélisation 3D
	Vanne		
	Venturi		
Modèle	H2Q	Possible dans la galerie EP : incertitude sur les petits débits + pas connaissance de la pente	
	Modèle empirique ou 1D		Ouvrage pas classique car perturbations au niveau du seuil (pompe, seuil à 2 fenêtres)
	Modèle de trop-plein		N/A
	3D	Modélisation 3D de l'entonnement créé par la galerie EP	
MODELISATION ET TECHNOLOGIE RETENUES			
Méthode de modélisation	Modélisation 3D (chambre de surverse)		
Technologie du capteur	1 capteur ultrason		

III.3.3.b. Méthode de la modélisation 3D

Présentation de la géométrie du déversoir d'orage

La géométrie de la surverse Bel Air est présentée dans la Figure 30 suivante. Le seuil est composé de 2 fenêtres successives. Le débit conservé est évacué grâce à 2 canalisations de DN1000 et DN 1300.

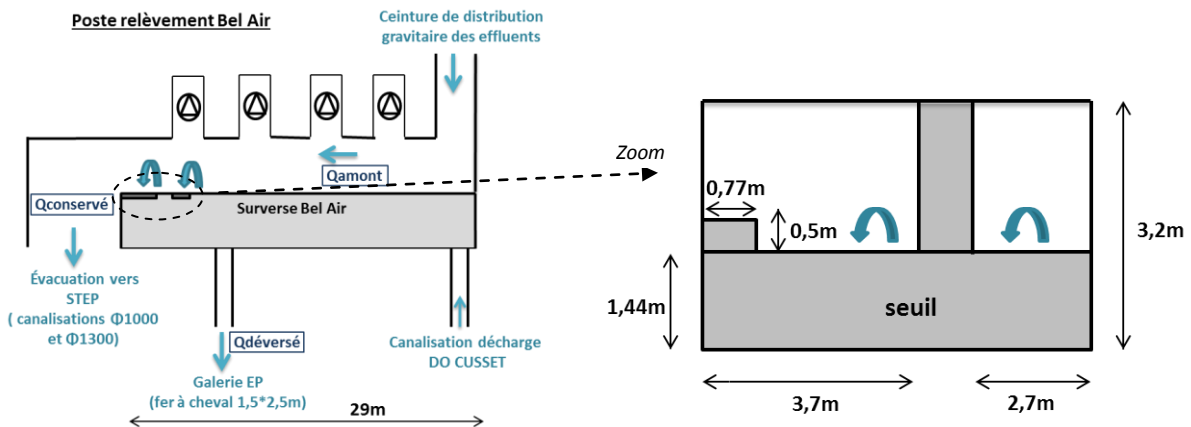


Figure 30. Vue de dessus du DO Bel Air dans le poste de pompage (gauche) ; Vue de profil du seuil (droite)

L'emplacement des pompes dans la ceinture de distribution, notamment celle en face du seuil, perturbe l'écoulement de l'eau au niveau du seuil, ce qui exclut une instrumentation sur la lame déversante.

Analyse du pompage et débits présents dans le DO d'après des études antérieures

La surverse Bel Air est située à l'extrémité aval de la ceinture de distribution gravitaire du poste de pompage. Le débit d'écoulement est contrôlé par le fonctionnement ou non des pompes.

Les pompes fonctionnent en alternance par groupe de 2 : une petite de $1800\text{m}^3/\text{h}$ et une grande de $3600\text{m}^3/\text{h}$. Il y a 4 couples de pompes au total dans le poste de relevage. Les débits déversés sont calculés pour différentes combinaisons de pompes. Les résultats sont détaillés dans l'Annexe 5.1 et sont récapitulés dans le Tableau 11 ci-dessous.

Tableau 11. Débits déversés possibles par analyse hydraulique

Pompes	Jusqu'à équivalent 2GP	2 GP +1 PP	2 GP+2 PP	T=10ans (Egis 2012)	T=10ans (PCSWMM) = 3GP+ 3PP
Débit déversé (m^3/s)	Pas de déversement	0,42	0,92	0,85	2,42

*PP : Petite Pompe de $1800\text{m}^3/\text{h}$ et GP : Grande Pompe de $3600\text{m}^3/\text{h}$

Ainsi il faut au minimum l'équivalent de 2 grandes pompes et une petite pompe pour que la surverse de Bel Air fonctionne. Les données du rapport (Egis 2012) et du modèle PCSWMM correspondent à des valeurs réelles de combinaison de pompage. Ces valeurs sont utiles pour le choix de la gamme de débits modélisés.

Méthode de la modélisation 3D

Il est intéressant de remarquer que pour le plus petit déversement possible de la surverse Bel Air ($0,4\text{m}^3/\text{s}$), la hauteur d'eau correspondante dans la galerie EP est de environ 35cm (calculs de Manning Strickler par le logiciel HSL). Cette hauteur permet donc l'installation de capteurs de mesure de hauteurs à l'entrée ou à l'intérieur de la galerie. La modélisation 3D de l'entonnement créé par la galerie d'eaux pluviales est la méthode retenue. La démarche est détaillée dans la Figure 31 ci-dessous.

Méthodologie Modélisation 3D:

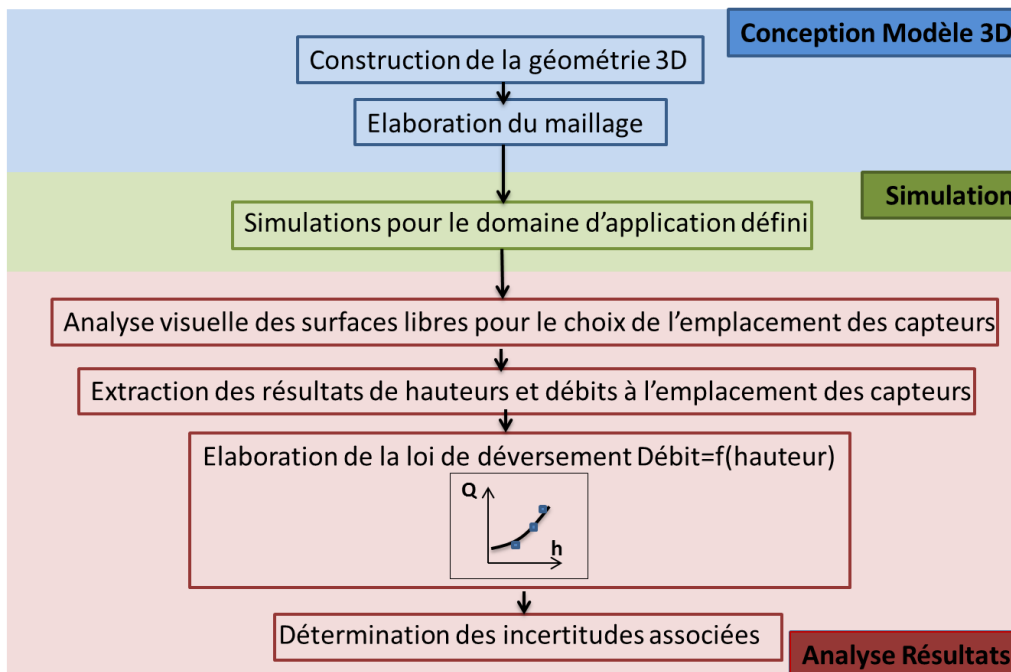


Figure 31. Méthodologie pour élaborer la loi de déversement avec la modélisation 3D

III.3.3.c. Conception du modèle 3D

Choix de la géométrie pertinente à modéliser

Comme décrit dans l'analyse hydraulique précédente, la modélisation 3D porte seulement sur la surverse de Bel Air, soit le seuil, la chambre de surverse et la galerie d'eaux pluviales. Il s'agit de déterminer l'emplacement le plus adapté du capteur dans cette partie.

Le seuil est décrit précisément en 3D dans sa forme évasée et avec le rehaussement à l'aval du seuil. La longueur de la chambre de surverse est raccourcie du côté du déversement du DO Cusset car cette canalisation est une zone morte pour l'écoulement (8m au lieu de 18m en réalité). La majorité de l'écoulement s'écoule directement dans la galerie EP.

A noter que la canalisation de décharge de Cusset n'est pas ajoutée à la modélisation 3D car le déversement est indépendant à celui de Bel Air. Cette hypothèse est détaillée et vérifiée dans l'Annexe 5.2.

Conception du maillage

L'élaboration du maillage est déterminante pour la convergence des calculs. Pour le déversoir d'orage Bel Air, un pas d'espace de 10 cm est défini pour le maillage avec un raffinement de 5cm pour le seuil et l'entonnement de la galerie E.P. (cf. Figure 32 et Figure 33). L'ouvrage est décrit avec 300 600 mailles hexaédriques.

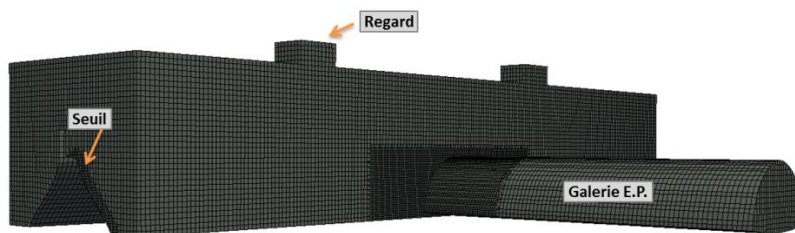


Figure 32. Vue extérieure du maillage : raffinement au niveau de l'entonnement et du seuil

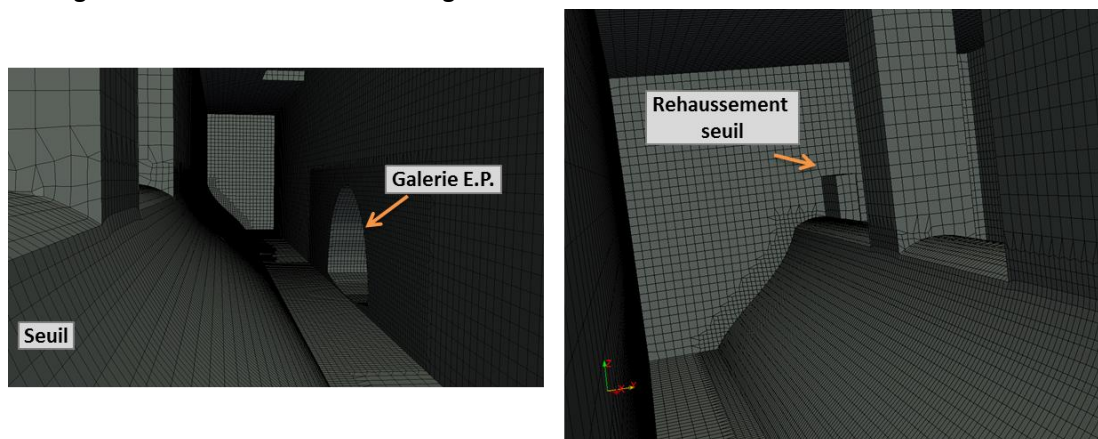


Figure 33. Vue intérieure du maillage

Simulations et hypothèses de calcul

Les conditions limites pour les modélisations sont récapitulées dans le Tableau 12 ci-dessous. Il n'y a pas d'influence d'aval possible donc une seule condition sur le débit déversé est suffisante.

Tableau 12. Conditions limites pour la modélisation du DO Bel Air

	Minimum	Maximum
Q déversé (m ³ /s)	0,1	2,5

Le débit maximal correspond au débit décennal avec le modèle PCSWMM. Le débit minimal est plus faible que celui calculé lors de l'étude du pompage pour ajouter une marge de sécurité à la loi d'étalonnage. Les modélisations sont concentrées entre 0,4 et 1,4m³/s, ce qui correspond aux débits les plus fréquents. Au total, 8 simulations sont réalisées. Le détail des simulations est présenté dans le Tableau 23 en Annexe 6.

III.3.3.d. Analyse des résultats des simulations

Après avoir réalisé le modèle 3D et les calculs hydrauliques pour la surverse Bel Air, il s'agit d'élaborer les lois de déversement qui seront utilisées par les automates pour l'autosurveillance de cet ouvrage. La première étape consiste en l'analyse des données obtenues.

Bilan de masse

Le bilan de masse est la différence entre la quantité d'eau à l'entrée et à la sortie de l'ouvrage modélisé. Il doit être inférieur à 5% pour s'assurer de la bonne convergence des calculs. Dans le cas du DO Bel Air des effets transitoires physiques de l'écoulement sont visibles. En effet, des vagues se forment et évoluent dans la zone morte de la chambre de surverse. Le débit à la sortie de la galerie

E.P est donc diminué de la quantité d'eau stockée vers la zone morte pour un temps donné (et inversement). Le bilan de masse ne peut donc pas tendre vers une valeur fixe, mais oscille autour du bilan de masse nul (cf. Figure 34).

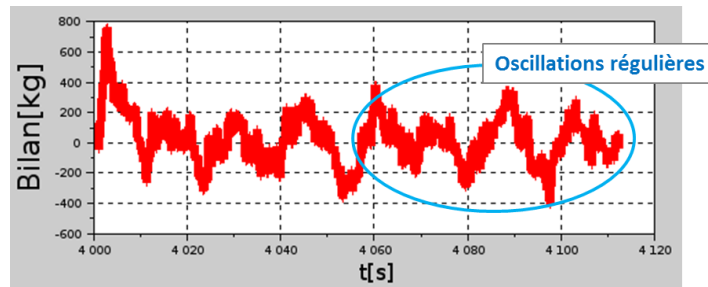


Figure 34. Bilan de masse (exemple de la simulation 4, $Q=1,9 \text{ m}^3/\text{s}$)

Ce phénomène est peut être traduit par la représentation du débit en fonction du temps à 3 emplacements particuliers dans le DO : entrée de l'eau dans le DO au niveau du seuil, sortie par la galerie E.P et dans la chambre de surverse (cf. Figure 35 et Figure 36).

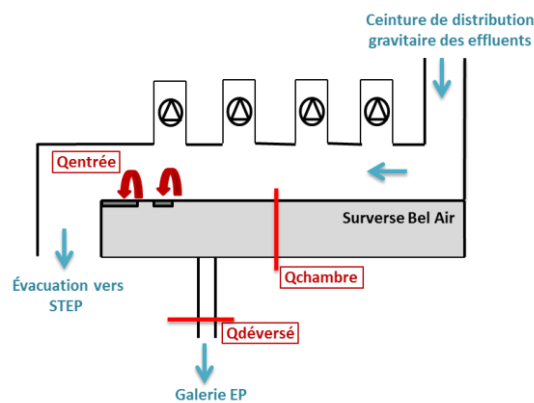


Figure 35. Localisation des 3 sections-tests pour la comparaison du débit présentée en Figure 36

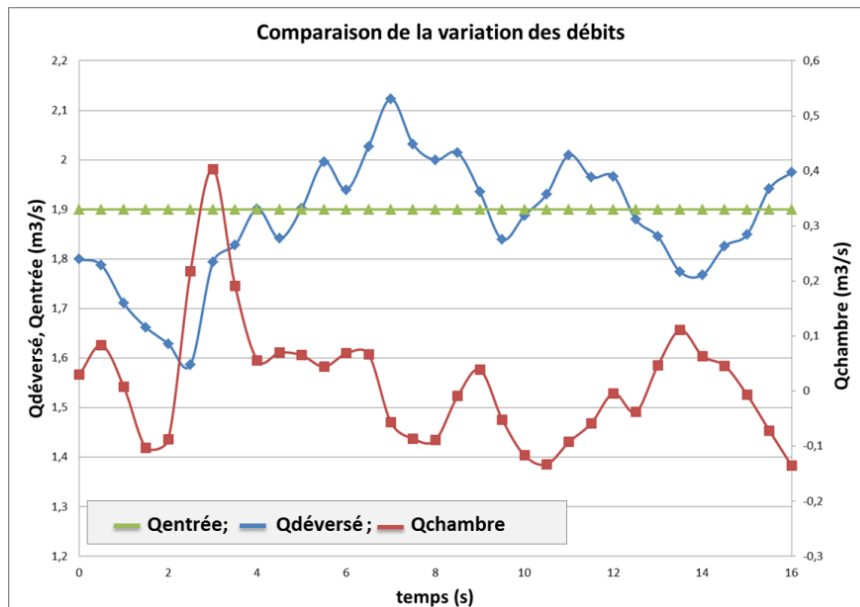


Figure 36. Comparaison des débits d'entrée, déversé et dans la chambre (exemple simulation $Q=1,9 \text{ m}^3/\text{s}$)

Les débits dans la chambre et dans le déversé varient d'environ $0,2 \text{ m}^3/\text{s}$ de part et d'autre de la valeur attendue, soit $0 \text{ m}^3/\text{s}$ pour Q_{chambre} et $1,9 \text{ m}^3/\text{s}$ pour $Q_{\text{déversé}}$. A part les premiers pics à 2

secondes, une augmentation de débit déversé est corrélée à une diminution d'eau stockée dans la chambre.

Ainsi les résultats obtenus lors des modélisations sont fiables, malgré un bilan de masse oscillant. Pour garantir une bonne de précision, les résultats sont moyennés sur 20 secondes, ce qui correspond à un pas de temps d'oscillation du bilan de masse (soit physiquement à l'évolution d'une vague).

Surface libre

La visualisation des surfaces libres permet de décrire l'écoulement dans l'ouvrage. La Figure 37 est le résultat de la modélisation pour un débit d'entrée de $1,4 \text{ m}^3/\text{s}$.

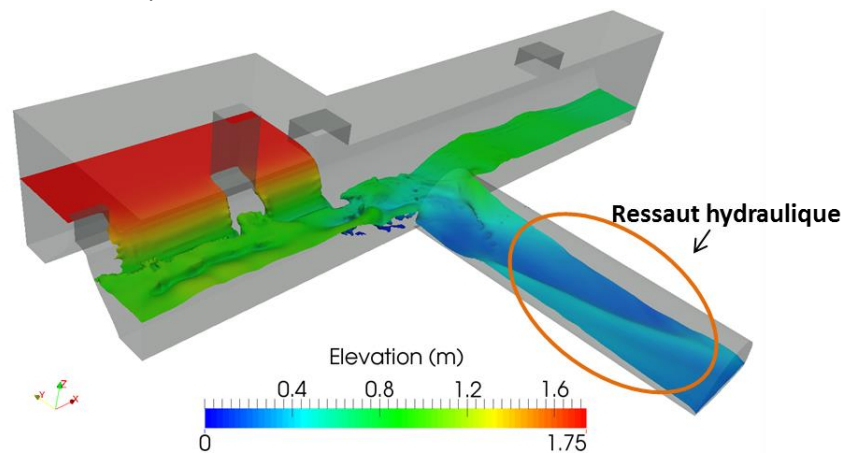


Figure 37. Résultat de surface libre pour $Q=1,4\text{m}^3/\text{s}$

Ainsi l'entrée dans la galerie E.P ne provoque pas d'entonnement. L'écoulement est similaire à l'écoulement dans un coude, avec un long ressaut en sortie. Même au débit le plus fort ($Q=2,5\text{m}^3/\text{s}$), la chute après le seuil est bien dénoyée. La modélisation 3D a permis de mettre en évidence des phénomènes de stockage, qui ne sont pas visibles en modélisation 1D.

III.3.3.e. Identification de la position du /des capteurs

Dans le cas du déversoir d'orage Bel Air, un seul capteur de mesure de hauteur d'eau est nécessaire car il n'y a pas d'influence aval.

L'identification de la position de ce capteur doit répondre à plusieurs critères :

- **Unicité de la hauteur d'eau pour un débit donné.** Les surfaces libres pour différents débits ne doivent pas se couper.
- **Stabilité spatiale de la mesure.** La surface libre doit être suffisamment plane pour que la lecture de la hauteur d'eau dans le cône de mesure du capteur soit identique.
- **Stabilité temporelle de la mesure.** La variation de hauteur d'eau en ce point au cours du temps doit être faible, idéalement négligeable par rapport à l'incertitude de mesure du capteur.

Unicité de la hauteur d'eau pour un débit donné

La première étape consiste à choisir les points qui répondent à l'unicité de la mesure de hauteur d'eau pour chaque débit simulé.

Plusieurs surfaces libres obtenues pour des débits différents sont superposées dans la même Figure 38 ci-dessous.

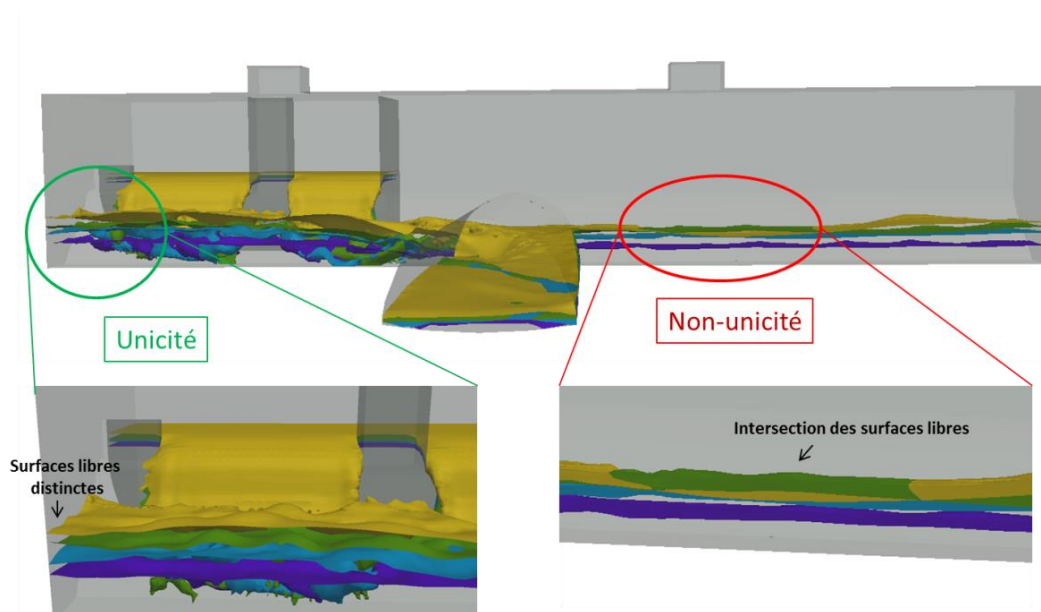


Figure 38. Superposition de surfaces libres pour les débits :
Violet : $Q=0,4\text{m}^3/\text{s}$; Bleu : $Q=0,7\text{m}^3/\text{s}$; Vert : $Q=0,9\text{m}^3/\text{s}$; Jaune : $Q=1,4 \text{ m}^3/\text{s}$.

L'étude des champs de vitesses permet également de visualiser les zones tranquillisées dans l'ouvrage lors d'un écoulement. (cf. Figure 39).

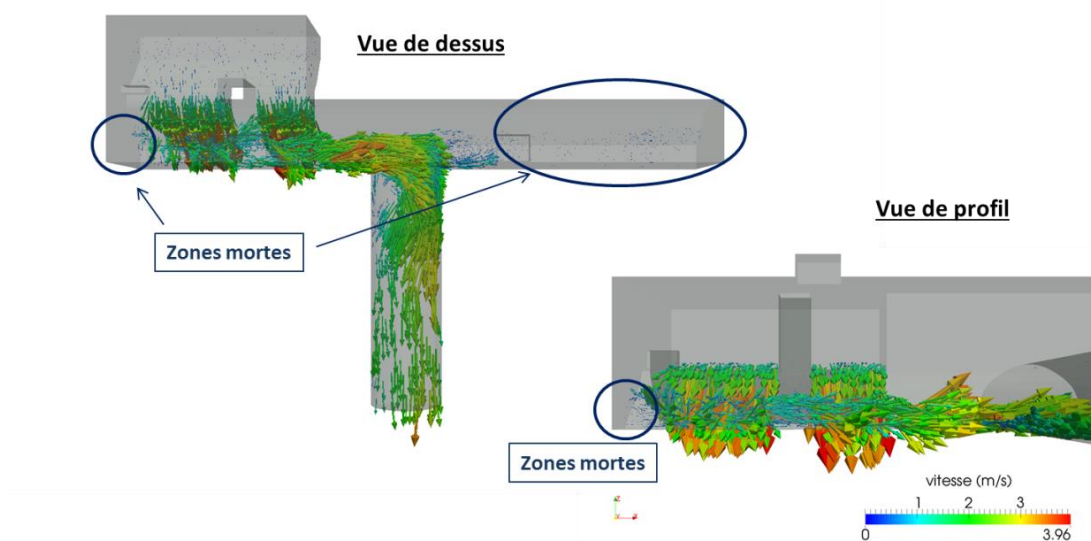


Figure 39. Analyse de la vitesse de l'écoulement dans l'ouvrage : visualisation des zones tranquillisées

La superposition des surfaces libres et l'analyse des vitesses montrent clairement que la chambre de surverse (zone morte) ne peut pas être instrumentée car les lignes d'eau se coupent pour différents débits. De même, la galerie EP présente un long ressaut, ce qui rend l'instrumentation difficile. Cependant une zone au niveau du rehaussement du seuil présente peu de turbulence et une belle différenciation entre les différents débits. Cette zone tranquillisée est retenue préférentiellement pour l'emplacement du capteur.

Stabilité spatiale

L'emplacement du capteur défini précédemment doit également être invariant sur une surface suffisamment large pour accueillir le cône de mesure du capteur. La Figure 40 présente la zone de

surface libre plane où le capteur peut être installé. La variation de hauteur d'eau sur l'ensemble de cette surface est de 3cm en moyenne.

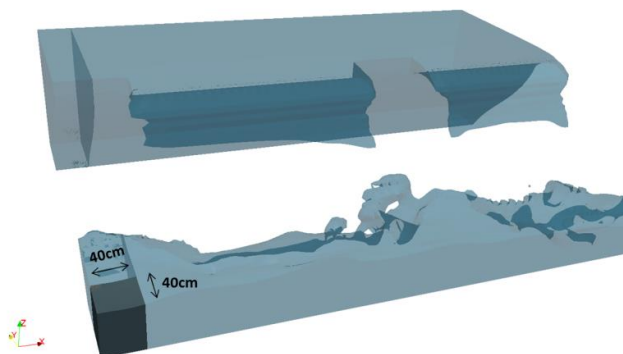


Figure 40. Stabilité spatiale pour la zone choisie pour l'emplacement du capteur (exemple $Q=0,4\text{m}^3/\text{s}$)

Stabilité temporelle

La ligne d'eau pour chaque débit doit également être invariante au cours du temps. Dans le cas de la surverse Bel Air, la compréhension de la variation du bilan de masse a montré la présence d'effets transitoires dans la chambre de surverse. La formation de vaguelettes se produit également à l'emplacement défini pour le capteur (derrière le rehaussement) et donc provoque une variation de la hauteur d'eau (cf. Figure 41).

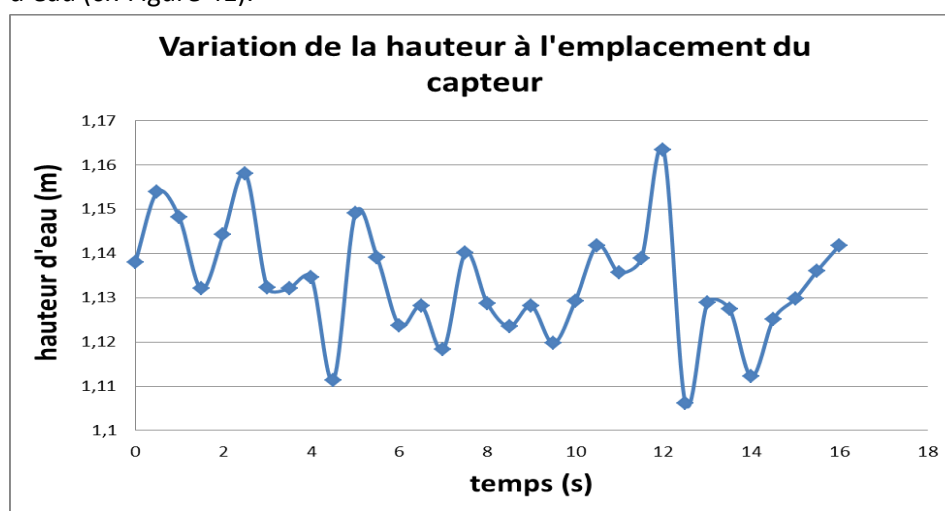


Figure 41. Variation de la hauteur d'eau à l'emplacement défini pour le capteur

Pour garantir la stabilité temporelle et la précision dans les mesures de hauteur d'eau, les valeurs mesurées sont moyennées sur 20 secondes. Les 20 secondes correspondent au temps d'une oscillation du bilan de masse (cf. Figure 34) et donc permet de couvrir l'amplitude maximale de la vague. En général, les capteurs prennent des mesures toutes les 2 minutes, ce qui ne pose pas de problèmes d'exploitation.

Conclusion sur l'emplacement du capteur

D'après les paragraphes précédents, l'emplacement du capteur est fixé derrière le rehaussement du seuil, dans la zone calme. La Figure 42 suivante récapitule l'emplacement défini pour installer la capteur US. Pour garantir une bonne précision de la mesure, les résultats de hauteurs d'eau mesurées doivent être moyennés sur 20 secondes au minimum.

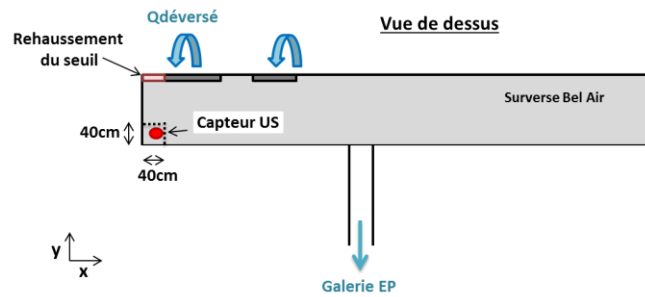


Figure 42. Emplacement du capteur US pour le DO Bel Air

III.3.3.f. Elaboration de la loi d'étalonnage h-Q et d'incertitudes

Les valeurs de hauteurs d'eau moyennes sont extraites à l'emplacement choisi pour le capteur, au point de coordonnées $x=0,4$; $y=0,4$, sur 20 secondes.

Le capteur étant proche du seuil, la loi d'étalonnage est établie avec la valeur du débit d'entrée qui correspond au débit déversé par la surverse de Bel Air et qui est plus stable (pas de variation temporelle par rapport au reste de l'ouvrage). La loi de déversement représente alors uniquement le seuil de Bel Air, sans prendre en compte le déversement du Cusset. L'avantage de cette méthode est de séparer les débits venant du seuil de Bel Air et ceux venant de Cusset, contrairement à un capteur global dans la galerie E.P. La précision des mesures est donc meilleure.

L'hypothèse de la non-influence du déversement de Cusset sur la hauteur d'eau au niveau du capteur est validée par 2 méthodes qui sont détaillées en Annexe 5.2:

- passage par un régime torrentiel en sortie du seuil de Bel Air, avant la galerie E.P. Ce passage par la hauteur critique rend indépendant l'amont et l'aval de la chambre de surverse et donc garantit qu'il n'y a pas d'influence aval du DO Cusset au point de mesure.
- modélisation 3D dans le cas d'un déversement de période de retour mensuelle. Cette modélisation démontre également que le point de mesure est indépendant du déversement du DO Cusset.

La loi de déversement établie est présentée dans la Figure 43 ci-dessous. Les résultats de modélisation sont détaillés dans le Tableau 24 en Annexe 6.

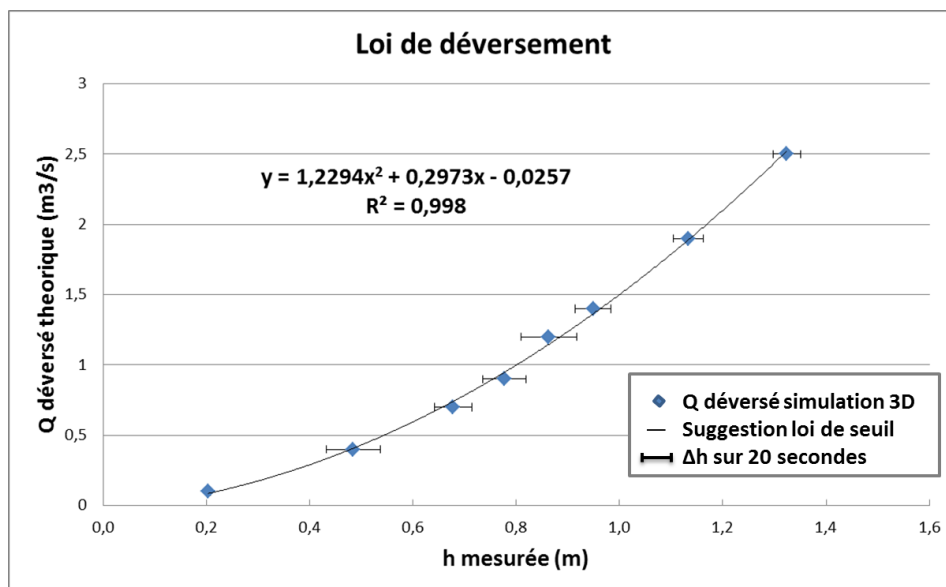


Figure 43. Loi de déversement pour le D.O bel Air

Une loi d'incertitudes associée à la loi d'étalonnage précédente est calculée par la méthode de l'Annexe 1. L'incertitude est inférieure à 10% à partir d'un débit de 0,5m³/s.

III.3.2.c. Synthèse sur la mise en place de l'autosurveillance de l'ouvrage

Principe de l'aménagement

L'aménagement consiste en la pose d'un capteur US de mesure de hauteur d'eau, sans modification conséquente de génie civil.

Position du capteur de mesure de hauteur d'eau

Un seul capteur suffit pour déterminer le débit déversé car il n'y a pas d'influence aval dans la chambre de surverse. L'emplacement du capteur a été déterminé après analyse des résultats de modélisation 3D. La Figure 44 ci-dessous récapitule la position du capteur.

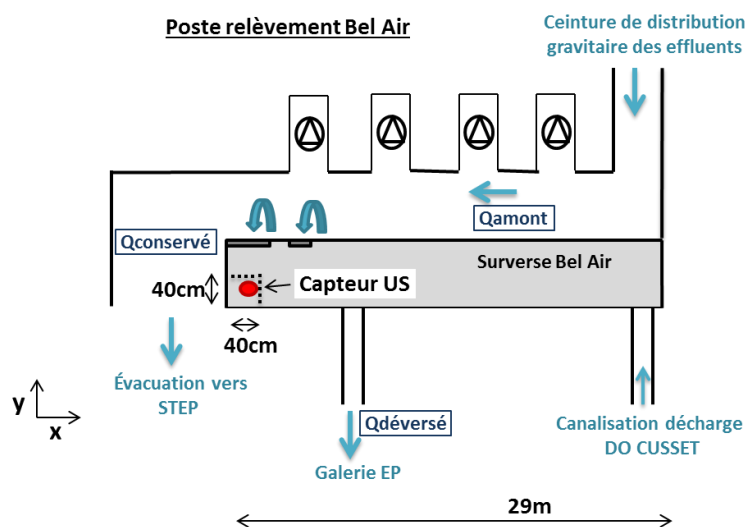


Figure 44. DO Cusset, vue de dessus

Lois polynomiales de déversement à implémenter en supervision

Les lois de déversement et d'incertitude pour le DO Bel air sont récapitulées dans le Tableau 13 suivant (Q en m³/s et h en m). L'incertitude est calculée pour un intervalle de confiance de 95%.

Tableau 13. Récapitulatif des lois d'incertitude et de déversement

Domaine d'application	Loi de déversement et d'incertitude	R ²
Q=[0,1 ; 2,5] (m3/s)	$Q_{\text{déversé}}=1,2294 \cdot h^2 + 0,2973 \cdot h_{\text{capteur}} - 0,0257$	0,998
	$\text{Incertitude}(\%)=8,7665 \cdot Q_{\text{déversé}}^{(-0,396)}$	0,9891
	$\text{Incertitude}(\%)=7,4817 \cdot h_{\text{capteur}}^{(-0,68)}$	0,9871

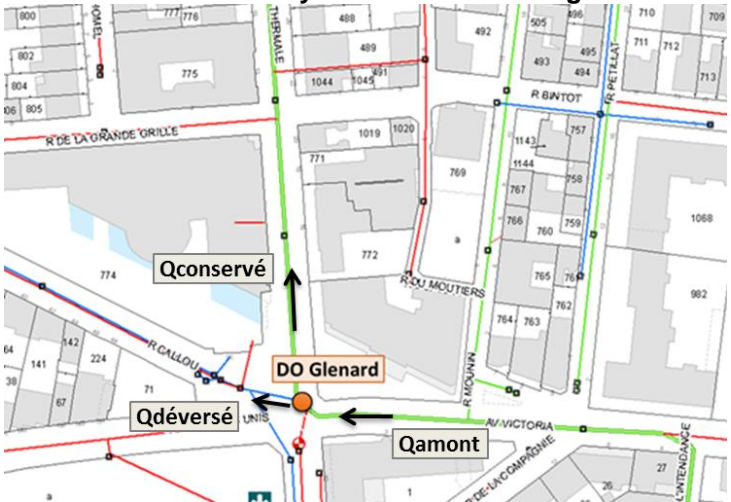
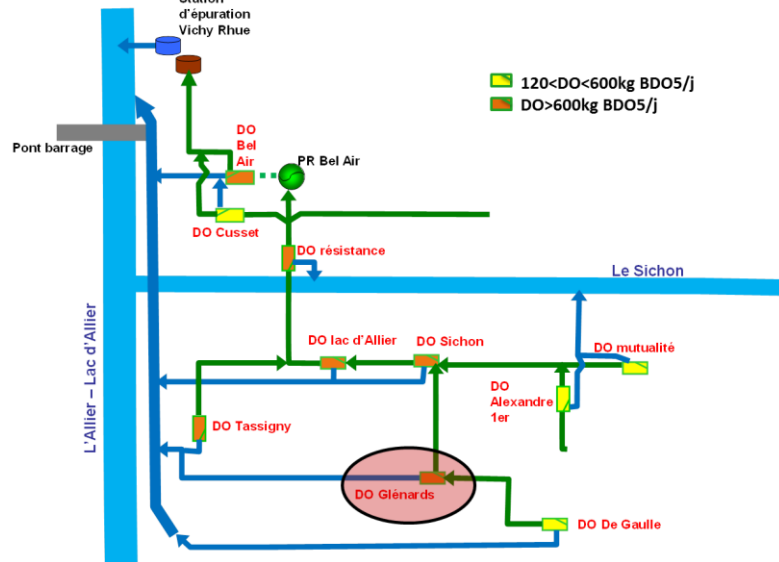
L'incertitude est < 10% à partir d'un débit de 0,5 m³/s.

III.3.4. Modèles 3D : cas du déversoir d'orage F. Glénard

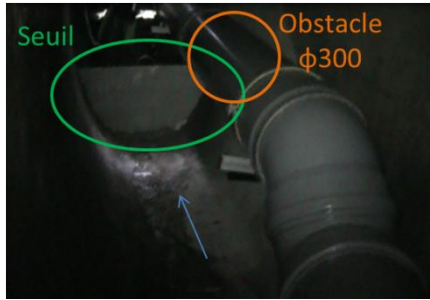
Le déversoir d'orage F. Glénard se situe à une jonction entre les réseaux d'eaux usées, une conduite d'eaux thermales et la canalisation de décharge vers la galerie d'eaux pluviales. La loi h-Q est évaluée par modélisation 3D.

III.3.4.a. Généralités

Localisation dans le réseau d'assainissement VVA

GENERALITES	
<p>Localisation dans le réseau d'assainissement de VVA:</p>	<p>Le déversoir d'orage (DO) F. Glénard est situé à proximité des établissements thermaux de Vichy. Il déverse dans la galerie E.P.</p> 
<p>Interaction du DO dans le réseau</p>	<p>Le DO F. Glénard est situé en aval du DO Charles de Gaulle et influence les DO Sichon et Lac d'Allier en aval.</p> 
<p>Charge (kg DBO5/j)</p>	<p>811 kg DBO5/j (soit 13523 Equivalent-Habitant) : Enjeu fort</p>
<p>Objectif et intérêt de la mesure</p>	<p>Mise en place de l'auto surveillance Suivi en continu du débit déversé et estimation des charges rejetées</p>
<p>Déversements</p>	<p>Non-déversement pour des pluies mensuelles Déversement pour la pluie décennale (source : modèle PCSWMM calé pour le réseau de VVA (étude Egis (2012))</p>

Analyse de l'environnement hydraulique et choix de la méthode d'instrumentation

SINGULARITES ET CONTRAINTES DE L'OUVRAGE			
Type de déversoir	Déversoir frontal à seuil mince		
Singularité amont:	Régime d'écoulement fluvial		
Singularité aval	Influence aval due à la contre-pente et à l'arrivée d'eaux pluviales à l'aval du seuil (pas d'influence du milieu naturel).		
Géométrie particulière	Existence d'un obstacle (la canalisation DN300 d'eaux thermales) au-dessus du seuil 		
Autres contraintes	Présence d'un gradient de températures potentiellement élevé (eaux thermales) et possibilité de formation de brouillard		
ANALYSE COMPARATIVE DES METHODES DE MESURE DE DEBITS			
Techniques possibles		Méthodes pertinentes	Méthodes non applicables
Vélocimétrie	Doppler		Accès limité pour l'entretien des capteurs Impossible d'instrumenter à l'aval du seuil car présence de la canalisation EP (DN600) Stagnation de l'eau à cause de la contre-pente
	Corde de vitesse		
Section de contrôle	Seuil		
	Vanne		
	Venturi		
Modèle	H2Q		N/A
	Modèle empirique ou 1D	Seuil frontal standard avec un obstacle (DN300 eaux thermales) : quel est l'impact de l'obstacle sur les résultats ?	
	Modèle de trop-plein		N/A
	3D	Modélisation du seuil avec l'obstacle en 3D	
MODELISATION ET TECHNOLOGIE RETENUES			
Méthode de modélisation	Modélisation 3D		
Technologie du capteur	2 capteurs radar (gradient de température)		

III.3.4.b. Modélisation du fonctionnement hydraulique en 3D

Présentation de la géométrie du déversoir d'orage

La géométrie du déversoir d'orage F. Glénard est présentée dans les Figure 45 et Figure 46 suivantes. La canalisation conservée est un ovoïde T1700 et la canalisation de déversement présente une contre-pente (-1.3%) par rapport au sens d'écoulement.

La géométrie a récemment été modifiée : un nouveau seuil est installé dans l'ovoïde de déversement T1700 pour éviter que l'ouvrage fonctionne en sens inverse en temps sec et petites pluies. La canalisation d'eaux thermales passe 25cm au-dessus du nouveau seuil.

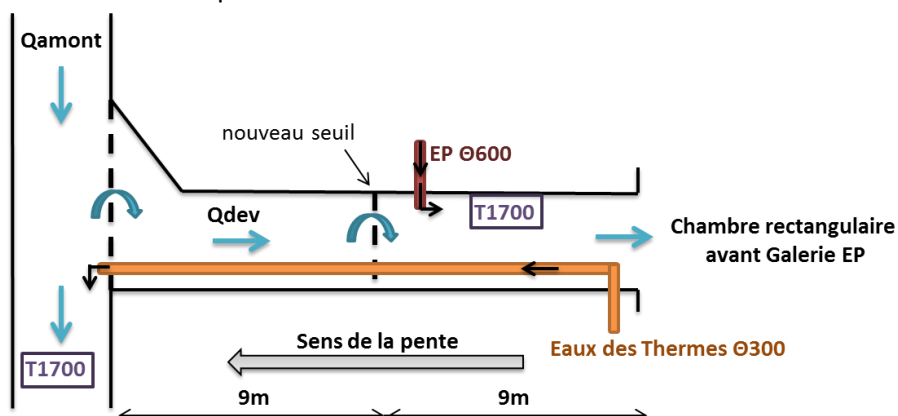


Figure 45. Schéma de la géométrie du DO F. Glénard

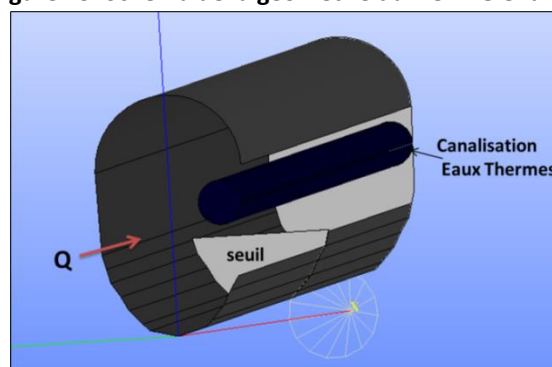


Figure 46. Géométrie 3D du nouveau seuil du DO F. Glénard

Le déversoir d'orage F. Glénard ne correspond pas à un seuil frontal standard dû à la canalisation d'eaux thermales qui passe au-dessus du seuil. L'incertitude sur les calculs introduite par cet obstacle est difficile à évaluer. Le recours à la modélisation 3D est alors préféré à une loi empirique, mais une comparaison des 2 méthodes est réalisée pour évaluer l'impact de cet obstacle sur les résultats.

Débits présents dans le DO d'après des études antérieures

Les débits mensuels et décennaux établis avec le modèle PCSWMM calé pour le réseau de VVA dans l'étude Egis (2012) sont présentés dans le Tableau 14 ci-dessous.

Tableau 14. Débit mensuels et décennaux pour le déversoir d'orage F. Glénard

	Pluie mensuelle	Pluie T=10ans
Q amont (m ³ /s)	1,2	2,7
Q déversé (m ³ /s)	0	1,2
Q injection EP (m ³ /s)	0,032	0,14

L'ouvrage ne déverse pas pour des pluies mensuelles. L'injection d'eau pluviale après le seuil représente, respectivement pour la pluie mensuelle et décennale, une hauteur d'eau de 13cm et de 28cm dans la canalisation d'arrivée de diamètre 600mm.

Conception du modèle 3D

Seule la partie déversée de l'ouvrage est modélisée car le nouveau seuil est au centre de la canalisation de décharge. L'ajout de la canalisation conservée n'apporte pas d'impact hydraulique supplémentaire. La canalisation d'eaux thermales (DN300) est intégrée à la modélisation 3D.

Conception du maillage

Pour le déversoir d'orage F. Glénard, un pas d'espace de 5cm est défini pour le maillage avec un raffinement de 2,5cm au niveau du seuil (cf. Figure 47). L'ouvrage est décrit avec 540 000 mailles hexaédriques.

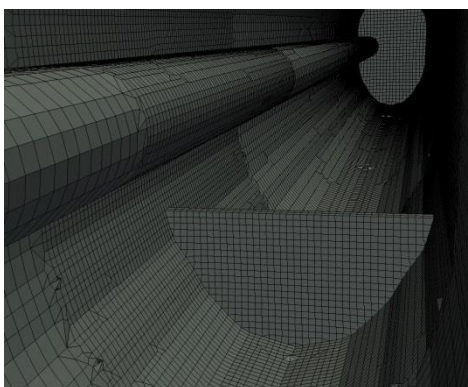


Figure 47. Maillage de l'ouvrage. Raffinement plus élevé au niveau du seuil

Simulations et hypothèses de calcul

Les conditions limites pour les modélisations sont récapitulées dans le Tableau 15 ci-dessous.

Tableau 15. Conditions limites pour la modélisation du DO F. Glénard

	Minimum	Maximum
Q déversé (m ³ /s)	0,1	1,2
Hauteur d'eau aval (m)	0	0,8

Le débit maximal correspond au débit décennal. La hauteur d'eau couvre toutes les possibilités de seuil dénoyé et noyé (soit sans ou avec influence aval). La hauteur maximale prend en compte la hauteur d'eau maximale possible due à la stagnation de l'eau et à l'ajout d'eaux pluviales par le DN600. Au total, 20 simulations sont réalisées. Le détail des simulations est présenté dans le Tableau 25 en Annexe 7.

III.3.4.c. Elaboration de l'autosurveillance

Après avoir réalisé le modèle 3D et les calculs hydrauliques pour le DO F. Glénard, il s'agit d'élaborer la loi de déversement qui sera utilisée par les automates pour l'autosurveillance de cet ouvrage.

Analyse des résultats de simulation : Bilan de masse

Le bilan de masse, qui est la différence entre la quantité d'eau à l'entrée et à la sortie de l'ouvrage modélisé, est inférieur à 4%. Les bilans de masse de chaque simulation sont détaillés dans le Tableau 26 en Annexe 7.

Analyse des résultats de simulation : Surface libre

La visualisation des surfaces libres permet de décrire l'écoulement dans l'ouvrage. La Figure 48 est un exemple de résultat de modélisation avec un débit de 1,2m³/s et une hauteur aval de 40cm.

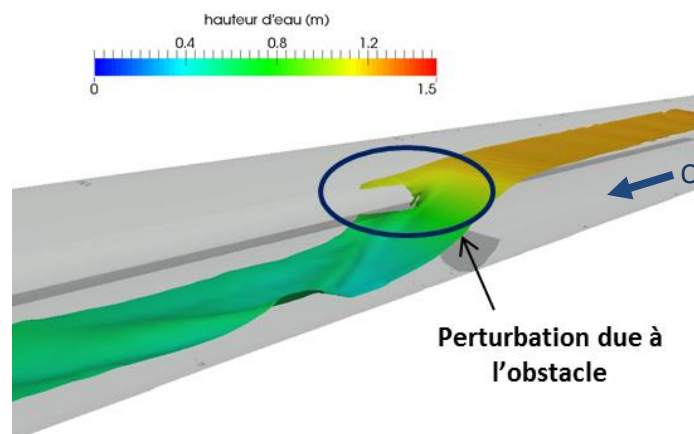


Figure 48. Modélisation 3D de l'ouvrage ($Q=1,2\text{m}^3/\text{s}$ et $h_{\text{aval}}=0,4\text{m}$)

Ainsi la perturbation créée par la canalisation DN300 est visible et provoque un long et dissymétrique ressaut après le seuil.

Identification de la position du/des capteur(s)

La présence d'une influence aval impose l'installation de 2 capteurs, un à l'amont du seuil et l'autre à l'aval.

D'après les lois d'instrumentation pour les seuils standards (CETMEF, 2005), le capteur amont est installé à une distance de 2m du seuil pour s'assurer d'un écoulement en régime permanent uniforme à cet endroit. Un regard existe à 3,8m à l'aval du seuil où pourrait être installé le second capteur. Les différents critères d'unicité et de stabilités spatiales et temporelles sont vérifiés pour chaque capteur.

La Figure 49 ci-dessous présente un exemple d'écoulements sans influence aval. Les lignes d'eau pour les différents débits au niveau du capteur amont sont très différenciées et ne se coupent pas. De plus, à cet emplacement, les lignes de courant sont très stables sur le profil transversal de la canalisation, avec une variation de hauteur moyenne de 5mm pour les 20 simulations. A noter que seul le capteur amont contrôle la loi de déversement pour un écoulement sans influence aval.

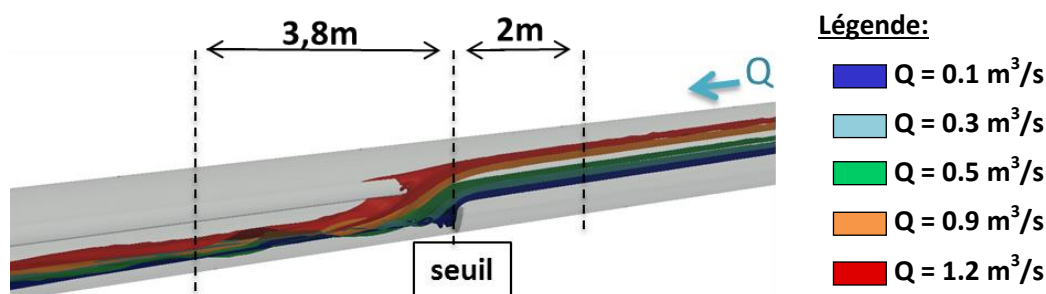


Figure 49. Surfaces libres sans influence aval

La Figure 50 ci-dessous présente les surfaces libres pour un même débit avec différentes influences aval. L'emplacement du capteur amont répond également aux 2 critères d'unicité et de stabilité

spatiale. Les lignes d'eau sont également très différenciées à 3.8m en aval du seuil, lors d'une influence aval. La hauteur d'eau le long du profil transversal de la canalisation est très stable, avec une moyenne de variation de hauteur de 1cm pour les 20 simulations.

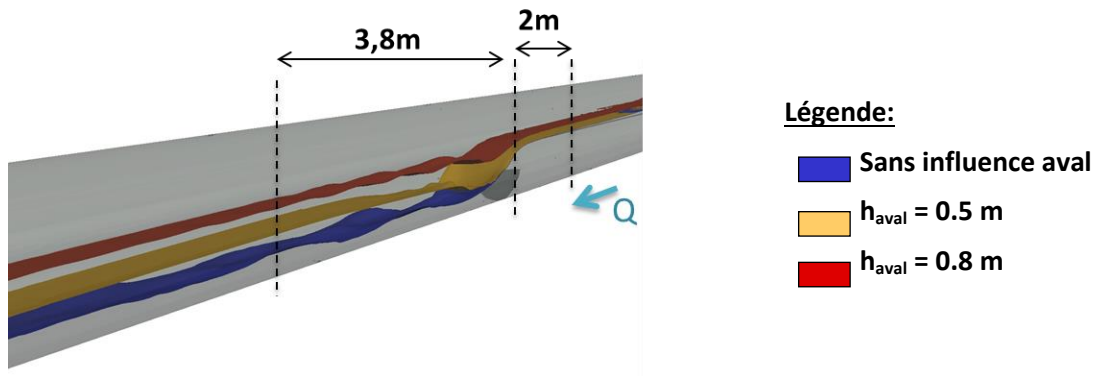


Figure 50. Surfaces libres pour un débit de $0,5 \text{ m}^3/\text{s}$

La stabilité temporelle des lignes d'eau à l'emplacement des 2 capteurs est vérifiée sur 10 secondes de modélisation. La stabilité est de l'ordre de 10^{-4}m au niveau du capteur aval et est d'environ 10^{-5}m pour le capteur amont.

L'emplacement des 2 capteurs est donc confirmé à 2m à l'amont et à 3.8m à l'aval du seuil. La Figure 51 suivante récapitule ces résultats.

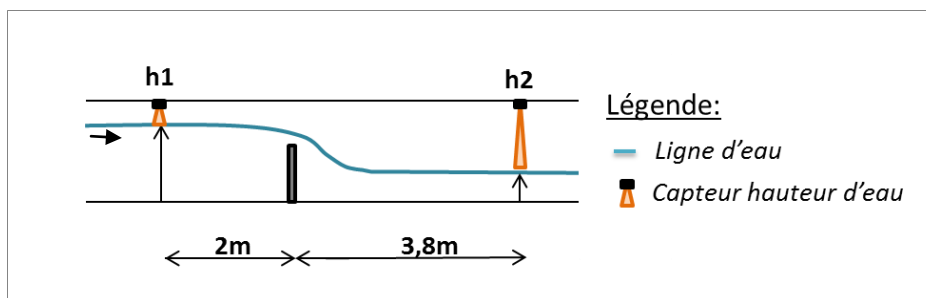


Figure 51. Placement des capteurs de mesure de hauteur d'eau

Elaboration de la loi h-Q

Les données de hauteurs d'eau et de débits sont extraites aux endroits choisis pour l'emplacement des 2 capteurs. Les résultats des modélisations sont détaillés dans le Tableau 26 en Annexe 7.

Pour interpréter ces résultats, il est nécessaire de les différencier suivant le régime d'écoulement dénoyé ou noyé du seuil. La Figure 52 ci-dessous précise les notations utilisées par la suite.

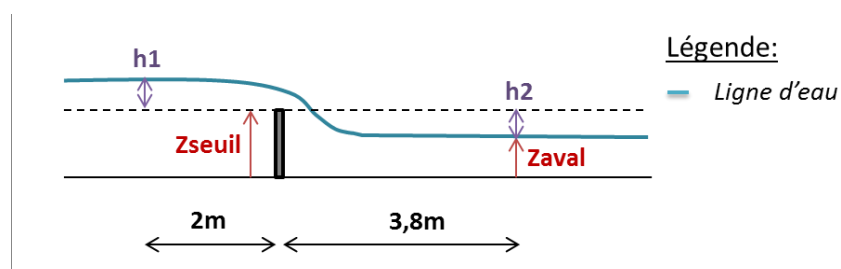


Figure 52. Notation des hauteurs dans l'ouvrage

Le critère pour définir l'écoulement au niveau d'un seuil est tel que (CETMEF, 2005) :

Pour $Z_{\text{seuil}} > Z_{\text{aval}}$: seuil dénoyé

Pour $Z_{\text{seuil}} < Z_{\text{aval}}$: seuil noyé

D'après ce critère, 4 simulations ont un seuil dénoyé et 16 sont noyées. Une première loi de déversement est établie avec les 4 simulations dénoyées pour estimer $Q_{\text{dénoyé}}$. Une deuxième courbe peut alors être tracée pour les 16 simulations noyées avec une relation entre $Q_{\text{noyé}}/Q_{\text{dénoyé}}$ en fonction de h_1 et h_2 (relation similaire à une loi de seuil noyé classique). La Figure 53 ci-dessus présente l'ensemble des résultats où le seuil est noyé.

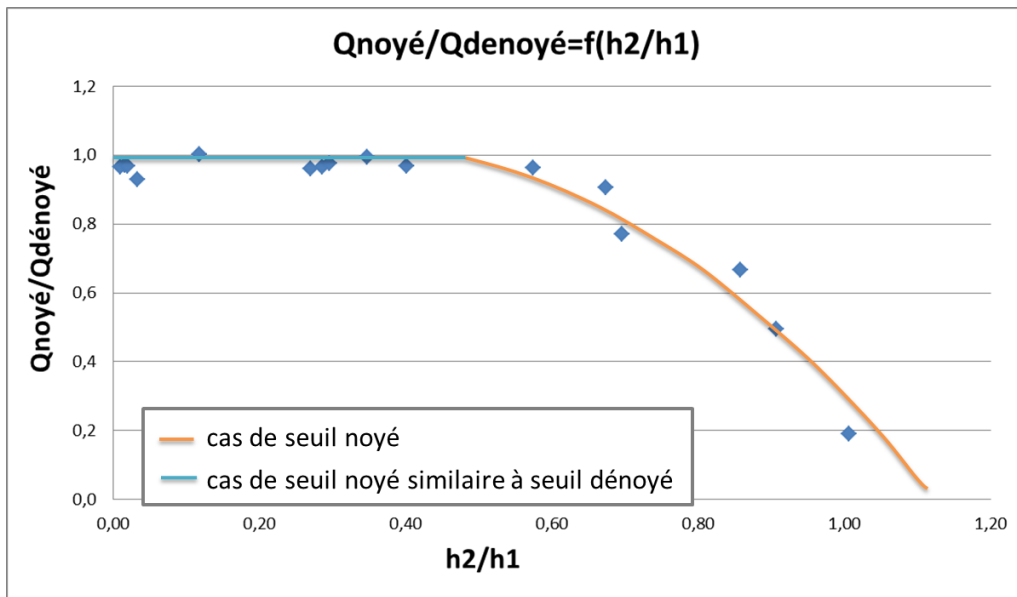


Figure 53. Cas d'écoulement en seuil noyé

Le graphique précédent met en évidence que pour les seuils noyés avec h_2/h_1 inférieurs à 0,41, le seuil se comporte comme un seuil dénoyé ($Q_{\text{noyé}}/Q_{\text{dénoyé}}=1$). La loi de seuil dénoyé est alors recalculée avec ces valeurs supplémentaires. (cf. Figure 54).

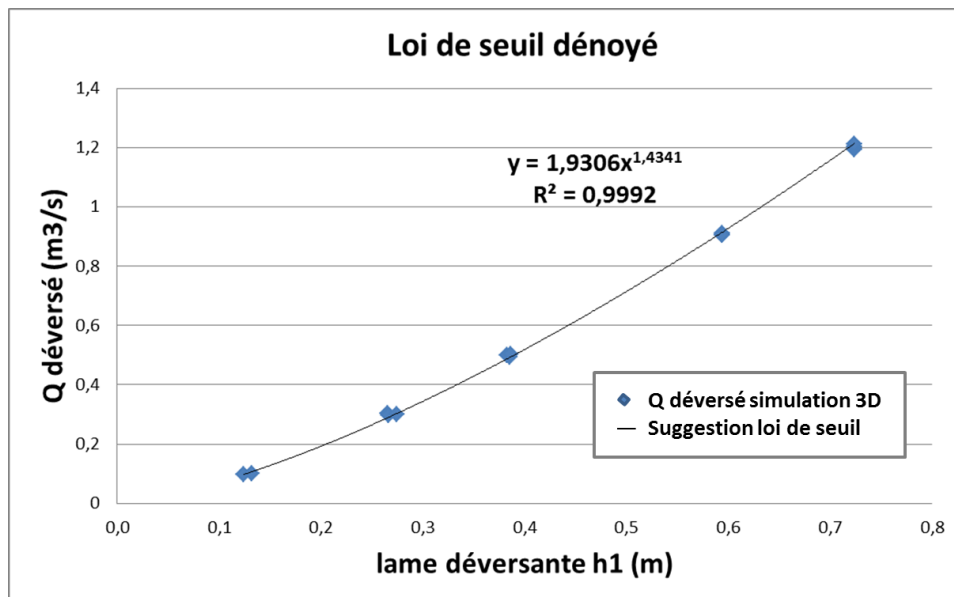


Figure 54. Loi de seuil dénoyé et seuil noyé avec $h_2/h_1 < 0,41$

La loi de seuil modélisée est similaire à une loi de seuil empirique du type $Q_{\text{dév}} = \text{constante} * h^{3/2}$.

La loi de déversement est aussi établie dans le cas d'un seuil noyé avec $h_2/h_1 > 0,41$ (cf. Figure 55).

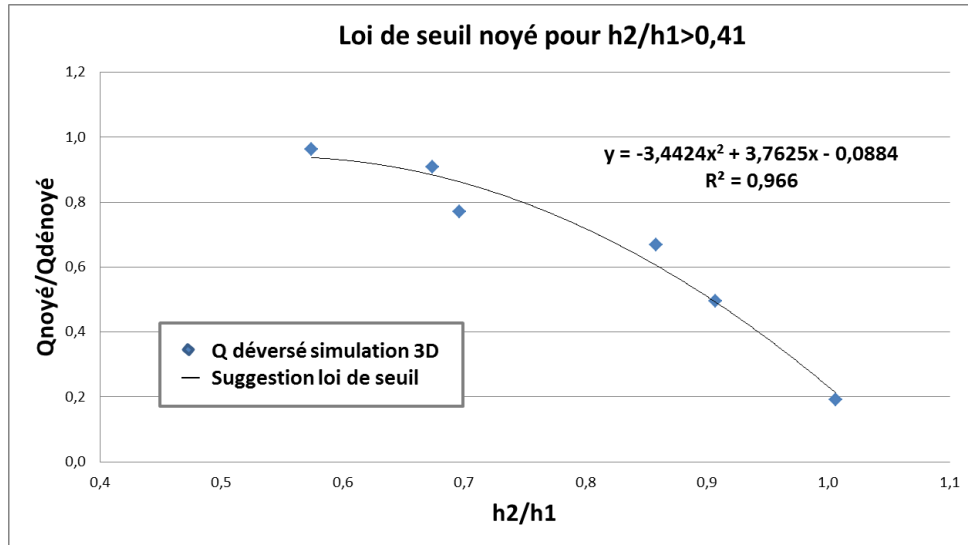


Figure 55. Loi de seuil noyé pour $h_2/h_1 > 0,41$

Le calcul d'incertitudes est réalisé selon la méthode décrite dans l'Annexe 1. L'incertitude est inférieure 10% à partir d'un débit de $0,3 \text{ m}^3/\text{s}$ pour un écoulement dénoyé et est inférieure à 20% à partir de $0,5 \text{ m}^3/\text{s}$ pour un écoulement noyé.

III.3.4.d. Comparaison avec une loi de seuil empirique

Les résultats de la modélisation 3D sont comparés avec la loi de seuil dénoyé empirique de Kindsvater (CETMEF, 2005) pour évaluer l'impact de l'obstacle sur l'écoulement. L'équation de seuil s'écrit :

$$Q_{\text{déversé}} \left(\frac{\text{m}^3}{\text{s}} \right) = \mu * C_v * L * (h_e)^{\frac{3}{2}} * \sqrt{2g}$$

$$\text{Avec : } \mu = \frac{2}{3} * (0,602 + 0,075 * \frac{h_{\text{eau}}}{h_{\text{crete}}})$$

$$\text{Et } C_v = 1 ; h_e(\text{m}) = h_{\text{eau}}(\text{m}) + 0,001.$$

Les résultats de seuil noyé sont comparés avec la loi empirique de Carlier qui s'écrit (CETMEF, 2005) :

$$Q_{\text{noyé}}(\text{m}^3/\text{s}) = Q_{\text{dénoyé}} * K_{\text{carlier}} = Q_{\text{dénoyé}} * \left[1,05 * \left(1 + \frac{h_2}{5p} \right) * \sqrt[3]{1 - \frac{h_2}{h_1}} \right]$$

Avec le domaine de validité suivant : $0,25p < h_1 - h_2 < 0,75p$.

Le domaine de validité est respecté pour toutes les valeurs de débits déversés.

Les résultats sont présentés dans la Figure 56 ci-dessous. Le détail des calculs sont donnés en Annexe 7 dans les Tableau 27 et Tableau 28.

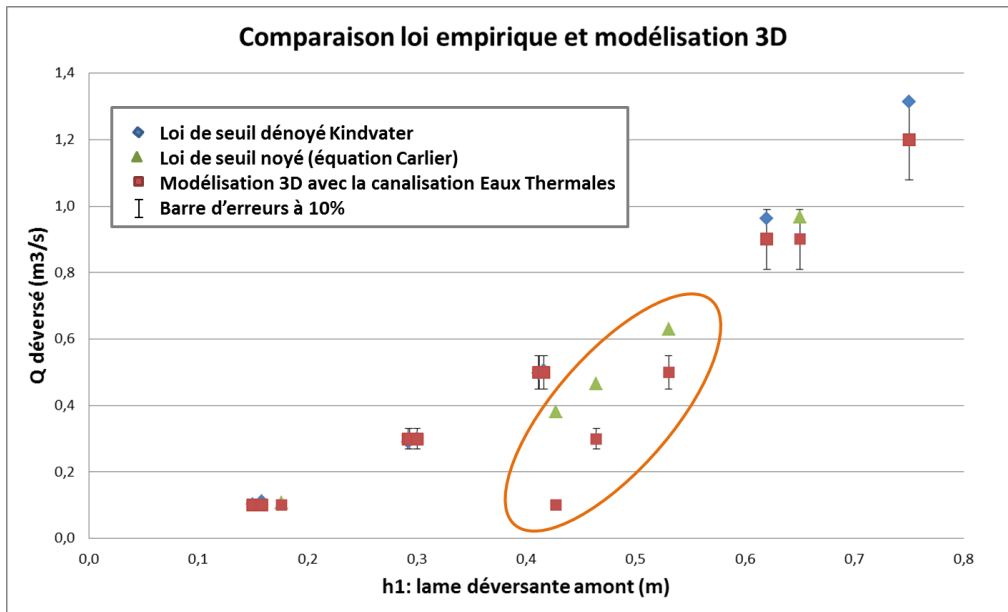


Figure 56. Comparaison des lois empiriques et des résultats de la modélisation 3D

Globalement l'erreur entre les résultats des lois de seuil empiriques et la modélisation 3D est inférieure à 10%. Seulement 3 valeurs qui correspondent à des conditions particulières, un seuil complètement noyé avec une grande influence aval ($h_2=0,8m$) et de petits débits déversés (0,1 à $0,5m^3/s$), sont divergentes.

III.3.4.e. Synthèse sur la mise en place de l'autosurveillance

Principe de l'aménagement

L'aménagement consiste en la pose de capteurs de mesure de hauteurs d'eau, sans modification conséquente de génie civil.

Position du capteur de mesure de hauteur d'eau

La présence d'une influence aval impose l'installation de 2 capteurs, un à l'amont du seuil et l'autre à l'aval. Les Figure 57 et Figure 58 ci-dessous récapitulent l'emplacement de ces 2 capteurs.

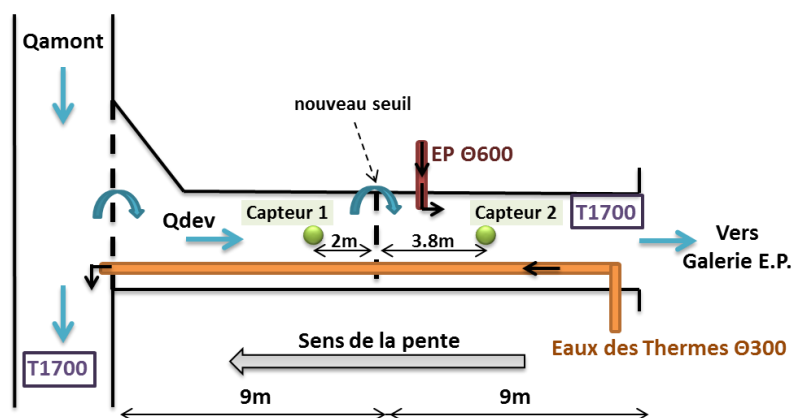


Figure 57. Schéma du DO F. Glénard, vue de dessus

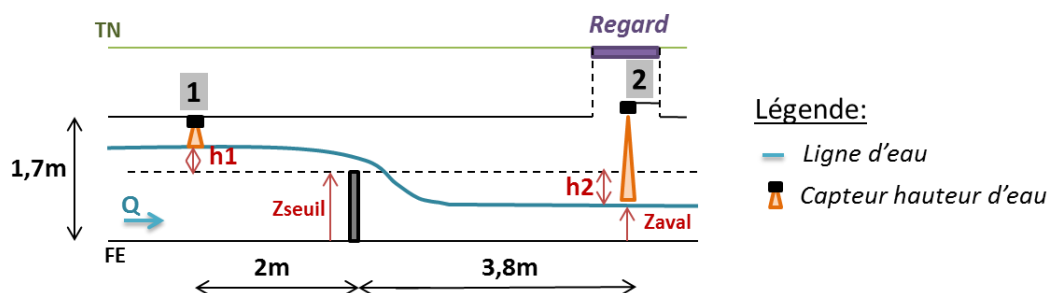


Figure 58. Schéma du DO F. Glénard, vue de profil

Lois polynomiales de déversement à implémenter en supervision

Les lois de déversement et d'incertitude pour le DO F. Glénard sont récapitulées dans le schéma de principe de la Figure 59 suivante (Q en m^3/s et h en m). L'incertitude est calculée pour un intervalle de confiance de 95%.

A noter que les notations utilisées dans les lois sont celles précisées dans la Figure 58 précédente.

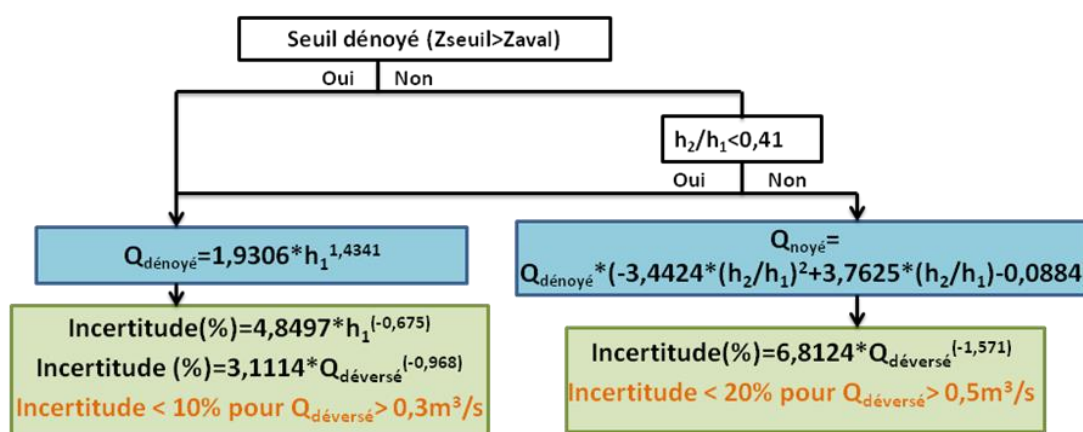


Figure 59. Récapitulatif des lois de déversement et d'incertitude (Q est en m^3/s et h en mètre)

III.4. Conclusions et suites à donner

Les 4 cas d'études précédents ont montré un exemple de mise en place de l'autosurveillance de déversoirs d'orage dans le réseau d'assainissement de Vichy Val d'Allier. Les lois h - Q ont été déterminées avec des méthodes différentes de modélisation : empirique, 1D et 3D. Dans les 4 cas, il a été mis en évidence l'importance de l'analyse de l'environnement hydraulique, du choix du modèle, de la taille de la maille de discrétisation de l'ouvrage et de l'emplacement du capteur pour établir une loi h - Q précise et fiable.

La modélisation 3D est une méthode qui permet d'obtenir des résultats précis des écoulements et est particulièrement utile dans le cas d'ouvrages à géométrie complexe ou de jonctions de plusieurs canalisations. Mais il ne faut pas oublier qu'il s'agit d'une méthode qui est très consommatrice en temps pour créer la géométrie, réaliser les calculs et exploiter les résultats. Il n'est alors pas envisageable de généraliser cette méthode pour des raisons de coûts de l'étude. Une méthode plus simple, par exemple de type empirique, doit être privilégiée si elle est applicable dans l'ouvrage. La

comparaison entre la modélisation 3D et la loi de seuil empirique dans le déversoir d'orage F. Glénard a pour objectif d'acquérir plus d'expérience sur les seuils frontaux avec un obstacle et d'utiliser ces résultats pour de futurs ouvrages.

L'évaluation de l'incertitude sur le débit déversé est également une précision supplémentaire qui est intéressante pour les Maîtres d'ouvrage et pour les Agences de l'eau. Cette information n'est pas systématiquement présente dans la gestion de débits en réseaux assainissement.

Pour finir, il convient d'évoquer les suites données à ce projet. L'étude de mise en place de l'autosurveillance des déversoirs d'orage de VVA est un projet de maîtrise d'œuvre qui est réalisé en co-traitance avec la société Larbre Ingénierie. Un rapport sur l'emplacement des capteurs et le génie civil à réaliser a déjà été rédigé pour une demande de subvention à l'Agence de l'Eau Loire-Bretagne. Actuellement, le Dossier de Consultation aux Entreprises est en cours de rédaction pour réaliser un marché public pour installer les capteurs de mesure.

Conclusion générale

Ainsi ce rapport a montré que la mesure de débits déversés en réseaux d'assainissement est un défi, constamment relevé par les Maitres d'ouvrage pour se mettre en conformité avec la réglementation. L'étude décrite dans ce rapport détaille l'élaboration de l'instrumentation de 4 déversoirs d'orage de la Communauté d'Agglomération de Vichy Val d'Allier. La démarche pour réaliser cette étude a été abordée d'un point de vue méthodologique avec tout d'abord un état de l'art de l'ensemble des méthodes actuelles de mesure de débits avec leurs avantages et inconvénients. Une nouvelle méthode utilisant la modélisation 3D (CFD) a ensuite été détaillée, ainsi que son contexte scientifique théorique et sa mise en œuvre pour des applications d'évaluation de débits déversés. En conclusion de ces 2 chapitres, une méthodologie a été établie pour aider à la détermination de la technologie de mesure de débit la plus adaptée à l'ouvrage.

Cette démarche a été illustrée par les cas d'études de VVA. Pour chaque ouvrage, une étude de la géométrie, l'encombrement, la possibilité de maintenance et l'environnement (gradient température, bulles d'air) de l'ouvrage a été réalisée pour choisir une technologie robuste, peu coûteuse à l'installation et en maintenance. Dans les cas plus standards, une modélisation de type empirique ou 1D est facile à mettre en place pour élaborer la loi d'étalonnage h-Q, couplée à un capteur de mesure de hauteur d'eau. En cas de géométrie complexe, l'utilisation de la modélisation 3D a répondu parfaitement à cet enjeu. Plusieurs déversoirs d'orage du projet de VVA ont été instrumentés avec cette méthode innovante.

Les calculs par CFD demandent un temps d'étude plus long, mais les résultats pour l'emplacement des capteurs de mesure de hauteur et la loi d'étalonnage, sont précis et facilement implémentés dans la supervision des gestionnaires de réseaux. Les coûts de génie civil sont très faibles car ils consistent seulement en l'installation de quelques capteurs, souvent non-intrusifs et autonomes. Toutefois le recours à la modélisation 3D ne doit pas être systématique. Il convient préalablement de vérifier qu'il n'existe pas d'autres solutions plus simples à utiliser, par exemple par modélisation empirique ou 1D.

La modélisation 3D fait donc partie des méthodes actuelles facilement mises en œuvre pour des études d'ouvrages hydrauliques. Le rapport a détaillé une application de cette modélisation, mais le champ d'utilisations dans le domaine de l'hydraulique est large. Une application, par exemple, pour répondre aux exigences du nouvel Arrêté du 21/07/2015 est l'optimisation de bassins de rétention pour garantir moins de 5% du flux de pollution annuel produit par l'agglomération à la sortie de l'ouvrage. Une modélisation CFD des bassins de rétention permet de concevoir l'ouvrage pour garantir les objectifs de résultats et d'en minimiser la taille de construction.

Bibliographie

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

Bertrand-Krajewski J-L, Laplace D, Joannis C, Chebbo G. (2000), Mesures en hydrologie urbaine et assainissement. Editions Tec&Doc.

CETMEF, Centre d'Etudes Techniques Maritimes et Fluviales, (2005), Notice sur les déversoirs, Synthèse des lois d'écoulement au droit des seuils et déversoirs, Département Environnement Littoral et Cours d'Eau, Division Hydraulique et Sédimentologie Fluviales

EgisEau, 09/2012, Etude de gestion globale des eaux usées, des eaux pluviales, et du risque inondation sur le territoire de Vichy Val d'Allier, Volet eaux usées, Préconisation pour la mise en place de la métrologie.

Fletcher D. et Xuereb C. (2004), Mécanique des fluides numérique, Techniques de l'ingénieur (j1050)

FNDAE (2006), Guide technique sur le fonctionnement des déversoirs d'orage, Auteurs Vazquez J., ZUG M. et al, partenariat ENGEES et Veolia Anjou Recherche

FNDAE (2006), Fiches techniques : Annexes du guide technique sur le fonctionnement des déversoirs d'orage, Auteurs Vazquez J., ZUG M. et al, partenariat ENGEES et Veolia Anjou Recherche

GRAIE (2009), Fiche Technique n°4 : mesurage de la vitesse d'écoulement par cordes de vitesses

Hager W.H (1999), Wastewater Hydraulics, Theory and practice, Springer

ISO 6416 (2005), Mesure du débit à l'aide de la méthode ultrasonique (acoustique). 62 p.

ISO IEC 98-3 (2008), Uncertainty of measurement- Part 3: Guide to the expression of uncertainty in measurement

Isel S. (2014), Développement de méthodologies et d'outils numériques pour l'évaluation du débit en réseau hydraulique à surface libre, Thèse Université de Strasbourg, ICUBE

Laplace D et al., TSM n°1/2 2012, Les réseaux d'assainissement face aux incertitudes climatiques

Lipeme Kouyi G. (2004), Expérimentations et modélisations tridimensionnelles de l'hydrodynamique et de la séparation particulière dans les déversoirs d'orage, Thèse de l'université de Strasbourg Louis Pasteur

Versteeg H.K. et Malalasekera W. (1995), An introduction to Computational Fluid Dynamics, The finite Volume Method, Pearson Education

Wertel J. (2009), Modélisation tridimensionnelle des écoulements turbulents en conduite d'assainissement à surface libre, Thèse Université de Strasbourg

Roache,P.J (1994), Perspective: A method for Uniform Reporting of Grid Refinement Studies, Journal

of fluids Engineering, Vol. 116/405.

Vazquez J., Joannis C. et al. (05/2014), projet COACHS, Guide technique 3 : Evaluer le débit déversé par le trop-plein de station de pompage à partir de la mesure de hauteur(s) d'eau, partenariat IFSTTAR, GEMCEA, INSA et ICUBE.

Références et téléchargement du Logiciel HSL :

<http://hydraulique-des-reseaux.engees.eu/home/outils-de-calcul>

ANNEXES : SOMMAIRE

ANNEXE 1 : Méthodologie de calculs d'incertitudes	65
ANNEXE 2 : DO CUSSET - Modélisation 1D à charge spécifique constante	66
Présentation de la méthode et équations utilisées	66
ANNEXE 3 : DO CUSSET - Tables de valeurs utilisées pour établir la loi $Q_{\text{déversé}}=f(\text{haval})$	68
ANNEXE 4 : DO RESISTANCE - Modélisation par lois empiriques- Modèle de Trop-plein ...	70
Equations empiriques utilisées.....	70
ANNEXE 5 : Surverse BEL AIR - Modélisation en 3D	71
1. Détails de l'étude de pompage	71
2. Validation de l'indépendance du point de mesure choisi par rapport aux déversements du DO CUSSET.....	71
ANNEXE 6 : Surverse BEL AIR – Tables de résultats de simulations	74
1. Analyse du pompage de la station Bel Air	74
2. Liste des simulations	75
3. Résultats des simulations	75
ANNEXE 7 : DO F. GLENARD – Tables de résultats de simulations	76
1. Détails des simulations 3D réalisées	76
2. Résultats des modélisations	77
3. Comparaison entre une loi empirique de seuil et la modélisation 3D.....	78

ANNEXE 1 : Méthodologie de calculs d'incertitudes

3D EAU a mis en place une méthodologie pour évaluer l'incertitude sur les résultats de débits déversés. Cette démarche est conforme aux recommandations de la norme ISO IEC 98-3. L'incertitude est calculée pour un intervalle de confiance de 95%, c'est-à-dire qu'il y a 95% de chances que la valeur réelle du débit soit comprise dans cet intervalle.

Les sources d'incertitude sur le débit déversé sont les suivantes :

- **L'incertitude de mesure de la hauteur d'eau** : celle-ci provient de l'incertitude des capteurs de mesure du niveau d'eau et des paramètres de pose ; elle est déterminée selon les recommandations de la norme ISO 6416. L'incertitude de mesure sur site avec des technologies sans contact (ultrason ou radar) est généralement fixée à 1 cm. Elle ne tient pas compte de la fluctuation de l'écoulement au point de mesure (exemple présence de vaguelettes).

Pour les lois précédemment établies $Q_{\text{dénové}} = f(h_1)$ et $Q_{\text{noyé}} = f(h_1, h_2)$, l'incertitude de mesure absolue s'écrit :

$$\Delta Q = \sqrt{\left(\frac{df}{dh_1}\right)^2 * \Delta h_1^2 + \left(\frac{df}{dh_2}\right)^2 * \Delta h_2^2}$$

Avec $\Delta h=1\text{cm}$, Q : débit déversé (m^3/s)

L'incertitude de mesure relative s'exprime : $Inc_{\text{mesure } 95\%} = 2 * \frac{\Delta Q}{Q}$

- **L'incertitude de la formule mathématique reliant la hauteur d'eau aval au débit déversé** : celle-ci provient de l'interpolation des résultats par la loi $Q = f(h)$. Les résultats sont distribués autour de la courbe de tendance. Cette incertitude de calcul dépend donc du débit. L'incertitude d'interpolation relative s'écrit :

$$Inc_{\text{interpol}} = \frac{|Q_{\text{dev_modélisation}} - Q_{\text{dev_interpolation}}|}{Q_{\text{dev_modélisation}}}$$

Avec : $Q_{\text{dev_modélisation}}$: débit déversé calculé par la modélisation 3D, en m^3/s

$Q_{\text{dev_interpolation}}$: débit déversé interpolé par les lois de déversement, en m^3/s

- **L'incertitude du modèle numérique** : celle-ci est due à la discrétisation du domaine de calcul en petits éléments de taille finie. Elle est évaluée au moyen d'une analyse de sensibilité au maillage et le calcul du Grid Convergence Index (GCI) selon la procédure de Roache (1994). L'incertitude diminue lorsque le nombre de cellules de calculs augmente. Néanmoins au-delà d'un certain nombre de mailles, ce paramètre présente un comportement asymptotique. L'incertitude du maillage représente l'écart entre les résultats obtenus et cette valeur de convergence.

La même modélisation est ainsi réalisée avec plusieurs tailles de maillage différentes pour appliquer le protocole de Roache. Le GCI est ensuite inclus dans le calcul d'incertitude globale.

L'incertitude globale, pour chaque débit déversé, s'écrit telle que :

$$Inc_{\text{globale}} = \sqrt{Inc_{\text{mesure}}^2 + Inc_{\text{interpol}}^2 + \left(\frac{GCI}{2}\right)^2}$$

ANNEXE 2 : DO CUSSET - Modélisation 1D à charge spécifique constante

Présentation de la méthode et équations utilisées

La méthode de la charge spécifique constante permet de calculer la hauteur d'eau et le débit en tout point de la crête, par la résolution d'équations différentielles de proche en proche.

Un déversoir est caractérisé par une charge spécifique, H, constante, soit :

$$H = H_o = \frac{Q^2}{2 * g * S^2} + h$$

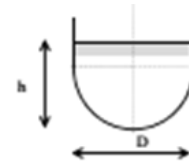
avec h : hauteur d'eau (m) ; S : surface (m²), Q : débit (m³/s)

Comme H est constant, $\frac{dH}{dx} = 0$ soit $\frac{d}{dx} \left(\frac{Q^2}{2 * g * S^2} + h \right) = 0$

i.e.
$$\frac{Q}{g * S^2} \frac{dQ}{dx} - \frac{Q^2}{g * S^3} \frac{dS}{dx} + \frac{dh}{dx} = 0$$

Le déversoir a une section en forme de U, la surface s'écrit:

$$S = D * h + D^2 * \left(\frac{\pi}{8} - \frac{1}{2} \right)$$



avec D : diamètre (m) qui ne dépend pas de x

Ainsi :

$$\frac{dS}{dx} = \frac{\partial S}{\partial h} \frac{dh}{dx} + \frac{\partial S}{\partial x} = D * \frac{dh}{dx} + 0$$

Soit
$$\frac{Q}{g * S^2} \frac{dQ}{dx} - \frac{Q^2}{g * S^3} \left(D * \frac{dh}{dx} \right) + \frac{dh}{dx} = 0$$

Soit
$$\frac{dh}{dx} = \frac{\frac{-Q}{g * S^2}}{1 - \frac{Q^2 * D}{g * S^3}} * Q'$$

Pour exprimer le débit en fonction de x, une loi de seuil est définie en prenant en compte l'effet de la vitesse latérale et sa direction, ainsi que l'effet de l'entonnement. L'équation utilisée est l'équation généralisée de déversement (Hager et al, 1999) pour une section rectangulaire. Cette équation peut être approximée pour un canal en U car le taux de remplissage de la canalisation est élevé.

$$Q' = \frac{dQ}{dx} = -0,6 * n^* * c_w * \sqrt{g} * (h - w)^{\frac{3}{2}} * \sqrt{\frac{H_o - w}{3H_o - 2h - w}} * \left[1 - \tan \theta * \left(\frac{3(H_o - h)}{h - w} \right)^{\frac{1}{2}} \right]$$

Avec c_w : 1 crête mince et 0,8 crête épaisse ; n^* : nombre de crêtes déversantes ; w : hauteur de crête (m) ; θ : angle d'entonnement.

Les 2 équations différentielles précédentes sont résolues de proche en proche avec Excel par la méthode de Runge-Kutta. Il s'agit d'une méthode basée sur les développements limités d'ordre 4 tels que :

$$h_{i+1} = h_i + \frac{\Delta x}{6} (k_{1,h} + 2k_{2,h} + 2k_{3,h} + k_{4,h}) \quad \left| \quad Q_{i+1} = Q_i + \frac{\Delta x}{6} (k_{1,Q} + 2k_{2,Q} + 2k_{3,Q} + k_{4,Q})\right.$$

Avec

$$k_{1,h} = f(x_i, h_i, Q_i)$$

Avec

$$k_{1,Q} = g(h_i,)$$

$$k_{2,h} = f\left(x_i + \frac{\Delta x}{2}, h_i + \frac{\Delta x}{2} k_{1,h}, Q_i + \frac{\Delta x}{2} k_{1,Q}\right) \quad k_{2,Q} = g\left(h_i + \frac{\Delta x}{2} k_{1,h}\right)$$

$$k_{3,h} = f\left(x_i + \frac{\Delta x}{2}, h_i + \frac{\Delta x}{2} k_{2,h}, Q_i + \frac{\Delta x}{2} k_{2,Q}\right) \quad k_{3,Q} = g\left(h_i + \frac{\Delta x}{2} k_{2,h}\right)$$

$$k_{4,h} = f(x_i + \Delta x, h_i + \Delta x * k_{3,h}, Q_i + \Delta x * k_{3,Q}) \quad k_{4,Q} = g(h_i + \Delta x * k_{3,h})$$

Connaissant une hauteur d'eau et le débit conservé à une extrémité de la crête, la résolution des équations différentielles de proche en proche permet de calculer la hauteur d'eau et le débit à l'autre extrémité. Le débit déversé est alors la différence entre le débit amont et le débit conservé aval.

ANNEXE 3 : DO CUSSET - Tables de valeurs utilisées pour établir la loi $Q_{d\acute{e}vers\acute{e}}=f(h_{aval})$

Tableau 16. Valeurs utilisées et résultats de la modélisation 1D pour le DO CUSSET

h_aval_DO (m)	h capteur (42cm) (m)	Q conservé (m3/s)	h_amont_DO	Q_amont_DO (m3/s)	Q déversé (m3/s)	hc [amont;aval] (m)	h>hc dans le DO	penne PC DO (aval)*	penne à l'extrémité DO (amont)*
0,63	0,630	0,1	0,63	0,10	1,7E-03	0,21	oui	faible	forte
0,63	0,630	0,2	0,63	0,20	1,4E-03	0,29	oui	faible	faible
0,63	0,630	0,25	0,63	0,25	1,3E-03	[0,33;0,32]	oui	faible	faible
0,63	0,630	0,3	0,63	0,30	1,3E-03	0,36	oui	faible	faible
0,63	0,630	0,4	0,63	0,40	1,2E-03	0,42	oui	faible	faible
0,63	0,630	0,42	0,63	0,42	1,2E-03	[0,43;0,43]	oui	faible	faible
0,63	0,630	0,5	0,63	0,50	1,2E-03	0,48	oui	faible	faible
0,64	0,640	0,22	0,64	0,22	4,1E-03	[0,31;0,30]	oui	faible	faible
0,64	0,639	0,47	0,64	0,47	3,4E-03	[0,46;0,46]	oui	faible	faible
0,64	0,639	0,48	0,64	0,48	3,4E-03	0,47	oui	faible	faible
0,65	0,649	0,37	0,65	0,38	6,9E-03	[0,41;0,40]	oui	faible	faible
0,67	0,668	0,35	0,66	0,37	1,6E-02	[0,40;0,39]	oui	faible	faible
0,68	0,677	0,44	0,67	0,46	1,9E-02	[0,46;0,44]	oui	faible	faible
0,69	0,689	0,12	0,69	0,16	3,5E-02	[0,33;0,22]	oui	faible	faible
0,69	0,685	0,47	0,68	0,49	2,4E-02	[0,47;0,46]	oui	faible	faible
0,70	0,699	0,11	0,70	0,15	4,4E-02	[0,25;0,22]	oui	faible	forte
0,71	0,708	0,16	0,70	0,21	5,0E-02	[0,30;0,26]	oui	faible	faible
0,72	0,718	0,1	0,71	0,16	6,2E-02	[0,26;0,21]	oui	faible	forte
0,72	0,717	0,2	0,71	0,26	5,6E-02	[0,33;0,29]	oui	faible	faible
0,72	0,715	0,3	0,71	0,35	5,0E-02	[0,39;0,36]	oui	faible	faible
0,72	0,712	0,5	0,70	0,54	4,1E-02	[0,50;0,48]	oui	faible	faible
0,75	0,743	0,19	0,74	0,27	8,5E-02	[0,34;0,28]	oui	faible	faible
0,75	0,746	0,33	0,73	0,40	7,4E-02	[0,42;0,38]	oui	faible	faible
0,75	0,743	0,35	0,73	0,42	7,2E-02	[0,43;0,39]	oui	faible	faible
0,76	0,755	0,22	0,74	0,31	9,2E-02	[0,37;0,30]	oui	faible	faible
0,76	0,752	0,35	0,74	0,43	8,1E-02	[0,44;0,39]	oui	faible	faible
0,77	0,760	0,39	0,74	0,48	8,7E-02	[0,47;0,41]	oui	faible	faible
0,78	0,772	0,27	0,76	0,38	1,1E-01	[0,41;0,34]	oui	faible	faible
0,79	0,786	0,11	0,78	0,25	1,4E-01	[0,32;0,22]	oui	faible	faible
0,79	0,785	0,15	0,77	0,28	1,3E-01	[0,35;0,25]	oui	faible	faible

*calculé dans le DO : la penne est de 0,56% à l'amont et de 0,28% à l'aval (cf. Profil en long, Figure 4) (abréviation : PC : point de contrôle)

h_aval_DO (m)	h capteur (42cm) (m)	Q conservé (m3/s)	h_amont_DO	Q amont_DO (m3/s)	Q déversé (m3/s)	hc [amont;aval] (m)	h>hc dans le DO	pente PC DO (aval)*	pente à l'extrémité DO (amont)*
0,80	0,792	0,13	0,78	0,28	1,5E-01	[0,34;0,23]	oui	faible	faible
0,80	0,795	0,23	0,78	0,36	1,3E-01	[0,40;0,31]	oui	faible	faible
0,81	0,806	0,1	0,79	0,26	1,6E-01	[0,33;0,21]	oui	faible	faible
0,81	0,803	0,2	0,79	0,35	1,5E-01	[0,39;0,29]	oui	faible	faible
0,81	0,802	0,21	0,79	0,36	1,5E-01	[0,40;0,30]	oui	faible	faible
0,81	0,800	0,3	0,78	0,44	1,4E-01	[0,44;0,36]	oui	faible	faible
0,83	0,820	0,25	0,80	0,42	1,7E-01	[0,43;0,32]	oui	faible	faible
0,83	0,819	0,29	0,80	0,45	1,6E-01	[0,45;0,35]	oui	faible	faible
0,84	0,833	0,16	0,81	0,35	1,9E-01	[0,39;0,26]	oui	faible	faible
0,84	0,832	0,17	0,81	0,36	1,9E-01	[0,40;0,27]	oui	faible	faible
0,85	0,843	0,13	0,83	0,34	2,1E-01	[0,38;0,23]	oui	faible	faible
0,87	0,862	0,15	0,84	0,38	2,3E-01	[0,41;0,25]	oui	faible	faible
0,87	0,860	0,19	0,84	0,42	2,3E-01	[0,43;0,28]	oui	faible	faible
0,88	0,870	0,18	0,85	0,42	2,4E-01	[0,43;0,27]	oui	faible	faible
0,88	0,866	0,27	0,84	0,50	2,3E-01	[0,48;0,34]	oui	faible	faible
0,89	0,881	0,15	0,86	0,41	2,6E-01	[0,43;0,25]	oui	faible	faible
0,9	0,893	0,1	0,87	0,39	2,9E-01	[0,41;0,21]	oui	faible	faible
0,9	0,888	0,2	0,86	0,47	2,7E-01	[0,46;0,29]	oui	faible	faible
0,91	0,901	0,13	0,87	0,42	2,9E-01	[0,44;0,23]	oui	faible	faible
0,92	0,906	0,23	0,87	0,52	2,9E-01	[0,49;0,31]	oui	faible	faible
0,93	0,920	0,12	0,89	0,45	3,3E-01	[0,45;0,22]	oui	faible	faible
0,93	0,917	0,2	0,88	0,51	3,1E-01	[0,48;0,29]	oui	faible	faible
0,94	0,929	0,14	0,90	0,48	3,4E-01	[0,47;0,24]	oui	faible	faible
0,95	0,939	0,13	0,91	0,49	3,6E-01	[0,47;0,23]	oui	faible	faible
0,95	0,936	0,19	0,90	0,53	3,4E-01	[0,50;0,28]	oui	faible	faible
0,96	0,948	0,15	0,91	0,52	3,7E-01	[0,49;0,25]	oui	faible	faible
0,98	0,968	0,1	0,93	0,51	4,1E-01	[0,48;0,21]	oui	faible	faible
0,98	0,969	0,12	0,93	0,53	4,1E-01	[0,49;0,22]	oui	faible	faible
0,99	0,978	0,12	0,94	0,54	4,2E-01	[0,50;0,22]	oui	faible	faible
1	0,989	0,1	0,95	0,54	4,4E-01	[0,50;0,21]	oui	faible	faible

*calculé dans le DO : la pente est de 0,56% à l'amont et de 0,28% à l'aval (cf. Profil en long, Figure 4) (abréviation : PC : point de contrôle)

ANNEXE 4 : DO RESISTANCE - Modélisation par lois empiriques- Modèle de Trop-plein

Equations empiriques utilisées

Les équations des lois empiriques utilisées pour la modélisation du DO Résistance sont détaillées dans cette annexe.

La loi d'entonnement, résultant de modélisations 3D, s'écrit (guide COACHS, 2014):

$$Q_{\text{déversé dénoyé}}(m^3/s) = 0,7157 * (9,81 * DN^5)^{0,5} * 0,5 \frac{hpr}{DN} * \left(\frac{hpr}{DN}\right)^{2,1747}$$

Avec DN : diamètre de l'orifice (m) et hpr : hauteur d'eau dans le regard dont le seuil de l'orifice est le plan de référence (m). Il est supposé que le débit est équitablement partagé entre les 2 canalisations de décharge DN800. Le débit total est ainsi le double de celui calculé pour une canalisation.

La loi de seuil empirique utilisée est celle d'un seuil rectangulaire dénoyé à crête mince avec contraction latérale de Kindsvater (1957). Cette loi est reconnue par l'AFNOR et s'écrit :

$$Q_{\text{dév}}(m^3/s) = \mu * Cv * Le * he^{3/2} * \sqrt{2 * g}$$

Avec

Le= L + Ki avec L : longueur de la crête et Ki=3,8 par lecture d'abaques

Cv=1 car l'eau monte sans vitesse horizontale

he (m)=h1 (m)+0,001

$\mu=2/3 * (\varphi + \psi * h1/p)$ avec $\varphi=0,594$, $\psi=0,025$ par lecture d'abaque et p : hauteur de la crête

La loi de seuil noyé s'écrit : $Q_{\text{noyé}}(m^3/s) = K * Q_{\text{dénoyé}}$

Avec K (Brater, 1976) tel que : $K = \left[1 - \left(\frac{h2}{h1}\right)^{1,5}\right]^{0,385}$

ANNEXE 5 : Surverse BEL AIR - Modélisation en 3D

1. Détails de l'étude de pompage

Le déversoir Bel Air est situé à l'extrémité aval de la ceinture de distribution gravitaire du poste de pompage. Les pompes fonctionnent en alternance par groupe de 2 : une petite de 1800m³/h et une grande de 3600m³/h. Il y a 4 couples de pompes au total dans le poste de relevage.

Il y a peu de données sur la ceinture de distribution (Aval) et les canalisations conservées aval du déversoir. Pour le calcul des débits déversés possibles, quelques hypothèses ont été formulées :

- la pente des canalisations DN1000 et DN1300 est fixée à 0,1%
- la rugosité est fixée à 70

Le débit pleine-section conservé est alors de 7500m³/h en sortie du poste de pompage (avant le bassin d'orage de protection de la STEU). Les calculs sont détaillés dans le Tableau 21 de l'Annexe 6.

La hauteur du seuil est supérieure au diamètre des canalisations aval, le déversement commence lorsque le débit pleine-section conservé est atteint. Les débits déversés sont calculés pour différentes combinaisons de pompes. Les résultats sont détaillés dans le Tableau 22 de l'Annexe 6 et sont récapitulés dans le Tableau 17 ci-dessous.

Tableau 17. Débits déversés possibles par analyse hydraulique

Pompes	Jusqu'à équivalent 2GP	2 GP +1 PP	2 GP+2 PP	T=10ans (Egis 2012)	T=10ans (PCSWMM) = 3GP+ 3PP
Débit déversé (m ³ /s)	Pas de déversement	0,42	0,92	0,85	2,42

*PP : Petite Pompe de 1800m³/h et GP : Grande Pompe de 3600m³/h

Ainsi il faut au minimum l'équivalent de 2 grandes pompes et une petite pompe pour que la surverse de Bel Air fonctionne. Les données du rapport (Egis 2012) et du modèle PCSWMM correspondent à des valeurs réelles de combinaison de pompage. Ces valeurs sont utiles pour le choix des conditions limites de modélisation.

2. Validation de l'indépendance du point de mesure choisi par rapport aux déversements du DO CUSSET

L'aval déversé est composé d'une première chambre de surverse de 29m de long qui regroupe les eaux pluviales des déversoirs d'orage de Bel Air et Cusset. Cette eau est ensuite évacuée par la galerie EP qui est située à 1m du seuil de Bel Air. Il n'y a pas d'influence aval possible par la galerie E.P. Le débit de déversement de Cusset est faible par rapport au débit déversé par Bel Air (cf. Tableau 18 ci-dessous) mais la question de l'influence peut se poser pour une période de retour mensuelle.

Tableau 18. Comparaison des débits déversés de Cusset et de Bel Air

D.O	Qdéversé T= 1 mois (m ³ /s)	Qdéversé T= 10 ans (m ³ /s)
D.O Cusset	0,1	0,2
D.O Bel Air	0,4	2,4
% Cusset/BelAir	25%	8%

A noter que pour la période de retour mensuelle, le débit maximal est de $0,1\text{m}^3/\text{s}$ mais il correspond à un déversement de volume de 100m^3 . Ce débit maximal est certainement surestimé par le logiciel PCSWMM qui gère difficilement les discontinuités de débits au niveau des déversoirs, ou si ce débit maximal existe, il dure seulement quelques minutes. Il convient de vérifier tout de même que le déversement du DO Cusset n'influence pas le point de mesure de Bel air.

1/ Méthode avec passage par la hauteur critique :

La modélisation 3D de l'ouvrage fait apparaître une diminution de hauteur d'eau à la sortie du seuil de Bel Air (cf. Figure 60). Le calcul de la hauteur critique par le logiciel HSL (cf. Tableau 19) confirme le passage par un écoulement torrentiel avant la galerie E.P. La variation de la hauteur d'eau en A au cours du temps est élevée à cause du déplacement du ressaut entre la sortie du seuil et la galerie E.P.

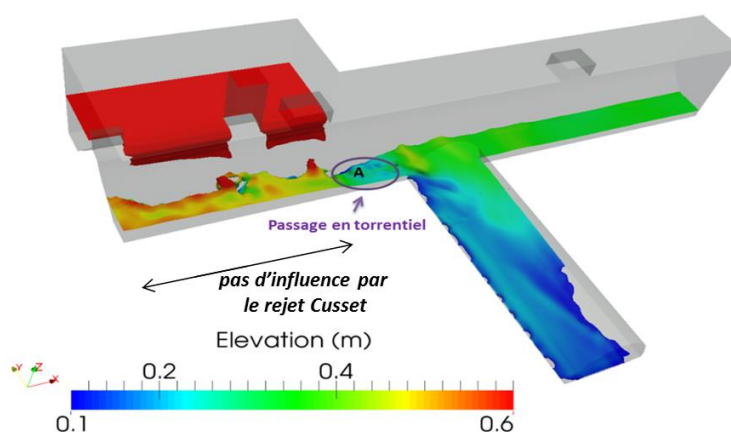


Figure 60. Visualisation des écoulements ($Q=0,4\text{m}^3/\text{s}$) et le passage par un écoulement torrentiel

Tableau 19. Comparaison avec la hauteur critique dans la chambre de surverse

Hauteur d'eau (m) à la sortie du seuil de Bel Air (en A Figure 17) – moyenne sur 20s	Hauteur critique (m) calculé avec le logiciel HSL*
0,28 (écart type 0,08)	0,30

*La chambre de surverse est assimilée à une canalisation en section U pour le calcul de la hauteur critique.

2/ Méthode par modélisation 3D :

La géométrie 3D de la surverse de Bel Air a été modifiée pour ajouter la canalisation de décharge du DO Cusset (cf. Figure 61).

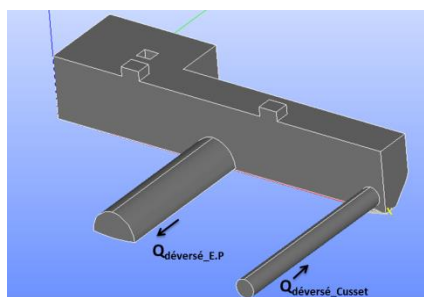


Figure 61. Géométrie de l'ouvrage avec la canalisation de décharge du DO Cusset

Les conditions de modélisation correspondent à la pluie de retour mensuelle où la proportion du débit de Cusset est significative par rapport au débit de la surverse de Bel Air (en supposant que les débits de pointe arrivent à peu près en même temps car les 2 DO sont proches). Les résultats de

comparaison de hauteurs d'eau à l'emplacement du capteur sont récapitulés dans le Tableau 20 suivant.

Tableau 20. Comparaison avec la hauteur d'eau mesurée à l'emplacement du capteur

Hauteur d'eau (m) au niveau du capteur cas SANS Cusset*	Hauteur d'eau (m) au niveau du capteur cas AVEC Cusset*
0,48 (écart type 0,02)	0,49 (écart type 0,02)

*moyenne sur 20 secondes

Ainsi le débit venant du déversement du Cusset n'impacte pas la mesure de hauteur d'eau à l'emplacement déterminé pour le capteur de Bel Air. La Figure 62 suivante permet de visualiser les vitesses d'écoulement présentes dans la chambre de surverse. Les vitesses venant de Bel Air sont largement supérieures lors de l'engouffrement dans le coude et confirme l'indépendance des écoulements des DOs Bel Air et Cusset.

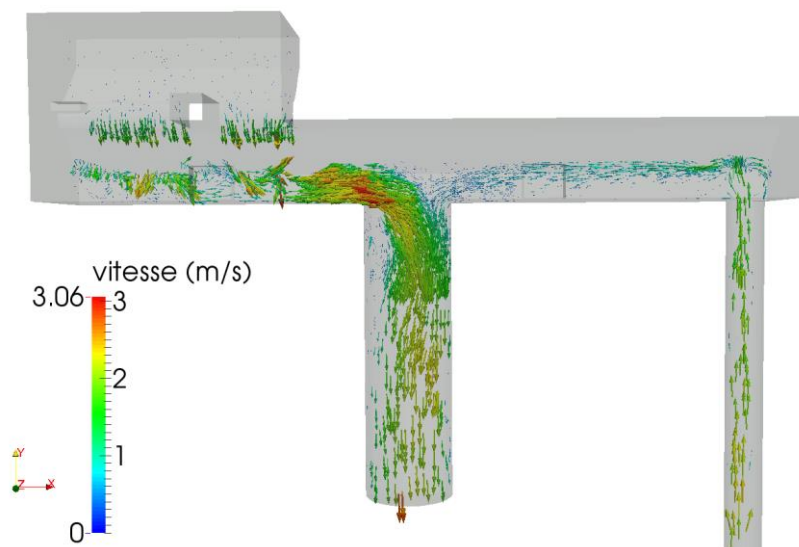


Figure 62. Evolution de la vitesse dans la surverse du DO Bel Air ($Q_{\text{Bel Air}} = 0,4\text{m}^3/\text{s}$; $Q_{\text{Cusset}} = 0,1\text{m}^3/\text{s}$)

Conclusion : Les déversements du DO Cusset et de la surverse de Bel Air sont indépendants. La loi d'étalonnage établie pour le capteur à l'emplacement défini derrière le seuil correspond bien à la mesure du débit de déversement de Bel Air.

ANNEXE 6 : Surverse BEL AIR – Tables de résultats de simulations

1. Analyse du pompage de la station Bel Air

Tableau 21. Calculs du débit pleine-section des canalisations à l'aval

	canalisation 1	canalisation 2
DN (m)	1	1,3
Ks	70	70
pente (%)	0,1	0,1
surface (m3)	0,79	1,33
Rh (m)	0,25	0,33
Qps(m3/s)	0,69	1,39
Qps(m3/h)	2484	5000
Qps total (m3/h)	7484	

Tableau 22. Calculs du débit déversé avec plusieurs configurations de pompage

cas possibles	débit pompé (m3/h)	débit déversé (m3/h)	débit déversé (m3/s)	commentaires
cas 1: 1 petite pompe	1800	pas de déversement		
cas 2: 1 grande pompe (= 2 petites pompes)	3600	pas de déversement		confirmé lors de la visite
cas 3: 1 petite pompe + 1 grande pompe	5400	pas de déversement		
cas 4: 2 grandes pompes (= 2 petites + 1 grande)	7200	pas de déversement		
cas 5: 2 grandes pompes +1 petite	9000	1516	0,42	
cas 6: 2 grandes pompes +2 petites(= 3 grandes pompes)	10800	3316	0,92	cas proche de T=10ans dans rapport Egis
cas 7: pluie décennale, données (Egis 2012)		3064	0,85	données initiales: 7661m3 en 2h30
cas 8: avec données T=10ans modèle PCSWMM		8712	2,42	soit 16196m3/h pompé soit 3petites et 3 gdes pompes

2. Liste des simulations

Tableau 23. Liste des simulations

nom simulation	Débit théorique (m ³ /s)
01_sim04	0,4
02_sim09	0,9
03_sim14	1,4
04_sim19	1,9
05_sim25	2,5
06_sim01	0,1
07_sim07	0,7
08_sim12	1,2

3. Résultats des simulations

Tableau 24. Résultats des 8 simulations

nom simulation	Q déversé (m ³ /s)	h mesurée à emplacement capteur* (m)	écart type* (m)	$\Delta z/2$ (m)**
01_sim04	0,4	0,48	0,02	0,05
02_sim09	0,9	0,78	0,01	0,04
03_sim14	1,4	0,95	0,02	0,03
04_sim19	1,9	1,13	0,01	0,03
05_sim25	2,5	1,32	0,01	0,03
06_sim01	0,1	0,20	0,00	0,01
07_sim07	0,7	0,68	0,02	0,04
08_sim12	1,2	0,86	0,02	0,05

* valeurs moyennes sur 20 secondes de simulation

** écart entre la hauteur minimale et maximale pendant les 20 secondes de simulation, divisé par 2

ANNEXE 7 : DO F.GLENARD – Tables de résultats de simulations

1. Détails des simulations 3D réalisées

Tableau 25. Liste des simulations 3D

NomSim	Qentree (m3/s)	h aval imposée (m)
01_Q01p0	0,1	/
02_Q03p0	0,3	/
03_Q05p0	0,5	/
04_Q09p0	0,9	/
05_Q12p0	1,2	/
06_Q01p04	0,1	0,4
07_Q03p04	0,3	0,4
08_Q05p04	0,5	0,4
09_Q09p04	0,9	0,4
10_Q12p04	1,2	0,4
11_Q01p05	0,1	0,5
12_Q03p05	0,3	0,5
13_Q05p05	0,5	0,5
14_Q09p05	0,9	0,5
15_Q12p05	1,2	0,5
16_Q01p08	0,1	0,8
17_Q03p08	0,3	0,8
18_Q05p08	0,5	0,8
19_Q09p08	0,9	0,8
20_Q12p08	1,2	0,8

2. Résultats des modélisations

Tableau 26. Résultats des modélisations 3D

Nom Simulation	Qthéorique (m3/s)	Qaval seuil 3D (m3/s)	h1 amont lame deversante (m)	h2 aval lame deversante (m)	bilan de masse 3D (%)	seuil (noyé/dénoyé)
01_Q01p0	0,1	0,10	0,124	0,157	1,1	dénoyé
02_Q03p0	0,3	0,30	0,266	0,005	1,5	dénoyé
03_Q05p0	0,5	0,49	0,386	0,109	-0,4	dénoyé
04_Q09p0	0,9	0,50	0,383	0,106	-1,2	noyé
05_Q12p0	1,2	0,91	0,594	0,009	0,2	noyé
06_Q01p04	0,1	1,20	0,724	0,195	2,7	noyé
07_Q03p04	0,3	0,10	0,132	0,004	3,8	noyé
08_Q05p04	0,5	0,30	0,267	0,031	-0,4	dénoyé
09_Q09p04	0,9	0,90	0,594	0,005	-1,4	noyé
10_Q12p04	1,2	1,20	0,724	0,207	-3,6	noyé
11_Q01p05	0,1	0,10	0,150	0,104	-2,3	noyé
12_Q03p05	0,3	0,30	0,275	0,110	-1,1	noyé
13_Q05p05	0,5	0,50	0,387	0,134	1,5	noyé
14_Q09p05	0,9	0,91	0,594	0,011	0,3	noyé
15_Q12p05	1,2	1,21	0,724	0,214	2,1	noyé
16_Q01p08	0,1	0,10	0,400	0,402	1,1	noyé
17_Q03p08	0,3	0,30	0,438	0,397	-1,3	noyé
18_Q05p08	0,5	0,49	0,504	0,432	0,4	noyé
19_Q09p08	0,9	0,91	0,624	0,420	-0,6	noyé
20_Q12p08	1,2	1,20	0,724	0,415	1,6	noyé

Les valeurs amont et aval sont extraites respectivement à 2m en amont et à 3,8m à l'aval du seuil.

3. Comparaison entre une loi empirique de seuil et la modélisation 3D

Tableau 27. Comparaison loi empirique et résultats de modélisation : cas de seuil dénoyé

	PAS D'INFLUENCE AVAL														
	01_sim1Q01p0	06_simQ01p04	02_simQ03p0	07_Q03p04	03_Q05p0	08_Q05p04	13_Q05p05	04_Q09p0	09_Q09p04	14_Q09p05	05_Q12p0	10_Q12p04	15_Q12p05	20_Q12p08	12_Q03p05
hamont (m)	0,66	0,67	0,80	0,80	0,92	0,92	0,93	1,13	1,13	1,13	1,26	1,26	1,26	1,26	0,81
h crête (m)	0,51	0,51	0,51	0,51	0,51	0,51	0,51	0,51	0,51	0,51	0,51	0,51	0,51	0,51	0,51
h1 (m)	0,15	0,16	0,29	0,29	0,41	0,41	0,42	0,62	0,62	0,62	0,75	0,75	0,75	0,75	0,30
h1/hcrête	0,29	0,31	0,57	0,57	0,81	0,81	0,82	1,22	1,22	1,22	1,47	1,47	1,47	1,47	0,59
μ	0,42	0,42	0,43	0,43	0,44	0,44	0,44	0,46	0,46	0,46	0,47	0,47	0,47	0,47	0,43
Cv	1														
Largeur seuil (m)	0,96														
Q déversé (m3/s)	0,10	0,11	0,29	0,29	0,50	0,50	0,51	0,96	0,96	0,96	1,31	1,31	1,31	1,31	0,30
Q théorique (m3/s)	0,1	0,1	0,3	0,3	0,5	0,5	0,5	0,9	0,9	0,9	1,2	1,2	1,2	1,2	0,3
%écart	3,8	12,4	-3,3	-2,8	-0,3	-0,7	1,2	6,8	6,8	6,8	9,5	9,5	9,5	9,5	0,83

Tableau 28. Comparaison loi empirique et résultats de modélisation : cas de seuil noyé

	INFLUENCE AVAL: SEUIL NOYÉ				
	11_Q01p05	16_Q01p08	17_Q03p08	18_Q05p08	19_Q09p08
hamont (m)	0,686	0,937	0,974	1,04	1,16
h crête (m)	0,51	0,51	0,51	0,51	0,51
h1 (m)	0,18	0,43	0,46	0,53	0,65
h1/hcrête	0,35	0,84	0,91	1,04	1,27
μ	0,42	0,44	0,45	0,45	0,47
h2 théorique	0,50	0,80	0,80	0,80	0,80
K(carlier)	0,81	0,73	0,78	0,85	0,93
Qdéversé (Carlier) (m3/s)	0,11	0,38	0,47	0,63	0,97
Q théorique (m3/s)	0,1	0,1	0,3	0,5	0,9
%écart (Carlier)	6,8	282,1	55,5	25,9	7,5

MEMOIRE DE FIN D'ETUDES

Diplôme(s): Mastère spécialisé

Spécialité : Eau potable et Assainissement

Auteur :
FRELAT Marion

Année
2014/2015

Titre
MISE EN PLACE DE L'AUTO-SURVEILLANCE DU RESEAU D'ASSAINISSEMENT DE LA COMMUNAUTE D'AGGLOMERATION VICHY-VAL D'ALLIER EN PARTICULIER AU NIVEAU DES DEVERSOIRS D'ORAGE

Nombre de pages texte : 55 annexes : 14

Nombre de références bibliographiques : 19

Structure d'accueil : 3D EAU/ France (75)

Maître de stage : Jonathan Wertel

Résumé

L'évaluation des débits déversés vers le milieu naturel est un besoin exprimé par de nombreux acteurs de l'eau mais aussi une obligation requise par l'Arrêté du 21 juillet 2015 sur l'autosurveillance des ouvrages. Dans ce contexte, la Communauté d'Agglomération de Vichy Val d'Allier a engagé l'autosurveillance de 9 déversoirs d'orage. Ce rapport présente l'élaboration des dispositifs d'instrumentation de ces ouvrages au cas par cas. Diverses méthodes de modélisation, allant de formules semi-empiriques (loi de seuil, guide COACHS...) à la modélisation 3D des écoulements au sein de l'ouvrage (CFD), sont utilisées pour évaluer le débit déversé à partir de mesures de hauteur d'eau uniquement. L'emplacement des capteurs, une loi d'étalonnage (h/Q) et l'incertitude associée sont ainsi établis pour chaque ouvrage.

Mots-clés

Autosurveillance, Installation capteurs, Courbe de remous, Modélisation CFD, Déversoirs d'orage, Incertitude