



HAL
open science

Application de la mécanique des fluides numérique (CFD) à une étude d'instrumentation et à un programme de R&D sur la formation des vortex dans les chambres de pompage

Imane Zidaoui

► To cite this version:

Imane Zidaoui. Application de la mécanique des fluides numérique (CFD) à une étude d'instrumentation et à un programme de R&D sur la formation des vortex dans les chambres de pompage. Sciences de l'ingénieur [physics]. 2020. dumas-03578717


HAL Id: dumas-03578717

<https://dumas.ccsd.cnrs.fr/dumas-03578717v1>

Submitted on 17 Feb 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.



Application de la mécanique des fluides numérique (CFD) à une étude d'instrumentation et à un programme de R&D sur la formation des vortex dans les chambres de pompage

Autosurveillance des déversoirs d'orage de la Communauté d'Agglomération de Longwy

Mémoire de fin d'études
présenté pour l'obtention
du diplôme d'Ingénieur de
l'ENGEES

16 JUIN 2020

Imane ZIDAOUI

Promotion Bretagne



3D EAU



ENGEES

ÉCOLE NATIONALE DU GÉNIE DE L'EAU
ET DE L'ENVIRONNEMENT DE STRASBOURG

Photo de couverture : Orifice de trop-plein en amont d'une station de pompage (point VIL-DO10 selon la nomenclature de la Communauté d'Agglomération de Longwy)

Organisme d'accueil :

3D EAU – Strasbourg

21 rue Jacobi-Netter 67200 STRASBOURG, FRANCE

Tuteur de stage : Matthieu DUFRESNE

Remerciements

*Je tiens tout d'abord à adresser mes premiers remerciements à **M. Jonathan Wertel** et **M. Matthieu Dufresne**, co-fondateurs de 3D, pour la confiance qu'ils m'ont accordé mais aussi pour m'avoir permis de réaliser mon stage de fin d'étude au sein de 3D EAU - Strasbourg.*

*Je remercie tout particulièrement **M. Matthieu Dufresne**, qui fût le chef de projet de la communauté d'agglomération de Longwy, pour son encadrement de qualité tout au long de la période de mon stage, avec pédagogie et bienveillance.*

*Mes remerciements vont également à **Gabriel Guibu Pereira**, ingénieur de projet et de recherches, pour avoir pris le temps de m'accompagner lors mes premières simulations en 3D et de m'avoir initié à la problématique des vortex.*

*Un grand merci à **Sandra Isel**, chef de projet à 3D EAU, qui n'hésitait pas à me partager une partie de ses compétences et ses retours d'expérience.*

*Merci à **Angel Manjarres**, doctorant à 3D EAU, pour son humour et son soutien au quotidien.*

*Je remercie l'ensemble de **l'équipe de 3D EAU** pour son soutien et son aide, mais surtout pour m'avoir intégré rapidement au sein de l'entreprise malgré le contexte particulier du télétravail à la suite de la crise sanitaire du COVID-19.*

*Merci à **José Vazquez** et **Gilles Isenmann**, maîtres de conférences à l'ENGEES, pour leur pédagogie et pour la qualité de leurs enseignements au cours de ces trois ans d'études à l'ENGEES.*

*Finalement, je remercie chaleureusement **mes parents**, qui m'ont soutenu tout au long de ces années d'études. Sans leur accompagnement et leur affection, je n'aurais pas pu réaliser tout ce parcours !*

Résumé

Application de la mécanique des fluides numérique (CFD) à une étude d'instrumentation et à un programme de R&D sur la formation des vortex dans les chambres de pompage : Autosurveillance des déversoirs d'orage de la Communauté d'Agglomération de Longwy

L'objet de ce travail de fin d'étude est double, avec une partie ingénierie qui concerne l'autosurveillance des déversoirs d'orage de la communauté d'agglomération de Longwy (CAL) et une partie recherche qui s'intéresse à la quantification des vortex dans les stations de pompage. Dans un premier temps, la CAL souhaite instrumenter 42 déversoirs d'orage pour répondre aux obligations de l'Arrêté du 21 juillet 2015. Chaque ouvrage est pré-diagnostiqué en analysant ses données géométriques et métrologiques (s'il est déjà instrumenté) afin de comprendre son fonctionnement hydraulique. Ensuite, une méthode de modélisation est choisie en fonction des contraintes hydrauliques de l'ouvrage et son enjeu. Ces différentes méthodes reposent sur la mesure d'une (ou plusieurs) hauteur(s) d'eau et l'établissement d'une loi univoque qui permet de la relier au débit déversé. Le choix se fait entre une approche 0D ou 1D pour des déversoirs « simples » ou à faible enjeu et une modélisation 3D pour les ouvrages complexes et à fort enjeu. Dans un deuxième temps, l'étude R&D sur les vortex dans les stations de pompage a pour objectif de fiabiliser la modélisation CFD des stations de pompage dans le but de diagnostiquer un risque de vortex ou autre phénomène lié (pré-rotation, entraînement d'air...). Des règles de bonnes pratiques pour la modélisation CFD sont fournies (maillage, modèle de turbulence, schéma numérique). Des ordres de grandeur sont également fournis sur la valeur du Q critérium à considérer pour un diagnostic de vortex.

Mots-clés : Autosurveillance, Déversoir d'orage, Loi de déversement, Mécanique des fluides, Vortex, Q critérium

Abstract

Application of Computational Fluid Dynamics (CFD) to an instrumentation study and to an R&D program on the formation of vortices in pumping chambers: Monitoring of storm overflows of the Longwy Agglomeration Community

The purpose of this end-of-studies work is twofold, with an engineering part that concerns the monitoring of storm overflows in the Longwy Agglomeration Community and a research part that focuses on the quantification of vortices in pumping stations. First of all, the CAL wishes to instrument 42 storm overflows to meet the obligations of the decree of 21 July 2015. Thus, each structure is pre-diagnosed by analysing its geometric and metrological data (if it is already instrumented) in order to understand its hydraulic operation. Then, a modelling method is chosen according to the hydraulic constraints of the structure. These different methods are based on the measurement of one (or several) water level(s) and the establishment of a univocal law that relates to the discharged flow. The choice is made between a 0D or 1D approach for "simple" stormwater weirs and a 3D modelling for complex structures. Furthermore, the R&D study on vortices in pumping stations aims to make the CFD modelling of pumping stations more reliable in order to diagnose the risk of vortex or other related phenomena (pre-rotation, air entrainment...). Rules of good practice for CFD modelling are provided (mesh, turbulence model, numerical scheme). Orders of magnitude of the Q criterion are also provided, to be considered for a vortex diagnosis.

Keywords: Self-monitoring, Storm overflow, Discharge law, Fluid mechanics, Vortex, Q criterion

Table des matières

Introduction générale.....	11
1. Contexte et objectifs de l'étude	13
1.1. Cadre réglementaire.....	13
1.1.1. Textes de loi.....	13
1.1.2. Principe d'autosurveillance	13
1.2. Communauté d'Agglomération de Longwy.....	14
1.3. Présentation de 3D EAU	15
1.4. Cahier des charges.....	15
1.5. Planning et prestations.....	16
2. Méthodologie.....	18
2.1. Visite des sites	18
2.2. Analyse hydraulique préalable	18
2.2.1. Les différents principes d'instrumentation	18
2.2.2. Calcul d'enjeu	18
2.2.3. Analyse d'un déversoir d'orage.....	19
2.2.4. Choix de la méthode de modélisation	20
2.3. Modélisation hydraulique et définition des lois hauteur(s)-débit	21
2.3.1. Méthode empirique « OD »	21
2.3.2. Etude des déversoirs latéraux : Modélisation 1D	21
2.3.3. Aménagement de la crête : fenêtre de déversement privilégié.....	22
2.3.3. Etude des trop-pleins : Combinaison d'une approche OD et 1D.....	23
2.3.4. Modélisation 3D	23
2.4. Elaboration de l'autosurveillance	25
2.4.1. Emplacement du capteur	25
2.4.2. Etablissement de la loi hauteur-débit.....	26
2.4.3. Evaluation des incertitudes	26
2.4.4. Type de capteur.....	27
3. Mise en œuvre de la méthodologie	28
3.1. Point de déversement GOR-DO14 : Etude d'un trop-plein	29
3.1.1. Descriptif de l'ouvrage	29
3.1.2. Pré-diagnostic hydraulique de l'ouvrage	29
3.1.3. Etablissement de la loi hauteur(s)-débit.....	31
3.1.4. Travaux connexes et incertitudes	33
3.2. Point de déversement HUS-DO2 : Reprofilage de la crête de déversement	34
3.2.1. Descriptif de l'ouvrage	34
3.2.2. Pré-diagnostic hydraulique de l'ouvrage	34
3.2.3. Etablissement de la loi hauteur(s)-débit.....	37
3.2.4. Aménagements connexes	39
3.3. Point de déversement REH-DO9 : Modélisation 3D.....	40
3.3.1. Descriptif de l'ouvrage	40
3.3.2. Pré-diagnostic hydraulique de l'ouvrage	41
3.3.3. Etablissement de la loi hauteur(s)-débit.....	41
3.3.4. Instrumentation de l'ouvrage	43

3.3.5. Estimation de l'incertitude	44
4. Analyse du risque de vortex dans les chambres de pompage	45
4.1. Contexte et objectifs	45
4.2. Etat de l'art	45
4.2.1. Norme ANSI/ HI 9.8-1998.....	45
4.2.2. Modèles réduits.....	47
4.2.3. Travaux numériques.....	49
4.2.4. Travaux expérimentaux.....	50
4.3. Matériels et méthodes	51
4.3.1. Dispositif expérimental de Möller.....	51
4.3.2. Construction du modèle.....	52
4.4. Traitement des résultats.....	53
4.5. Analyse des résultats	55
4.5.1. Schéma numérique	55
4.5.2. Modèle de turbulence.....	55
4.5.3. Maillage Vs nombres adimensionnels.....	56
4.6. Synthèse et perspectives	58
Conclusion et perspectives	59
Bibliographie.....	61
Annexe 1 : Cartographie des points SANDRE pour les collectivités	64
Annexe 2 : Synoptique du réseau principal de Longwy	65
Annexe 3 : Validation du dimensionnement d'un seuil en V arrondi via la modélisation 3D.....	66
Annexe 4 : Modes de fonctionnement d'un trop-plein	68
Annexe 5 : Formules et ordre de grandeur des incertitudes	69
Annexe 6 : Fiche technique du point HUS-DO2.....	71
Annexe 7 : Fiche technique du point GOR-DO14	72
Annexe 8 : Fiche technique du point REH-DO9	73
Annexe 9 : Calcul d'enjeu des points de déversement HUS-DO2 / GOR-DO14 / REH-DO9	74
Annexe 10 : Extraction des résultats de la modélisation 3D pour le point REH-DO9	75
Annexe 11 : Choix de la position du capteur de niveau en fonction des résultats de la modélisation 3D	76
Annexe 12 : Le « Swirl Angle »	78
Annexe 13 : Recommandations de la norme ANSI/HI 9,8-1998 pour la conception des chambres de pompage.....	79
Annexe 14 : Avantages et inconvénients de la méthodologie actuelle pour la simulation des vortex	81
Annexe 15 : Synthèse des études réalisées par 3D EAU sur la thématique des vortex	81
Annexe 16 : Descriptif du protocole expérimental de Möller.....	82
Annexe 17 : Résultats de la modélisation CFD des vortex	83

Liste des figures

Figure 1: Communauté d'agglomération de Longwy et ses 21 communes - Source : (Site officiel de la CAL).....	15
Figure 2: Méthodologie proposé par le groupement LOREAT / 3D EAU	17
Figure 3: Aperçu global sur le calcul d'enjeu d'un DO – Source : AERM	19
Figure 4: Méthodologie d'analyse hydraulique pour la mesure de lame déversante – Source : (VAZQUEZ, et al., 2016).....	20
Figure 5: Analyse multicritère (enjeu, complexité et investissement) – Source : AERM	21
Figure 6: Types d'aménagements pour éviter les faibles lames déversantes pour les petits débits – Source : (CETMEF, 2005)	22
Figure 7: Schéma de principe du seuil en V arrondi	22
Figure 8: Positionnement recommandé par CETFEM pour la mesure de la hauteur d'eau dans le cadre d'une loi hauteur-débit	25
Figure 9: Géométrie du point GOR-DO14 (Vue de dessus).....	29
Figure 10: Simulations réalisées en fonction du couple hauteur amont / hauteur aval	31
Figure 11: Cas 1 : Fonctionnement dénoyé	31
Figure 12: Cas 2 : Fonctionnement noyé	32
Figure 13: Cas 1bis : Fonctionnement partiellement en charge.....	32
Figure 14: Cas 3 : Fonctionnement totalement en charge	32
Figure 15: Logigramme d'analyse des hauteurs mesurées en vue la définition de la loi hauteur-débit correspondante.....	33
Figure 16: Incertitude globale sur le débit en fonction du débit déversé	33
Figure 17: Géométrie du point de déversement HUS-DO2	34
Figure 18: Données mesurées sur l'année 2018.....	35
Figure 19: Pourcentage de volume apporté par la plage de hauteurs mesurées	36
Figure 20: Incertitude de mesure en fonction de la hauteur de lame déversante sous l'hypothèse d'une loi de seuil frontal – Source : (VAZQUEZ, et al., 2016).....	36
Figure 21: Comparaison approximative des lois hydraulique avant et après l'aménagement	38
Figure 22: Comparaison des lois hydrauliques au niveau de l'engouffrement	38
Figure 23: Géométrie et dimensions du seuil en V préconisé	39
Figure 24: Exemple de fixation d'une lame inox sur une crête – Source : Saint Etienne Métropole.....	40
Figure 25: Géométrie du point REH-DO9 (Vue de dessus et de face)	40
Figure 26: Géométrie en 3D du point REH-DO9	42
Figure 27: Maillage et raffinement autour de la crête déversante	42
Figure 28: Loi hauteur débit du point REH-DO9	43
Figure 29: Position du capteur de niveau pour le point REH-DO9.....	44
Figure 30: Incertitude globale sur le débit pour le point REH-DO9 en fonction de la lame déversante.	44
Figure 31: Vortex dans une centrale hydraulique – Source : (UNI - KL, 2012)	45
Figure 32: Classification des vortex selon la norme ANSI/HI	46
Figure 33: Définition de la hauteur de submersion et du diamètre en fonction de la disposition de la pompe d'aspiration	48
Figure 34: Dispositif expérimental utilisé par Möller lors de l'analyse des vortex.....	51
Figure 35: Grille des expériences menées par Möller	52
Figure 36: Géométrie modélisée en 3D et zone de raffinement du maillage	52
Figure 37: Visualisation d'un Q critérium = 2 pour les simulations 2 et 4 respectivement.....	56
Figure 38: Evolution du Q critérium en fonction du nombre de Froude pour un maillage de 0,75 cm et une submersion relative de 2,25.....	57
Figure 39: Ajustement de la loi	66
Figure 40: Seuil circulaire modélisé de rayon 250 mm	67
Figure 41: Maillage du seuil en V arrondi	67
Figure 42: Unicité de la hauteur pour un débit donné pour le point REH-DO9	76
Figure 43: Visualisation de la surface libre pour la simulation 4 - REH-DO9	77
Figure 44: Schéma du Swirl Meter	78
Figure 45: Schématisation des différents paramètres.....	79
Figure 46: Dispositif expérimental complet de Möller	82

Liste des tableaux

Tableau 1: Exigences d'autosurveillance pour des points de rejets de type A1	14
Tableau 2: Exigences d'autosurveillance pour des points de rejets de type A2	14
Tableau 3: Les différentes méthodes d'instrumentation d'un déversoir d'orage	18
Tableau 4: Récapitulatif des principales conditions aux limites utilisées en modélisation 3D	25
Tableau 5: Comparaison des capteurs de niveau non-intrusifs	27
Tableau 6: Liste des ouvrages et des études réalisées dans le cadre du projet de la CAL	28
Tableau 7: Synthèse de l'analyse hydraulique pour le point GOR-DO14	30
Tableau 8: Synthèse de l'analyse hydraulique pour le point HUS-DO2	37
Tableau 9: Synthèse des lois hydrauliques du point HUS-DO2	39
Tableau 10: Synthèse de l'analyse hydraulique pour le point REH-DO9	41
Tableau 11: Liste des simulations effectuées en 3D	43
Tableau 12: Synthèse des simulations 3D pour la modélisation des vortex de surface	53
Tableau 13: Analyse des iso surfaces du Q critérium (simulation n°7 à t = 200s)	54
Tableau 14: Analyse de la variabilité du Q critérium dans le temps (simulation n°7)	55
Tableau 15: Synthèse des résultats de la modélisation CFD des vortex	56
Tableau 16: Tailles des mailles minimales en cm au niveau de l'aspiration en fonction du nombre de Froude et de la submersion relative	58
Tableau 17: Tableau des résultats de la modélisation 3D pour un seuil circulaire	67
Tableau 18: Résultats de la modélisation 3D pour un seuil en V arrondi	67
Tableau 19: Ordre de grandeur des incertitudes liées à la mesure de la hauteur via un modèle 3D	69
Tableau 20: Visualisation de la surface libre pour le point REH-DO9 colorisée en fonction de la lame déversante	75
Tableau 21: Variabilité temporelle de la mesure pour le point REH-DO9	76
Tableau 22: Nouvelle zone de mesure préconisée pour le point REH-DO9	77
Tableau 23: Recommandations de la norme ANSI/HI	80
Tableau 24: Avantages et inconvénients de la méthodologie actuelle pour l'étude des vortex	81
Tableau 25: Tableau synthétique des études réalisées par 3D EAU sur la thématique des vortex	81

Liste des équations

Équation 1: Débit déversé pour un déversoir latéral	22
Équation 2: Equation de continuité	23
Équation 3: Equation de la conservation de la quantité de mouvement	23
Équation 4: Loi de propagation des incertitudes	26
Équation 5: Calcul de l'incertitude étendue	27
Équation 6: Niveau de submersion minimal selon la norme ANSI	47
Équation 7: Equation mathématique du Q critérium	49
Équation 8: Le débit déversé selon Vatankhah	66
Équation 9: Calcul du coefficient CGI	69
Équation 10: Incertitude globale d'un modèle 3D	70
Équation 11: Incertitude liée à la régression d'une loi hauteur débit	70
Équation 12: Incertitude temporelle à un intervalle de confiance de 95%	76
Équation 13: Formule du Swirl Angle	78
Équation 14: Calcul du swirl angle expérimentalement	78

Symboles, sigles et abréviations

AERM : Agence de l'Eau Rhin Meuse ; souvent utilisé pour faire référence au guide d'autosurveillance élaboré par cette agence de l'eau

CAL : Communauté d'Agglomération de Longwy

CATEC : Certificat d'aptitude à travailler dans les espaces confinés

C_d : Coefficient du débit

CFD : Computational Fluid Dynamics

CL : hauteur d'eau dans le milieu récepteur

D ou DN : diamètre de la canalisation

DBO₅ : Demande biochimique en oxygène à 5 jours

DERU : Directive sur les eaux résiduaires urbaines

DES : Detached Eddy Simulation

DO : Déversoir d'orage

EH : équivalent-habitant

Fr ou F_D : Nombre de Froude

GCI : Grid Convergence Index

h₁ ou h_{amont} : hauteur d'eau en amont de l'ouvrage

h₂ ou h_{aval} : hauteur d'eau en aval déversé de l'ouvrage

IC : intervalle de confiance

interFoam : Solveur VOF dans OpenFOAM (biphasique/incompressible)

NPSH : Net Positive Suction Head over the vapor pressure

pimpleFoam : Solveur VOF dans OpenFOAM (monophasique/incompressible)

PR : hauteur d'eau dans le poste de pompage

Q : débit déversé (m³/s)

Q dénoyé : Débit déversé en régime dénoyé

Q noyé : Débit déversé en régime noyé (avec influence aval)

RANS : Reynolds Averaged Navier Stokes equations

Re : Nombre de Reynolds

TP : trop-plein

US : ultrason

VOF : Volume of Fluid

We : Nombre de Weber

Introduction générale

Aujourd'hui, la lutte contre la pollution des milieux aquatiques en France passe par la régulation et le contrôle des rejets d'eaux usées, via la notion de **conformité des réseaux d'assainissement** par temps de pluie (**Arrêté du 21 juillet 2015**). En plus d'une obligation de moyens (mesurer les débits déversés), les collectivités sont soumises à une obligation de résultats correspondant à l'un des trois critères suivants (au choix de la collectivité) :

- Les rejets par temps de pluie représentent **moins de 5% des volumes d'eaux usées** produits par l'agglomération durant l'année,
- Les rejets par temps de pluie représentent **moins de 5% des flux de pollution** produits par l'agglomération durant l'année,
- **Moins de 20 jours de déversement** sont constatés durant l'année au niveau de chaque déversoir d'orages soumis à autosurveillance réglementaire.

Dans ce contexte, la **Communauté d'Agglomération de Longwy** (CAL) a souhaité fiabiliser la mesure du débit déversé sur les déversoirs d'orage devant réglementairement être équipés. Elle a donc lancé un marché public afin d'étudier les 159 déversoirs d'orage présents sur ses 7 systèmes d'assainissement puis de définir l'instrumentation des ouvrages devant être équipés (42 sur les 159). Un marché de travaux sera lancé suite à cette étude en 2020 pour la fourniture et la pose des instruments de mesure.

3D EAU, bureau d'étude spécialisé en hydraulique urbaine, a gagné le marché d'étude. La mission de ce dernier est **d'établir pour chaque déversoir une solution de mesure qui soit précise, simple à exploiter et en accord avec la réglementation**.

Par ailleurs, 3D EAU participe régulièrement à des études de conception de stations de pompage dont l'objectif est **d'évaluer le risque de vortex** et autres phénomènes liés (pré-rotation à l'aspiration des pompes, entraînement d'air...) qui peuvent conduire à une détérioration très importante des performances du pompage. Une méthodologie d'étude par CFD a déjà été mise au point en interne par l'entreprise ; celle-ci ne permet cependant **qu'une évaluation qualitative du risque de vortex**, ce qui conduit à des recommandations sécuritaires sur la conception des stations de pompage (et donc des coûts de génie civil plus importants pour l'entreprise de BTP qui commande l'étude). 3D EAU souhaite **améliorer cette méthodologie pour disposer d'éléments quantitatifs plus précis** ; ces derniers permettraient d'éviter de préconiser des designs trop sécuritaires pour éviter les phénomènes de vortex.

Par conséquent, l'objectif de **ce travail de fin d'étude** est double : d'une part, répondre à la demande de la CAL, en définissant les **dispositifs d'autosurveillance** adaptés aux différents déversoirs d'orage, et d'autre part, améliorer la méthodologie d'étude **des vortex via la modélisation CFD**.

Il peut paraître surprenant de présenter dans un même mémoire de fin d'études deux sujets somme toute assez distincts, l'un très orienté ingénierie, l'autre très orienté R&D. Ce choix est cependant cohérent avec les méthodes de travail mises en œuvre au sein de 3D EAU, l'entreprise se donnant comme ambition de se positionner à la frontière entre la R&D et l'ingénierie dans le domaine de

l'hydraulique. Ce choix est en outre cohérent avec mon projet professionnel de poursuite en thèse CIFRE au sein de 3D EAU.

Le **plan du mémoire** est le suivant. Le contexte et les objectifs du projet d'instrumentation de la CAL sont d'abord explicités dans le chapitre 1. Le chapitre 2 décrit les étapes d'élaboration de l'instrumentation d'un déversoir d'orage en fonction des différentes contraintes (état de l'art). Ensuite, le chapitre 3 présente la mise en œuvre de la méthodologie sur 3 déversoirs d'orage de la CAL. Enfin, le chapitre 4 présente la problématique des vortex dans les stations de pompage, les moyens mis en œuvre pour l'étudier et les résultats de ce travail de R&D.

1. Contexte et objectifs de l'étude

1.1. Cadre réglementaire

1.1.1. Textes de loi

Afin de lutter contre la pollution du milieu naturel par les rejets urbains de temps de pluie, l'Union Européenne a établi, le 21 mai 1991, une **directive sur les eaux résiduaires urbaines** (DERU 91/271/CEE) qui impose des niveaux de traitement en fonction de la taille de l'agglomération et de la sensibilité du milieu récepteur. A une échelle nationale, **la loi sur l'eau de 1992** transpose en droit français les objectifs de la DERU et exige leur prise en compte dans l'établissement des différents documents de l'urbanisme.

En 2000, **la directive cadre sur l'eau** (DCE 2000/60/CE) définit un objectif de bonne qualité pour l'ensemble des milieux aquatiques européens à l'horizon de 2015. Sur la base de cette obligation, la réglementation française commence à encadrer la conception des systèmes d'assainissement et oblige les exploitants à rendre compte des performances effectives de leurs ouvrages.

Six ans plus tard, **la loi sur l'eau et les milieux aquatiques** (LEMA 2006/1772) vient définir les seuils d'obtention du « bon état » des cours d'eau. En particulier, cette loi a redéfini les seuils des déclarations et des autorisations pour les rejets ayant une potentielle incidence sur les eaux superficielles et souterraines.

Ensuite les arrêtés¹ se sont enchaînés afin d'ancrer l'idée que les systèmes de collecte et les stations d'épuration forment une entité cohérente. Leur dimensionnement doit répondre aux exigences suivantes : minimiser la quantité des matières polluantes déversées et respecter les critères du bon état du milieu récepteur.

Le dernier texte en date est l' (**Arrêté du 21 juillet 2015**). Ce dernier présente la référence réglementaire pour les systèmes d'assainissement collectif et les installations d'assainissement non collectif, à l'exception de celles recevant une charge brute de pollution organique inférieure ou égale à 1,2 kg/j de DBO₅. Son objectif est de **passer d'une logique de moyens** (instrumentation des ouvrages) **à une logique de résultats** en fixant des prescriptions techniques pour mettre en place une gestion pragmatique de l'assainissement. Ainsi, ce nouveau texte apporte :

- Une amélioration de la lisibilité des prescriptions de l'autosurveillance,
- Une introduction du principe de gestion des eaux pluviales le plus en amont possible,
- Des prescriptions relatives au suivi des micropolluants,
- Une optimisation du rapport coût/bénéfice pour les ouvrages d'assainissement,
- Un suivi régulier par les collectivités de leurs ouvrages pour une gestion pérenne.

1.1.2. Principe d'autosurveillance

Selon l' (**Arrêté du 21 juillet 2015**), le maître d'ouvrage a l'obligation de s'assurer de « la mise en place d'équipements permettant de mesurer ou d'estimer les volumes et/ou flux de pollution à traiter et déversés ». Le niveau d'exigence dépend du type d'ouvrage et de sa charge polluante en temps sec. La nomenclature (**SANDRE**) distingue 7 points de mesure réglementaires en fonction de leur emplacement

¹ Arrêté du 22 juin 2007 et Arrêté du 25 janvier 2010

dans le réseau d'assainissement (cf. **Annexe 1 : Cartographie des points SANDRE pour les collectivités**). Parmi les ouvrages répertoriés, deux sont étudiés dans le cadre de ce stage ; à savoir les déversoirs d'orage au niveau du système de collecte (**point A1**) et les déversoirs d'orage en tête de station de traitement (**point A2**).

Les obligations d'autosurveillance pour les points A1 sont les suivantes (cf. **Tableau 1**) :

Tableau 1: Exigences d'autosurveillance pour des points de rejets de type A1

Charge polluante par temps sec	Exigences d'autosurveillance
< 120 kg DBO ₅ /j	Aucune obligation
≥ 120 kg DBO ₅ /j <u>ou</u> ≥ 600 kg DBO ₅ /j avec moins de 10 jours de déversements par an en moyenne quinquennale	Mesure des temps de déversements + Estimation des débits déversés
≥ 600 kg DBO ₅ /j avec plus de 10 jours de déversements par an en moyenne quinquennale	Mesure et enregistrement en continu des volumes déversés + Estimation des flux de pollution déversés (DCO, MES, DBO ₅ , NTK, P _{tot})

Les obligations d'autosurveillance pour les points A2 sont les suivantes (cf. **Tableau 2**) :

Tableau 2: Exigences d'autosurveillance pour des points de rejets de type A2

Charge polluante par temps sec	Exigences d'autosurveillance
< 30 kg DBO ₅ /j	Vérification de l'existence de déversements
≥ 30 kg DBO ₅ /j et < 120 kg DBO ₅ /j	Estimation des débits rejetés
≥ 120 kg DBO ₅ /j et < 6000 kg DBO ₅ /j	Mesure et enregistrement en continu des débits déversés + Estimation des flux de pollution rejetés
≥ 6000 kg DBO ₅ /j	Mesure et enregistrement en continu des débits déversés + Mesure des caractéristiques des eaux usées

Différence entre une estimation et une mesure

Selon le **(Commentaire technique de l'arrêté du 21 juillet 2015)**, « la distinction entre mesure et estimation renvoie implicitement à une **différence de qualité**, la première étant supposée plus exacte et moins incertaine que la deuxième ». Ainsi, une mesure correspond à un dispositif standardisé et vérifié ou bien un dispositif ayant fait l'objet d'une étude spécifique validée.

1.2. Communauté d'Agglomération de Longwy

La Communauté d'Agglomération de Longwy (CAL) se situe au Grand-Est et représente la 2^{ème} intercommunalité du département de Meurthe et Moselle. Aujourd'hui, la CAL regroupe 21 communes représentées dans la carte suivante et qui ont toutes fait l'objet de cette étude (cf. **Figure 1**). Selon l'**(INSEE)**, le nombre d'habitants de la CAL a été estimé en 2016 à 61 223 habitants.

En 2014, la collectivité a équipé une vingtaine de déversoirs d'orage (DO) soumis à autorisation, déclaration, ou situés dans des zones à enjeu sanitaire / environnemental particulier. Le 1^{er} novembre 2016, la CAL a pris la compétence « Assainissement » sur l'ensemble de ses 21 communes ; comptant ainsi 7 systèmes d'assainissement. L'exploitation de ces réseaux est assurée en partie par la CAL et est en grande partie déléguée soit à VEOLIA, soit à la SAUR.

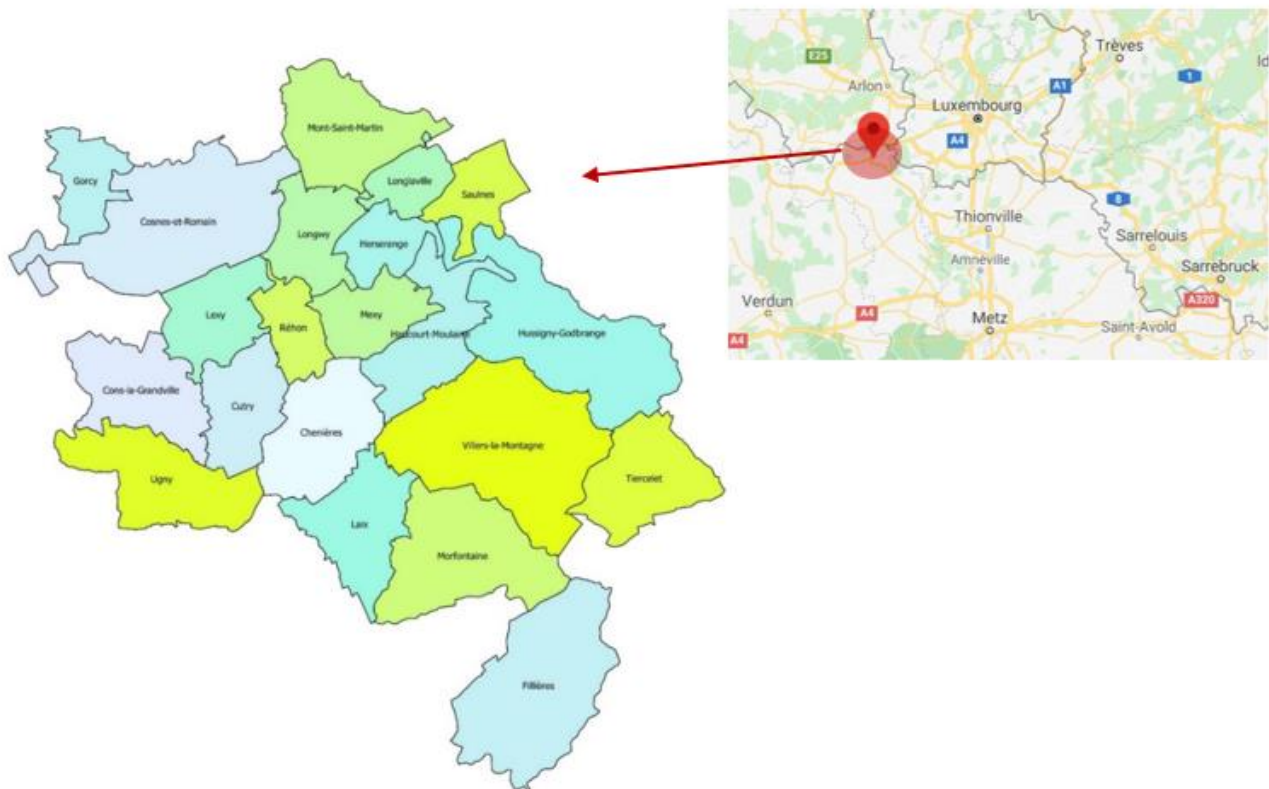


Figure 1: Communauté d'agglomération de Longwy et ses 21 communes - Source : (Site officiel de la CAL)

1.3. Présentation de 3D EAU

3D EAU est un bureau d'étude composé de spécialistes hydrauliciens issus du laboratoire ICube (ENGEES, INSA de Strasbourg, CNRS et Université de Strasbourg). La start-up a vu le jour le 30 avril 2014 suite à la volonté de ses 3 co-fondateurs. Son activité concerne à la fois la conception, le diagnostic et l'instrumentation des ouvrages de gestion des eaux usées, ainsi que l'application de la modélisation 3D au domaine de l'eau et l'environnement. L'entreprise s'intéresse également à la recherche et au développement via des thèses CIFRE. Aujourd'hui, 3D EAU compte 10 personnes dans son effectif, dont 8 ingénieurs et un doctorant ([Site officiel de 3D EAU](#)).

1.4. Cahier des charges

La présente étude se fait dans le cadre du marché public n° 19-08-00-00 publié par la CAL et dont l'intitulé est : « **Marché d'étude de faisabilité de la mise en œuvre de la métrologie sur ouvrages d'assainissement non équipés et d'optimisation de la métrologie existante sur ouvrages équipés** ». Ainsi, afin d'appliquer la réglementation en vigueur, le maître d'ouvrage prévoit un programme de travaux pour instrumenter les ouvrages ainsi que pour améliorer l'équipement de ceux déjà équipés (et par conséquent lever les non-conformités indiquées dans le rapport d'audit AERM). Au total, **159 ouvrages** sont concernés (cf. [Annexe 2 : Synoptique du réseau principal de Longwy](#)), dont **42 sont à analyser hydrauliquement**, tandis que le reste fait l'objet d'un levé (fiche synthétique et plan détaillé).

Plus précisément, **les objectifs de cette étude** sont, pour chaque point de rejet :

- Déterminer et/ou valider l'emplacement, le type et le nombre de capteurs de hauteur d'eau nécessaires pour permettre une mesure fiable et accessible pour l'exploitant.

- Etablir la loi de déversement hauteur/débit pour évaluer le débit déversé. Pour cela, la méthode de modélisation est choisie en fonction des enjeux et de l'hydraulique de chaque site.
- Evaluer les incertitudes associées aux calculs du débit déversé.
- Etablir les prescriptions techniques et chiffrer de manière estimative le coût des travaux de l'installation des capteurs et des éventuelles modifications légères de génie civil.
- Validation et vérification de l'installation après travaux.

Parallèlement à ce marché, a commencé, à compter de mars 2019, la mise à jour du Schéma Directeur d'Assainissement pour une durée de 2 ans. Il est prévu dans ce schéma une réactualisation des charges des ouvrages actuels et futurs. Par conséquent, afin d'anticiper la croissance démographique, **la CAL a décidé d'équiper les DOs (type A1) à partir de 1500 EH** (alors que la limite réglementaire est de 2000 EH).

1.5. Planning et prestations

Dans le cadre de cette étude, 3D EAU s'est associé à **la société LOREAT** en tant que sous-traitant. Cette dernière se charge des levés pour l'ensemble des ouvrages (fort et faible enjeu), tandis que 3D EAU analyse hydrauliquement les 42 ouvrages à fort enjeu. Ce groupement permet également de disposer de deux équipes sur le terrain simultanément de telle manière à accélérer les visites. Le logigramme suivant présente la démarche générale et le déroulement de cette étude (cf. [Figure 2](#)) :

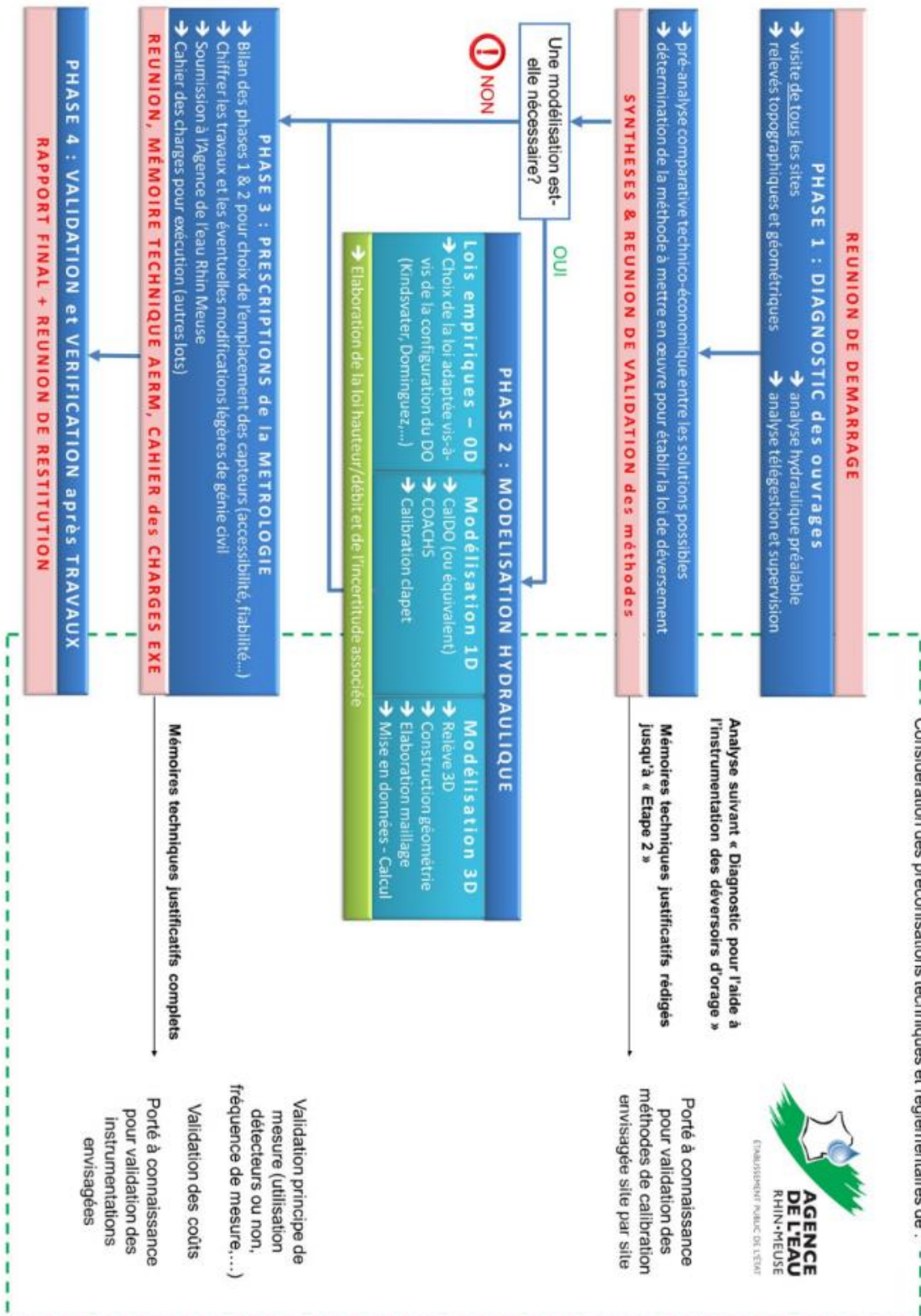


Figure 2: Méthodologie proposé par le groupement LOREAT / 3D EAU

Ce travail de fin d'étude concerne principalement les **3 premières phases du projet** ; la 4^{ème} étant programmée 6 mois plus tard. Ainsi, les tâches qui m'ont été confiées lors de ce stage de fin d'étude commencent par l'analyse hydraulique préalable des ouvrages et se termine par le chiffrage des travaux (cf. Figure 2).

2. Méthodologie

2.1. Visite des sites

L'intervention en réseaux d'assainissement nécessite une formation **CATEC** (Certificat d'aptitude à Travailler en Espaces Confinés). Par conséquent, cette étape n'a pas fait partie des missions que j'ai assurées lors de mon stage TFE.

Généralement, l'**objectif des visites de terrain** est de :

- Réaliser les relevés géométriques (longueurs, hauteurs, diamètres, singularités, ...)
- Cheminer, si possible, dans les canalisations pour identifier d'éventuelles influences sur l'ouvrage et ainsi réaliser une analyse préalable des régimes d'écoulement
- Mesurer les pentes des conduites amont, conservée et/ou déversée nécessaires pour l'étude.

2.2. Analyse hydraulique préalable

2.2.1. Les différents principes d'instrumentation

Généralement, trois différents principes peuvent être adoptés afin d'instrumenter un déversoir d'orage (cf. **Tableau 3**). **Le choix se fait notamment par rapport à l'enjeu du point de déversement et les coûts d'investissement et d'exploitation.** Dans le cadre de ce projet, en fonction des préconisations du maître d'ouvrage et l'hydraulique des différents sites, la 3^{ème} méthode a été adoptée pour l'évaluation des débits déversés.

Tableau 3: Les différentes méthodes d'instrumentation d'un déversoir d'orage

Méthode	Principe	Avantages	Inconvénients
Mesure du débit dans la conduite déversée	Mesure de la hauteur d'eau dans la conduite de décharge, couplée à une mesure de la vitesse	+Prise en compte des influences aval +Nombre des points de mesure limité	-Incertitude importante liée à la relation vitesse mesurée / vitesse moyenne -Difficulté de vérifier le fonctionnement du capteur en temps sec
Mesure du débit par différence entre l'amont et l'aval	Mesure du débit en amont et en aval du point de déversement	+Vérification permanente du fonctionnement des capteurs	-Frais d'investissement et d'exploitation importants -Incertitude importante liée à la double mesure
Instrumentation en hauteur(s) d'eau	Mesure de la lame déversante et calcul du débit via des lois hydrauliques	+Nombre des points de mesure limité	-Etablissement de la loi hauteur-débit en fonction de la géométrie de l'ouvrage

2.2.2. Calcul d'enjeu

Dans l'objectif de protection du milieu récepteur (qualité du milieu, activités humaines tributaires de la ressource d'eau, ...), l' (**Agence de l'Eau Rhin Meuse, Février 2016**) distingue la notion de charge polluante (en termes d'EH) et l'enjeu de l'ouvrage. Cette approche est plus restrictive que la réglementation. Au sens de l'AERM, « **l'enjeu d'un ouvrage s'évalue selon son influence sur son**

environnement. Trois critères principaux sont proposés : technique, environnemental et activités humaines. » (cf. **Figure 3**). Par conséquent, en fonction du score obtenu sur 10, l'enjeu du déversoir peut être classé en mineur (si ≤ 4), modéré (entre 5 et 7) et important (si ≥ 8).

<ol style="list-style-type: none">1. enjeu technique : ratio taille du DO (EH) / taille de la STEP (EH)<ul style="list-style-type: none">○ $R < 0,15 = 0$ point /4○ $0,15 < R < 0,30 = 1$ point /4○ $0,30 < R < 0,50 = 2$ points / 4○ $0,50 < R < 0,70 = 3$ points /4○ $R > 0,70 = 4$ points /42. enjeu environnemental : facteur de dilution : taille du DO / QMNA2<ul style="list-style-type: none">○ $F_d < 1 = 0$ point /4○ $1 < F_d < 2 = 1$ point /4○ $2 < F_d < 3 = 2$ points / 4○ $3 < F_d < 4 = 3$ points /4○ $F_d > 4 = 4$ points /43. enjeu activité humaine : présence ou non de l'aire de baignade<ul style="list-style-type: none">○ présence de l'aire de baignade en aval = 2 points /2○ absence de l'aire de baignade en aval du point de rejet = 0 point
--

Figure 3: Aperçu global sur le calcul d'enjeu d'un DO – Source : AERM

2.2.3. Analyse d'un déversoir d'orage

Dans le cadre de cette étude, l'analyse hydraulique s'est appuyée sur le guide technique « Diagnostic pour l'aide à l'instrumentation des déversoirs d'orage » (**VAZQUEZ, et al., 2016**). Ce document permet aux bureaux d'étude de cadrer leur analyse via des questions précises dans le but **de déterminer d'une part si le débit peut être évalué au moyen d'une mesure de hauteur d'eau et d'une conversion hauteur - débit, et d'autre part le moyen à utiliser pour évaluer la relation hauteur/débit**. Il s'agit d'un document qui est validé et recommandé par l' (**Agence de l'Eau Rhin Meuse, Février 2016**). Le logigramme suivant permet d'illustrer la méthodologie à suivre (cf. **Figure 4**).

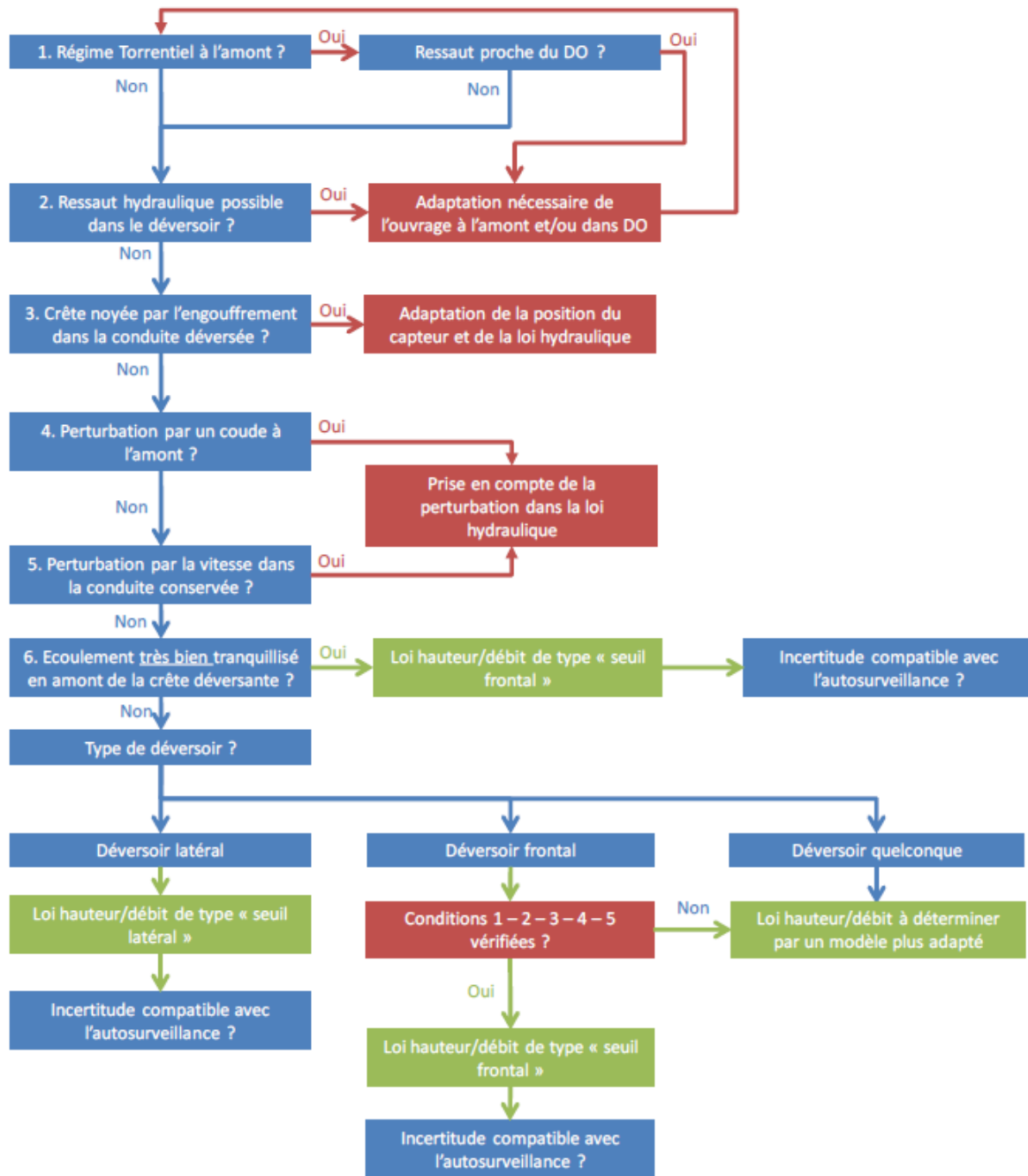


Figure 4: Méthodologie d'analyse hydraulique pour la mesure de lame déversante – Source : (VAZQUEZ, et al., 2016)

2.2.4. Choix de la méthode de modélisation

Une fois l'ouvrage analysé hydrauliquement, il peut être classé en fonction de sa géométrie (régularité de la crête, nombre de conduites amont, présence d'entonnement, ...) et sa complexité hydraulique (perturbations, régime d'écoulement, ennoisement, ...) en 3 catégories :

- Géométrie simple : pour faire référence à des DOs type seuil frontal sans complexité hydraulique,
- DO latéral / géométrie simple : pour des DOs type déversoir latéral sans complexité hydraulique,
- Géométrie complexe : pour des ouvrages complexes représentant des contraintes hydrauliques particulières.

Ensuite, cette analyse est confrontée à l'enjeu calculé, de telle manière à définir la méthode la mieux adaptée et le niveau d'investissement approprié. Cette comparaison est synthétisée par le schéma ci-dessous (cf. [Figure 5](#)) :

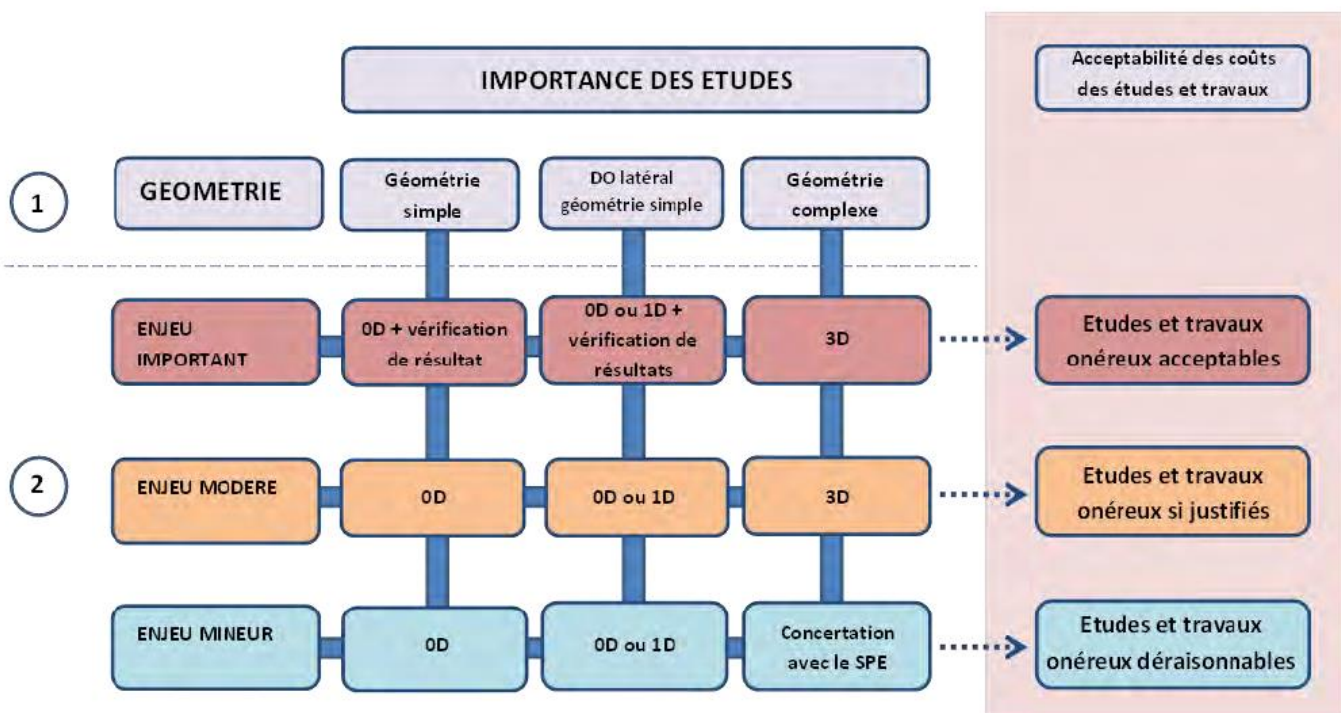


Figure 5: Analyse multicritère (enjeu, complexité et investissement) – Source : AERM

2.3. Modélisation hydraulique et définition des lois hauteur(s)-débit

Les paragraphes suivants présentent les principales méthodologies utilisées pour élaborer une loi hauteur-débit.

2.3.1. Méthode empirique « OD »

Selon ([VAZQUEZ, et al., 2009](#)), l'approche OD consiste à établir une loi entre la hauteur d'eau au droit de l'ouvrage et le débit déversé. Ce modèle utilise des **lois empiriques de la littérature** ([CETMEF, 2005](#)) en négligeant les particularités géométriques. Néanmoins, ces relations sont limitées par leur domaine d'application et les hypothèses qu'elles considèrent ; notamment les effets de vitesse au niveau du déversement. **L'incertitude est de l'ordre de 10%** si l'ensemble des conditions est vérifié, davantage en cas de perturbations hydrauliques plus ou moins importantes.

2.3.2. Etude des déversoirs latéraux : Modélisation 1D

Cette méthodologie tient compte de l'évolution de la ligne d'eau tout au long de la crête. Ainsi, elle est particulièrement adaptée à des **déversoirs latéraux**. Le principe hydraulique de cette méthode est la conservation de la charge spécifique. Cette hypothèse sous-entend que les pertes de charges linéaires sont négligeables (ce qui est conforme avec la taille de la crête). Par conséquent, en cas de présence d'un ressaut hydraulique dans l'ouvrage ; dissipateur d'énergie assez fort, cette approche ne peut pas être adoptée ([BUYER, 2002](#)).

([HAGER, 1999](#)) a établi une loi (cf. [Équation 1](#)) qui permet de relier la hauteur d'eau au débit déversé en fonction des caractéristiques de l'ouvrage. Cette loi présente une forme similaire à un seuil frontal

(puissance 3/2), ainsi que des coefficients correcteurs pour tenir compte du déversement latéral. La résolution des équations différentielles peut se faire de proche en proche en utilisant des méthodes numériques tel que Runge Kutta, ...

Équation 1: Débit déversé pour un déversoir latéral

$$\frac{dQ}{dx} = C_d \cdot \sqrt{2g} \cdot (h - w)^{\frac{3}{2}} \cdot \omega_u \cdot \omega_\phi$$

Avec : C_d coefficient de débit, dépend de la hauteur d'eau et la forme de la crête,
 ω_u coefficient qui prend en compte l'effet de la vitesse latérale et de sa direction,
 ω_ϕ coefficient qui prend en compte l'effet de l'entonnement du déversoir.

Or, pour simplifier cette démarche, certains logiciels librement téléchargeables tel que CalDo² (**Site internet Hydraulique des réseaux**) ou interne à l'entreprise permettent de résoudre les équations différentielles avec un pas de calcul modifiable en fonction des caractéristiques de l'ouvrage (conduite amont, aval et crête).

Cette méthode permet d'établir une loi hauteur-débit avec **une incertitude de l'ordre de 10-15%** lorsque l'ouvrage n'est pas perturbé hydrauliquement.

2.3.3. Aménagement de la crête : fenêtre de déversement privilégié

Souvent les déversoirs latéraux sont dimensionnés avec des **longueurs de crête importantes**. Par conséquent, pour les faibles débits, les lames déversantes sont souvent très faibles et peuvent générer des **fortes incertitudes**. Pour remédier à ce problème, le seuil peut être recalibré via une contraction ou une forme triangulaire. Cependant, d'un point de vue exploitation, une crête avec des angles vifs est susceptible d'engendrer des dépôts de filasses (cf. **Figure 6**).

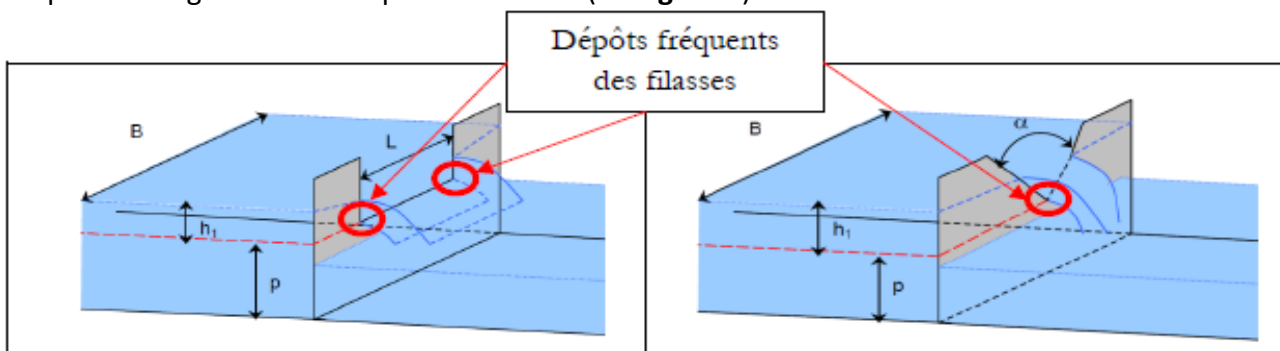


Figure 6: Types d'aménagements pour éviter les faibles lames déversantes pour les petits débits – **Source :** (CETMEF, 2005)

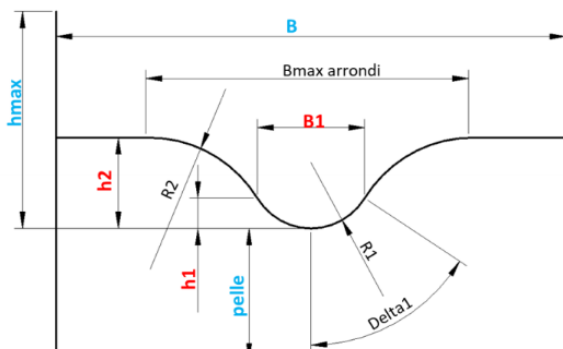


Figure 7: Schéma de principe du seuil en V arrondi

Une autre alternative qui peut être proposée est **un seuil en V arrondi** (cf. **Figure 7**). Cette forme de crête présente les avantages suivants :

- En cantonnant l'écoulement sur une largeur réduite aux faibles débits, ce type de seuil permet une bonne précision de mesure.
- Avec aucun angle vif, ce type de seuil évite l'accumulation des déchets flottants, filasses, etc. ; typiques des seuils en forme de créneau.

² Le logiciel CalDo ne permet pas d'étudier le cas d'une influence aval

Le dimensionnement de cet ouvrage a fait l'objet d'une méthodologie particulière, développée par 3D EAU et qui repose sur les deux considérations hydrauliques suivantes :

- Le passage par la hauteur critique de l'écoulement au droit du seuil (écoulement dénoyé),
- La conservation de la charge entre l'amont et la hauteur critique.

Cette approche a été calibrée via la modélisation 3D (cf. [Annexe 3 : Validation du dimensionnement d'un seuil en V arrondi via la modélisation 3D](#)).

2.3.3. Etude des trop-pleins : Combinaison d'une approche 0D et 1D

Les trop-pleins sont considérés comme des déversoirs d'orage particuliers, mais qui sont quand même soumis aux exigences réglementaires d'autosurveillance au même titre qu'un point A1. ([VAZQUEZ, et al., Novembre 2016](#)) ont établi dans le cadre du projet de recherche européen COACHS (COmputations and their Applications in Channel Hydraulics for Sewers) une méthodologie d'analyse pour **les trop-pleins des stations de pompage**. Aujourd'hui, la « loi COACHS » fait référence à un couplage des lois d'orifice et du calcul de la ligne d'eau en 1D. Elle a été calibrée suite à la modélisation 3D et des cas d'études pratiques ; ce qui a permis d'identifier les **différents modes de fonctionnement** d'un trop-plein (cf. [Annexe 4 : Modes de fonctionnement d'un trop-plein](#)), ainsi que les lois hauteur(s)-débit qui correspondent à chaque mode.

L'avantage de cette approche est qu'elle ne nécessite pas d'aménagement particulier et peut s'adapter à la configuration de l'ouvrage en question. 3D EAU a développé ses propres outils de calcul qui permettent de tracer la ligne d'eau en aval de l'engouffrement et d'établir la loi hauteur-débit pour les différents modes de fonctionnement. L'incertitude de cette loi dépend à la fois du mode et de la hauteur d'eau en amont. Elle varie entre **5 et 25%** pour un fonctionnement « normal » et peut devenir plus importante pour des faibles hauteurs d'eau (inférieures à 5 cm) ou un fonctionnement noyé.

2.3.4. Modélisation 3D

2.3.4.1. Principe hydraulique

Le principe de la modélisation 3D consiste à résoudre les équations fondamentales de la mécanique des fluides ; à savoir les équations de Navier-Stokes ([VERSTEEG, et al., February 2007](#)). Dans le cas d'un écoulement newtonien incompressible, ces dernières se traduisent par **la loi de conservation de la masse** (cf. [Équation 2](#)) et **de la quantité de mouvement** (cf. [Équation 3](#)) au sein d'un écoulement.

Équation 2: Equation de continuité

$$\nabla u = 0$$

Avec : u vecteur vitesse à un moment donné.

Équation 3: Equation de la conservation de la quantité de mouvement

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \nabla \cdot (uu) = -\frac{1}{\rho} \nabla p + g + \nabla \cdot (v \nabla u)$$

Avec : u vecteur vitesse à un moment donné,
p pression,
g accélération de pesanteur,
v viscosité cinématique.

La forme non-linéaire de ces équations exclut toute solution analytique, d'où la nécessité du recours à une résolution numérique. En ingénierie, l'approche **Reynolds Averaged Navier Stokes (RANS)** est utilisée. Elle repose sur l'hypothèse de Boussinesq qui consiste à modéliser l'impact de la turbulence sur le champ de vitesse moyen via la « viscosité turbulente » (**ISENMANN, Avril 2016**). Cette viscosité est calculée au moyen d'un **modèle de turbulence**. Les plus classiquement utilisés en ingénierie sont les modèles k- ϵ ou k- ω . Dans le cadre des études d'autosurveillance, 3D EAU utilise le modèle **k – ω SST** (*Shear Stress Transport*). Développé par (**MENTER, August 1994**), ce modèle hybride mélange les modèles k- ϵ et k- ω dans les régions proches de la paroi et utilise le modèle k- ϵ standard dans les zones de fortes turbulences loin des parois.

Remarque : *l'approche de Boussinesq, en modélisant la turbulence par une viscosité, reproduit les phénomènes de dissipation de la turbulence sur l'écoulement. Si cette approche est parfaitement adaptée pour reproduire un champ d'écoulement moyen (les études d'autosurveillance s'intéressent uniquement à la distribution de la hauteur d'eau), elle est en revanche complètement contre-indiquée pour reproduire les phénomènes de vortex qui seront présentés par la suite. En effet, une telle approche risquerait de dissiper numériquement ces phénomènes qu'on cherchera à reproduire.*

2.3.4.2. **Modèle numérique**

Le logiciel de modélisation 3D utilisé dans le cadre de cette étude est **OpenFOAM**[®] (Open Field Operation And Manipulation). Il s'agit d'un logiciel de CFD (Computational Fluid Dynamics) qui a l'avantage d'être gratuit et open source (**Site officiel OpenFOAM**).

Afin de modéliser les écoulements à surface libre dans les déversoirs d'orage, un modèle biphasique peut être utilisé. Dans OpenFOAM, il est présenté par un modèle **Volume of Fluid (VOF)**, qui permet de définir la fraction volumique entre deux fluides incompressibles et non miscibles (ici, l'eau et l'air). Le recours à ce modèle se fait en utilisant le solveur **interFoam**.

2.3.4.3. **Paramétrage du modèle**

Construction de la géométrie : Suite à la visite du site et les levés géométriques, un modèle 3D représentant l'ouvrage est construit sur une interface graphique, telle que SALOME.

Maillage : Une fois la géométrie construite, celle-ci est discrétisée en éléments élémentaires de calcul au sein desquels les équations de la mécanique des fluides seront résolues. Un compromis doit être trouvé entre le temps de calcul, la capacité des machines et l'enjeu du déversoir. Dans le cas d'une instrumentation en hauteur, le maillage de la géométrie est créé en favorisant des mailles hexaédriques ou de type CutCellMeshing (plutôt que les mailles tétraédriques qui aboutissent à des nombres de mailles plus importants). Selon le retour d'expérience de 3D EAU, une taille des mailles de l'ordre de 5 à 10 cm dans l'ouvrage et entre 1 et 2 cm au niveau de la crête (avec 20 cellules sur la lame déversante) s'avère comme étant un bon compromis qui permet d'obtenir une incertitude numérique de l'ordre de 5%.

Conditions aux limites : Les conditions aux limites permettent de prendre en compte l'influence de l'environnement de l'ouvrage sur l'écoulement. Généralement, ces conditions sont les mêmes dans le cas d'un déversoir d'orage avec quelques particularités (**LIPEME KOUYI, et al., Décembre 2005**). Trois types de conditions peuvent être distingués (**ISEL, 2014**) (cf. **Tableau 4**) :

Tableau 4: Récapitulatif des principales conditions aux limites utilisées en modélisation 3D

Type de condition	Caractéristiques
InletFlux	Cette condition impose un débit, injecté sur une section mouillée connue. Elle peut être utilisée pour les conduites d'entrée ou la conduite conservée (en fixant un débit négatif)
Outlet / Top	Cette condition impose une pression sur la paroi considérée. Si la pression est nulle, elle traduit une sortie à gueule bée. Sinon, elle traduit le cas d'une influence aval. Cette condition est régulièrement utilisée pour les conduites déversées ou/et conservées. Elle est également utilisée avec la nomination « top » pour imposer une pression atmosphérique au niveau de la paroi supérieure de l'ouvrage.
Walls	Cette condition de mur sert à imposer une vitesse nulle au niveau des parois latérales, mais peut également être utilisée occasionnellement pour modéliser le toit de l'ouvrage.

2.4. Elaboration de l'autosurveillance

2.4.1. Emplacement du capteur

« Le positionnement du capteur est un facteur important de l'incertitude d'une mesure (Agence de l'Eau Rhin Meuse, Février 2016) ». En fonction de l'analyse de l'ouvrage et la méthodologie adoptée, un emplacement optimal est préconisé au maître d'ouvrage. Le but est de positionner le capteur à un endroit où il y a le minimum de perturbations et où la mesure est fiable. Il est ainsi convenable d'éviter les zones de dépôts ou de remous. D'autres paramètres, mais pas des moindres, sont à prendre en compte : accessibilité, risque de vandalisme, proximité du réseau électrique, moyens de transmission³...

Dans le cas d'un ouvrage « simple » où une approche OD ou 1D a été adopté, l'emplacement du capteur peut s'appuyer sur les recommandations de (CETMEF, 2005) qui préconisent une position située de 3 à 4 fois la hauteur maximale en amont de la crête de déversement. Le schéma suivant (cf. Figure 8) permet d'illustrer l'emplacement préconisé dans le cas d'un seuil à crête mince ou à crête épaisse. Les comparaisons menées par 3D EAU sur des ouvrages modélisés en 3D ont permis de montrer que ces recommandations étaient sécuritaires.

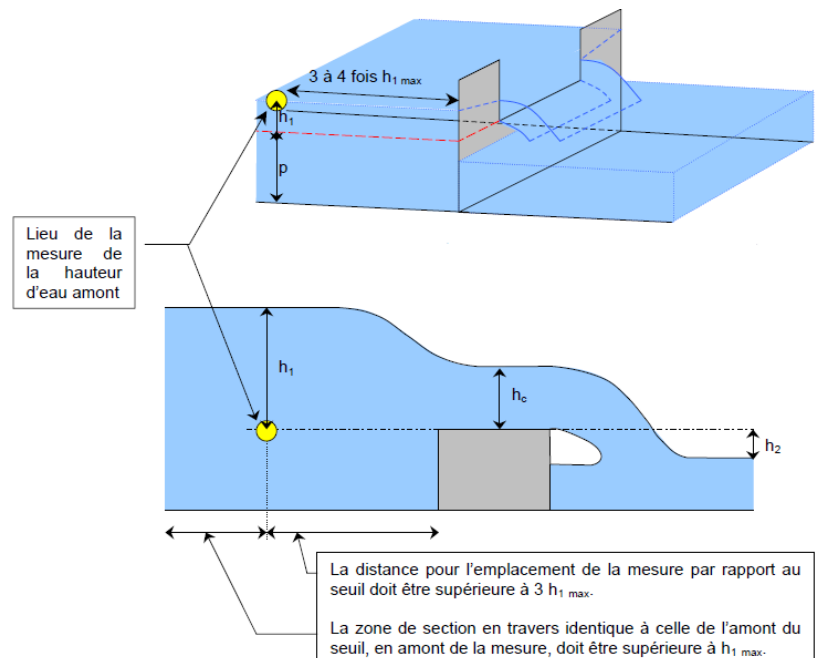


Figure 8: Positionnement recommandé par CETFEM pour la mesure de la hauteur d'eau dans le cadre d'une loi hauteur-débit

³ Il est important de percer les tampons du regard pour améliorer la transmission GSM

Dans le cas d'une **modélisation 3D**, l'analyse de la surface libre permet de définir un emplacement propice à la mesure : hauteur stable dans le temps, uniforme sur la zone de mesure du capteur et relation univoque entre la hauteur et le débit. Le cas échéant, des modifications structurelles légères peuvent être proposées telles que des déflecteurs ou autre afin de stabiliser l'écoulement.

Si une **influence aval** est avérée, un **deuxième capteur en aval** de l'ouvrage peut être préconisé en fonction de l'enjeu que représente le DO. L'absence de cette seconde mesure peut conduire à une surestimation très importante du débit déversé en cas d'influence aval.

2.4.2. Etablissement de la loi hauteur-débit

Une fois l'analyse hydraulique aboutie et le nombre de capteurs ainsi que leurs emplacements définis, les résultats de la méthode doivent être exploités afin de créer **une loi permettant de calculer le débit en fonction de la mesure** (ou les mesures) de la hauteur d'eau. Cette loi doit prendre la forme d'une relation $Q = f(h_i)$ facilement implémentable dans Excel, dans un superviseur ou éventuellement directement dans un transmetteur (**LIPEME KOUYI, 2004**).

2.4.3. Evaluation des incertitudes

Une fois la loi hauteur(s)-débit définie, il est primordial de proposer un calcul d'incertitude, qui correspond aux normes internationales de métrologie.

2.4.3.1. Sources d'incertitude

Les sources d'incertitude sur le débit qui doivent être prises en compte sont les suivantes :

- L'incertitude du **modèle** reliant les hauteurs au débit déversé : celle-ci provient notamment de la méconnaissance précise des **conditions aux limites** et de **l'approche adoptée**. La modélisation 3D est considéré comme étant la plus précise avec une incertitude de 5% (**Agence de l'Eau Rhin Meuse, Février 2016**).
- L'incertitude de **régression** liée au choix de la loi mathématique d'interpolation ; généralement de l'ordre de 1 à 2%.
- L'incertitude de mesure de la hauteur de lame déversante : celle-ci provient de l'incertitude sur **le zéro du capteur** et de l'incertitude sur **la mesure du niveau** ; elle est déterminée selon les recommandations de la norme (**ISO 6416:2017**). Elle est de l'ordre de 1 cm (essentiellement liée au zéro). C'est la source d'incertitude généralement la plus importante, notamment aux faibles lames déversantes.

L'ensemble de ces sources est ensuite combiné afin d'évaluer l'incertitude globale sur le débit (cf. **Annexe 5 : Formules et ordre de grandeur des incertitudes**).

2.4.3.2. Calcul des incertitudes

Pour évaluer l'incertitude globale, plusieurs méthodes sont disponibles telles que la loi de propagation des incertitudes (méthode GUM de type B) (**JCGM 100:2008**). Cette dernière est traduite par l'équation suivante dans le cas de variables indépendantes (cf. **Équation 4**) :

Équation 4: Loi de propagation des incertitudes

$$u(X)^2 = \sum_{i=1}^n \left(u(X_i)^2 \cdot \left(\frac{\partial f}{\partial X_i} \right)^2 \right)$$

Cette équation permet d'avoir une loi à un intervalle de confiance de 68%, si les incertitudes fournies par les constructeurs sont directement utilisées. Néanmoins, généralement, les intervalles de confiance sont affichés à 95%. Ainsi, un coefficient multiplicateur est appliqué sous l'hypothèse d'une loi normale (cf. **Équation 5**) :

Équation 5: Calcul de l'incertitude étendue

$$u'(X) = k \cdot u(X)$$

Avec : k un coefficient qui dépend de l'intervalle de confiance IC

- Pour IC = 68 %, k = 1
- Pour IC = 95 %, k = 2
- Pour IC = 98 %, k = 3

2.4.4. Type de capteur

Pour des raisons de maintenance et d'entretien, les capteurs de niveau non intrusifs sont à privilégier. Ce genre de capteur permet également de s'affranchir du problème des dépôts. Le principe est de **mesurer le temps de parcours d'une onde ultrasonore ou électromagnétique qui est émise par le capteur et réfléchi par la surface du liquide**⁴. Le tableau suivant (cf. **Tableau 5**) permet de synthétiser les avantages et les inconvénients des deux principaux capteurs utilisés en assainissement (**ISO 4373 : 2008**). Il est à noter que ces deux capteurs ne permettent pas de mesurer la hauteur dans le cas d'une mise en charge (un capteur piézométrique est à privilégier dans ce cas).

Tableau 5: Comparaison des capteurs de niveau non-intrusifs

Type de capteur	Avantages	Inconvénients
Sonde Ultrason	<ul style="list-style-type: none"> - Faible dérive au cours du temps - Bonne autonomie - Faible encombrement 	<ul style="list-style-type: none"> - Plusieurs facteurs de perturbation de la mesure (mousses, flottants, gradients de températures, brume, etc.) - Nécessité d'une zone morte
Capteur Radar	<ul style="list-style-type: none"> - Non perturbé par les variations de température, les brumes, les mousses et les flottants) - Faible dérive au cours du temps - Pas de zone morte 	<ul style="list-style-type: none"> - Consommateur d'énergie - Encombrant

Un protocole de contrôle au sens du Guide Pratique de l' (**Agence de l'Eau Loire et Bretagne, 2015**) est préconisé à la réception du dispositif d'autosurveillance et périodiquement.

⁴ Il faut que l'angle d'émission soit dépourvu d'obstacles, sinon un filtrage de la donnée doit avoir lieu

3. Mise en œuvre de la méthodologie

Dans le cadre de ce stage de fin d'étude, j'ai analysé hydrauliquement 40 points de déversement ont dans le but de valider ou proposer une instrumentation ; deux ouvrages n'ont pas pu être visités (cf. **Tableau 6**). Ci-dessous sont présentés trois exemples qui permettent d'illustrer la diversité des sites étudiés, ainsi que les différentes méthodes de modélisation hydraulique décrites dans la partie **2.3**. L'analyse n'est pas présentée dans son intégralité ; une attention particulière est portée aux éléments les plus importants et caractéristiques de chaque site.

Tableau 6: Liste des ouvrages et des études réalisées dans le cadre du projet de la CAL (les points en rouge sont ceux qui seront explicités)

N°	Ouvrage	Charge EH	Type	Prescription réglementaire	Méthode mise en œuvre
1	CONS-DO1	1708	A1	Aucune	0D
2	CONS-DO5	2103	A1	Estimation du débit déversé	COACHS 1D
3	CONS-DO6	2073	A1	Estimation du débit déversé	COACHS 0D
4	CONS-DO8	2103	A1	Estimation du débit déversé	COACHS 1D
5	FIL-DO1	510	A2	Estimation du débit déversé	0D/ Seuil en V
6	GOR-DO14	2391	A2	Mesure du débit déversé	COACHS 1D
7	HER-DO5	1025	A1	Aucune	Abandonné suite à l'analyse hydraulique
8	HER-DO8	8396	A1	Estimation du débit déversé	En attente de données
9	HEU-DO1	1939	A1	Aucune	0D
10	HUS-DO2	1580	A1	Aucune	Seuil en V arrondi
11	HUS-DO6	1580	A1	Aucune	En attente des travaux
12	LEXY-DO1	2742	A1	Estimation du débit déversé	COACHS 0D
13	LEXY-DO2	2246	A1	Estimation du débit déversé	0D
14	LEXY-DO9	2751	A2	Mesure du débit déversé	0D/Seuil en V
15	LON-DO1	6806	A1	Estimation du débit déversé	0D/Seuil en V
16	LON-DO10	22028	A1	Mesure du débit déversé	3D
17	LON-DO21	6806	A1	Estimation du débit déversé	En attente des travaux
18	LON-DO4	2969	A1	Estimation du débit déversé	0D
19	LON-DO7	4299	A1	Estimation du débit déversé	COACHS 1D
20	LONGL-DO1	2029	A1	Estimation du débit déversé	1D/COACHS 1D
21	LONGL-DO3	2751	A1	Estimation du débit déversé	COACHS 1D
22	LONGL-DO4	4674	A1	Estimation du débit déversé	0D/COACHS 0D
23	LONGL-DO8	2029	A1	Estimation du débit déversé	COACHS 1D
24	MEX-DO1	1674	A1	Aucune	Seuil en V arrondi
25	MEX-DO3	1674	A1	Aucune	Seuil en V arrondi
26	MOR-DO5	954	A2	Estimation du débit déversé	En attente de la visite
27	MSM-DO1	1953	A1	Aucune	COACHS 0D
28	MSM-DO13	1919	A1	Aucune	COACHS 0D
29	MSM-DO5	90	A1	Aucune	Abandonné suite à l'analyse hydraulique
30	MSM-DO8	3081	A1	Estimation du débit déversé	0D/Seuil en V
31	REH-DO14	1594	A1	Aucune	0D/Seuil en V
32	REH-DO4	1594	A1	Aucune	0D/Seuil en V
33	REH-DO9	35310	A1	Mesure du débit déversé	3D
34	SAU-DO1	3277	A1	Estimation du débit déversé	1D/COACHS 0D
35	SAU-DO4	3277	A1	Estimation du débit déversé	En attente des travaux
36	STEP-DO1	35318	A2	Mesure du débit déversé	3D

37	STEP-DO2	38886	A2	Mesure du débit déversé	En attente des données
38	TIER-DO3	465	A2	Aucune	En attente de la visite
39	VIL-DO10	1520	A1	Aucune	COACHS OD
40	VIL-DO4	330	A1	Aucune	1D
41	VIL-DO5	943	A1	Aucune	COACHS OD
42	VIL-DO8	2668	A1	Estimation du débit déversé	COACHS OD

3.1. Point de déversement GOR-DO14 : Etude d'un trop-plein

3.1.1. Descriptif de l'ouvrage

Le site d'étude est situé sur la commune de Gorcy, dans l'enceinte de la station d'épuration. Il s'agit d'un orifice de trop-plein dans la bêche de pompage (point A2). Selon le CCTP, la charge polluante drainée par ce point est de **2 391 EH**, soit une charge comprise entre 120 et 6000 kg DBO₅/j. Selon l' **(Arrêté du 21 juillet 2015)** (voir le **Tableau 2**), ce site est soumis à une mesure.

La figure ci-dessous illustre la géométrie de l'ouvrage à instrumenter, ainsi que les caractéristiques des principales canalisations (cf. **Figure 9**). Les QR codes permettent de visualiser des vidéos du site, filmées lors de la visite du terrain. Une fiche plus détaillée est fournie en **Annexe 7 : Fiche technique du point GOR-DO14**.

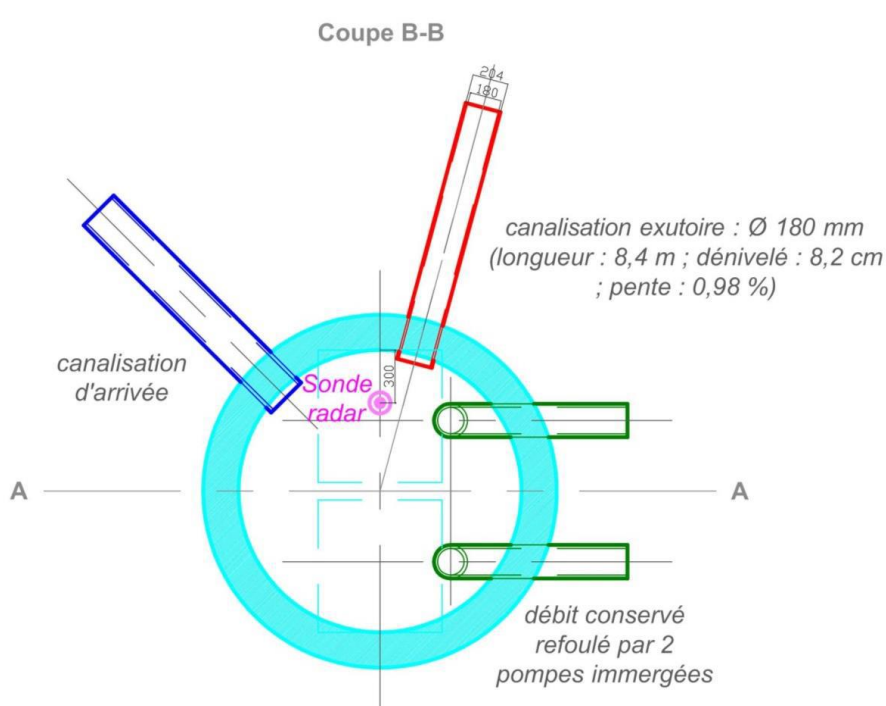


Figure 9: Géométrie du point GOR-DO14 (Vue de dessus)

3.1.2. Pré-diagnostic hydraulique de l'ouvrage

Le pré-diagnostic d'un ouvrage repose sur le calcul d'enjeu, l'analyse hydraulique conformément à la démarche décrite dans la **Figure 4** et l'analyse des données dans le cas où l'ouvrage est déjà instrumenté.

Pour le point de déversement GOR-DO14, **l'enjeu du déversoir est modéré** avec une note de 7/10. Etant un point qui est déjà soumis à une mesure du débit, cet enjeu n'apporte pas de contraintes particulières (cf. **Annexe 9 : Calcul d'enjeu des points de déversement HUS-DO2 / GOR-DO14 / REH-DO9**).

Ensuite, l'analyse hydraulique se fait en répondant aux 7 questions de la **Figure 4**. Le point GOR-DO14 correspond au trop-plein d'une station de pompage, ainsi son fonctionnement hydraulique est assez simple, avec seulement quelques éléments pouvant perturber la mesure. En effet, l'arrivée en chute dans le regard est susceptible de créer des perturbations de la surface libre, et par conséquent, l'écoulement risque de ne pas être très bien tranquilisé lors des déversements. En outre, la présence d'un clapet anti-retour laisse penser que le risque d'une influence aval ne peut pas être exclu. Si ce dernier est très léger et ne représente pas un obstacle à l'écoulement quand le niveau du milieu naturel est faible, pour des niveaux importants dans le Coulmy (milieu récepteur), le clapet risque de se fermer et d'influencer la ligne d'eau amont, ce qui conduirait à surcompter les volumes déversés. Ce surcomptage pourrait être vu comme un problème mineur car il va dans le sens de la sécurité. Il peut cependant s'avérer très problématique pour la collectivité maintenant que la réglementation impose une obligation de résultat (critère 1 = moins de 5% du volume peut être rejeté dans le milieu récepteur). Pour cette dernière, disposer d'une mesure précise pour ce type de point est donc un enjeu très important.

Aucune donnée n'est disponible pour ce point de mesure. Les observations de terrain (traces d'eau) laissent cependant penser que les lames déversantes sont en général assez importantes, ce qui devrait permettre une mesure de bonne qualité (peu d'incertitude sur la mesure de lame déversante).

La synthèse de l'analyse hydraulique est fournie dans le tableau suivant :

Tableau 7: Synthèse de l'analyse hydraulique pour le point GOR-DO14

Critère 1	Régime d'écoulement torrentiel en amont ?	OUI
Critère 2	Risque de ressaut hydraulique dans l'ouvrage ?	NON
Critère 3	Crête noyée par l'aval ?	OUI
Critère 4	Perturbation par un coude à l'amont ?	NON
Critère 5	Perturbation par la vitesse dans la conduite conservée ?	NON
Critère 6	Écoulement très bien tranquilisé ?	NON
Critère 7	Incertain compatible avec une mesure de qualité ?	OUI

La problématique soulevée par le critère 1 et le critère 6 sera réglée par la mise en place d'un coude sur la conduite d'arrivée. Concernant le critère 3, la solution passe par une double instrumentation. Le **capteur actuellement en place dans la bache de pompage** peut être conservé mais il devrait être déplacé car il est très proche de l'engouffrement dans la conduite de décharge (zone où l'écoulement accélère et où le niveau d'eau diminue). **Un capteur est en plus préconisé en aval du clapet** de manière à prendre en compte l'impact du milieu naturel dans la mesure des débits déversés. La mise en place d'un détecteur de surverse dans la bache est également préconisée de telle manière à répondre aux exigences du guide (**Agence de l'Eau Rhin Meuse, Février 2016**) (page 42). En effet, pour un point de déversement pour lequel la réglementation impose une mesure du débit, il est nécessaire de mettre en place un capteur complémentaire qui « sécurise » les résultats. Ce détecteur peut également être utilisé afin de recalibrer le zéro.

3.1.3. Etablissement de la loi hauteur(s)-débit

Compte tenu de l'analyse précédente, la relation hauteur – débit correspond à la **loi COACHS** adaptée à la configuration du site. Concernant le risque d'influence aval, 3D EAU a développé en interne son propre logiciel afin de :

- Prendre en compte l'ensemble des cas de fonctionnement possibles,
- Simuler un grand nombre de calculs correspondant à l'ensemble de ces cas (ici 1600 simulations),
- Traiter les résultats de ces calculs afin d'établir les relations permettant d'évaluer le débit à partir des hauteurs mesurées.

Remarque : Cet outil de calcul a été créé lors de la période de mon stage. Je n'ai pas participé à son développement, mais j'étais chargée de le tester et faire des retours d'utilisation qui ont permis de l'améliorer et de le rendre pleinement opérationnel.

La **Figure 10** présente ainsi dans un graphique hauteur – débit l'ensemble des 1600 simulations réalisées dans le cadre d'étude du point GOR-DO14.

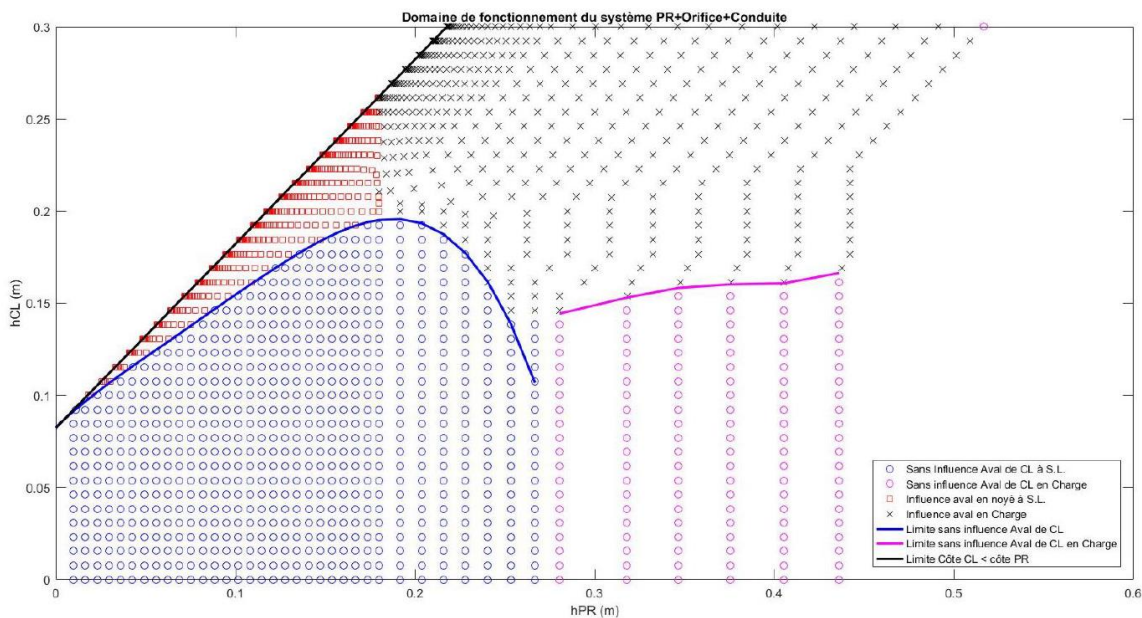


Figure 10: Simulations réalisées en fonction du couple hauteur amont / hauteur aval

Les figures suivantes présentent quelques lignes d'eau parmi l'ensemble des 1600 simulées afin d'illustrer les différents modes de fonctionnement.

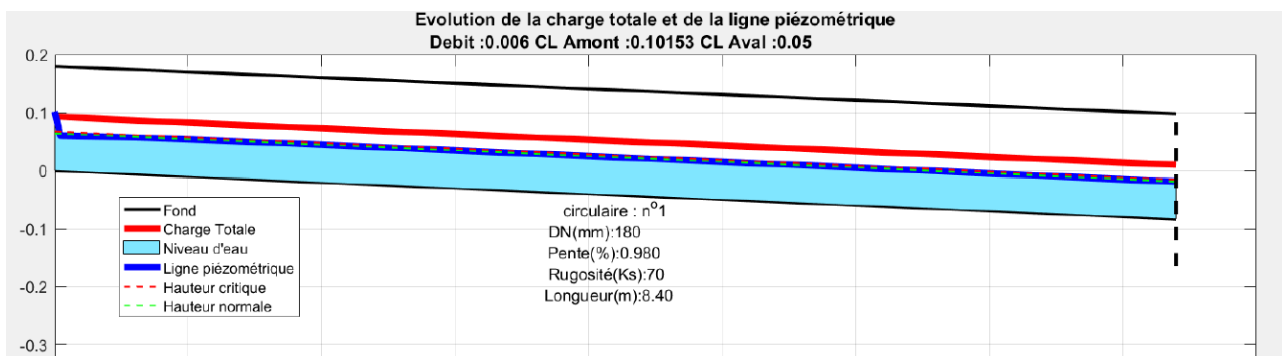


Figure 11: Cas 1 : Fonctionnement dénoyé

La **Figure 11** présente ainsi le cas d'un engouffrement dénoyé (Cas 1) : l'écoulement se fait en torrentiel sur toute la longueur de la conduite de décharge. Le débit est uniquement fonction du niveau d'eau dans la bêche.

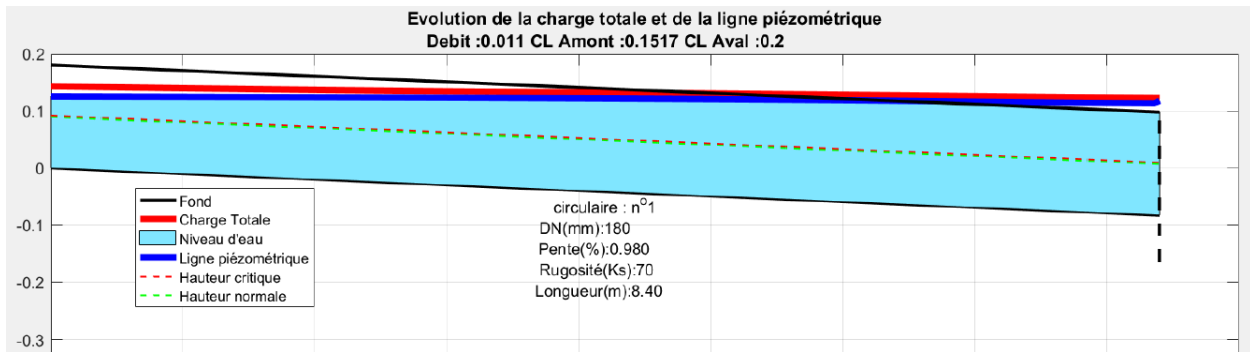


Figure 12: Cas 2 : Fonctionnement noyé

La **Figure 12** présente quant à elle un écoulement noyé par l'aval (Cas 2). En effet, le niveau d'eau dans le milieu naturel est suffisamment important pour remonter la ligne d'eau dans la conduite de décharge. Par conséquent, l'écoulement est fluvial. Le débit est fonction de la hauteur dans la bêche et de la hauteur dans le cours d'eau.

Pour ce qui est de la mise en charge, on différencie deux cas de figure :

- Une mise en charge due à un débit important en amont de l'engouffrement (cf. **Figure 13**). L'écoulement se fait à « gueule bée » ; le débit est alors uniquement fonction du niveau dans la bêche.
- Une mise en charge totale, due à la fois au débit important et au haut niveau d'eau dans le milieu récepteur (cf. **Figure 14**). Le débit est fonction du niveau dans la bêche et du niveau dans le cours d'eau.

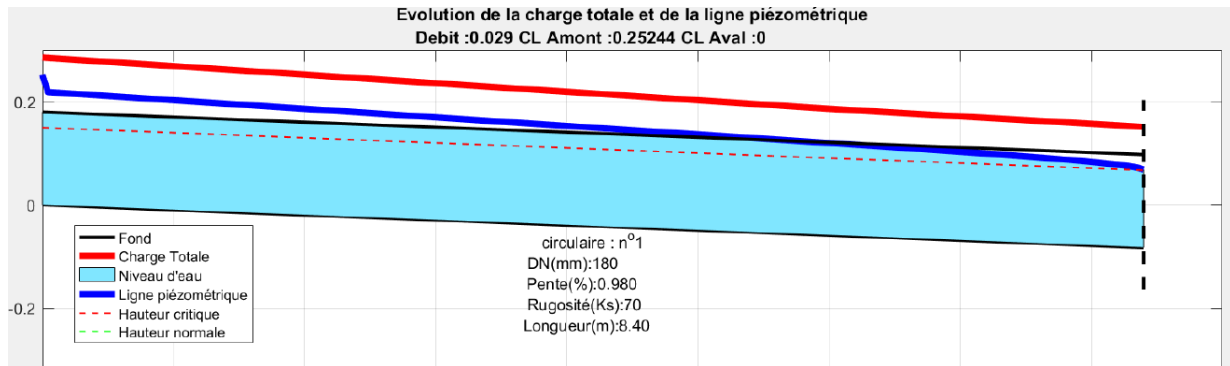


Figure 13: Cas 1bis : Fonctionnement partiellement en charge

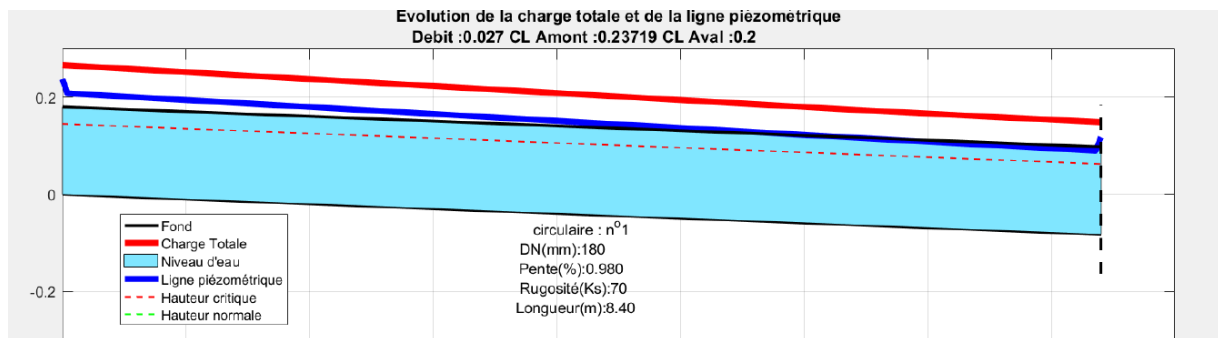


Figure 14: Cas 3 : Fonctionnement totalement en charge

Le logigramme suivant (cf. **Figure 15**) permet de synthétiser la démarche à adopter pour l'évaluation du débit en fonction de la hauteur PR mesurée au niveau de la chambre de déversement et CL la hauteur mesurée dans le milieu naturel. Ce logigramme, d'abord un peu difficile, comprend la totalité des conditions susceptibles de se produire. Il est destiné à être intégré au logiciel de supervision.

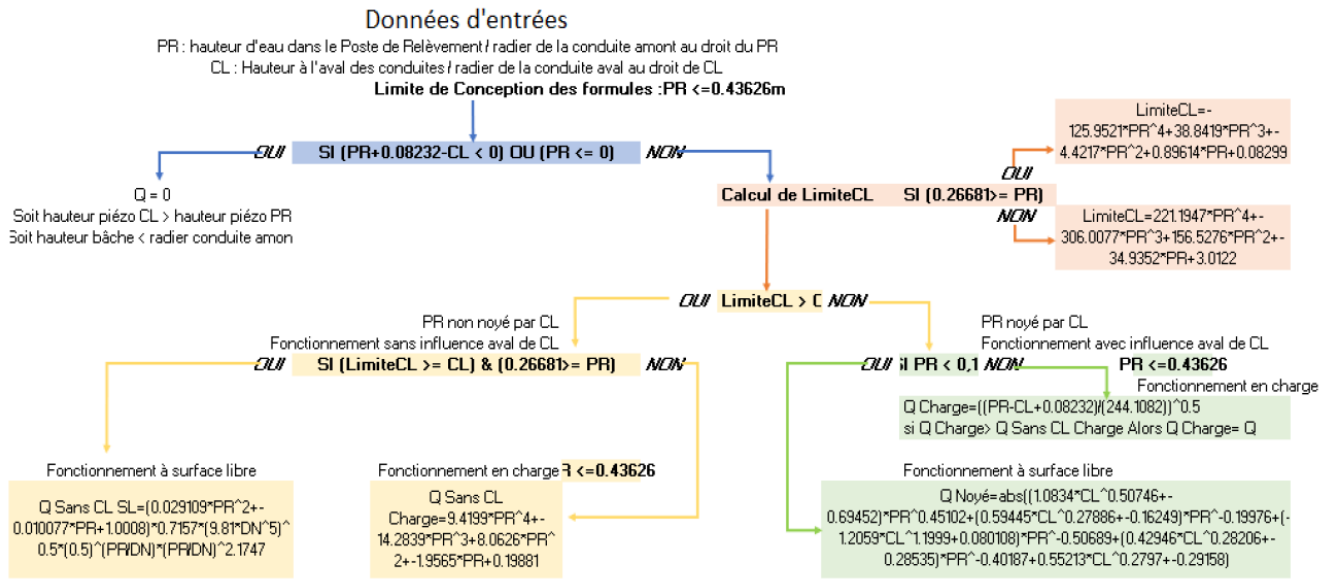


Figure 15: Logigramme d'analyse des hauteurs mesurées en vue la définition de la loi hauteur-débit correspondante

3.1.4. Travaux connexes et incertitudes

Aménagements connexes

Afin d'accompagner l'écoulement et limiter les perturbations de la surface libre, un coude à 90° doit être mis en place en sortie de la conduite d'arrivée et prolongé jusqu'à un niveau inférieur à la cote du trop-plein (de 20 cm environ).

Evaluation de l'incertitude

Pour une loi COACHS, quand les différentes hypothèses sont validées et le fonctionnement du site n'est pas perturbé, l'incertitude liée à la loi est de 5% pour un fonctionnement dénoyé et d'environ 25% en cas de mise en charge. Cette incertitude peut devenir importante pour un fonctionnement noyé si la différence entre le niveau amont et aval est faible.

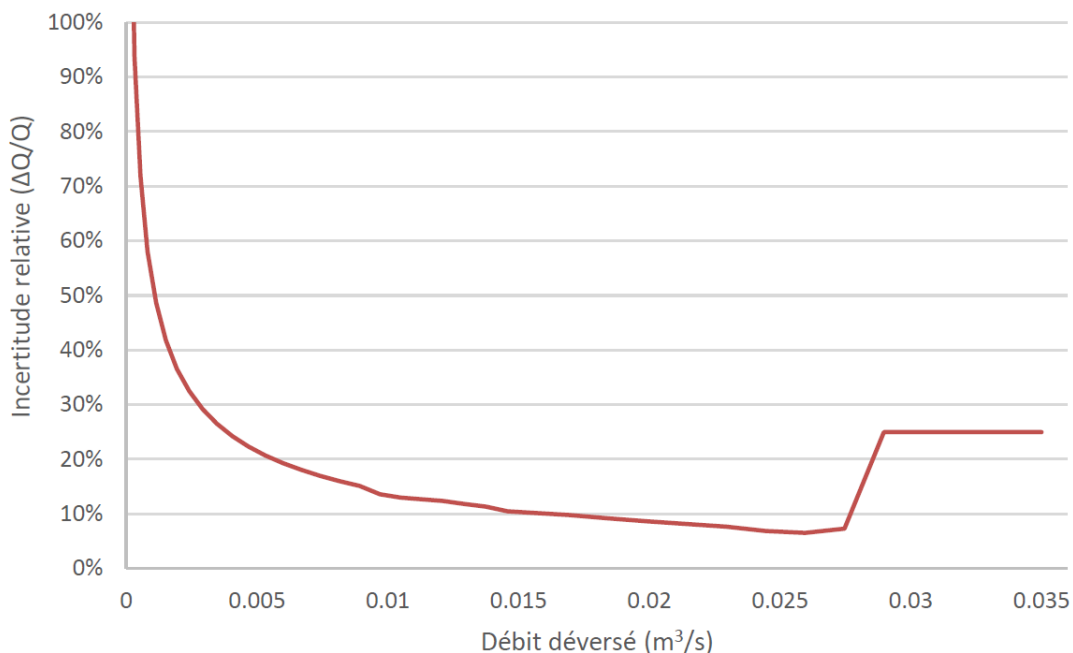


Figure 16: Incertitude globale sur le débit en fonction du débit déversé

Dans le cas où l'écoulement est dénoyé, cette incertitude est compatible avec les enjeux réglementaires de ce point qui exigent une mesure. L'occurrence d'un fonctionnement noyé permettra de statuer sur la précision de la mesure à l'échelle du volume annuel. Une analyse des premiers mois de données est prévue dans ce but après la mise en œuvre de la solution proposée ; elle permettra de calculer le volume annuel et la part correspondant à un écoulement noyé.

3.2. Point de déversement HUS-DO2 : Reprofilage de la crête de déversement

3.2.1. Descriptif de l'ouvrage

Le site d'étude est situé sur la commune de Hussigny-Godbrange, rue de la Gare. Il s'agit d'un double déversoir : le premier avec une crête frontale vers le bassin de pollution HUS-BO2 et le poste de vidange associé HUS-SR6 et le deuxième avec une lame latérale avec un rejet dans le milieu récepteur. Selon le CCTP, la charge polluante drainée par ce point est de **1 580 EH**, soit une charge inférieure à 120 kg DBO₅/j. Malgré une charge inférieure à 2 000 EH, la CAL souhaite disposer d'une estimation de débit (en raison de projets de nouvelles constructions sur la zone de collecte).

La figure ci-dessus illustre la géométrie de l'ouvrage à instrumenter, ainsi que les caractéristiques des principales canalisations (cf. [Figure 17](#)). Le QR code permet de visualiser une vidéo du site, filmée lors de la visite du terrain. Une fiche plus détaillée est fournie en [Annexe 6 : Fiche technique du point HUS-DO2](#).

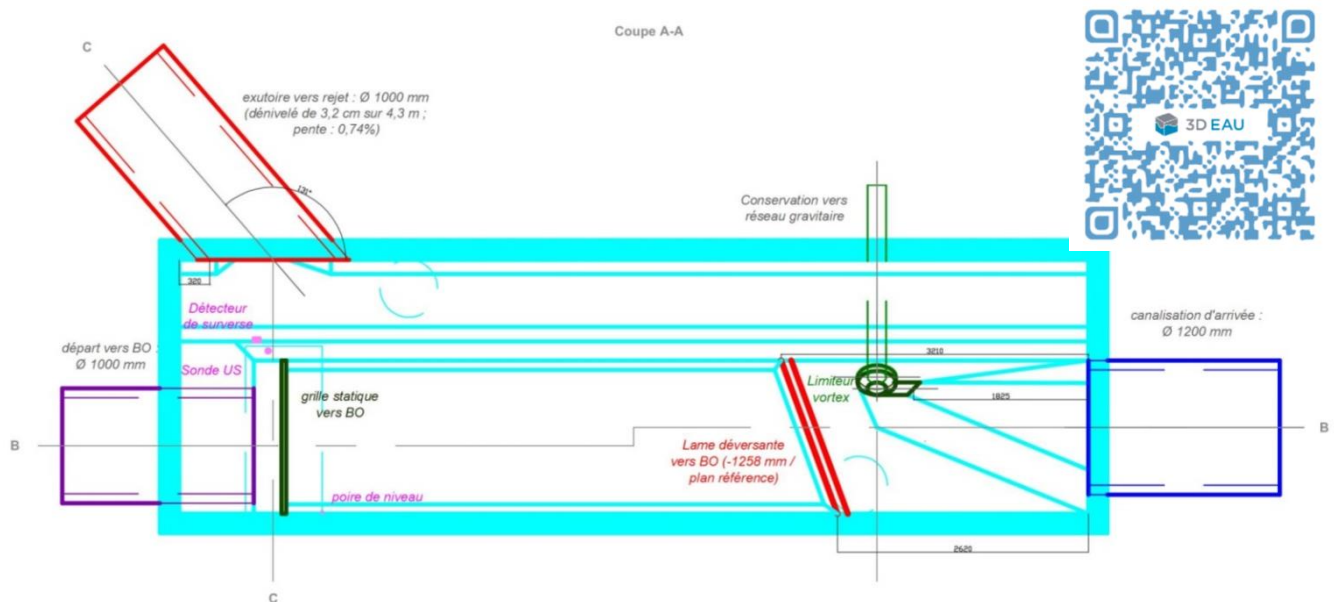


Figure 17: Géométrie du point de déversement HUS-DO2

3.2.2. Pré-diagnostic hydraulique de l'ouvrage

Pour le point de déversement HUS-DO2, l'enjeu est mineur avec une note de 1/10 (cf. [Annexe 9 : Calcul d'enjeu des points de déversement HUS-DO2 / GOR-DO14 / REH-DO9](#)).

Quant à l'analyse hydraulique, elle montre que ce site a les particularités suivantes :

- Ennoiment de la crête par l'aval :** En effet, pour les forts débits, l'engouffrement dans la conduite de décharge est susceptible de piloter l'écoulement et noyer la crête. Quantitativement, en appliquant une loi COACHS en régime dénoyé sur la conduite de décharge en DN1000, la crête est susceptible d'être noyée dès que le débit dépasse environ $0,52 \text{ m}^3/\text{s}$. En première approche avec une loi de seuil frontal, ce débit correspond à une lame déversante de 7 cm. Or, en analysant les données de mesure fournies par VEOLIA (cf. **Figure 18**), les lames déversantes peuvent aller jusqu'à 26 cm. Le risque d'un écoulement noyé ne peut donc pas être exclu.

Remarque : des modélisations hydrauliques 3D menées sur d'autres ouvrages ont montré que l'approche consistant à évaluer le débit d'engouffrement de la crête à partir de la loi COACHS était en général pessimiste (le débit d'engouffrement est sous-estimé). En effet, compte tenu du confinement à l'aval de crête ainsi que de l'accélération de l'écoulement en chutant depuis l'amont de la crête, le régime fluvial a du mal à prendre place entre la crête et l'engouffrement. Le calcul mené précédemment fournit cependant un ordre de grandeur (certes pessimiste) à garder en tête au moment de la proposition de solution pour ce point.

- Perturbation de l'écoulement :** Le nombre de Froude est représentatif de l'état de tranquillité d'un écoulement ; il se calcule avec la vitesse et la hauteur de l'écoulement. Une valeur inférieure à 0,20 correspond à un écoulement très bien tranquilisé. Pour un débit amont de $2,35 \text{ m}^3/\text{s}$ et une lame déversante de 0,26 m, le nombre de Froude est égal à 0,62. Si cette valeur est certes fluviale (inférieure à 1), elle est largement supérieure au seuil de 0,20. Des perturbations de la surface libre sont donc à attendre pour les débits moyens à forts.
- Lames déversantes très faibles :** Les données de mesures fournies par VEOLIA pour l'année 2018 sont illustrées ci-dessous (cf. **Figure 18**) ; elles mettent en évidence des valeurs très faibles qu'il sera difficile de mesurer avec précision.

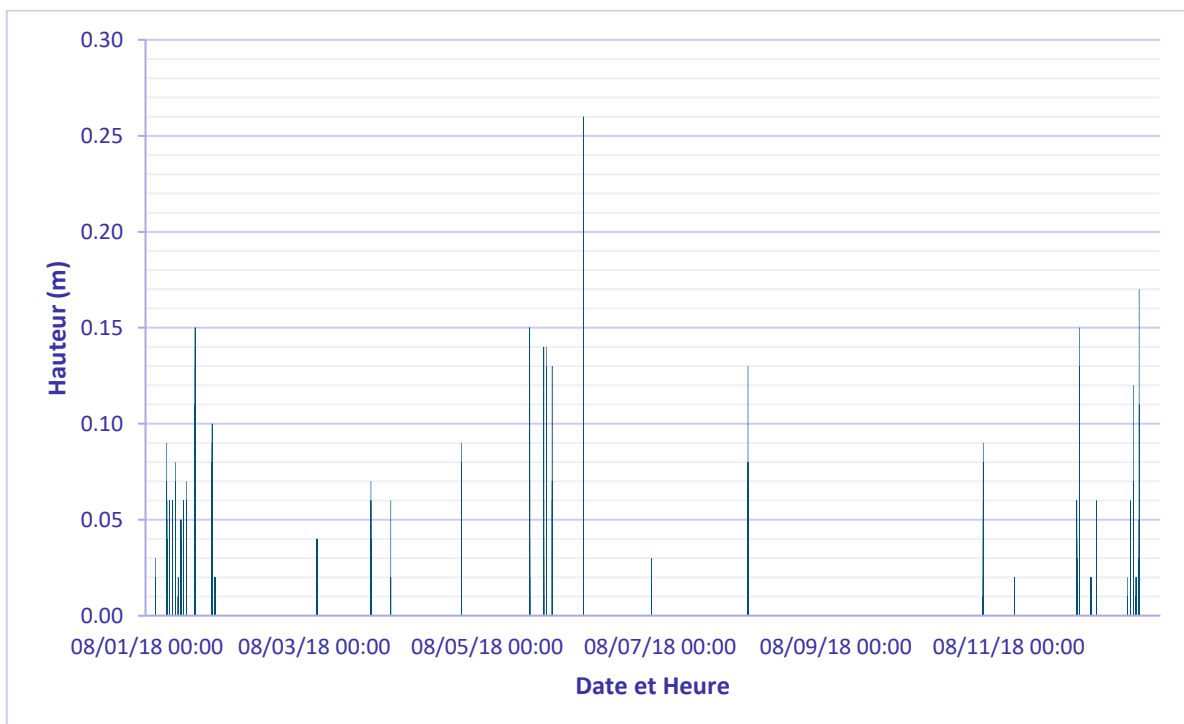


Figure 18: Données mesurées sur l'année 2018

Le graphique suivant illustre la contribution des différentes hauteurs au volume déversé. Cette évaluation est approximative car elle repose sur l'utilisation d'une loi de seuil frontal pour l'évaluation du débit. Elle permet cependant sans ambiguïté de conclure que la majorité du volume déversé (de

l'ordre de 80% à 90%) est apportée par des lames déversantes inférieures à 10 cm ; 30% à 50% du volume est même apporté par des lames déversantes inférieures à 5cm. De telles hauteurs ne peuvent pas être mesurées avec précision, principalement du fait de l'incertitude sur le zéro du capteur (et un peu de la précision intrinsèque du capteur sur la mesure du niveau d'eau) ; le graphique suivant montre ainsi que l'incertitude de mesure est supérieure à 30% lorsque les lames déversantes sont inférieures à 5 cm. La conséquence pour ce site est que le volume déversé annuellement risque d'être entaché d'une très forte incertitude.

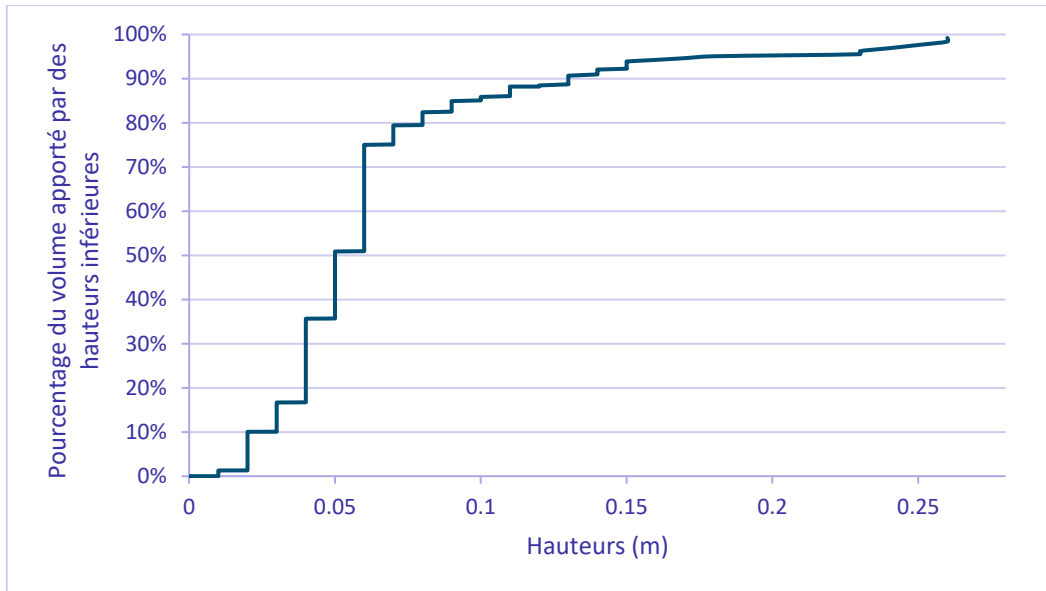


Figure 19: Pourcentage de volume apporté par la plage de hauteurs mesurées

Remarque : les données font apparaitre une précision au centimètre près, ce qui est assez grossier compte tenu des hauteurs mesurées. Il serait judicieux d'avoir des données présentant des valeurs au millimètre près.

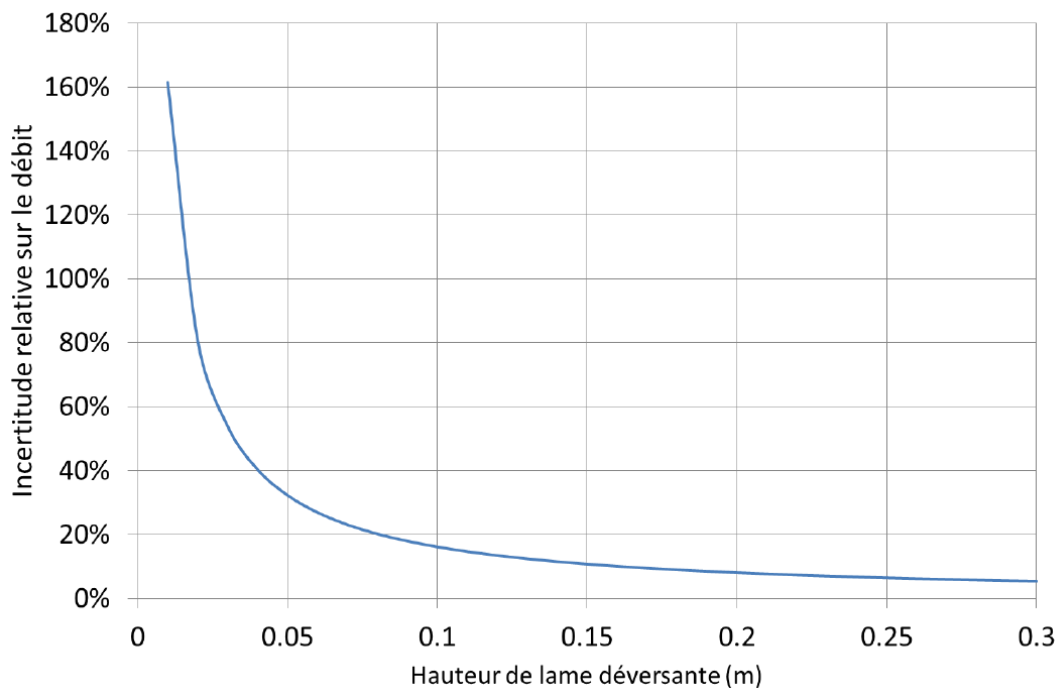


Figure 20. Incertitude de mesure en fonction de la hauteur de lame déversante sous l'hypothèse d'une loi de seuil frontal – Source : (VAZQUEZ, et al., 2016)

En définitive, la synthèse de l'analyse hydraulique est fournie dans le tableau suivant :

Tableau 8: Synthèse de l'analyse hydraulique pour le point HUS-DO2

Critère 1	Régime d'écoulement torrentiel en amont ?	NON
Critère 2	Risque de ressaut hydraulique dans l'ouvrage ?	NON
Critère 3	Crête noyée par l'aval ?	OUI
Critère 4	Perturbation par un coude à l'amont ?	NON
Critère 5	Perturbation par la vitesse dans la conduite conservée ?	Possible
Critère 6	Écoulement très bien tranquilisé ?	NON
Critère 7	Incertitude compatible avec une mesure de qualité ?	NON

Au vu de la très longue crête et les lames déversantes assez faibles, **une fenêtre de déversement privilégié** est donc préconisée afin de minimiser l'incertitude de mesure. Un **changement d'emplacement** du capteur est également nécessaire. Ce dernier doit être reculé afin de disposer d'une mesure correcte (ne pas être dans la zone où l'écoulement s'accélère lorsqu'il y a déversement). Le zéro quant à lui doit être calé au niveau du point le plus bas de la crête déversante (le milieu du V).

***Remarque :** vu la catégorie réglementaire du point (qui n'est même pas soumis à estimation), la CAL aurait pu se contenter de la mesure imprécise sur la crête actuelle (et même en fait de rien du tout). Son choix d'en « faire plus » vient d'une volonté de vraie amélioration des mesures si celle-ci peut se faire dans un coût raisonnable. Ce choix est pertinent par rapport à la réglementation actuelle qui demande une obligation de résultat sur les volumes déversés au milieu récepteur.*

3.2.3. Etablissement de la loi hauteur(s)-débit

L'objectif de la fenêtre de déversement privilégié est de redimensionner la crête de façon à disposer d'une lame déversante suffisamment importante pour les débits courants (80% du volume déversé doit se faire par la fenêtre privilégiée). L'incertitude de mesure sera ainsi suffisamment faible pour disposer d'une mesure de qualité. L'aménagement proposé se compose d'un **seuil en V arrondi** dont le point bas est 5 cm au-dessus de la crête actuelle. Ce type de dispositif a fait l'objet d'une procédure de dimensionnement élaborée par 3D EAU. Cette procédure permet de définir les dimensions du seuil afin d'atteindre le fonctionnement souhaité (par exemple une lame déversante minimale pour un débit donné).

Néanmoins, la fenêtre de déversement préférentiel augmente la hauteur de lame déversante. Cette augmentation au niveau du déversoir va avoir une incidence sur la ligne d'eau amont. Le dimensionnement du seuil doit donc prendre en compte le risque de débordement. En absence de données concernant le débit décennal et la capacité hydraulique du réseau amont, le calcul est fait approximativement de telle manière à ne pas dépasser une surélévation de 20 cm pour les débits les plus courants ; cette valeur de 20 cm étant jugée acceptable par la CAL et son exploitant au vu de leur expérience du réseau.

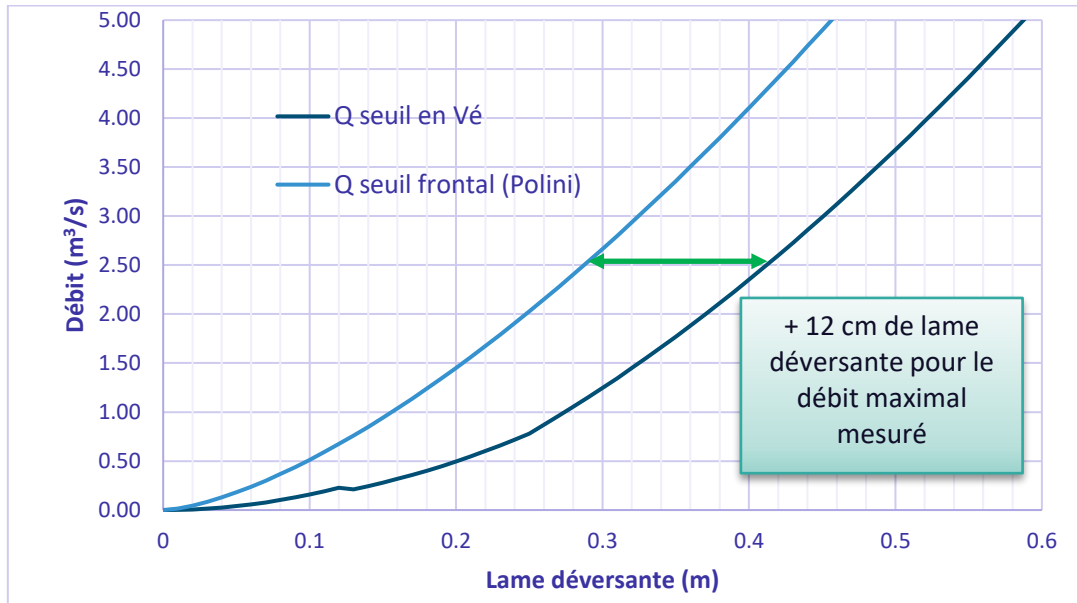


Figure 21: Comparaison approximative des lois hydraulique avant et après l'aménagement

Par ailleurs, comme anticipé lors de l'analyse hydraulique, l'engouffrement dans la conduite en DN1000 est susceptible de noyer la crête et modifier la loi de déversement à partir d'un certain débit. Celui-ci peut être estimé approximativement en traçant sur un même graphique la loi du seuil en V et la loi d'engouffrement. Il vaut environ $0,95 m^3/s$. Les débits supérieurs à ce débit représentant moins de 10% du volume déversé globalement au vu de la Figure 19, ce risque d'engouffrement de la crête est relativement peu impactant sur l'évaluation des débits.

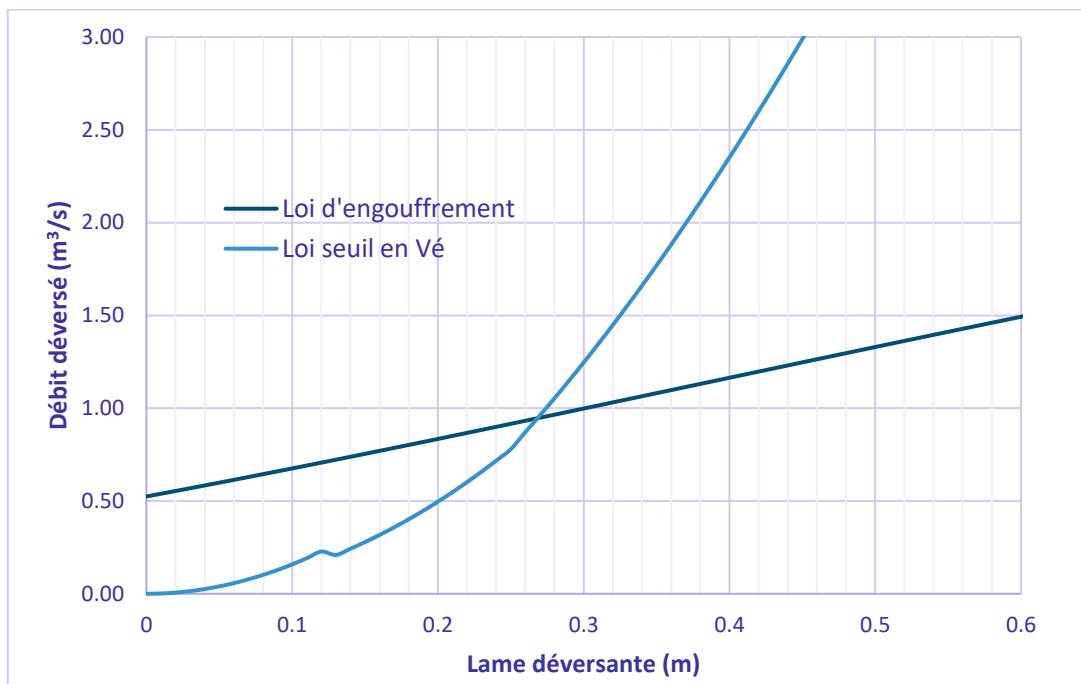


Figure 22: Comparaison des lois hydrauliques au niveau de l'engouffrement

En définitive, les lois permettant de calculer le débit déversé pour l'ensemble des configurations hydrauliques possibles au niveau du point HUS-DO2 sont synthétisées dans le tableau ci-dessous :

Tableau 9: Synthèse des lois hydrauliques du point HUS-DO2

Condition d'application	Fonctionnement hydraulique	Calcul du débit déversé
Pour $0 \leq h \leq 0,121$	Déversement par la partie circulaire du seuil	$Q = 11,2418 \times h^2 \times (0,728 + 0,0057 \times h) / (1 + 0,1033 \times h^{0,5}) ((1 - 0,0053 \times h)^{0,5} + (1 - 0,0185 \times h)^{0,5})$
Pour $0,121 < h \leq 0,251$	Déversement par la partie en V du seuil	$Q = 2,913 \times h^3 + 11,2621 \times h^2 + 0,14273 \times h - 0,00581$
Pour $0,251 < h \leq 0,27$	Déversement sur toute la longueur	$Q = -3,88866 \times h^3 + 15,76881 \times h^2 + 1,47164 \times h - 0,50991$
Pour $0,27 < h \leq 0,6$	Déversement sur toute la longueur + ennoisement de la crête	$Q = 0,7157 \times (9,81^{0,5}) \times (0,5^{(h+0,626)}) \times ((h + 0,626)^{2,1747})$

Remarque : La lame déversante est la hauteur d'eau en amont de la crête, référencée par rapport au point le plus bas du seuil en V. Elle est notée h et est exprimée en [m]. Le débit déversé est exprimé en [m³/s].

Cette loi n'est valable que pour des hauteurs inférieures à 0,6 m (ce qui correspond à un débit déversé de 1,5 m³/s). Au-delà de cette valeur, la conduite déversée fonctionne en charge. L'analyse des données montre que 95% du volume déversé est apporté par des débits inférieurs à cette limite. Ainsi la limite de 0,6 m s'avère suffisante au vu de l'enjeu du point HUS-DO2. Des hauteurs de déversements plus importantes ne seront mesurées que lors d'événements pluvieux extrêmes, ce qui ne rentre pas dans le cadre de l'autosurveillance. En fonction de l'analyse des données qui sera menée après quelques mois de fonctionnement, la loi pourra éventuellement être étendue afin de prendre en compte le cas d'un fonctionnement en charge.

3.2.4. Aménagements connexes

En complément de l'instrumentation de l'ouvrage, il est nécessaire de construire le seuil en V selon le plan ci-dessous (cf. Figure 23).

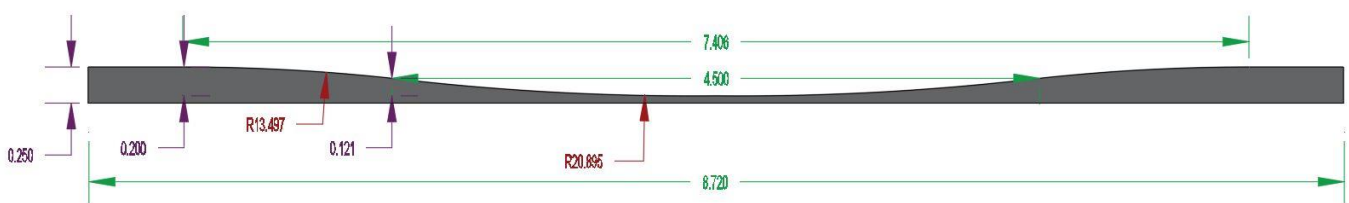


Figure 23: Géométrie et dimensions du seuil en V préconisé

Ce plan correspond à la partie qui doit être fixée sur la crête actuelle afin d'assurer le bon fonctionnement hydraulique. Néanmoins, il est nécessaire de rappeler que l'entreprise des travaux aura le soin d'adapter ce plan aux contraintes du site, en rallongeant la crête verticalement afin de pouvoir la fixer sur la crête actuelle et en la tronquant horizontalement pour mettre des points d'attaches sur les côtés.

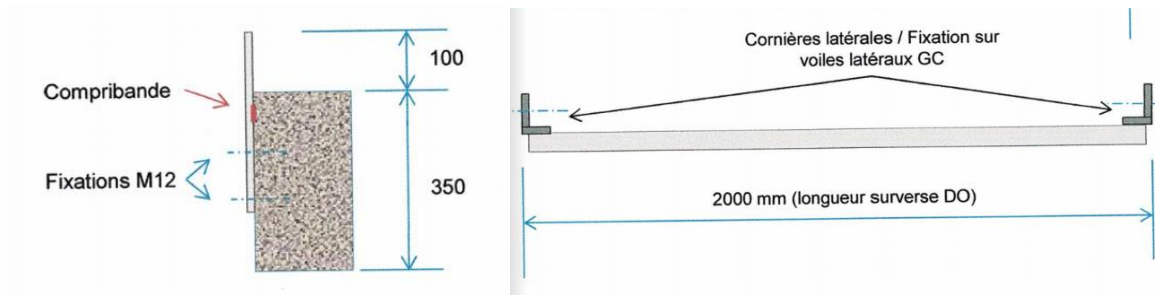


Figure 24: Exemple de fixation d'une lame inox sur une crête – Source : Saint Etienne Métropole

3.3. Point de déversement REH-DO9 : Modélisation 3D

3.3.1. Descriptif de l'ouvrage

Le site d'étude est situé sur la commune de Réhon, en rive gauche de la Chiers. Il s'agit d'un trop-plein avec un clapet anti-retour à son amont. Selon le CCTP, la charge polluante drainée par ce point est de **35 310 EH**, soit une charge supérieure à 600 kg DBO₅/j. Selon l' **(Arrêté du 21 juillet 2015)**, ce site est soumis à autosurveillance, le débit déversé doit être mesuré.

La figure ci-dessous illustre la géométrie de l'ouvrage à instrumenter, ainsi que les caractéristiques des principales canalisations (cf. **Figure 25**). Les QR codes permettent de visualiser des vidéos du site, filmées lors de la visite du terrain. Une fiche plus détaillée est fournie en **Annexe 8 : Fiche technique du point REH-DO9**.



Figure 25: Géométrie du point REH-DO9 (Vue de dessus et de face)

Cet ouvrage présente une **configuration très particulière**. L'écoulement déversé provient de la conduite avec le clapet anti-retour pour arriver dans l'ouvrage proprement dit. Un « caisson de déversement » fait office de seuil avant déversement vers le cours d'eau récepteur, en l'occurrence la Chiers.

3.3.2. Pré-diagnostic hydraulique de l'ouvrage

Avec une note de 7/10, l'enjeu de ce déversoir d'orage est modéré (cf. **Annexe 9 : Calcul d'enjeu des points de déversement HUS-DO2 / GOR-DO14 / REH-DO9**).

Son analyse hydraulique montre que la présence du clapet anti-retour, relativement lourd, est susceptible de perturber la surface libre en amont du caisson de déversement.

Par ailleurs, à moins d'un milieu récepteur en forte crue, il est raisonnable de penser que la conduite de décharge ne peut pas être noyée par l'aval (et ce malgré la présence du clapet anti-retour). En revanche, le **seuil du caisson** utilisé pour la mesure est **susceptible d'être noyé par l'engouffrement dans la conduite de décharge en DN600 à son aval immédiat**. Une analogie avec le guide (**VAZQUEZ, et al., Novembre 2016**) permet d'estimer le débit à partir duquel la crête risque d'être noyée par l'engouffrement à environ 0,16 m³/s soit 560 m³/h (approche sécuritaire). Les traces d'eau dans l'ouvrage situées autour de 10 à 15 cm de lame déversante permettent d'évaluer le débit « maximum » à environ 0,1 m³/s (loi de seuil frontal en première approche). Précisons cependant que le niveau d'eau peut monter beaucoup plus haut selon la CAL.

Remarque : le capteur de niveau en amont du caisson peut être maintenu pour mesurer la lame déversante. Néanmoins, il est situé trop près de la crête (probablement dans la zone d'accélération de l'écoulement) et devra donc être déplacé pour disposer d'une mesure correcte.

La synthèse de l'analyse hydraulique est fournie dans le tableau suivant :

Tableau 10: Synthèse de l'analyse hydraulique pour le point REH-DO9

Critère 1	Régime d'écoulement torrentiel en amont ?	OUI
Critère 2	Risque de ressaut hydraulique dans l'ouvrage ?	possible
Critère 3	Crête noyée par l'aval ?	NON
Critère 4	Perturbation par un coude à l'amont ?	OUI
Critère 5	Perturbation par la vitesse dans la conduite conservée ?	NON
Critère 6	Écoulement très bien tranquilisé ?	OUI
Critère 7	Incertitude compatible avec une mesure de qualité ?	?

Au vu de cette analyse hydraulique et de l'enjeu de l'ouvrage, il est recommandé d'établir la relation hauteur débit au moyen de la **modélisation 3D**.

3.3.3. Etablissement de la loi hauteur(s)-débit

Une modélisation hydraulique 3D a été mise en œuvre suite à l'analyse hydraulique de ce point. Elle est décrite ci-dessous.

3.3.3.1. Construction de la géométrie

L'ouvrage a été modélisé en 3D sur la base des relèves géométriques effectuées par 3D EAU et LOREAT lors de la visite du terrain. Toutes les singularités de l'ouvrage susceptibles d'avoir un impact hydraulique ont été reproduites dans le modèle 3D (ouverture du clapet anti-retour, l'engouffrement dans la conduite de décharge, le caisson en inox ...). La position du clapet a été évaluée pour chaque débit simulé en calculant un équilibre hydrostatique entre la hauteur d'eau amont, la hauteur d'eau aval et le poids du clapet sur base des mesures effectuées sur site au dynamomètre (mesure de la force nécessaire à l'ouverture du clapet pour différents angles d'ouverture).

La géométrie du modèle 3D est présentée dans la figure suivante :

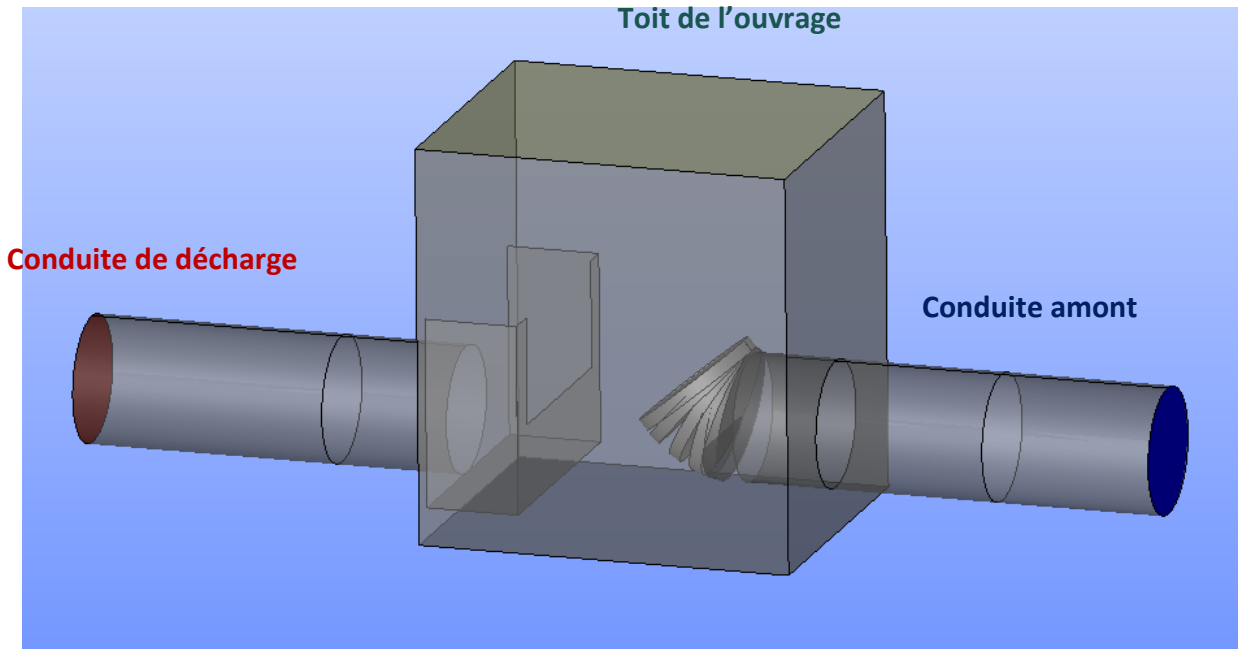


Figure 26: Géométrie en 3D du point REH-DO9

3.3.3.2. Création du maillage

Après la construction de la géométrie, le volume du modèle est découpé en cellules élémentaires de calcul dans lesquelles les équations de la mécanique des fluides sont résolues. C'est l'étape du maillage. Dans le cas de la géométrie du point REH-DO9, le maillage a été élaboré à l'aide de 460 000 cellules environ (cf. Figure 27) de taille allant de 4 cm à 0,5 cm. Le raffinement le plus fin (0,5 cm) correspond aux zones à enjeux hydrauliques forts telles que la crête de déversement. Ce maillage a été choisi de façon à avoir une incertitude numérique de l'ordre de 5%.

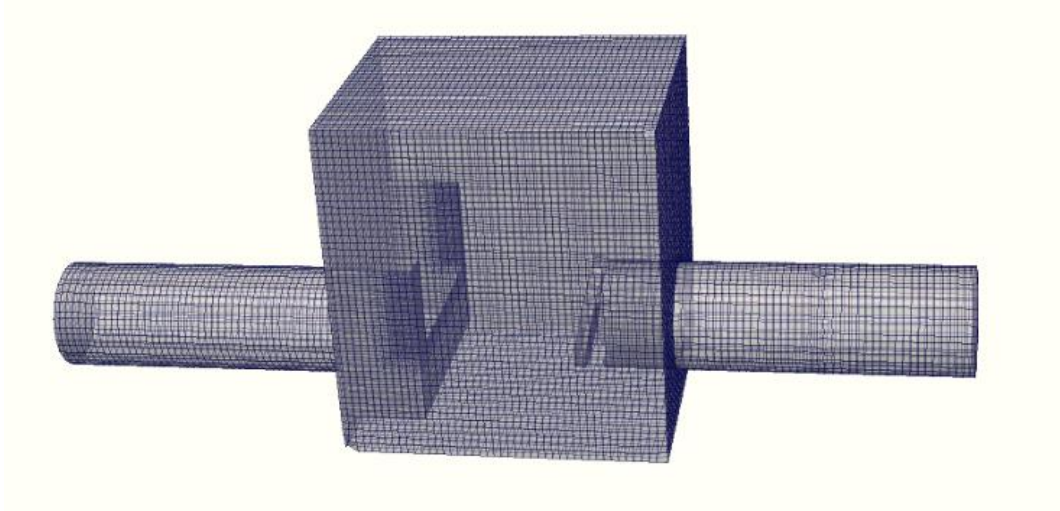


Figure 27: Maillage et raffinement autour de la crête déversante

3.3.3.3. Conditions aux limites

La prise en compte de l'environnement de l'ouvrage impose d'appliquer différentes conditions en entrée du déversoir d'orage afin de balayer toute la gamme de fonctionnement possible. Pour cela, différents paramètres sont à caler ; à savoir l'ouverture du clapet (en fonction de l'équilibre hydrostatique de ce dernier), la hauteur d'injection et le débit d'entrée. La sortie de la canalisation déversée ainsi que le toit de l'ouvrage sont à pression atmosphérique.

La liste des simulations effectuées pour calibrer la loi h/Q est récapitulée dans le tableau ci-dessous.

Tableau 11: Liste des simulations effectuées en 3D

Simulation	Débit (m ³ /s)	Ouverture du clapet
1	0,020	11°
2	0,056	19°
3	0,160	31°
4	0,452	43°
5	0,293	51°

3.3.3.4. Loi hauteur - débit

Une fois les simulations réalisées, leurs résultats sont extraits pour permettre l'élaboration de l'instrumentation (cf. [Annexe 10 : Extraction des résultats de la modélisation 3D pour le point REH-DO9](#)).

Ainsi, 4 modes de fonctionnement peuvent être identifiés en fonction de la lame déversante :

- Cas n°1 : Déversement uniquement par la fenêtre privilégiée de déversement du caisson.
- Cas n°2 : Déversement sur toute la longueur du caisson (les deux niveaux de crête).
- Cas n°3 : Ennoïement de la crête par la conduite d'engouffrement : dans ce mode de fonctionnement, l'ouvrage peut être assimilé à un trop-plein.
- Cas n°4 : Mise en charge de la décharge.

La courbe d'étalonnage du déversement calibrée sur les résultats des simulations est illustrée ci-dessous. Cette dernière est prolongée en utilisant une loi COACHS en dénoyé jusqu'à la limite de la mise en charge.

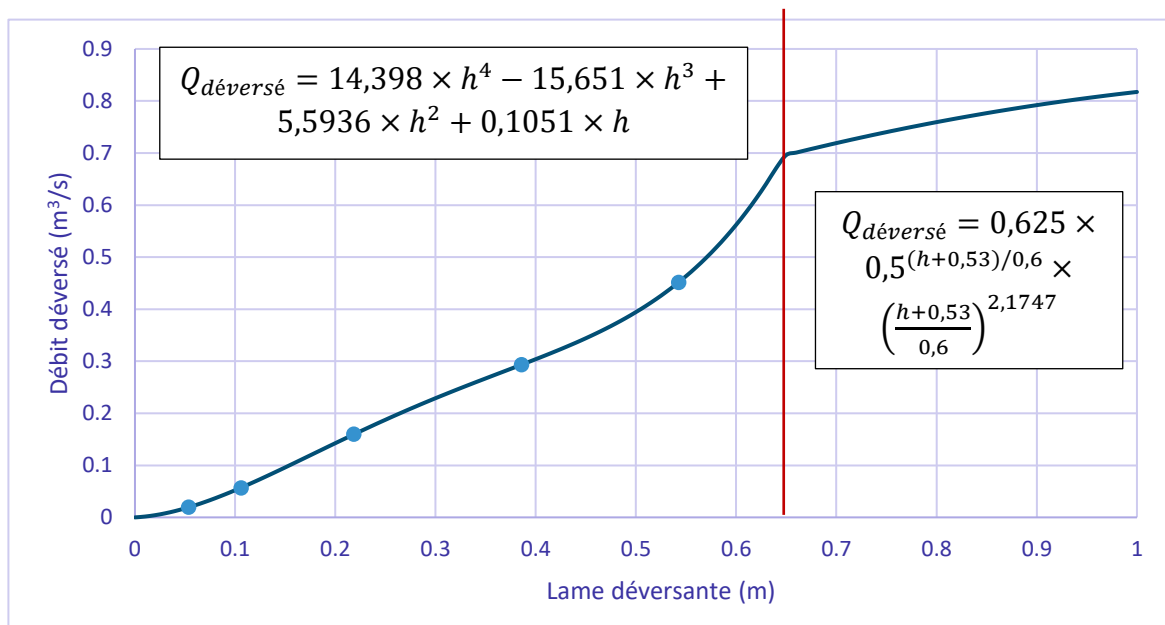


Figure 28: Loi hauteur débit du point REH-DO9 (les configurations simulées en 3D sont présentées par des points bleus)

3.3.4. Instrumentation de l'ouvrage

Le capteur dans la chambre de déversement peut être utilisé pour mesurer la lame déversante. Son emplacement actuel est fortement perturbé, notamment pour les forts débits déversés. Ainsi, un nouvel emplacement est proposé ci-dessous en fonction des résultats de la modélisation 3D (cf. [Annexe 11 :](#)

Choix de la position du capteur de niveau en fonction des résultats de la modélisation 3D). Le zéro du capteur doit être calé au même niveau que la crête déversante.

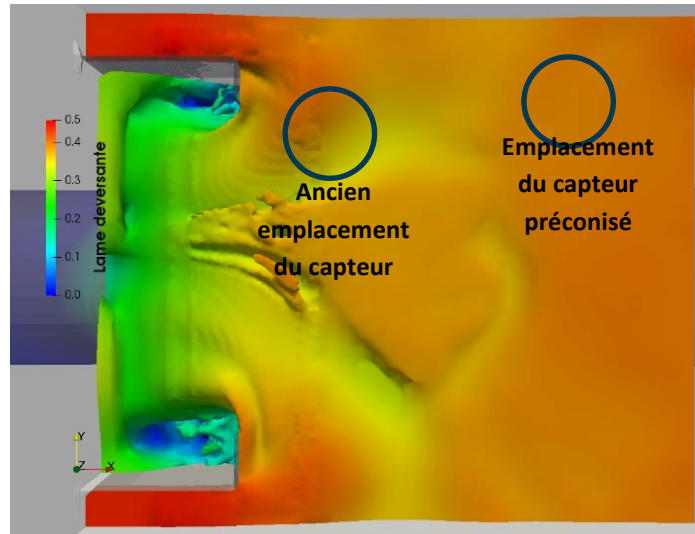


Figure 29: Position du capteur de niveau pour le point REH-DO9

3.3.5. Estimation de l'incertitude

La figure suivante illustre l'incertitude relative sur le débit pour le trop-plein REH-DO9. A l'exception des faibles débits, celle-ci est parfaitement compatible avec les enjeux de ce point soumis réglementairement à une mesure du débit déversé.

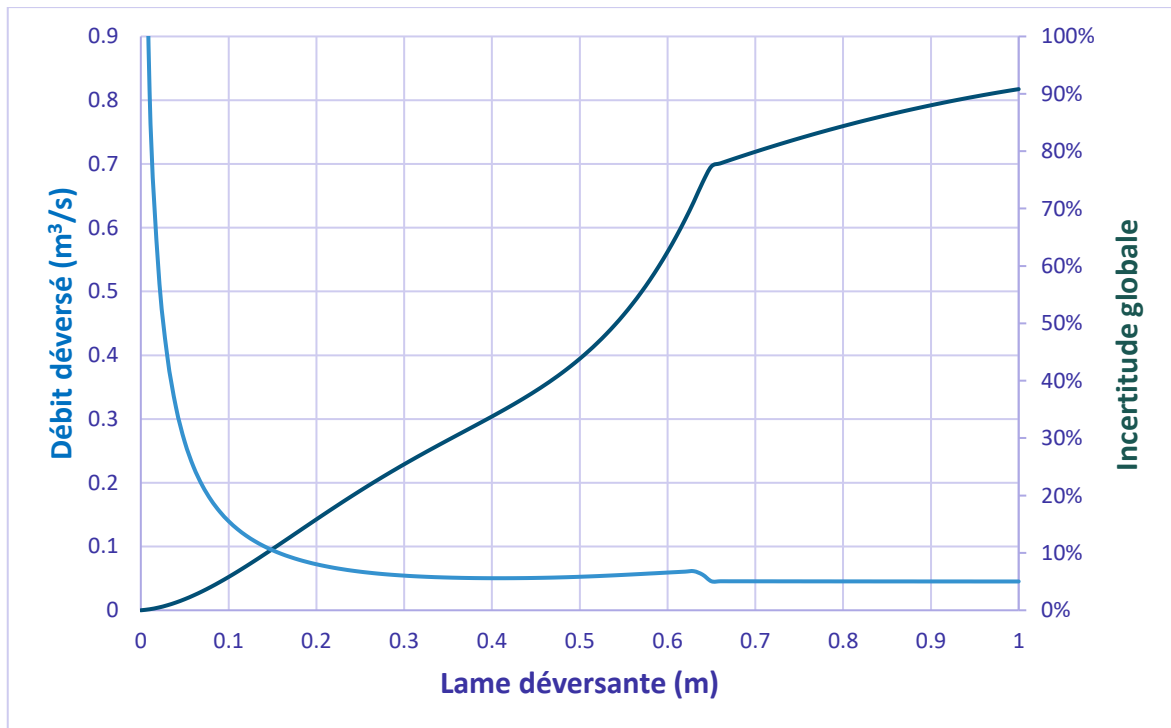


Figure 30: Incertitude globale sur le débit pour le point REH-DO9 en fonction de la lame déversante

Suite à cette présentation de 3 sites étudiés pour la Communauté d'Agglomération de Longwy, ce rapport s'attache à présent à traiter le second sujet de ce mémoire, en l'occurrence l'analyse du risque de vortex dans les stations de pompage.

4. Analyse du risque de vortex dans les chambres de pompage

4.1. Contexte et objectifs

La formation des vortex dans les stations de pompage est une problématique courante dans le domaine de l'ingénierie hydraulique. Elle se manifeste via des mouvements tourbillonnaires importants. D'un point de vue pratique, **ce phénomène est indésirable car il engendre des vibrations des divers éléments de la pompe, favorise le seuil de cavitation et diminue le rendement de l'installation** ; s'ajoutent à cela, le risque d'entraînement d'objets flottants et les bruits intenses lors du fonctionnement ... De **l'air peut également pénétrer dans la pompe**, réduisant ses performances, voire conduisant au désamorçage de l'installation. Pour ces différentes raisons, il s'avère primordial de s'intéresser à ce risque, le quantifier et définir les différents moyens pour l'éviter.



Figure 31: Vortex dans une centrale hydraulique – Source : (UNI - KL, 2012)

Ainsi, l'objectif de cette étude est tout d'abord d'établir **un panorama des différentes approches** qui sont utilisées aujourd'hui pour étudier ce phénomène. Ensuite, en s'intéressant particulièrement à l'activité de 3D EAU, le but est d'améliorer la **méthodologie actuelle développée par l'entreprise** utilisant la modélisation CFD et définir des pistes d'amélioration, notamment vis-à-vis du **paramétrage du modèle et la quantification du phénomène**. Concrètement, les objectifs sont les suivants :

- Définir des règles de bonnes pratiques en termes de maillage, modèle de turbulence et schéma numérique.
- Quantifier un paramètre explicatif du risque de vortex, a priori le Q critérium (qui sera défini par la suite).

4.2. Etat de l'art

4.2.1. Norme ANSI/ HI 9.8-1998

Aujourd'hui, la référence dans la conception des chambres de pompage est la norme américaine **(ANSI/HI 9.8-1998)**. Cette dernière permet de définir les critères à respecter dans la conception des

stations de pompage afin d'éviter la formation des vortex (**Annexe 13 : Recommandations de la norme ANSI/HI 9,8-1998 pour la conception des chambres de pompage**). Cette norme décrit aussi des designs réputés propices à l'apparition de vortex qui sont à éviter ; ainsi que des designs réputés favorables à l'évitement de ces phénomènes.

4.2.1.1. Types de vortex

Deux types de structures sont différenciés. Les vortex de surface naissent à partir de la surface libre, tandis que les vortex immergés ont lieu à proximité des parois. En s'approchant du centre du tourbillon, les vitesses de rotation augmentent, ce qui peut provoquer un entraînement d'air dans la dépression centrale. Par conséquent, en fonction de leur intensité, ces vortex sont classés en 6 et 3 catégories respectivement (cf. **Figure 32**).

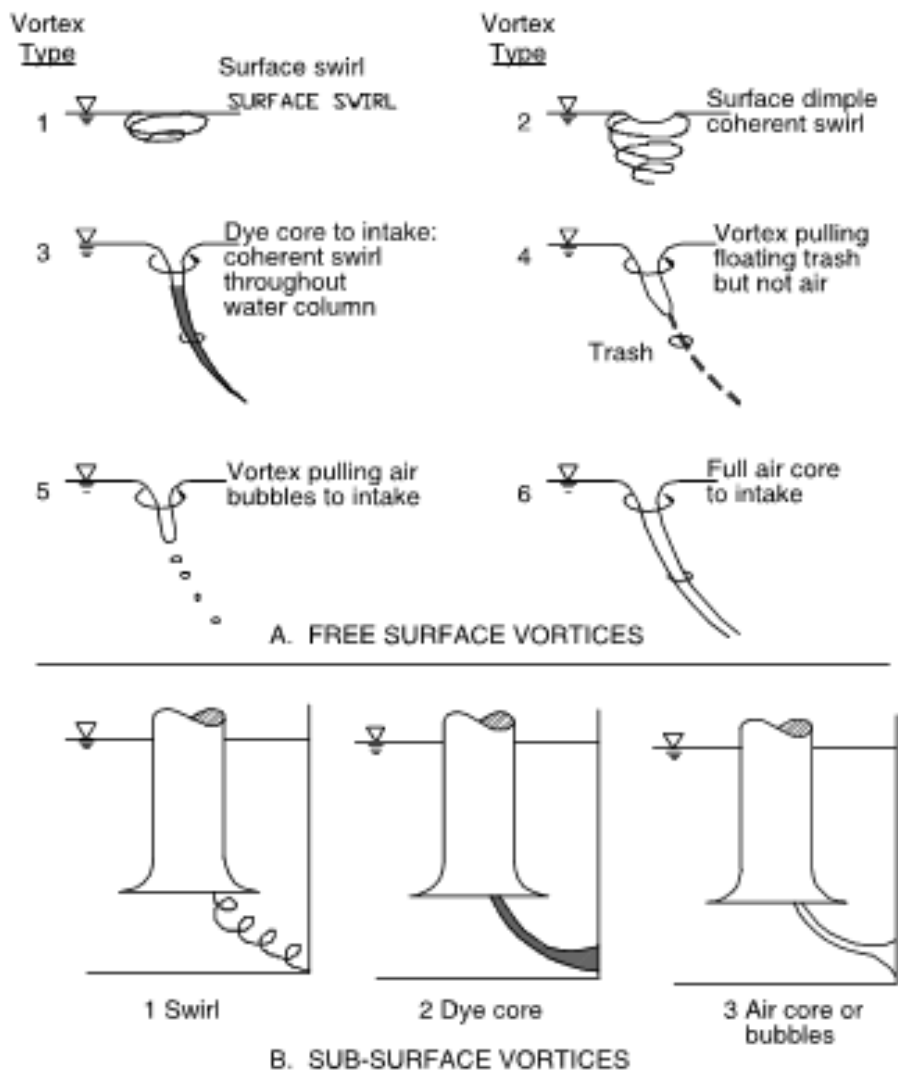


Figure 32: Classification des vortex selon la norme ANSI/HI

4.2.1.2. Critères à respecter dans la conception des chambres de pompage

Selon la norme (**ANSI/HI 9.8-1998**), la conception des chambres de pompage doit répondre aux critères ci-dessous

- L'entraînement d'air ne doit pas être observé, jamais, nulle part.
- Les vortex observés doivent être moins intenses que ceux qui produisent un "cœur cohérent". C'est à dire, les "vortex à surface libre" doivent être moins intenses que le type 3, et les "vortex immergés" moins intenses que le type 2 (cf. **Figure 32**). Les vortex à surface libre du type 3 et les vortex immergés

du type 2 sont acceptables seulement s'ils apparaissent pendant moins de 10% du temps ou pour un fonctionnement de pompe "transitoire".

- Le "Swirl Angle" ou « angle de pré-rotation » (cf. **Annexe 12 : Le « Swirl Angle »**) maximum, mesuré dans un temps entre 10 s et 30 s, ne doit pas dépasser la valeur de 5 degrés. Des valeurs jusqu'à 7 degrés sont acceptables si elles apparaissent pendant moins de 10% du temps de mesure.
- La moyenne temporelle de la vitesse observée dans des points de mesure à l'entrée du tuyau de la pompe doit avoir une variabilité maximale de 10% par rapport à la vitesse d'aspiration moyenne de la pompe. La fluctuation temporelle de ce point de mesure ne doit pas dépasser les 10%.

Remarque : ces conditions ont été rédigées en pensant à une caractérisation expérimentale des vortex, notamment des essais sur modèle réduit.

4.2.1.3. Niveau de submersion minimale

L'une des conditions les plus contraignantes de la norme **(ANSI/HI 9.8-1998)** est le **niveau de submersion minimale des pompes à garantir**. Ce dernier est défini via la formule ci-dessous (cf. **Équation 6**) issue de données expérimentales :

Équation 6: Niveau de submersion minimal selon la norme ANSI

$$S = D \times (1 + 2,3 \times Fr) = D \times \left(1 + \frac{2,3 V}{\sqrt{g D}} \right)$$

Avec : **S** hauteur d'immersion (m)

D le diamètre à l'entrée de la conduite d'aspiration (m)

Fr le nombre de Froude

V la vitesse d'aspiration (m/s)

g l'accélération gravitationnelle (en m/s²)

Ainsi, en considérant une conduite en DN500 et une vitesse d'aspiration de 1 m/s (ordre de grandeur des études réalisées par 3D EAU), la hauteur de submersion minimale est de l'ordre d'un mètre. Cette valeur peut être contraignante notamment en termes de marnage de l'eau dans la bêche.

⇒ **Pour les conceptions non standardisées, la norme américaine recommande de procéder à des essais dans un modèle physique.**

4.2.2. Modèles réduits

Des études sur modèles réduits sont régulièrement menées pour valider/optimiser le design de stations de pompage de grande taille. Cette approche est recommandée par la norme **(ANSI/HI 9.8-1998)**. Le principe consiste à reproduire la géométrie de la bêche à une échelle donnée (par exemple 1:10 ou 1:30) et à procéder à des mesures dans le modèle réduit pour s'assurer avant construction de la bêche de son fonctionnement à l'échelle 1. Le principal enjeu d'un modèle réduit est de garantir que les phénomènes qui s'y produisent sont les mêmes qu'à échelle 1. Cela passe par le respect de conditions sur les nombres adimensionnels hydrauliquement caractéristiques de l'écoulement.

4.2.2.1. Nombres adimensionnels

Selon la norme **(ANSI/HI 9.8-1998)**, la formation des vortex est conditionnée par **les nombres adimensionnels** suivants :

- Rapport $\frac{uD}{\Gamma}$ avec Γ circulation de l'écoulement (m^2/s), D diamètre (m), u vitesse (m/s) : ce nombre quantifie l'intensité d'un éventuel vortex.
- Nombre de Froude : $Fr = \frac{u}{\sqrt{gD}}$ avec g accélération gravitationnelle (m/s^2) : ce nombre quantifie l'inertie de l'écoulement par rapport aux forces de gravité.
- Nombre de Reynolds : $Re = \frac{uD}{\nu}$ avec ν viscosité cinématique de l'eau (m^2/s) : ce nombre quantifie l'inertie de l'écoulement par rapport aux forces de viscosité.
- Submersion relative : $\frac{D}{h}$ avec h hauteur de submersion au-dessus de l'entrée de la pompe (m) : ce nombre représente la hauteur d'eau adimensionnée par le diamètre.
- Nombre de Weber : $We = \frac{\rho u^2 D}{\sigma}$ avec ρ masse volumique de l'eau (kg/m^3) et σ tension de surface entre l'eau et l'air (N/m) : ce nombre quantifie l'inertie de l'écoulement par rapport aux forces de tension de surface.

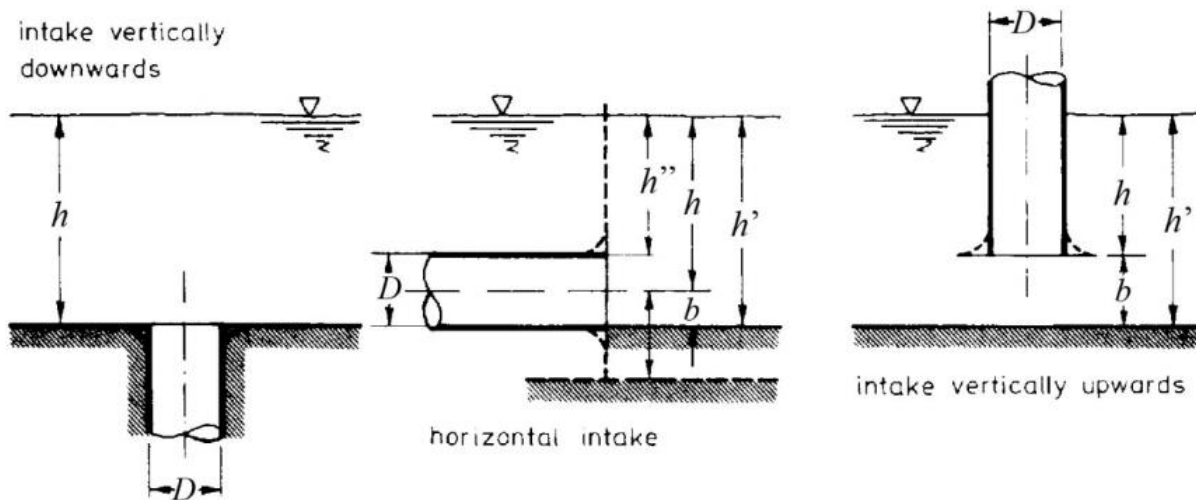


Figure 33: Définition de la hauteur de submersion et du diamètre en fonction de la disposition de la pompe d'aspiration

4.2.2.2. Dimensionnement du modèle

L'une des problématiques des modèles réduits est leur dimensionnement et le choix des éléments de similitude. Dans un modèle physique idéal, les nombres de Froude, de Reynolds, de Weber et la submersion relative sont identiques aux valeurs à l'échelle 1. Cela n'est cependant pas possible. En pratique, un modèle réduit de station de pompage est en général construit en similitude de Froude, similitude communément utilisée pour les modèles réduits d'écoulement à surface libre. Cela signifie que le débit dans le modèle réduit est calculé pour que le nombre de Froude soit le même dans le modèle réduit et dans l'ouvrage grandeur nature.

Cependant, compte tenu de la taille réduite du modèle physique, le nombre de Reynolds et le nombre de Weber seront plus faibles dans le modèle réduit que l'ouvrage grandeur nature. Cela signifie que les forces de viscosité et de tension de surface seront plus grandes dans le modèle physique. Cela demeure acceptable dans une certaine mesure, que la norme ANSI/HI 9.8-1998 quantifie de la façon suivante :

- $Re > 3 \times 10^4$, par sécurité : $Re > 6 \times 10^4$
- $We > 120$, par sécurité : $We > 240$

Remarque : la submersion relative, qui est quasiment un paramètre géométrique, peut en revanche être la même dans le modèle réduit et à l'échelle 1.

En définitive, en respectant l'ensemble de ces contraintes, le prototype permet selon la norme d'avoir une bonne représentation de l'ouvrage à l'échelle 1.

Malgré tout leur intérêt, les modèles physiques présentent quelques inconvénients :

- Les effets d'échelle (évoqués précédemment) qui peuvent conduire à devoir réaliser des modèles de grande taille.
- Leur coût qui peut être important (plusieurs dizaines à quelques centaines de milliers d'euros selon les modèles).
- Le temps nécessaire à la construction et aux tests.

⇒ La **modélisation numérique** constitue une approche complémentaire qui, sous réserve d'un modèle validé, s'affranchit du 1^{er} inconvénient des modèles physiques (pas d'effets d'échelle, le modèle numérique est construit à l'échelle 1). En termes de coût et de délai, la modélisation numérique peut aussi, selon la complexité du projet, se montrer très compétitive par rapport à la modélisation physique.

4.2.3. Travaux numériques

Le progrès dans le domaine de la mécanique des fluides numérique (CFD) a conduit à l'utilisation de cet outil pour l'analyse des vortex. La notion du **Q critérium** est communément utilisée pour quantifier l'intensité du phénomène. Ce paramètre traduisant la **vorticité de l'écoulement relative à son taux de cisaillement** est calculé en chaque point du modèle via l' **Équation 7 (HALLER, 2005)**.

Équation 7: Equation mathématique du Q critérium

$$Q = \frac{1}{2} [|\Omega|^2 - |S|^2]$$

Avec $S = \frac{1}{2} [\nabla v + (\nabla v)^T]$, le tenseur de cisaillement / déformation,

$\Omega = \frac{1}{2} [\nabla v - (\nabla v)^T]$, le tenseur de vorticité,

v le vecteur de vitesse,

Ainsi, quand le **Q critérium est positif**, la vorticité est importante par rapport au taux de cisaillement et par conséquent, il y a un risque de formation de vortex. Néanmoins, les valeurs absolues de Q-critérium sont à l'heure actuelle difficiles à interpréter car ils dépendent fortement des caractéristiques de l'écoulement et du maillage. Par conséquent, ce critère est uniquement intéressant à utiliser en relatif afin de comparer la force des recirculations les unes par rapport aux autres, et ainsi identifier les zones où le risque d'apparition de vortex est plus important. Ce point mérite d'être investigué pour faciliter l'utilisation de ce paramètre.

Une autre question fondamentale qui est traitée dans les travaux numériques est le **modèle de turbulence**. (**RAJENDRAN, et al., 1999**) ont analysé le nombre, l'emplacement et la structure générale du vortex en appliquant les équations RANS (approche classique utilisée dans les études CFD d'ingénierie, comme l'étude menée pour la Communauté d'Agglomération de Longwy). Les tourbillons calculés selon cette approche étaient généralement **plus grands et plus faibles** que prévu. Ainsi, les auteurs ont conclu que les différences sont dues à l'instabilité de l'écoulement et à l'insuffisance du modèle de turbulence choisi. Ensuite, (**CONSTANTINESCU, et al., 2000**) ont analysé le rôle du modèle de turbulence. Entre le modèle k – ε et le modèle k - ω, aucune différence majeure n'a été trouvée dans les lignes de courant et la vorticité du tourbillon.

Sur base de ces études et d'autres non présentés ici, 3D EAU a mis au point une méthodologie de modélisation des vortex dans les stations de pompage :

- La simulation 3D se fait en **monophasique** (seule la phase eau est représentée), avec la surface libre modélisée par une condition de symétrie. L'entraînement d'air en soit n'est pas modélisé. Cela serait possible sous réserve de l'utilisation d'une démarche adaptée à ces phénomènes (**GUIBU PEREIRA, Juin 2019**). L'entraînement d'air étant le stade ultime du dysfonctionnement d'une station de pompage, il n'est donc pas nécessaire d'aller jusque-là pour mettre en évidence que la station dysfonctionne. La simple présence de vortex de surface de type 3 est suffisante pour cela.
- Le phénomène de vortex est très instable dans le temps. Selon (**BERGE, 1966**), le vortex « apparaît, s'amplifie et disparaît après avoir parcouru sur la surface libre un chemin capricieux et variable. Il réapparaît ensuite en un nouvel emplacement ». Ainsi, le calcul doit être mené en régime **transitoire**.
- La simulation est menée sans modèle de turbulence afin d'éviter de dissiper les vortex par la viscosité turbulente introduite selon l'approche de Boussinesq.

L'annexe 14 présente les avantages et les inconvénients de cette approche (**Annexe 14 : Avantages et inconvénients de la méthodologie actuelle pour la simulation des vortex**).

L'inconvénient de cette approche est qu'elle est très sécuritaire. Sans le moindre modèle de turbulence, la dissipation est très faible, ce qui peut conduire à faire apparaître numériquement des vortex qui n'existent pas en réalité. En l'absence de valeurs de référence pour le Q critérium, la moindre structure tourbillonnaire est assimilée à un risque de vortex. L'enjeu actuel est donc d'affiner cette méthodologie pour éviter de conclure à un risque de vortex de façon trop sécuritaire (ce qui peut conduire à surdimensionner la bêche ou éventuellement à préconiser des aménagements non indispensables).

- ⇒ Pour cela, il est nécessaire de trouver des **données expérimentales obtenues dans des conditions de taille du même ordre de grandeur que les stations de pompage étudiées par 3D EAU** et qui permettront de valider la méthodologie.

4.2.4. Travaux expérimentaux

Différentes études ont été menées afin d'évaluer le risque de vortex (**MONJI, et al., 2010**) (**OKAMURA, et al., 2007**). Néanmoins, ces études se caractérisent par des paramètres hydrauliques qui s'éloignent des ordres de grandeur dans une station de pompage (le diamètre de la conduite d'aspiration est en général trop petit). Ainsi, l'un des enjeux de cette étude est de trouver de nouvelles données expérimentales à nombre de Reynolds comparable aux écoulements étudiés par 3D EAU (cf. **Annexe 15 : Synthèse des études réalisées par 3D EAU sur la thématique des vortex**).

Dans ce sens, (**MOLLER, 2013**) a réalisé des expériences sur l'entraînement d'air par les vortex avec un débit maximal de 0,51 m³/s et un diamètre de 500 mm. Par conséquent, le nombre de Reynolds maximum est évalué à 1,3 x 10⁶ ; ce qui correspond à **l'échelle des études réalisées par 3D EAU**.

Par conséquent, les expériences de (**MOLLER, 2013**) sont considérées comme base expérimentale pour répondre aux objectifs de cette étude. Ils permettent de caler les différents paramètres de la modélisation 3D et les comparer aux résultats de l'expérience.

4.3. Matériels et méthodes

4.3.1. Dispositif expérimental de Möller

En utilisant le dispositif expérimental ci-dessous (cf. [Figure 34](#)), ([MOLLER, 2013](#)) a réalisé un ensemble d'expériences sur la formation des vortex de surface en faisant varier les conditions hydrauliques : débit de pompage et submersion, ainsi que la taille des conduites d'aspiration (cf. [Annexe 16 : Descriptif du protocole expérimental de Möller](#)).

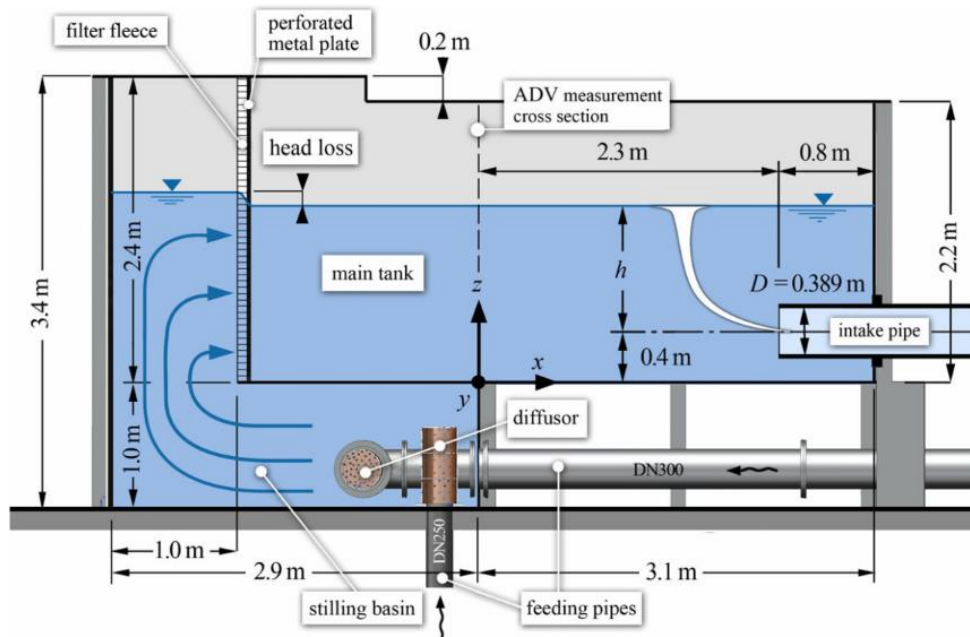


Figure 34: Dispositif expérimental utilisé par Möller lors de l'analyse des vortex

Remarque : l'objectif de l'étude de Möller n'était pas les stations de pompage mais les prises d'eau des barrages.

A l'issue de chaque expérience, différents paramètres sont extraits. Le graphique ci-dessous (cf. [Figure 35](#)) présente la grille d'expériences avec l'occurrence d'entraînement d'air indiquée pour chaque diamètre d'aspiration. **La présence d'un symbole veut dire que l'entraînement d'air a eu lieu et a pu être mesuré.**

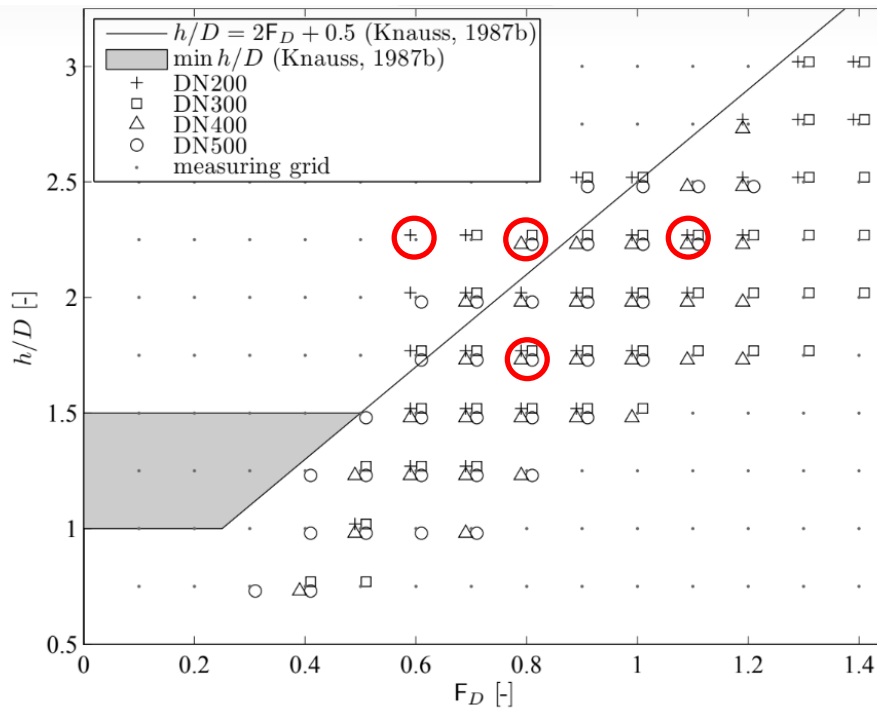


Figure 35: Grille des expériences menées par Möller⁵

4.3.2. Construction du modèle

L'expérience de Möller est reproduite numériquement en intégrant **l'ensemble des particularités géométriques susceptibles d'avoir un impact hydraulique** ; notamment le débord de la conduite d'aspiration. Ensuite, la géométrie est discrétisée en un nombre de cellules qui sont suffisamment petites pour assurer une bonne résolution des équations de la mécanique des fluides. Pour que le modèle numérique soit capable de bien identifier la formation des vortex, il est nécessaire que le **maillage soit raffiné à proximité de la conduite d'aspiration** (zone potentielle pour la formation du vortex). Ce point est discuté par la suite.

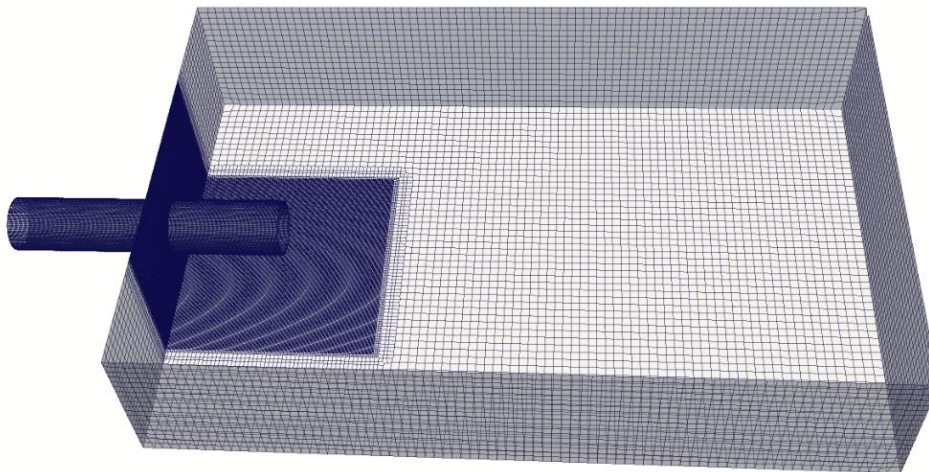


Figure 36: Géométrie modélisée en 3D et zone de raffinement du maillage

⁵ Les configurations entourées en rouge correspondent à celles retenues pour la modélisation 3D

Différentes conditions hydrauliques (nombre de Froude et de Reynolds), géométriques (submersion relative et diamètre de la conduite) et numériques (taille des mailles) ont été modélisées. Le tableau suivant permet de synthétiser l'ensemble des 18 simulations, leur paramétrage, ainsi que leurs résultats.

Tableau 12: Synthèse des simulations 3D pour la modélisation des vortex de surface

N°	Conditions & Résultats expérimentaux				Paramètres numériques		Résultats numériques		
	D (mm)	Fr	h/D	Vortex avec entraînement d'air	Paramétrage numérique	dx min (cm)	Visualisation de vortex de surface	Q critérium min	Q critérium max
1	400	1,1	2,25	OUI	1	1,25	NON		
2	400	1,1	2,25	OUI	1	1	NON		
3	400	1,1	2,25	OUI	1	0,75	OUI	10	15
4	400	1,1	2,25	OUI	2	1	NON		
5	400	1,1	2,25	OUI	3	1	NON		
6	400	1,1	2,25	OUI	1	0,56	OUI	30	1800
7	400	0,8	2,25	OUI	1	0,75	OUI	10	120
8	400	0,8	2,25	OUI	1	1	OUI	4	8
9	400	0,8	2,25	OUI	1	1,25	NON		
10	400	0,6	2,25	NON	1	0,75	OUI	6	75
11	400	0,6	2,25	NON	1	1	OUI	2	7
12	400	0,6	2,25	NON	1	1,25	OUI	0,5	2
13	400	0,8	1,75	OUI	1	0,75	OUI	40	95
14	400	0,8	1,75	OUI	1	1	OUI	10	110
15	400	0,8	1,75	OUI	1	1,25	OUI	11	18
16	500	0,8	1,75	OUI	1	0,75	OUI	20	110
17	500	0,8	1,75	OUI	1	1	OUI	20	65
18	500	0,8	1,75	OUI	1	1,25	OUI	12	55

Légende : Paramétrage numérique

- N° 1 : Sans modèle de turbulence et schéma numérique amont 2nd ordre
- N° 2 : Modèle de turbulence k- ω SST et schéma numérique amont 2nd ordre
- N° 3 : Sans modèle de turbulence et schéma numérique centré 2nd ordre

Le nombre total des mailles varie entre 1 million et 6 millions de cellules (avec exceptionnellement 16 millions de mailles pour la simulation n°6). Par conséquent, le temps de calcul moyen est de 5 jours par simulation sur une machine à 128 cœurs.

4.4. Traitement des résultats

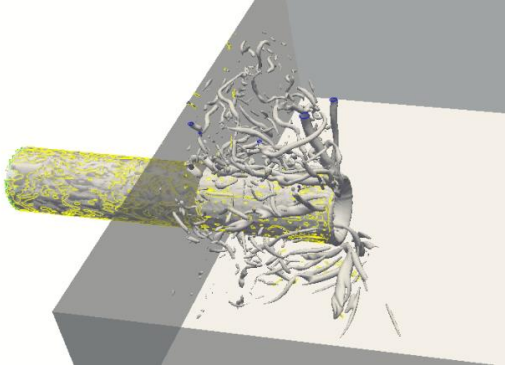
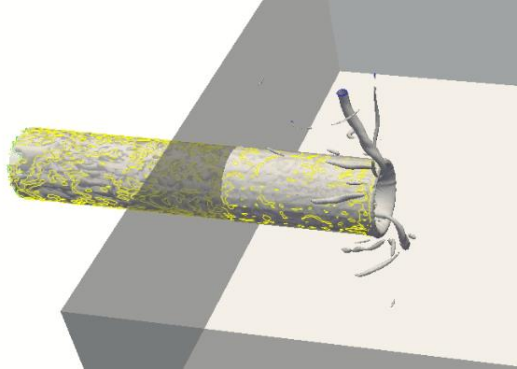
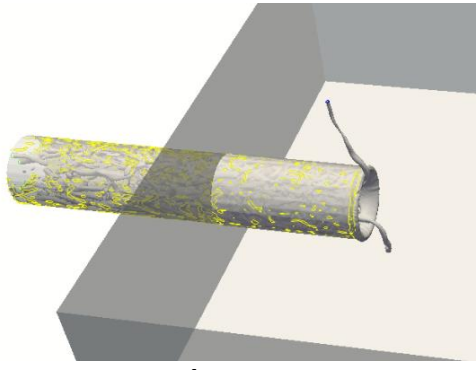
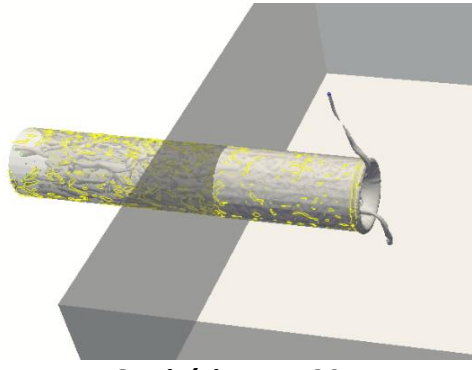
L'objectif de cette analyse est d'une part l'identification du « bon » paramétrage numérique ; notamment le modèle de turbulence et le schéma numérique de résolution, et d'autre part, l'analyse des résultats via le Q critérium afin d'établir des relations entre les nombres adimensionnels caractérisant l'écoulement dans la station de pompe et le niveau de raffinement du maillage.

Afin d'illustrer la méthodologie de traitement des résultats, la simulation n°7 est analysée ci-dessous à titre d'exemple.

Tout d'abord, le Q critérium est calculé en post-traitement en tout point de l'écoulement et en tout instant. Ce paramètre peut donc être visualisé à une valeur donnée et un instant donné. La figure

suivante montre par exemple les iso-valeurs du Q critérium à $t = 200$ s pour la simulation 7 ; les différentes vues correspondent à des iso-valeurs différentes.

Tableau 13: Analyse des iso surfaces du Q critérium (simulation n°7 à $t = 200$ s)

 <p style="text-align: center;">Q critérium = 2</p>	 <p style="text-align: center;">Q critérium = 10</p>
<p>Présence de « bruit » empêchant de mettre en évidence une structure cohérente</p>	<p>Identification d'une structure cohérente qui naît à la surface libre et part jusqu'à la conduite d'aspiration => Q critérium minimal</p>
 <p style="text-align: center;">Q critérium = 120</p>	 <p style="text-align: center;">Q critérium = 130</p>
<p>Valeur maximale qui permet de visualiser le vortex de surface sans avoir des structures « parasites » => Q critérium maximal</p>	<p>Le cœur du vortex est brisé : la structure ne représente plus une ligne continue de la surface libre à l'aspiration</p>

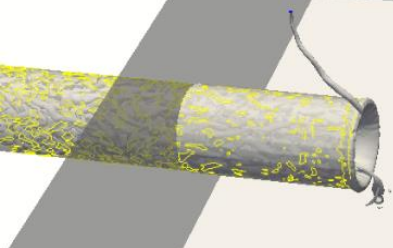
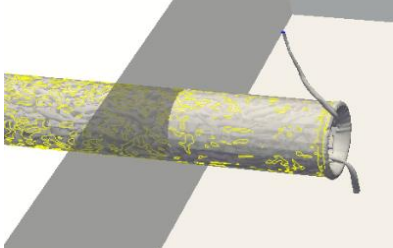
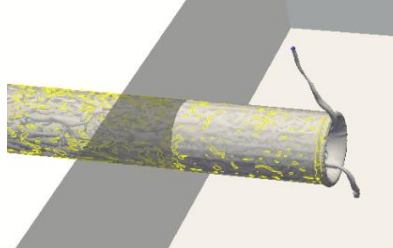
Par ailleurs l'une des problématiques d'analyse du Q critérium est la nature instable des vortex de surface, et par conséquent **la variabilité du Q critérium dans le temps**. Ainsi, pour définir la valeur minimale et la valeur maximale qui permettent de visualiser un vortex, différents pas de temps doivent être analysés. Ce travail d'analyse a été fait sur trois pas de temps distincts pour chaque simulation. Il en ressort :

- Un ordre de grandeur de valeur minimale pour observer une structure cohérente qui ne soit pas noyée dans le bruit
- Et un ordre de grandeur de valeur maximale au-delà de laquelle on ne devine plus aucune structure cohérente.



La figure suivante illustre ainsi cette approche pour l'évaluation du Q critérium maximum pour 3 instants dans le cas de la simulation 7. Une valeur allant de 65 à 120 est obtenue selon le pas de temps retenu. **Par conséquent, il convient d'avoir en tête que les valeurs maximales et minimales ne sont pas précises à l'unité près mais qu'elles constituent uniquement un ordre de grandeur.**

Tableau 14: Analyse de la variabilité du Q critérium dans le temps (simulation n°7)

t = 192 s	t = 195 s	t = 200 s
		
Q critérium maximal = 65	Q critérium maximal = 95	Q critérium maximal = 120

4.5. Analyse des résultats

Les résultats d'analyse du Q critérium des 18 simulations réalisées sont illustrées en annexe ((cf. [Annexe 17 : Résultats de la modélisation CFD des vortex](#))).

4.5.1. Schéma numérique

Afin d'éviter une génération artificielle de diffusion des champs de vitesse, ([GUIBU PEREIRA, Juin 2019](#)) recommande l'utilisation d'un schéma de second ordre biaisé à l'amont. Ce type de schéma est très stable et inconditionnellement borné. Or, il a l'inconvénient d'être fortement diffusif, chose qui nuit à la qualité des résultats ([HIRSCH, 2007](#)). Ainsi, dans l'optique d'améliorer la précision des simulations, la simulation n°5 a été lancée avec un schéma de second ordre centré qui est moins diffusif. Etant non-borné, ce type de schéma peut générer des pics des valeurs menant à la divergence du calcul. Pour remédier à ce problème, le calcul de la simulation n°5 fut initialisé par les résultats de la simulation n°1. Malgré cette précaution, le calcul a fini par diverger.

Selon ces essais, un schéma de second ordre centré n'est à ce jour pas suffisamment stable pour mener à bien ce type de calcul dans un contexte d'ingénierie. Par conséquent, le **schéma de second ordre amont est préconisé pour la modélisation des phénomènes de vortex**.

4.5.2. Modèle de turbulence

Comme déjà expliqué dans la partie [4.2.3](#), l'utilisation d'un modèle de turbulence n'est pas forcément adaptée à la modélisation des vortex. Néanmoins, étant donné que l'expérience de Möller considérait des vortex stables dans le temps, il s'avère intéressant de vérifier si un modèle de turbulence utilisant la méthode RANS permet de reproduire les vortex de surface dans ce cas. Ainsi, les résultats de deux simulations avec le même maillage ; à savoir la simulation n°2 (sans modèle de turbulence) et la simulation n°4 (avec modèle de turbulence k-omega SST) sont illustrés ci-dessous.

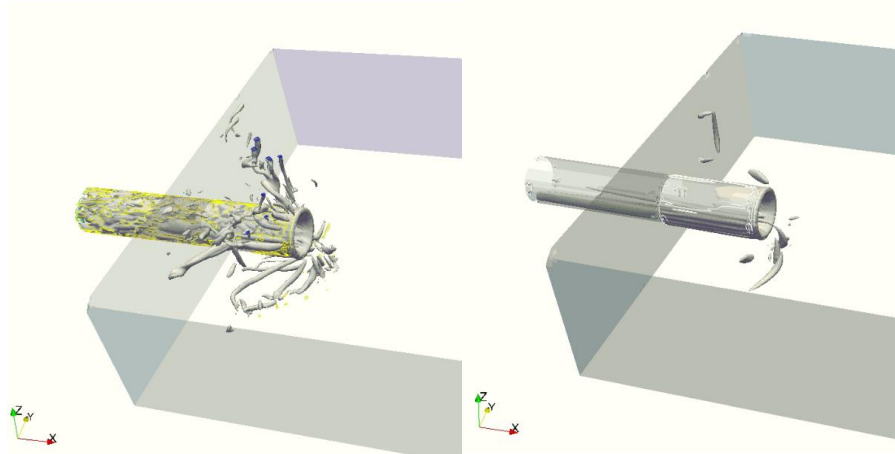


Figure 37: Visualisation d'un Q critérium = 2 pour les simulations 2 et 4 respectivement

La simulation avec un modèle de turbulence montre beaucoup moins de structures tourbillonnaires que la simulation sans modèle de turbulence, ce qui valide le fait qu'une approche RANS est fortement dissipatrice. Néanmoins, ces structures turbulentes ne naissent pas toutes à partir de la surface libre et ne peuvent pas forcément témoigner d'un potentiel vortex de surface. Cette analyse conclut qu'une **modélisation des vortex sans modèle de turbulence doit être privilégiée.**

Remarque : il conviendrait de procéder à cette même comparaison avec/sans modèle de turbulence pour un maillage plus fin (par exemple les mêmes conditions expérimentales que les simulations 2 et 4 mais avec un maillage de 0,75 cm).

4.5.3. Maillage Vs nombres adimensionnels

Le tableau ci-dessous synthétise les différents résultats afin de mettre en évidence les relations entre les nombres adimensionnels caractérisant l'écoulement dans la station de pompage, le niveau de raffinement du maillage et le Q critérium permettant d'identifier un vortex de surface (c'est la valeur maximale qui a été choisie pour cela).

Tableau 15: synthèse des résultats de la modélisation CFD des vortex (une croix signifie qu'aucun vortex de surface n'a été identifié)

Fr	Reynolds	h/D	Maillage (cm)	Q critérium max	N° Simulation	DN (mm)
1,1	6,38E+05	2,25	1,25	X	1	400
			1	X	2	
			0,75	15	3	
			0,56	1800	6	
0,8	4,64E+05	2,25	1,25	X	9	400
			1	8	8	
			0,75	120	7	
	1,75	1,25	18	15		
		1	110	14		
		0,75	170	13		
6,44E+05	1,75	1,25	55	18	500	
		1	65	17		
		0,75	110	16		
0,6	3,48E+05	2,25	1,25	2	12	400
			1	7	11	
			0,75	75	10	

✚ Choix du maillage

Pour les différentes simulations, le **Q critérium** maximal permettant de visualiser un éventuel vortex **augmente quand le maillage est de plus en plus raffiné**. Ceci s'explique par le fait que les gradients de vitesse sont mieux résolus pour les petites mailles ; un maillage fin permet donc de capter davantage de tourbillons. Un maillage de 0,75 cm s'avère ainsi suffisant pour les 18 simulations réalisées et permet de visualiser le vortex de surface lorsqu'il est présent. Un maillage plus fin (0,56 cm) permet d'obtenir des Q critérium importants et par conséquent une meilleure visualisation du vortex. Néanmoins, ce maillage demeure très contraignant en termes de nombre total des mailles (16 millions) et du temps de calcul qui est de 10 jours environ pour une condition hydraulique (sachant que la géométrie de Möller était relativement simple et plutôt de taille réduite par rapport à une vraie station de pompage).

On retiendra en conclusion **qu'une taille de maille de 0.75 cm permet de représenter les vortex de surface pour l'ensemble des conditions testées**, y compris les conditions dans lesquelles il n'y a pas d'entraînement d'air (simulations 10 à 12). Une telle taille revient à mettre une cinquantaine de cellules de calcul sur le diamètre de la conduite d'aspiration.

✚ Influence du nombre de Froude

L'état de l'art explicité précédemment a mis en évidence que **le risque de vortex (et donc leur intensité) augmente avec le nombre de Froude et diminue avec la submersion**. Ce comportement est retrouvé avec les résultats des simulations. En effet, en considérant une submersion relative de 2,25, le vortex est observé dès un maillage de 1 cm pour un nombre de Froude de 0,8 et dès un maillage de seulement 1,25 cm pour un nombre de Froude – plus faible – de 0,6. Cela peut s'interpréter en termes de turbulence : dans les simulations réalisées, les nombres de Froude faibles correspondent à des nombres de Reynolds faibles (corrélation des deux paramètres). Ainsi, quand **le Reynolds diminue, le spectre d'échelles de la turbulence devient plus petit et restreint**. Par conséquent, même un maillage grossier arrive à représenter une partie plus large du spectre de turbulence.

En considérant les simulations à une submersion relative de 2,25 et un maillage de 0,75 cm, le Q critérium augmente un peu quand le nombre de Reynolds augmente en passant de 75 (simulation 10) à 120 (simulation 7). La **Figure 35** montre que, pour la simulation 10, le vortex était trop faible qu'il n'a pas pu être mesuré. Par conséquent, ce constat découle de **l'intensité du phénomène qui augmente avec le nombre de Froude**. Néanmoins, pour la simulation 3 (même submersion relative et même maillage), le Q critérium maximal diminue. Ainsi, l'évolution du Q critérium se fait plutôt en « cloche » en **fonction du nombre de Froude** : pour les faibles vitesses d'aspiration, le Q critérium est faible, il augmente crescendo jusqu'à atteindre une valeur maximale et ensuite diminue pour les grandes vitesses d'aspiration.

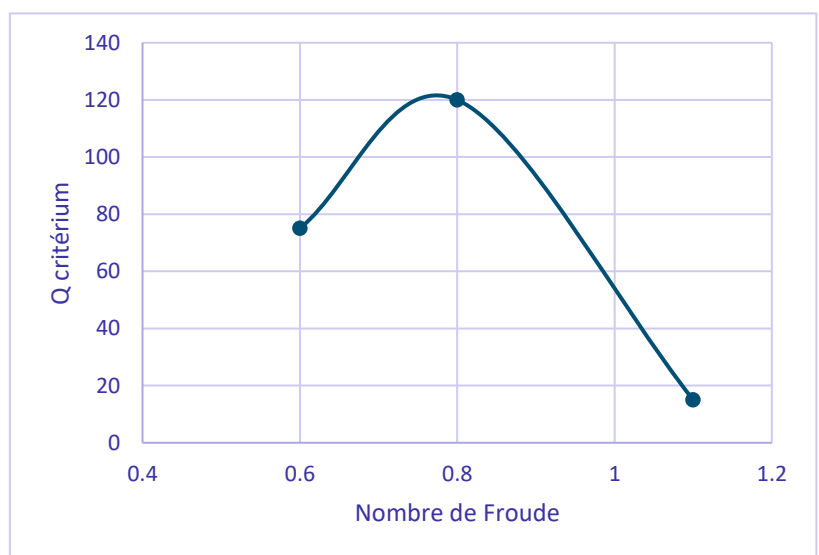


Figure 38: Evolution du Q critérium en fonction du nombre de Froude pour un maillage de 0,75 cm et une submersion relative de 2,25

Influence de la submersion relative

Par ailleurs, pour un nombre de Reynolds de $4,64 \times 10^5$, le Q critérium est plus important à une submersion de 1,75 et le vortex peut être identifié avec un maillage grossier, comparé à une simulation avec une submersion de 2,25. Ceci s'explique par le fait que **le phénomène de vortex et d'entraînement d'air devient plus important pour les faibles hauteurs de submersion** ; d'où la notion de submersion minimale imposée par la norme américaine.

Influence du diamètre de la conduite d'aspiration

En considérant la même vitesse d'aspiration, la même submersion relative et en augmentant le diamètre de 400 mm à 500 mm, le vortex est visible à partir de 1,25 cm et les ordres de grandeur du Q critérium sont les mêmes pour les deux configurations, sans pouvoir dégager une tendance en fonction du diamètre. **(MOLLER, 2013)** avait conclu dans son expérience que **les effets d'échelles étaient négligeables entre les simulations à DN400 et les simulations à DN500** ; le taux d'entraînement de l'air ne dépendait pas du diamètre. Les simulations réalisées ici aboutissent à la même conclusion.

4.6. Synthèse et perspectives

Cette analyse permet d'ores et déjà de fournir un paramétrage numérique qui permet de visualiser les vortex de surface en se basant sur les résultats d'expérience de Möller, ainsi que d'établir des relations entre les nombres adimensionnels, le maillage et le Q critérium. Tout d'abord les simulations doivent être paramétrées **sans modèle de turbulence et avec un schéma numérique amont** pour ne pas risquer de dissiper les vortex. Ensuite, la grille ci-dessous peut être utilisée pour dimensionner le maillage au niveau de la conduite d'aspiration.

Tableau 16: Tailles des mailles minimales en cm au niveau de l'aspiration en fonction du nombre de Froude et de la submersion relative

h/D \ Fr	-	0,6	0,8	1,1	+
+		< 1,25	< 1	< 0,75	< 0,75
2,25	> 1,25	1,25	1	0,75	< 0,75
1,75	> 1,25	> 1,25	1,25	1	< 1
-	> 1,25	> 1,25	> 1,25	> 1	

En considérant le maillage recommandé (le plus grossier et qui permet de visualiser un vortex avec risque d'entraînement d'air), les **Q critérium varient entre 2 et 20**. Ces ordres de grandeur peuvent être utilisés pour l'analyse des stations de pompage dont le diamètre d'aspiration est de 400 ou 500 mm. De façon plus globale (et moins différenciée), il faut une **cinquantaine de cellules de calcul sur le diamètre d'aspiration**.

Conclusion et perspectives

Ce travail de fin d'études m'a permis à la fois de traiter une mission d'ingénierie en mobilisant mes acquis pédagogiques et en acquérant des nouveaux, ainsi qu'une mission de recherche qui fait partie de mes objectifs professionnels.

L'étude d'instrumentation des déversoirs d'orage de la communauté de Longwy s'est penchée sur l'étude de 40 ouvrages à étudier hydrauliquement. Après une visite terrain (réalisée au sein de 3D EAU avant le stage), une analyse des données (dans le cas où le site est déjà instrumenté) et un diagnostic de l'ouvrage permet de déterminer s'il est possible de **trouver une relation univoque entre la hauteur d'eau à l'amont du point de contrôle** (seuil ou trop plein dans le cadre de cette étude) **et le débit déversé**. Une méthode de modélisation est ensuite définie à l'issue de l'analyse hydraulique conformément aux contraintes hydrauliques de l'ouvrage et aux enjeux d'autosurveillance auxquels il est soumis. Dans le cas du projet de la CAL, 11 ouvrages « classiques » ont été analysés en utilisant une approche OD. 3 seuils latéraux avec une crête longue ont été modélisés en 1D afin de prendre en compte l'évolution de la ligne d'eau le long de la lame déversante. 7 trop pleins des stations de pompage ont fait l'objet d'une modélisation COACHS. Enfin, 4 ouvrages complexes et à forts enjeux ont nécessité le passage par la modélisation 3D, tel que le point REH-DO9 dont l'exemple a été développé dans ce mémoire.

Cette étude a également mis l'accent sur certaines problématiques qui peuvent être rencontrées lors de l'analyse des ouvrages de déversements :

- Dans le cas de très faibles lames déversantes, l'incertitude de mesure peut devenir très importante ; un profilage de la crête de déversement est préconisé, tel que le point HUS-DO2 et 5 autres points de déversements non détaillés dans ce mémoire,
- Dans le cas d'une influence aval, un deuxième capteur est proposé au niveau du milieu récepteur afin d'éviter la surestimation des débits déversés, tel que le point GOR-DO14 (ainsi que 6 autres points).

Par conséquent, l'étude de chaque point de déversement se concrétise par un mémoire technique qui définit la loi hauteur(s)-débit à utiliser avec **une incertitude à un intervalle de confiance à 95%** de telle manière à répondre aux exigences réglementaires d'autosurveillance. Une fiche technique est également rédigée pour l'ensemble des points afin de permettre au client de disposer d'un document plus simple pour le marché des travaux à lancer pour instrumenter les différents ouvrages. Suite au **suivi à 6 mois** (non réalisé dans le cadre de ce stage), certaines lois seront susceptibles d'être réajustées et des nouveaux aménagements doivent être dimensionnés ; tel que, à titre d'exemple, une fenêtre de déversement pour le point FIL-DO1.

Concernant le projet de R&D sur la modélisation CFD des vortex, différentes méthodes sont utilisées aujourd'hui pour étudier **le risque de formation des vortex dans les stations de pompage**. La norme américaine **ANSI/HI** définit les règles de bonne pratique à prendre en compte lors du dimensionnement des stations. Une alternative qui peut être utilisée est la conception d'un **modèle réduit** qui permet de tester différentes configurations. Ces derniers, au-delà des temps de conception et des coûts associés, présentent l'inconvénient de ne pas pouvoir s'affranchir des effets d'échelle.

Toutes ces contraintes militent en faveur de l'utilisation de la **modélisation CFD pour la simulation des vortex**. Aujourd'hui, 3D EAU utilise cette approche afin d'évaluer le risque qualitativement. L'objectif de cette étude était **d'améliorer cette démarche et de fournir des éléments quantitatifs qui permettent d'évaluer le risque de formation des vortex**, ainsi que le bon paramétrage numérique qui permet de les visualiser. Les expériences de Möller ont été considérées comme base pour la validation des résultats numériques.

L'analyse prône l'utilisation d'un **schéma de résolution de second ordre amont** et un écoulement monophasique **sans modèle de turbulence**. Pour des nombres de Reynolds inférieurs à $6,4 \times 10^5$, un **maillage de 0,75 cm** au niveau de l'aspiration permet de capter les vortex de surface. Néanmoins, ce niveau de raffinement peut être optimisé quand le Reynolds diminue. Pour les faibles hauteurs de submersion, le risque de formation de vortex (de type 5 ou 6) est plus marqué. Par conséquent, même un maillage grossier permet de visualiser le vortex. Le Q critérium maximal qui permet d'identifier le vortex pour les maillages grossiers varie entre **2 et 20**. Ces résultats avec un **DN400 peuvent être extrapolés pour un DN500**. En effet, la modélisation 3D et l'expérience de Möller montrent que les effets d'échelle sont négligeables entre ces deux diamètres.

Ces résultats permettent de disposer de « règles de bonne pratique » pour modéliser une station de pompage pour laquelle on souhaite déterminer si un risque de vortex existe, et de passer d'une analyse jusqu'à présent très sécuritaire à une analyse plus fine. D'autres essais sont cependant nécessaires pour affiner ces règles et disposer d'une vraie procédure de modélisation des vortex.

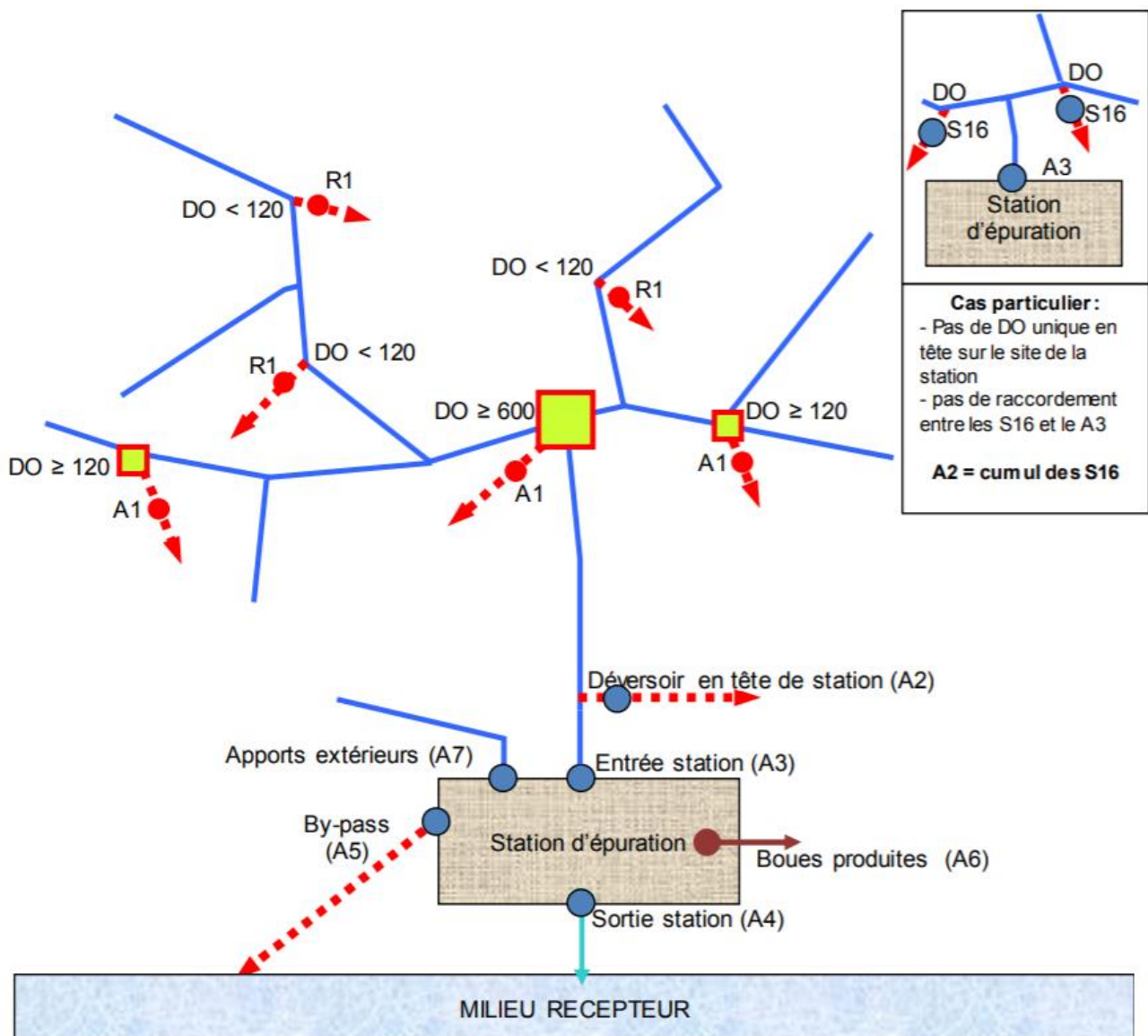
Bibliographie

- Agence de l'Eau Rhin Meuse, Février 2016**, *GUIDE PRATIQUE Mise en place de l'autosurveillance des réseaux d'assainissement*, Février 2016,
- Agence de l'Eau Loire et Bretagne, 2015**, *Guide pratique: Mise en oeuvre de l'autosurveillance des systèmes d'assainissement des collectivités et des industriels - Equipements et contrôles*, 2015,
- ANSI/HI 9,8-1998, 1998**, *Pump intake design*, United States of America : Hydraulic Institute, 1998,
- Arrêté du 21 juillet 2015, 2015**, Arrêté du 21 juillet 2015 relatif aux systèmes d'assainissement collectif et aux installations d'assainissement non collectif, à l'exception des installations d'assainissement non collectif recevant une charge brute de pollution organique inférieure ou ég, [En ligne] 21 Juillet 2015,
- BERGE, J,P, 1966**, *ENQUETE SUR LA FORMATION DE VORTEX ET AUTRES ANOMALIES D'ECOULEMENT DANS UNE ENCEINTE AVEC OU SANS SURFACE LIBRE*, s,l, : La Houille Blanche, 1966,
- BUYER, Marc, 2002**, *Transport de flux en réseau d'assainissement : modèle 1D pour l'hydraulique des collecteurs et déversoirs avec prise en compte des discontinuités*, Strasbourg : s,n,, 2002,
- CETMEF, 2005**, *Notice sur les déversoirs : synthèse des lois d'écoulement au droit des seuils et des déversoirs*, s,l, : Centre d'Etudes Techniques Maritimes et Fluviales, 2005,
- Chassaing, Patrick, Janvier 2000**, *Turbulence en mécanique des fluides : analyse du phénomène en vue de sa modélisation à l'usage de l'ingénieur*, s,l, : Cépaduès, Janvier 2000,
- Commentaire technique de l'arrêté du 21 juillet 2015**, Fiche 2 : Distinction entre « estimation » et « mesure » au sens de l'arrêté du 21 juillet 2015, *PARTIE 2: AUTOSURVEILLANCE DES SYSTEMES D'ASSAINISSEMENT COLLECTIF*,
- CONSTANTINESCU, G, S, et PATEL, V, C, 2000**, *Role of turbulence model in prediction of pump-bay vortices*, s,l, : Journal of Hydraulic Engineering, 2000,
- CRISTOFANO, L,, et al, 2016**, *Investigation on bathtub vortex flow field by Particle Image Velocimetry*, s,l, : Experimental Thermal and Fluid, 2016,
- GRAIE, 2014**, *Autosurveillance des réseaux d'assainissement: Retours d'expérience - Points caractéristiques, Modélisation, Supervision, Métrologie*, Vaulx en velin : s,n,, 2014,
- GUIBU PEREIRA, Gabriel, Juin 2019**, *Modélisation numérique d'écoulements turbulents avec entraînement d'air au sein d'ouvrages hydrauliques*, Strasbourg : Thèse de doctorat, Juin 2019,
- HAGER, Willi Hermann, 1999**, *Wastewater hydraulics theory and practice*, s,l, : Springer, 1999,
- HALLER, G, 2005**, *An objective definition of a vortex*, United Kingdom : Cambridge University Press, 2005,
- HIRSCH, C, 2007**, *Numerical Computation of Internal and External Flows, Fundamentals of Computational Fluid Dynamics*, s,l, : Elsevier, 2007,
- INSEE, 2020**, Dossier complet: Intercommunalité - Métropole de CA de Longwy, *Institut national de la statistique et des études économiques*, [En ligne] 04 Février 2020, <https://www.insee.fr/fr/statistiques/2011101?geo=EPCI-245400262>,
- ISEL, Sandra, 2002**, *Développement de méthodologies et outils numériques pour l'évaluation du débit en réseau hydraulique à surface libre*, Université Louis Pasteur - Strasbourg : s,n,, 2002,
- ISENMANN, Gilles, Avril 2016**, *APPROCHE EULER – LAGRANGE POUR LA MODELISATION DU TRANSPORT SOLIDE DANS LES OUVRAGES DE DECANTATION*, Avril 2016,
- ISO 4373 : 2008, 2008-10**, *Hydrométrie — Appareils de mesure du niveau de l'eau*, 2008-10,
- ISO 6416:2017, 2017-10**, *Hydrométrie — Mesure du débit par la méthode du temps de transit ultrasonique (temps de vol)*, s,l, : ISO, 2017-10,

- JCGM 100:2008, September 2008**, *Evaluation of measurement data — Guide to the expression of uncertainty in measurement*, s,l, : Joint Committee for Guides in Metrology, September 2008,
- LIPEME KOUYI, Gizlain, 2004**, *Expérimentations et modélisations tridimensionnelles de l'hydrodynamique et de la séparation particulaire dans les déversoirs d'orage - Thèse de doctorat*, Université Louis Pasteur – Strasbourg : Sciences pour l'Ingénieur, 2004,
- LIPEME KOUYI, Gizlain, VAZQUEZ, José et POULET, Jean-Bernard, Décembre 2005**, *Méthodologie d'utilisation de la modélisation 3D des déversoirs d'orage dans le cadre de l'autosurveillance*, s,l, : La Houille Blanche, Décembre 2005,
- MENTER, F,R, August 1994**, *Two-equation eddy-viscosity turbulence models for engineering applications*, August 1994,
- MOLLER, G, 2013**, *Vortex-induced air entrainment rate at intakes*, s,l, : ETH Zurich, 2013,
- MONJI, H,, et al, 2010**, *Effect of Experimental Conditions on Gas Core Length and Downward Velocity of Free Surface Vortex in Cylindrical Vessel*, s,l, : Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 2010,
- OKAMURA, T,, KAMEMOTO, K, et MATSUI, J, 2007**, *CFD prediction and model experiment on suction vortices in pump sump*, Korea : s,n,, 2007,
- RAJENDRAN, V, P,, CONSTANTINESCU, S, G, et PATEL, V, C, 1999**, *Experimental validation of numerical model of flow in pump-intake bays*, s,l, : Journal of Hydraulic Engineering, 1999,
- ROACHE, Patrick J, September 1994**, *Perspective: a method for uniform reporting of grid refinement studies*, , s,l, : Journal of Fluids Engineering, September 1994,
- SANDRE, Mai 2017**, *Autosurveillance des systèmes de collecte et de traitement des eaux usées*, Mai 2017,
- Site internet Hydraulique des réseaux**, [En ligne] ENGEES, ICUBE, <http://hydraulique-des-reseaux,engees,eu/home/outils-de-calcul>,
- Site officiel OpenFOAM**, [En ligne] <https://www.openfoam.com/>,
- Site officiel de 3D Eau**, [En ligne] [Citation : 2020 Janvier 06,] <https://www,3deau,fr/>,
- Site officiel de la CAL**, Présentation du territoire de la CAL, *Communauté d'agglomération de LONGWY*, [En ligne] [Citation : 26 Février 2020,] <http://www,ccal-longwy,fr/la-cal/le-territoire/>,
- UNI - KL, 2012**, University Kaiserslautern, [En ligne] Germany, 2012, [Citation : 10 01 2012,] https://www,mv,uni-kl,de/sam/data/fotos/pr_einlauf,jpg,
- Vatankhah, Ali R, June 2010**, Flow measurement using circular sharp-crested weirs, *Flow Measurement and Instrumentation*, s,l, : ScienceDirect, June 2010,
- VAZQUEZ, José, et al, 2016**, *Diagnostic pour l'aide à l'instrumentation des déversoirs d'orage*, 2016,
- VAZQUEZ, José, et al, Novembre 2016**, *Guide Technique n°3: Evaluer le débit déversé par le trop-plein de station de pompage à partir de la mesure de hauteur(s) d'eau*, Novembre 2016,
- VAZQUEZ, José, ZUG, Mathieu et JOANNIS, Claude, 2009**, Modélisation et métrologie des déversoirs d'orages, *Les Techniques de l'Ingénieur*, [En ligne] 2009, [Citation : 23 Janvier 2020,] <http://www,techniques-ingenieur,fr/book/w6902/modelisation-et-metrologie-des-deversoirs-d-orage,html>,
- VERSTEEG, H, et MALALASEKERA, W, February 2007**, *An Introduction to Computational Fluid Dynamics*, s,l, : Prentice Hall, February 2007,
- WU, P,, et al, 2019**, *Two-phase flow DES and URANS simulations of pump-intake bay vortices*, s,l, : Journal of Hydraulic Research, 2019,

ANNEXES

Annexe 1 : Cartographie des points SANDRE pour les collectivités



Cas particulier :

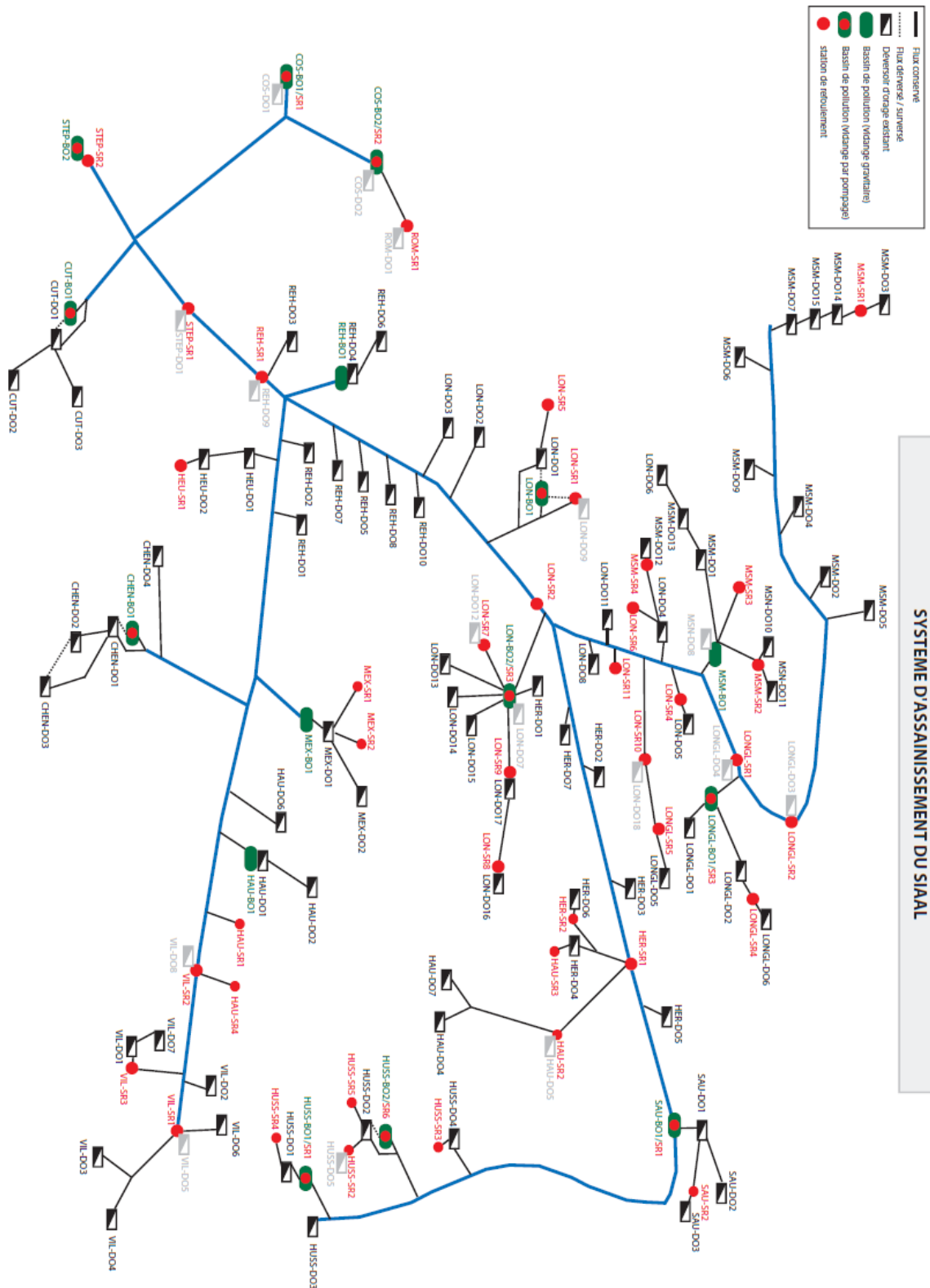
- Pas de DO unique en tête sur le site de la station
- pas de raccordement entre les S16 et le A3

A2 = cumul des S16

Légende

■ ■ ■ ► Déversement potentiel

Annexe 2 : Synoptique du réseau principal de Longwy



Ce synoptique ne présente que le réseau principal de la CAL ; à savoir celui de Longwy et des communes à proximité. Il est également à noter qu'il n'est pas à jour (date du juin 2006). Des nouveaux DOs ont été découverts lors des visites menées par LOREAT et 3D EAU.

Annexe 3 : Validation du dimensionnement d'un seuil en V arrondi via la modélisation 3D

Afin de permettre la validation de la méthode de calcul d'un seuil en V arrondi, une modélisation 3D et quelques données expérimentales ont été exploitées pour recalibrer les lois hydrauliques proposées.

Deux démarches ont fait l'objet de cette validation :

1. Vérification et recalibrage de la méthode « passage par la hauteur critique » par rapport à des données expérimentales pour la partie circulaire inférieure

Selon (Vatankhah, June 2010), le débit est donné par la relation suivante :

Équation 8: Le débit déversé selon Vatankhah

$$Q = 0,3926 \times C_d \times \sqrt{2g} \times h^{3/2} \times D \times \eta^{1/2} \times (\sqrt{1 - 0,22\eta} + \sqrt{1 - 0,773\eta})$$

Avec $C_d = \frac{0,728 + 0,24\eta}{1 + 0,668\sqrt{\eta}}$, $0,1 < \eta = \frac{h}{D} < 1$; h la lame déversante et D le diamètre,

Le graphique suivant montre l'erreur entre le débit Q de la relation de Vatankhah et le débit Q_c passant par la hauteur critique.

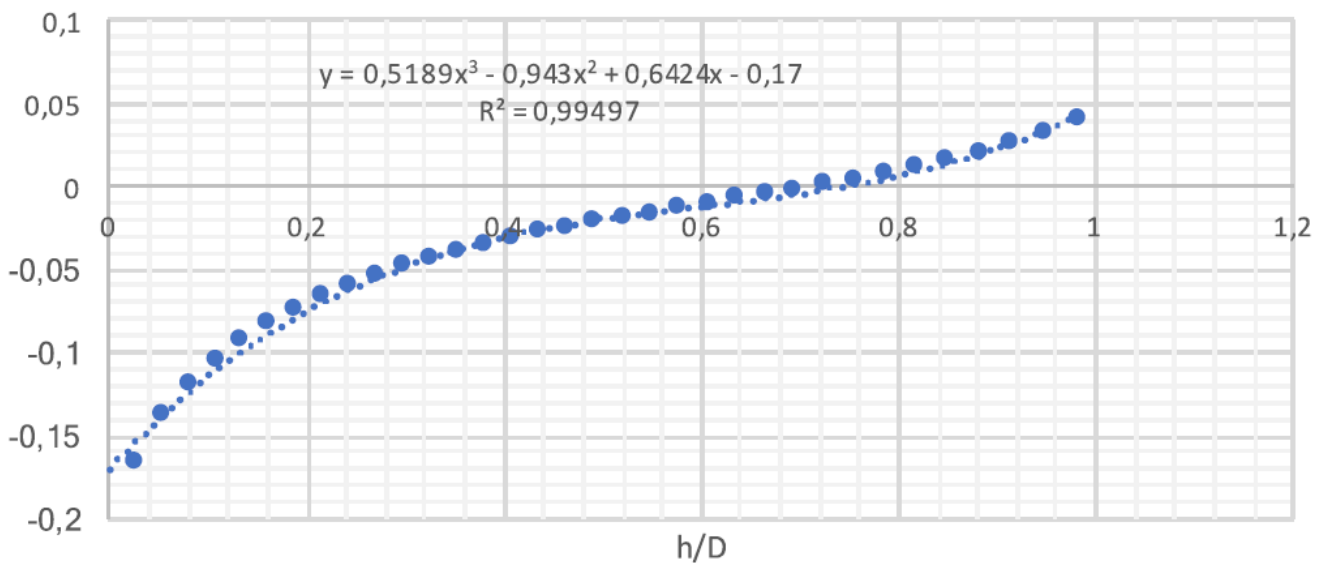


Figure 39: Ajustement de la loi

L'erreur maximale est de 17% aux plus petites hauteurs d'eau. Cette erreur devient inférieure à 5% à partir de 28% du taux de remplissage.

⇒ Par conséquent, la méthode consistant à passer par la charge critique au droit du seuil circulaire montre une bonne concordance entre les données expérimentales et le principe de calcul utilisé pour le dimensionnement des seuils en V arrondi. Une correction est envisageable pour des rapports $h/D < 28\%$.

2. Vérification de la méthode « passage par la hauteur critique » par la modélisation 3D pour l'ensemble de la forme du seuil

L'objectif de cette partie est de valider le dispositif de mesure par rapport à la modélisation 3D. La démarche utilisée est réalisée en deux étapes :

- Validation du maillage nécessaire au 3D par rapport aux données expérimentales précédentes

La figure ci-contre montre le seuil circulaire modélisé en 3D. Les plus petites mailles sont de 4mm en partie inférieure, de 8 mm ensuite sur l'orifice et de 32 mm en amont. Le tableau suivant donne les résultats de comparaison entre la modélisation 3D et la loi de seuil circulaire :

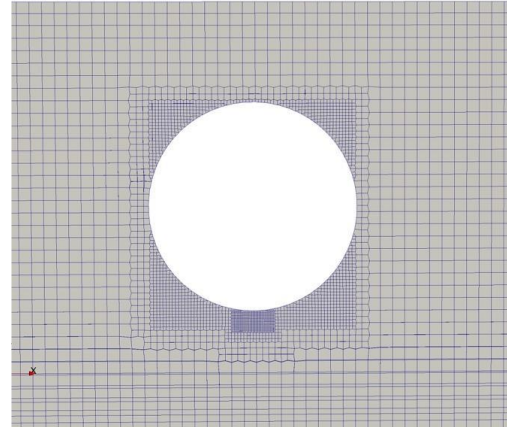


Figure 40: Seuil circulaire modélisé de rayon 250 mm

Tableau 17: Tableau des résultats de la modélisation 3D pour un seuil circulaire

N°	h(CFD) (m)	h/D	Cd (Vatankhah)	Q(Vatankhah) (m ³ /s)	Q(CFD) (m ³ /s)	Erreur
1	0,05	10,0%	0,621	0,00372	0,00372	0,0%
2	0,098	19,6%	0,598	0,01342	0,01394	3,9%
3	0,20055	40,1%	0,579	0,05115	0,05089	-0,5%
4	0,2987	59,7%	0,575	0,10501	0,10582	0,8%
5	0,3988	79,8%	0,576	0,17200	0,17285	0,5%

Par conséquent, ce maillage est validé.

- Vérification de la loi hydraulique par la modélisation 3D d'un seuil en V arrondi avec une arrête vive

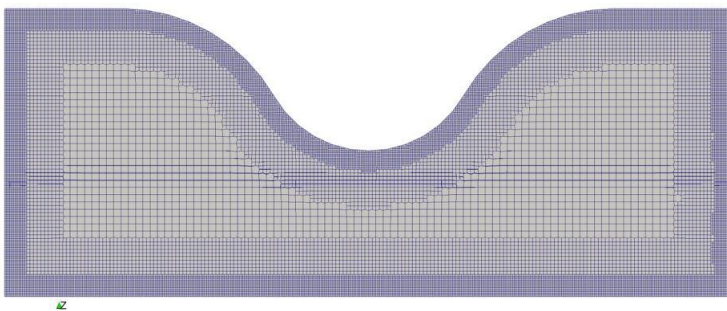


Figure 41: Maillage du seuil en V arrondi

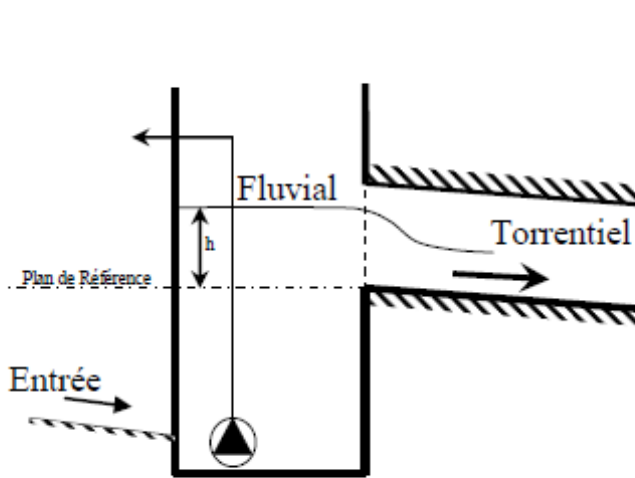
La figure ci-contre montre le seuil en V arrondi modélisé en 3D. Le même maillage validé ci-dessus a été utilisé. Le tableau suivant donne les résultats de comparaison entre la modélisation 3D et la loi de seuil en V arrondi avec arrête vive :

Tableau 18: Résultats de la modélisation 3D pour un seuil en V arrondi

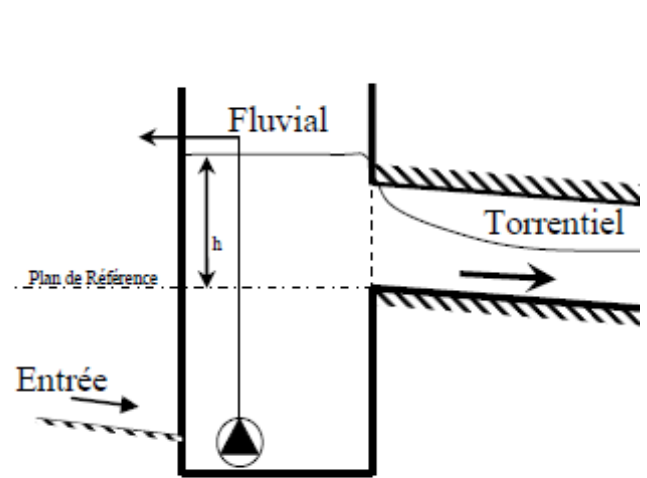
h(CFD) (m)	Q (Calculé)	Q (CFD) (m ³ /s)	Erreur
0,3453	0,2833	0,2725	4,0%
0,7924	1,3121	1,3508	-2,9%
1,4321	5,6942	5,9149	-3,7%

⇒ La méthode de calcul utilisant la charge critique sans ajustement particulier est vérifiée. Aucun coefficient d'ajustement est nécessaire.

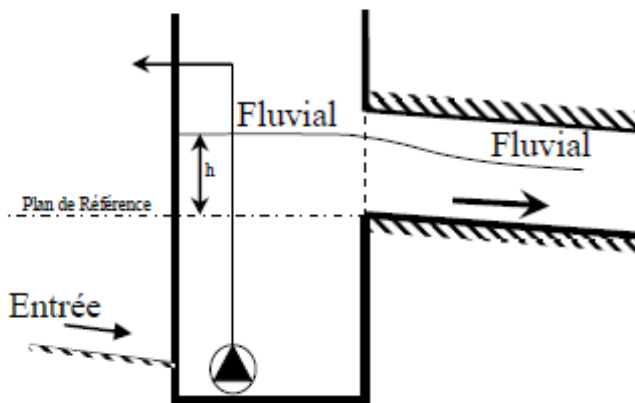
Annexe 4 : Modes de fonctionnement d'un trop-plein



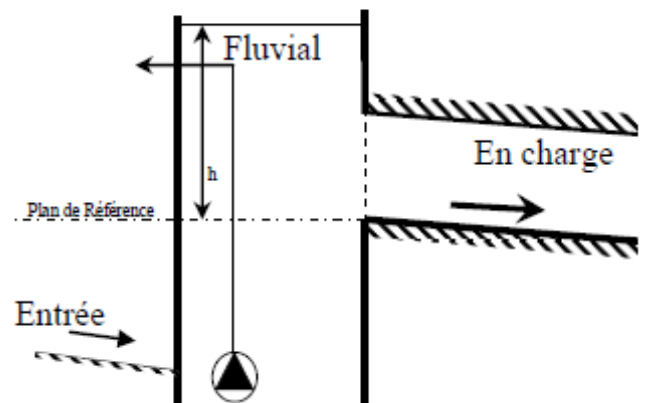
Cas 1 : fonctionnement à surface libre (orifice+canalisation) avec un passage fluvial vers torrentiel,



Cas 1bis : fonctionnement en charge au niveau de l'orifice et à surface libre dans la canalisation avec un passage fluvial vers torrentiel,



Cas 2 : fonctionnement à surface libre (orifice+canalisation) avec un régime fluvial conservé,



Cas 3 : fonctionnement en charge (orifice+canalisation).

Annexe 5 : Formules et ordre de grandeur des incertitudes

1. Incertitude du modèle

1.1. Modèle 0D ou 1D

L'incertitude dans ce cas provient de la vérification des hypothèses d'application de la loi retenue ainsi que du mode de fonctionnement (dénoyé, noyé ou en charge).

1.2. Modèle 3D

- Incertitude liée au maillage

Cette dernière est due au fait que le domaine est discrétisé en cellules de taille non infinitésimale, L'évaluation de cette incertitude passe ainsi par le calcul du *Grid Convergence Index* – GCI – tel que défini par (ROACHE, September 1994). La formule suivante (cf. Équation 9) permet de calculer le GCI pour un intervalle de confiance à 95%.

Équation 9: Calcul du coefficient CGI

$$GCI = 3 \left| \frac{h_{fin} - h_{grossier}}{h_{fin}} \right| \frac{1}{\left(\frac{dx_{grossier}}{dx_{fin}} \right)^2 - 1}$$

- Incertitude liée au modèle

Généralement, l'utilisation d'un modèle 3D permet d'avoir la hauteur d'eau avec une incertitude qui dépend du type d'ouvrage (cf. Tableau 19) :

Tableau 19: Ordre de grandeur des incertitudes liées à la mesure de la hauteur via un modèle 3D

Ouvrage	Incertainitude sur la hauteur d'eau
En amont d'un canal Venturi	< 1%
Dans un déversoir d'orage	1 %
Distribution de la hauteur d'eau	1%
Distribution de la vitesse	5%

- Incertitude globale

L'incertitude globale relative à l'utilisation d'un modèle numérique 3D peut être calculée via la formule suivante (cf. [Équation 10](#)) :

Équation 10: Incertitude globale d'un modèle 3D

$$(u_h)_{\text{numérique}} \approx \sqrt{\left(\frac{GCI}{2}\right)^2 + (u_{\text{modèle}})^2}$$

2. Incertitude de la régression

L'incertitude liée au choix de la régression mathématique $Q = f(h)$ dépend de la retranscription des résultats obtenus par la modélisation. Cette incertitude dépend donc notamment de la méconnaissance précise des conditions aux limites.

La médiane des écarts entre les résultats de simulation et la régression définit ainsi un intervalle de confiance à 50%. En multipliant par 1,5, l'intervalle de confiance est à 68%.

Équation 11: Incertitude liée à la régression d'une loi hauteur débit

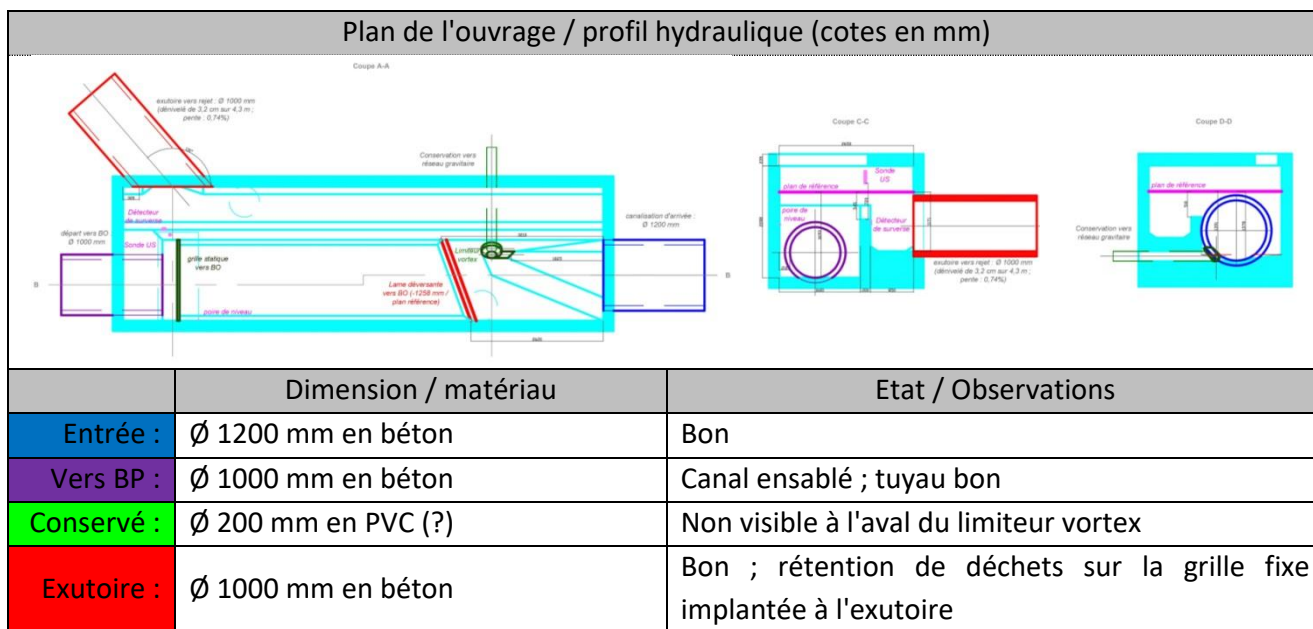
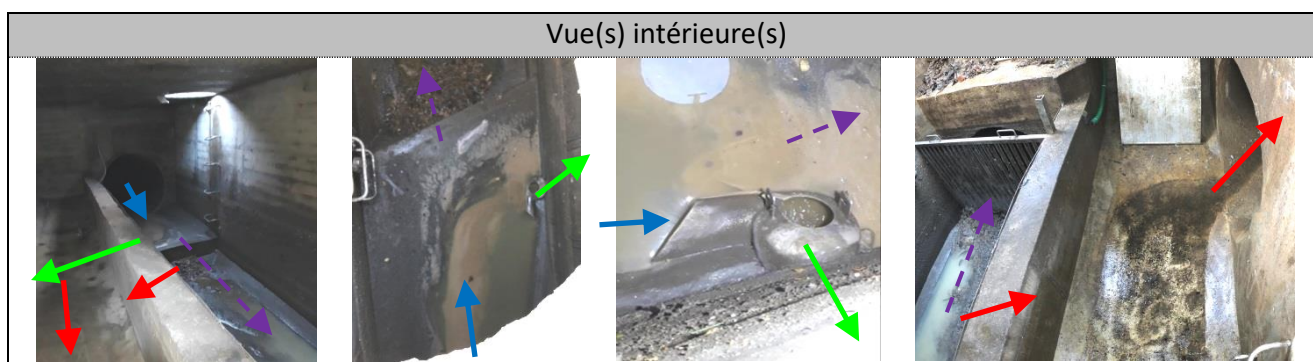
$$(u_Q)_{\text{régression}} \approx 1,5 \times \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left| \frac{Q_{\text{régression}}(h_i) - (Q_{\text{simulation}})_i}{Q_{\text{régression}}(h_i)} \right|$$

3. Incertitude sur la mesure


Comme déjà expliqué dans le paragraphe **2.4.3.1.**, cette incertitude est évaluée à 11 cm. L'incertitude sur le zéro est de 5 mm pour l'intervalle de confiance à 68% selon l'ISO 6416) et l'incertitude sur le niveau d'eau est de 2 mm pour l'intervalle de confiance à 68% selon l'ISO 6416).

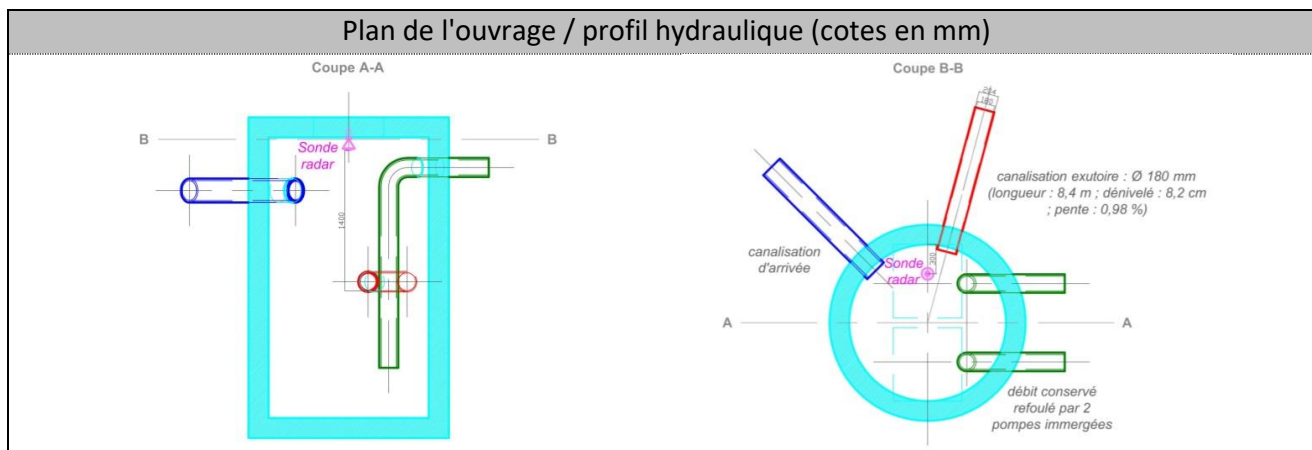
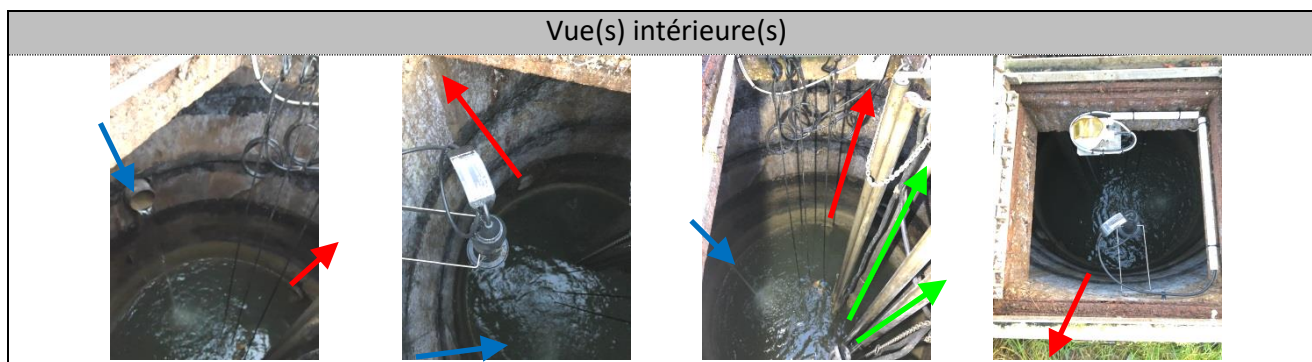
Annexe 6 : Fiche technique du point HUS-DO2

Nom ouvrage :	HUS-DO2	Commune :	HUSSIGNY-GODBRANGE	Date visite :	19/12/2019
Localisation :	Rue de la Gare, dans l'enceinte du bassin de pollution HUS-BO2, à hauteur du parking qui précède la frontière avec le Luxembourg				
Accessibilité () :	Aisée, par le parking automobile ; voirie large et dégagée et portail à double-vantail				
Coordonnées Lambert 93 :	X = 907,898 km	Y = 6 936,978 km	Pluviomètre de référence :		HUS-SR2
Situation hydraulique :	Partie centrale de Hussigny-Godbrange, avant raccordement sur l'émissaire de transfert vers Saulnes et Longwy				
Débit conservé :	9 L/s	Limiteur vortex (/\ trappe de visite enlevée)			
Pollution théorique collectée et potentielle déversée :	94,8 kgDBO5/j		(1 580 EH)		
Type d'ouvrage :	Déversoir frontal à lame basse vers le bassin de pollution HUS-BO2 et le poste de vidange associé HUS-SR6 ; lame latérale haute vers le rejet au milieu récepteur				
Milieu récepteur :	Le ruisseau de la Côte Rouge (rejet à 25 m ; X=907,909 km ; Y=6 936,999 km)				



Annexe 7 : Fiche technique du point GOR-DO14

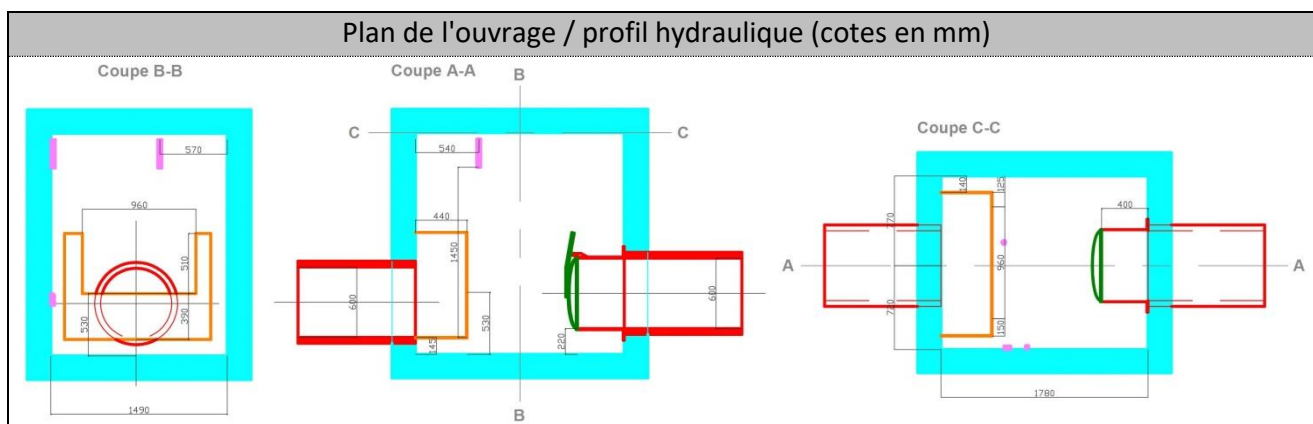
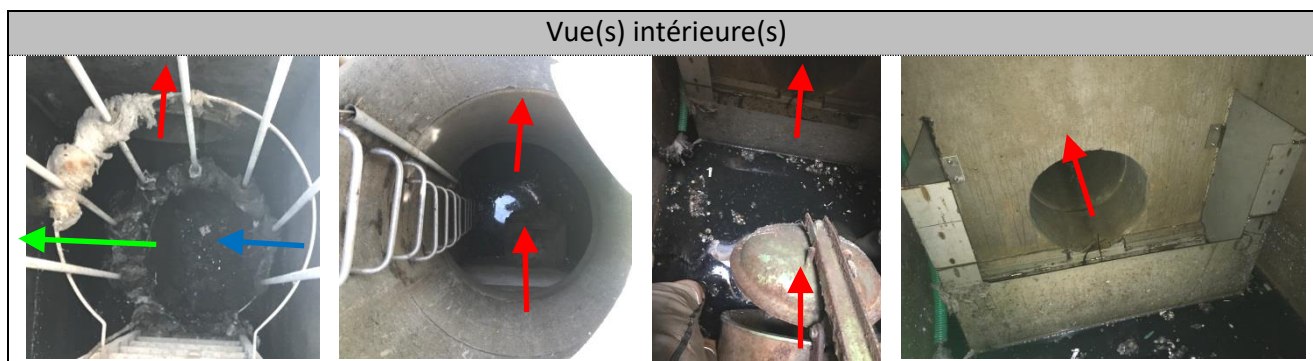
Nom ouvrage :	GOR-DO14	Commune :	GORCY	Date visite :	19/12/2019
Localisation :	Dans l'enceinte de la station d'épuration de Gorcy, au bout de la rue de Neuf Ville, dans le poste de relèvement qui alimente les ouvrages de traitement				
Accessibilité () :	Aisée à pieds mais pas d'accès direct proche pour un véhicule motorisé				
Coordonnées Lambert 93 :	X = 893,694 km	Y = 6 941,620 km	Pluviomètre de référence :	COS-BO1 COS-SR1	
Situation hydraulique :	Dernier ouvrage de déversement des eaux usées acheminées par le système de collecte, à l'entrée de la station d'épuration (point A2),				
Débit conservé :	25 L/s	Capacité d'une pompe de relèvement en service sur 2 installées			
Pollution théorique collectée et potentielle déversée :	143,5 kgDBO5/j			(2 391 EH)	
Type d'ouvrage :	Orifice de trop-plein latéral de la bache de pompage				
Milieu récepteur :	Le Coulmy qui longe la station côté ouest (exutoire à 8 m ; X=893,686 km ; Y=6 941,619 km)				



	Dimension / matériau	Etat / Observations
Entrée :	Ø (?)	Correct semble-t-il
Conservé :	Ø (?)	2 pompes de relèvement en bon état de marche
Exutoire :	Ø 180 mm en PVC	Correct ; débordement chronique lors de la visite, à chaque arrêt du pompage (marche bridée par temporisation pour ne pas surcharger les ouvrages de traitement)

Annexe 8 : Fiche technique du point REH-DO9

Nom ouvrage :	REH-DO09	Commune :	REHON	Date visite :	27/05/2019
Localisation :	En rive gauche de la Chiers, le long de la rue de Lexy, à 80 m des locaux de la CAL				
Accessibilité () :	Au bout d'un chemin carrossable, face au bâtiment de la CAL				
Coordonnées Lambert 93 :	X = 899,174 km	Y = 6 936,982 km	Pluviomètre de référence :	REH-SR1	
Situation hydraulique :	Trop-plein sur l'émissaire de transfert vers la station d'épuration				
Débit conservé :	474 L/s	(correspond en fait au débit pompé par le poste à l'aval)			
Pollution théorique collectée et potentielle déversée :	2 118,6 kg DBO5/j		(35 310 EH)		
Type d'ouvrage :	Trop-plein avec clapet anti-retour				
Milieu récepteur :	La Chiers (exutoire canalisé avec caisson de mesures ; X=899,165 km ; Y=6 936,990 km)				



	Dimension / matériau	Etat / Observations
Entrée :	Ø ? mm	Non visible
Conservé :	Ø ? mm	Non visible
Exutoire :	Ø 600 mm en béton ?	Correct <u>!</u> caisson pas parfaitement étanche sur sa partie inférieure

Annexe 9 : Calcul d'enjeu des points de déversement HUS-DO2 / GOR-DO14 / REH-DO9

Calcul d'enjeu pour le point HUS-DO2

Critère	Calcul	Note (points)
Critère technique	$EH\ DO / EH\ STEP = 1580 / 64000 = 2.47\%$	0
Critère environnemental	$EH\ DO / QMNA2\ (l/s) = 1580 / 981 = 1.61$	1
Critère activités humaines	Pas d'activité particulière	0
Enjeu	Sommes des trois notes	1

Calcul d'enjeu pour le point GOR-DO14

Critère	Calcul	Note (points)
Critère technique	$EH\ DO / EH\ STEP = 2391 / 4000 = 59.8\ \%$	3
Critère environnemental	$EH\ DO / QMNA2\ (l/s)$	4 ^{majoré}
Critère activités humaines	Pas d'activité particulière	0
Enjeu	Sommes des trois notes	7 ^{majoré}

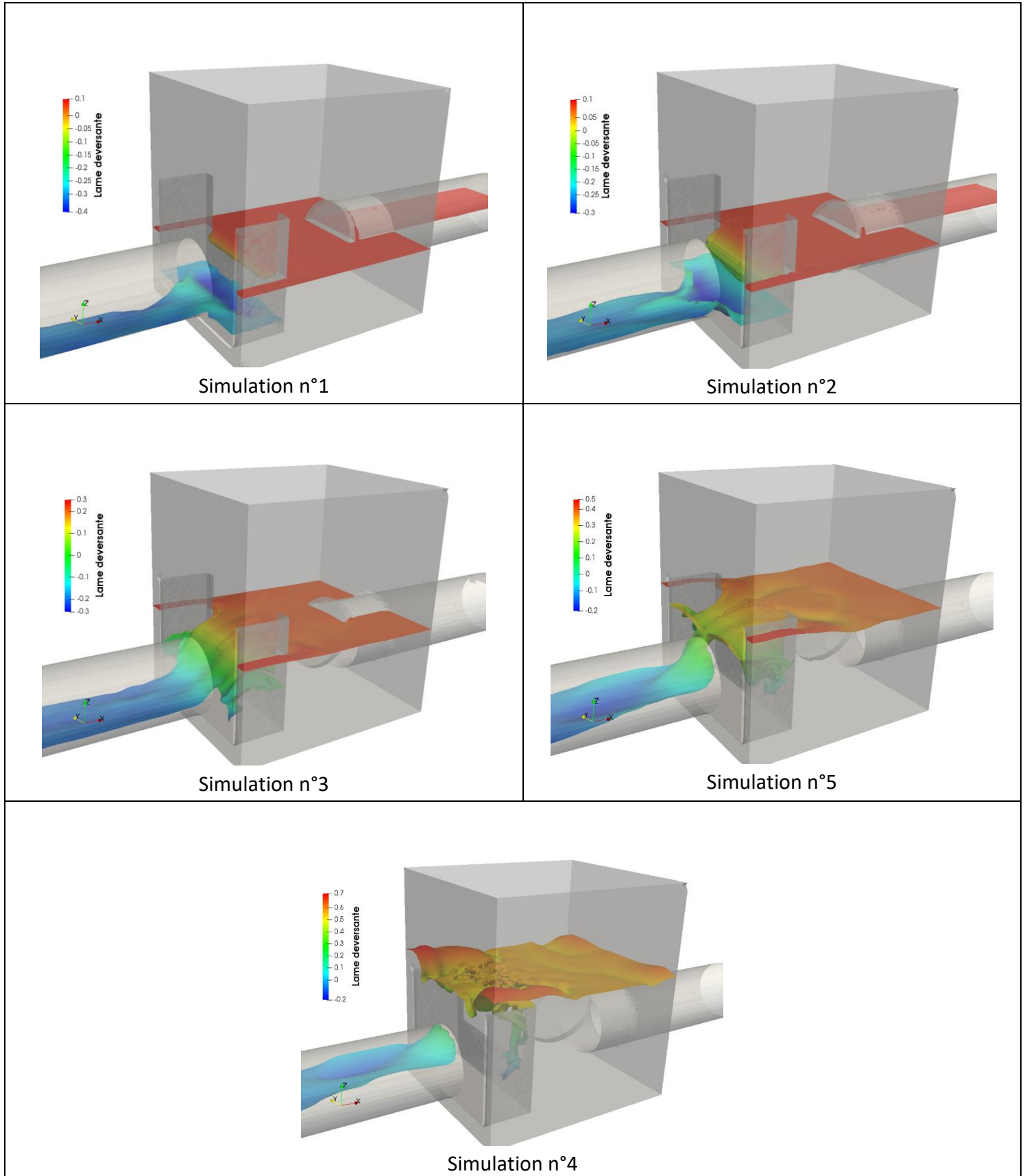
Remarque : Le QMNA2 du Coulmy étant inconnu, l'évaluation du critère environnemental repose sur une approche sécuritaire en considérant un débit très faible.

Calcul d'enjeu pour le point REH-DO9

Critère	Calcul	Note (points)
Critère technique	$EH\ DO / EH\ STEP = 35310 / 64000 = 55\%$	3
Critère environnemental	$EH\ DO / QMNA2\ (l/s) = 35310 / 981 = 36$	4
Critère activités humaines	Pas d'activité particulière	0
Enjeu	Sommes des trois notes	7

Annexe 10 : Extraction des résultats de la modélisation 3D pour le point REH-DO9

Tableau 20: Visualisation de la surface libre pour le point REH-DO9 colorée en fonction de la lame déversante



Annexe 11 : Choix de la position du capteur de niveau en fonction des résultats de la modélisation 3D

Pour choisir un emplacement optimal du capteur de niveau, il faut valider les 3 critères suivants :

- Unicité de la hauteur pour un débit donnée :** Pour cela, les surfaces libres ne doivent pas se chevaucher entre les différentes simulations. Ci-dessous, est présenté la lame déversante sur 15 secondes pour les différentes simulations pour le point REH-DO9. Ainsi, en outre du fait que les hauteurs ne se chevauchent pas, la variation de la hauteur est significative avec le débit, ce qui permet d'établir une loi assez précise.

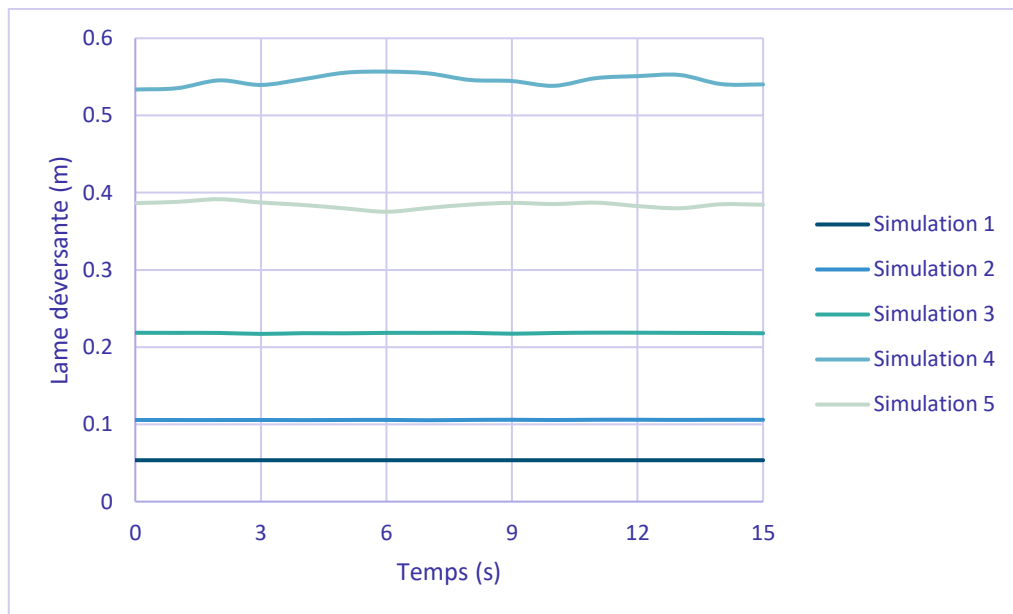


Figure 42: Unicité de la hauteur pour un débit donné pour le point REH-DO9

- Stabilité dans le temps :** Pour cela, une incertitude liée à la fluctuation de la mesure à un point donné (point de mesure) est calculée via la formule suivante de telle manière à avoir un intervalle de confiance à 95%.

Équation 12: Incertitude temporelle à un intervalle de confiance de 95%

$$\text{Incertitude temporelle} = \frac{\text{Percentile 97,5\%} - \text{Percentile 2,5\%}}{2 \times \text{Médiane}}$$

Par conséquent, pour le point REH-DO9, l'incertitude temporelle est assez faible. Le cas échéant, une moyenne de mesure sur 30 secondes peut être préconisée.

Tableau 21: Variabilité temporelle de la mesure pour le point REH-DO9

Simulation	1	2	3	4	5
Variabilité temporelle	0,02%	0,25%	0,34%	1,73%	2,08%

- Variabilité spatiale de la mesure :** Le but est de s'assurer que le niveau est uniforme dans la zone de la mesure. En visualisant la surface libre pour les forts débits lors de la modélisation du point REH-DO9, il s'avère que la zone de mesure actuelle est fortement perturbée (cf. **Figure 43**).

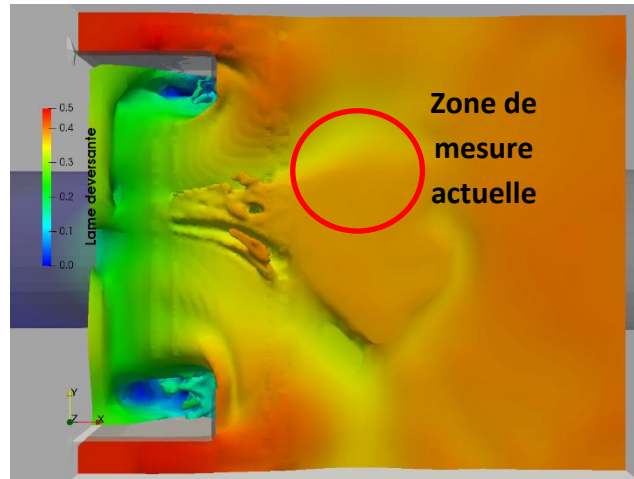
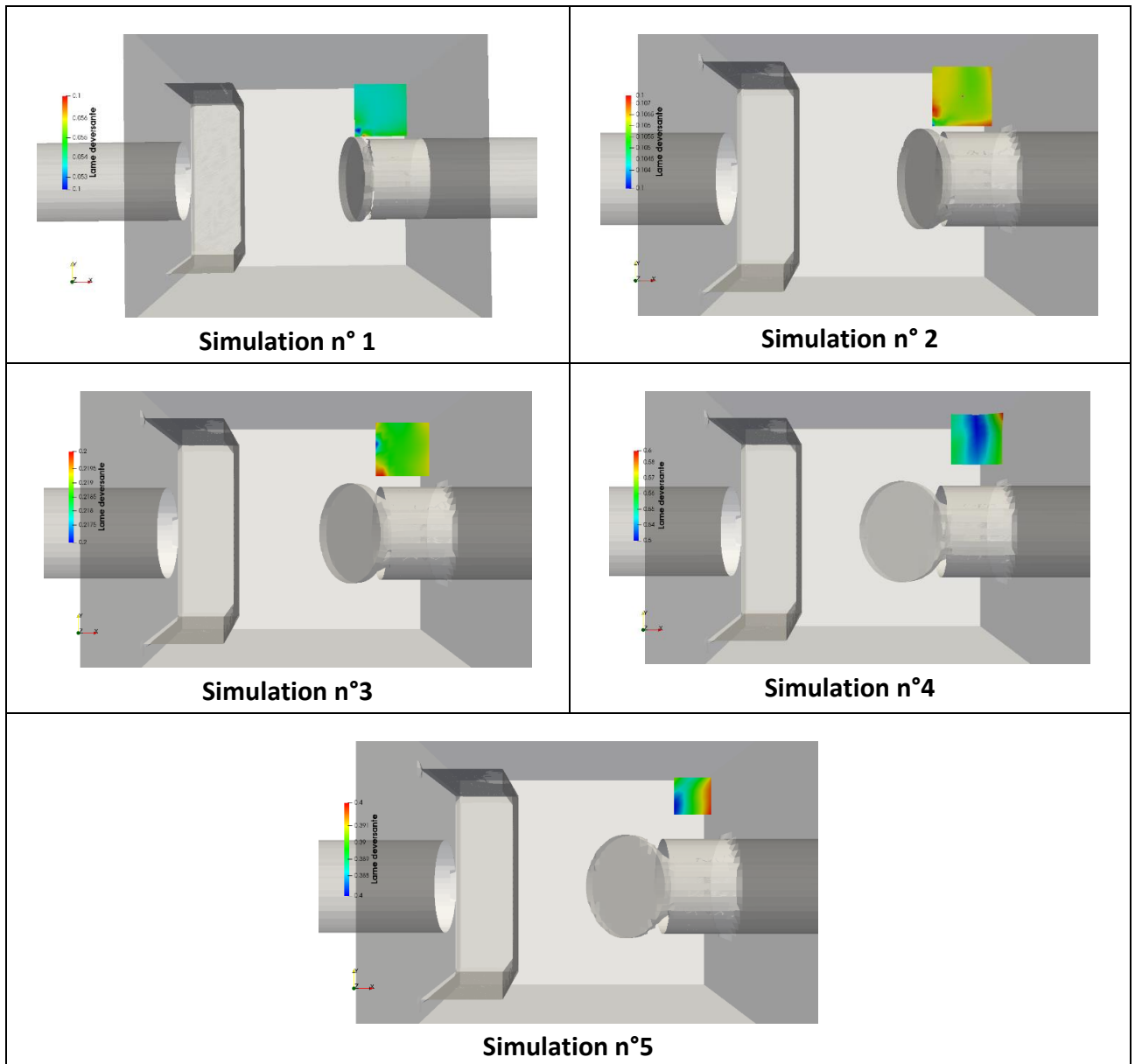


Figure 43: Visualisation de la surface libre pour la simulation 4 - REH-DO9

Pour conséquent, un nouvel emplacement est préconisé de telle manière à avoir une zone stable et non perturbée. Cette dernière est localisée au niveau de la partie amont de l'ouvrage. La variation de la hauteur est de l'ordre de 2 cm dans la zone de mesure.

Tableau 22: Nouvelle zone de mesure préconisée pour le point REH-DO9



Annexe 12 : Le « Swirl Angle »

Le "Swirl Angle", ou "angle de tourbillon" mesure l'intensité de la rotation de l'écoulement. Il est défini par la relation ci-dessous (cf., [Équation 13](#)) :

Équation 13: Formule du Swirl Angle

$$\theta = \tan^{-1} \left(\frac{V_t}{V_a} \right)$$

Où V_a présente la vitesse axiale de l'écoulement, et V_t sa vitesse tangentielle.

Ces grandeurs peuvent être facilement extraites d'un calcul en CFD à partir des outils de "post-processing".

Le "Swirl Angle" peut être mesuré expérimentalement à partir de l'installation d'un "Swirl Meter" (cf., [Figure 44](#)) :

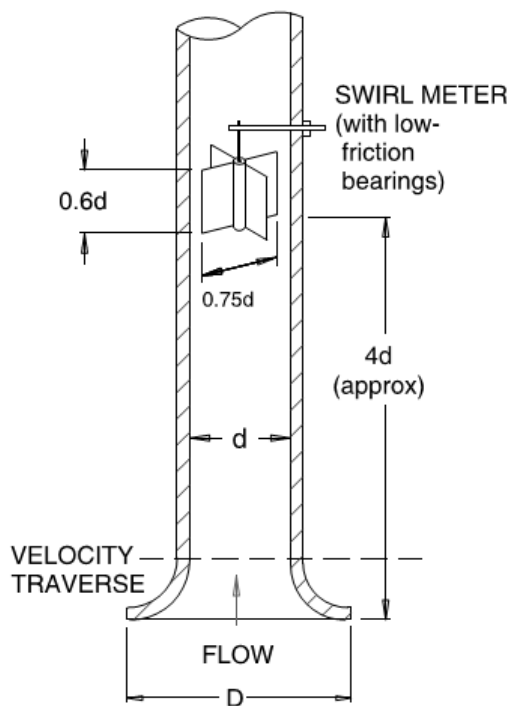


Figure 44: Schéma du Swirl Meter

Le "Swirl Angle" est donc expérimentalement obtenu à partir de la relation suivante (cf. [Équation 14](#)) :

Équation 14: Calcul du swirl angle expérimentalement

$$\theta = \tan^{-1} (\pi \times d \times n / u)$$

Où u (m/s) est la vitesse axiale moyenne, d (m) est le diamètre du tuyau d'aspiration et n est le nombre de rotations par seconde du "Swirl Meter".

Annexe 13 : Recommandations de la norme ANSI/HI 9,8-1998 pour la conception des chambres de pompage

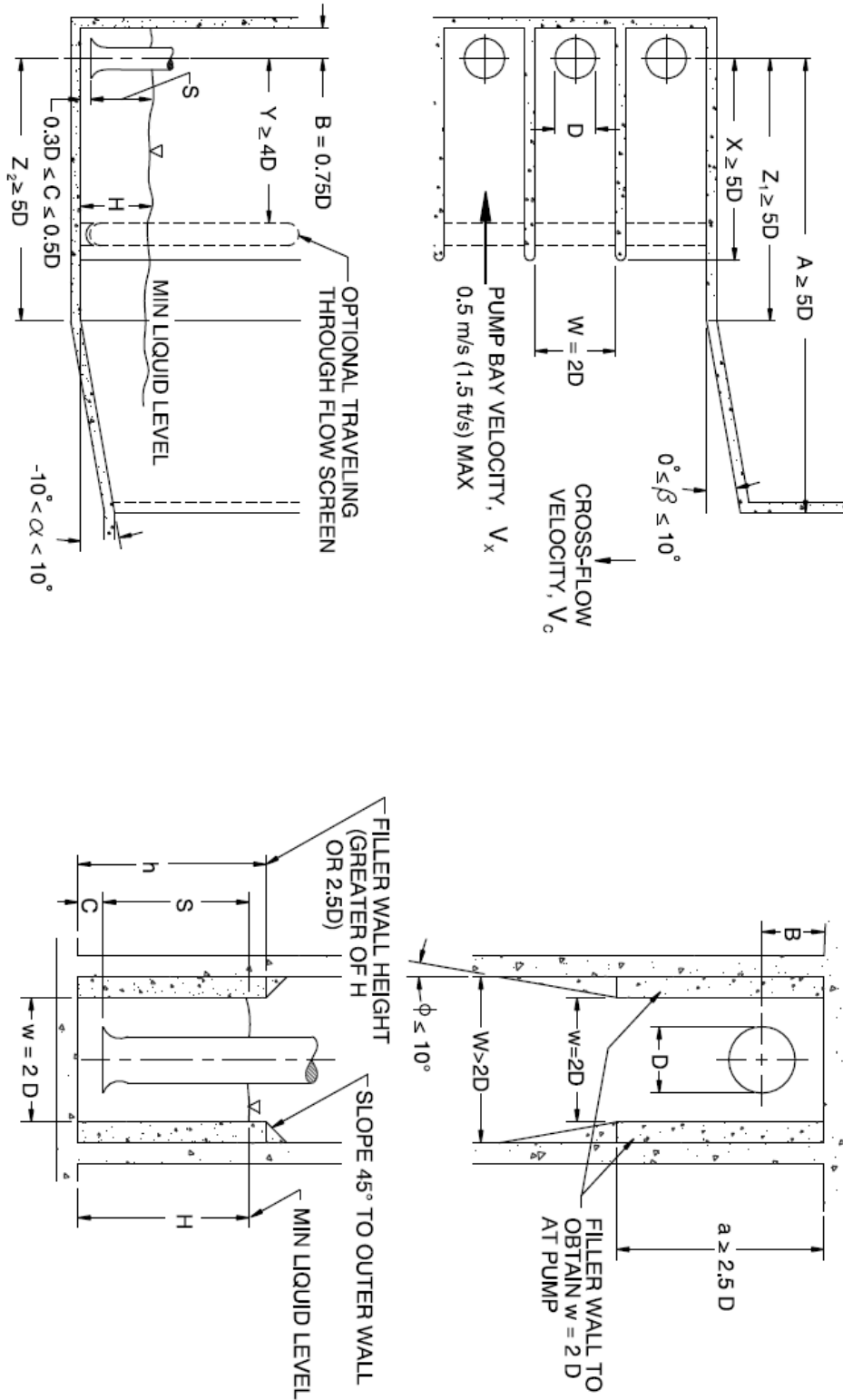


Figure 45: Schématisation des différents paramètres

Tableau 23: Recommandations de la norme ANSI/HI

Dimension Variable	Description	Recommended Value
A	Distance from the pump inlet bell centerline to the intake structure entrance	$A = 5D$ minimum, assuming no significant cross-flow ^a at the entrance to the intake structure
a	Length of constricted bay section near the pump inlet	$a = 2.5D$ minimum
B	Distance from the back wall to the pump inlet bell centerline	$B = 0.75D$
C	Distance between the inlet bell and floor	$C = 0.3D$ to $0.5D$
D	Inlet bell design outside diameter	See Section 9.8.6
H	Minimum liquid depth	$H = S + C$
h	Minimum height of constricted bay section near the pump inlet bell	$h =$ (greater of H or $2.5D$)
S	Minimum pump inlet bell submergence	$S = D(1.0 + 2.3 F_D)$ (see Section 9.8.7 for detailed discussion on determining minimum submergence)
W	Pump inlet bay entrance width	$W = 2D$ minimum
w	Constricted bay width near the pump inlet bell	$w = 2D$
X	Pump inlet bay length	$X = 5D$ minimum, assuming no significant cross-flow at the entrance to the intake structure
Y	Distance from pump inlet bell centerline to the through-flow traveling screen	$Y = 4D$ minimum. Dual-flow screens require a model study
Z_1	Distance from pump inlet bell centerline to diverging walls	$Z_1 = 5D$ minimum, assuming no significant cross-flow ^a at the entrance to the intake structure
Z_2	Distance from inlet bell centerline to sloping floor	$Z_2 = 5D$ minimum
α	Angle of floor slope	$\alpha = -10$ to $+10$ degrees
β	Angle of wall convergence	$\beta = 0$ to $+10$ degrees (Negative values of β , if used, require flow distribution devices developed through a physical model study)
ϕ	Angle of convergence from constricted area to bay walls	$\phi = 10$ degrees maximum

Annexe 14 : Avantages et inconvénients de la méthodologie actuelle pour la simulation des vortex

Tableau 24: Avantages et inconvénients de la méthodologie actuelle pour l'étude des vortex

Méthodologie	Avantages	Inconvénients
Simulation « monophasique »	Calcul plus rapide Moins de cellules de calcul nécessaires (pas besoin de simuler l'air)	Actuellement pas d'indicateur quantitatif sur la force du vortex Surface libre non mobile
Modèle de turbulence « laminaire »	Capacité de calculer des vortex transitoires (impossible avec une méthode RANS) Capacité de calculer des lignes de courant avec des fortes courbures (Sinon, besoin d'implémenter correction de courbure dans les modèles RANS)	Besoin d'un maillage très raffiné Besoin de visualiser les résultats à plusieurs pas de temps Besoin d'enregistrer le champ de vitesses moyen (calcul angle pré-rotation + distribution de la vitesse moyenne) Energie des petits tourbillons non dissipée (manque de SGS TM). Sous-estime la dispersion de la vorticité

Annexe 15 : Synthèse des études réalisées par 3D EAU sur la thématique des vortex

Tableau 25: Tableau synthétique des études réalisées par 3D EAU sur la thématique des vortex

Etude	N cells	Δx aspi (m)	Δx b�che (m)	N pompes	Débit aspiré/pompe (m ³ /s)	Volume b�che (m ³)	D cana (m)	Re	h (m)	UD (m/s)	h/D	Fr	Q crit
Genève	4.00E+06	0.04	0.08	10	1.03	1436	1	1.31E+06	2.58	1.31	2.58	0.42	0.5
Chaban EP fine	5.80E+06	0.008	0.016	1	0.524	30	0.64	6.68E+05	0.89	1.04	1.39	0.41	40
Chaban EP coarse	1.80E+06	0.035	0.035	1	0.524	30	0.64	6.68E+05	0.89	1.04	1.39	0.41	5
Chaban EU	5.00E+06	0.016	0.016	3	0.136	33	0.38	4.56E+05	1.26	1.20	3.32	0.62	200
Techfina	5.00E+06	0.0125	0.0125	1	0.56	139	0.689	1.03E+06	1.75	1.50	2.54	0.58	450
Monji (2010)	4.50E+05	1.80E-04	1.80E-04	1	1.00E-04	8.30E-03	0.015	8.49E+03	0.20	0.57	13.33	1.48	1400
Okamura (2007)	1.50E+05	5.00E-03	0.01	1	0.0167	0.05	0.1	2.13E+05	0.05	2.13	0.50	2.15	1200

Annexe 16 : Descriptif du protocole expérimental de Möller

Dispositif expérimental : Ce dispositif est principalement composé d'un réservoir (a) avec les dimensions décrites dans la [Figure 46](#). La première partie « stilling bassin » sert à avoir un flux uniforme en entrée du réservoir d'étude « main bassin ». La conduite d'entrée est perforée afin de diffuser le jet de manière homogène, ensuite l'écoulement se fait verticalement vers le réservoir principal via une toison de filtre. La deuxième partie (b) concerne le dispositif d'aspiration. Quatre différents diamètres ont été utilisés, allant de 200 à 500mm. La conduite d'aspiration est installée horizontalement (sans pente ou changement de direction). La partie (c) du dispositif sert à recirculer l'eau et contrôler les vitesses d'injection. La température de l'eau correspond à la température de l'air ambiant. Cependant, le fonctionnement des pompes est susceptible d'augmenter la température et modifier les propriétés du flux. Les résultats de l'expérience ont montré que les variations sont négligeables.

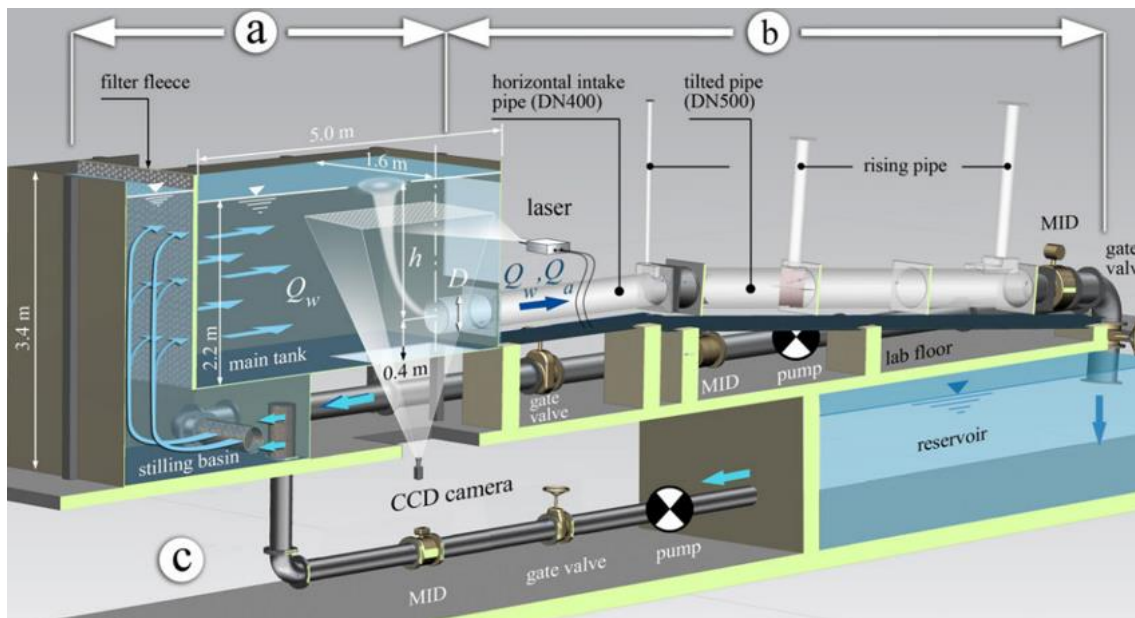
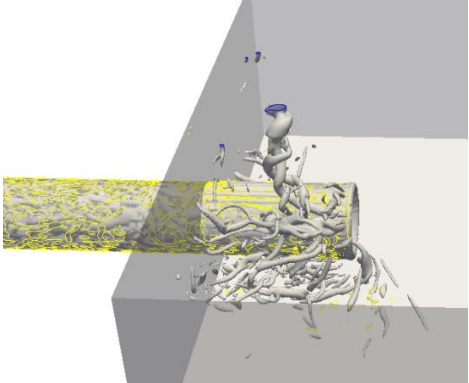
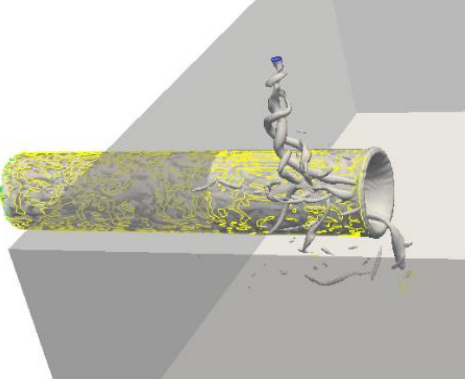
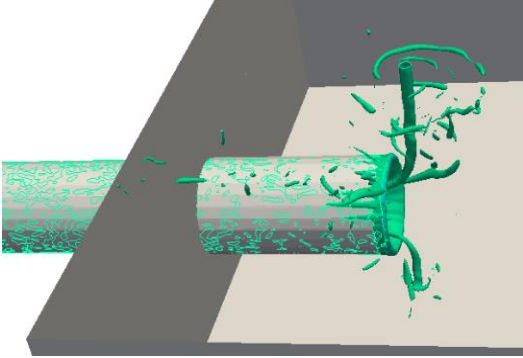
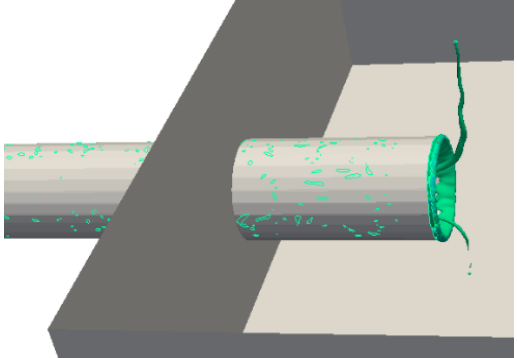
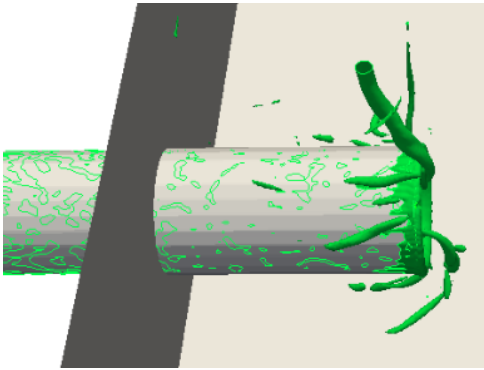
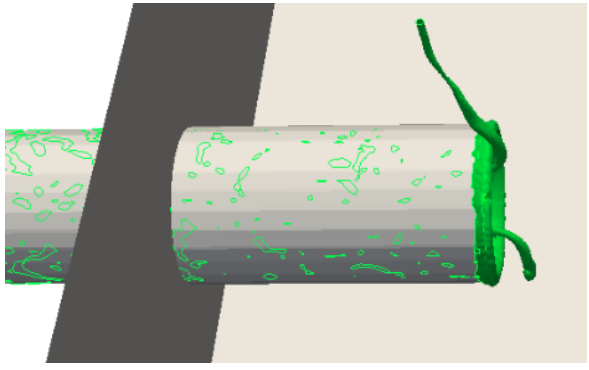


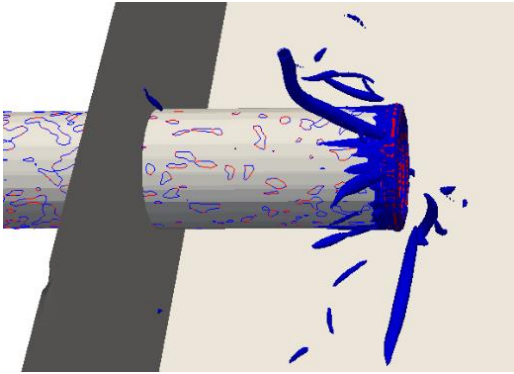
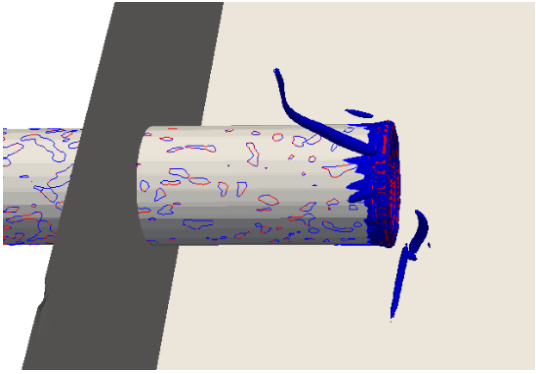
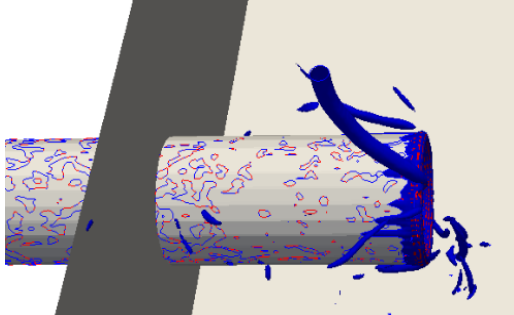
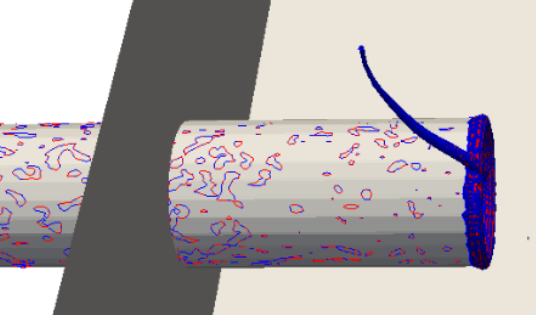
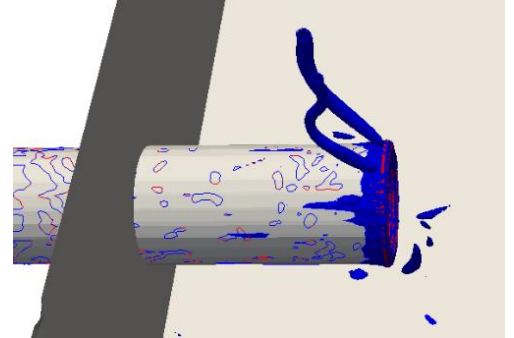
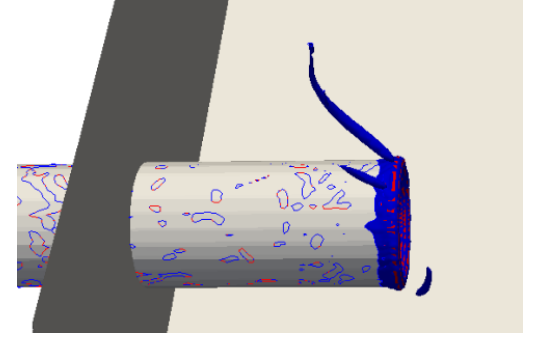
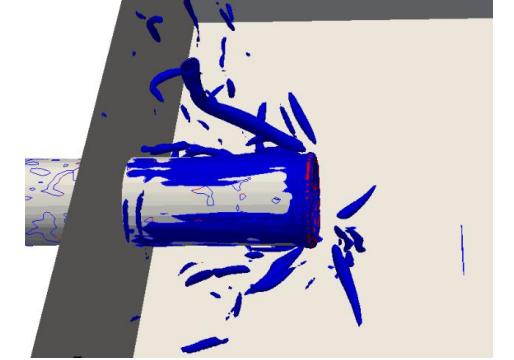
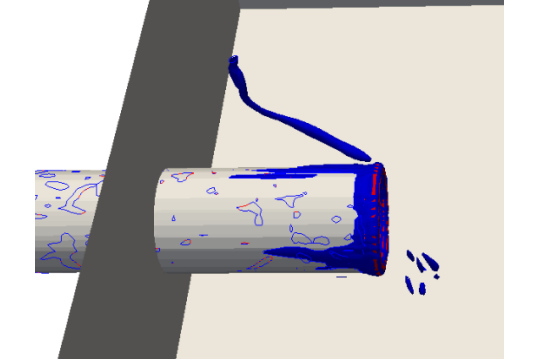
Figure 46: Dispositif expérimental complet de Möller

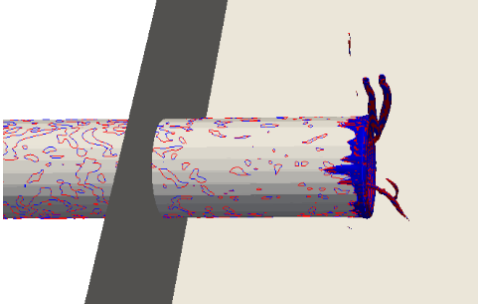
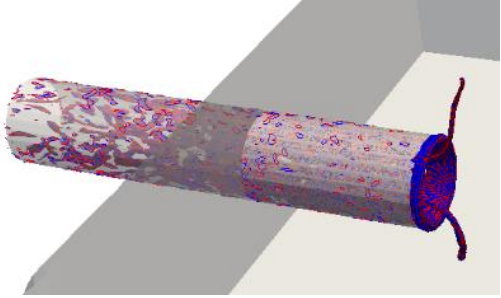
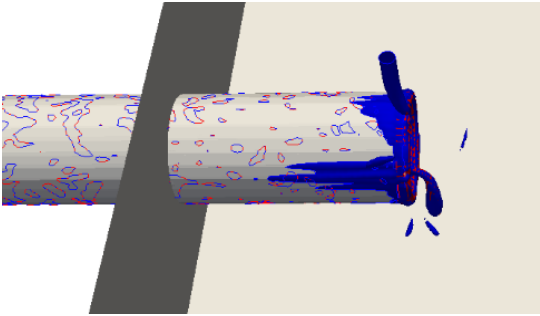
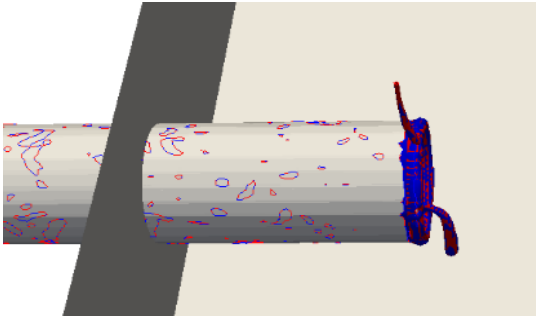
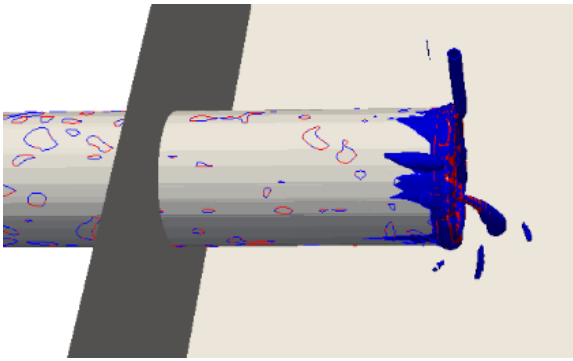
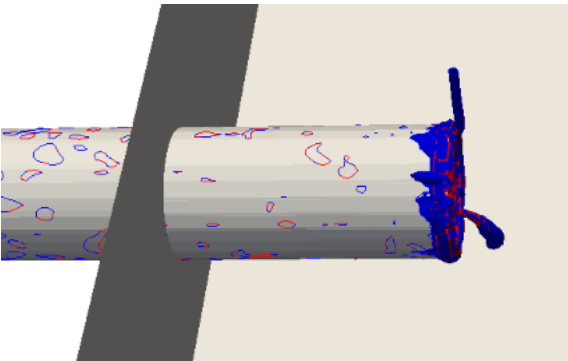
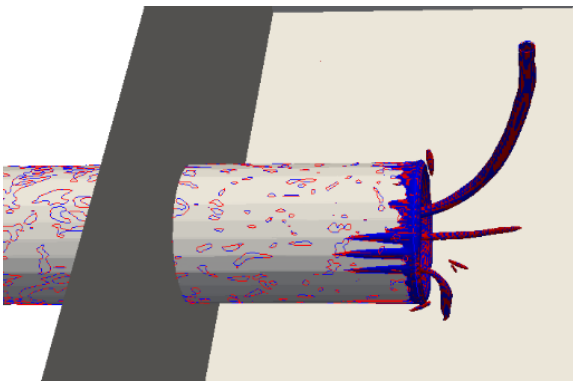
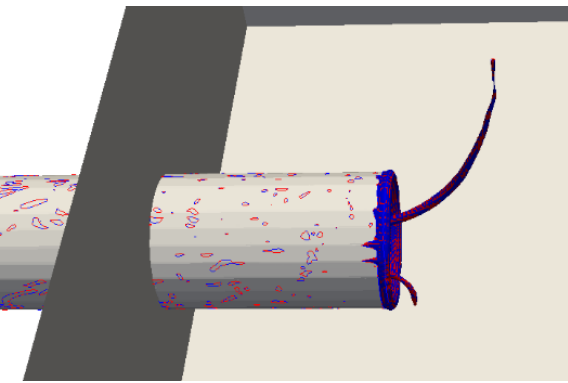
Instrumentation et mesures :

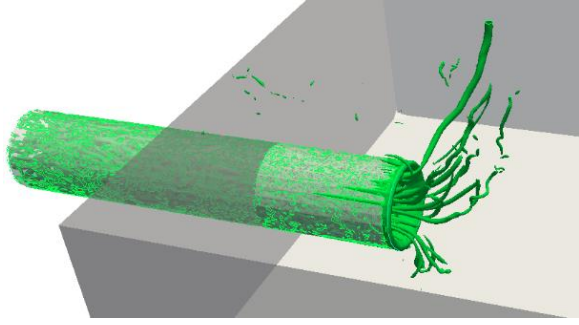
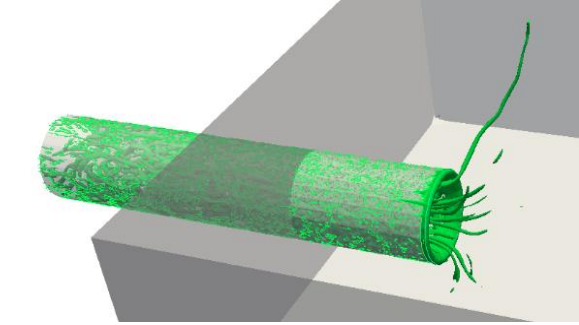
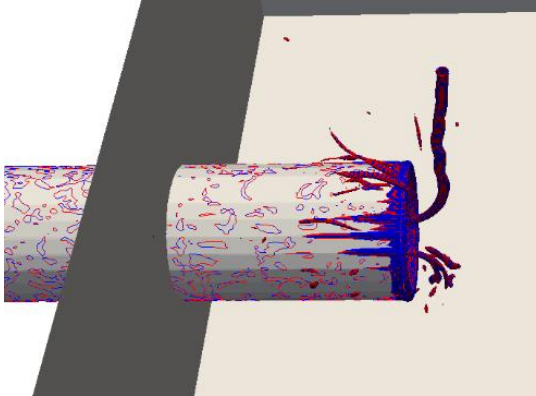
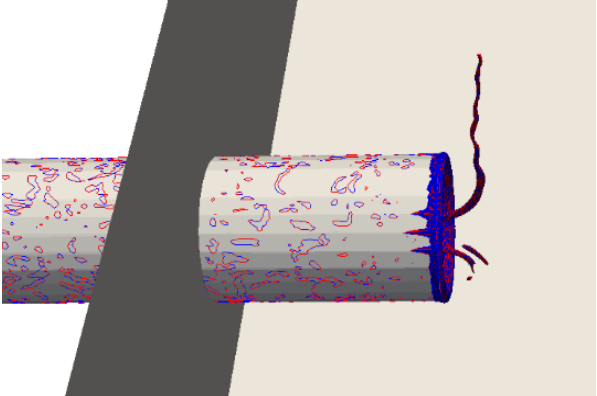
Instrumentation	Unité	Mesure
ADV	m/s	Vitesse à l'entrée du réservoir principal
MID	m ³ /s	Débit d'aspiration ; qui est réglé via les vannes
Sonde US	h	Hauteur d'eau dans le réservoir principal
Boîte VT		Entrée manuelle du type du vortex (connectée à l'ordinateur des mesures)
Capteur de pression	mbar	Pression dans les tubes de de-aération
2D PIV		Visualisation instantanée des champs de vitesse
Thermomètre	°C	Température de l'eau
Conductimètre ToR		Conductivité entre l'eau et l'air

Annexe 17 : Résultats de la modélisation CFD des vortex

Simulation	Q_{min}	Q_{max}
3	 <p style="text-align: center;">$Q = 5$</p>	 <p style="text-align: center;">$Q = 15$</p>
6	 <p style="text-align: center;">$Q = 30$</p>	 <p style="text-align: center;">$Q = 1800$</p>
7	 <p style="text-align: center;">$Q = 10$</p>	 <p style="text-align: center;">$Q = 120$</p>

<p>8</p>	 <p>Q = 4</p>	 <p>Q = 8</p>
<p>10</p>	 <p>Q = 6</p>	 <p>Q = 75</p>
<p>11</p>	 <p>Q = 2</p>	 <p>Q = 7</p>
<p>12</p>	 <p>Q = 0,5</p>	 <p>Q = 2</p>

<p>13</p>	 <p>Q = 40</p>	 <p>Q = 170</p>
<p>14</p>	 <p>Q = 10</p>	 <p>Q = 110</p>
<p>15</p>	 <p>Q = 11</p>	 <p>Q = 18</p>
<p>16</p>	 <p>Q = 20</p>	 <p>Q = 110</p>

17	 <p data-bbox="518 533 608 568">Q = 20</p>	 <p data-bbox="1137 533 1227 568">Q = 65</p>
18	 <p data-bbox="518 996 608 1032">Q = 12</p>	 <p data-bbox="1137 996 1227 1032">Q = 55</p>

Remarque : Le code couleur n'a pas de signification physique, Il a été mis en place uniquement pour des raisons de visibilité,

Pour les simulations qui ne sont pas présentes dans le tableau, les résultats n'ont pas été concluants. Deux cas de figure peuvent être différenciés : soit le vortex n'est pas du tout observé ou bien il y a beaucoup de structures parasites qui ne permettent pas d'identifier un vortex remarquable (cf. **Figure 37**).



3D EAU

MEMOIRE DE FIN D'ETUDES

Diplôme : Ingénieur de l'Ecole Nationale de Génie de l'Eau et de l'Environnement Strasbourg (ENGEES)

Spécialité : Hydraulique urbaine

Auteur : ZIDAOUI Imane

Promotion : Bretagne

2017 - 2020

Titre : Application de la mécanique des fluides numérique (CFD) à une étude d'instrumentation et à un programme de R&D sur la formation des vortex dans les chambres de pompage

Nombre de pages : 87 **dont** texte : 60 annexes : 27

Nombre de références bibliographiques : 42

Structure d'accueil : 3D EAU – Strasbourg

Maître de stage : DUFRESNE Matthieu

Résumé

Ce mémoire étudie l'instrumentation des déversoirs d'orage de la communauté d'agglomération de Longwy. Chaque DO est pré-diagnostiqué en analysant ses données géométriques et métrologiques. Ensuite, une méthode de modélisation (reposant sur le principe de conversion hauteur-débit) est choisie en fonction des contraintes hydrauliques de l'ouvrage et son enjeu. Un large panel d'approches est disponible (0D, 1D, 3D ou réaménagement de l'ouvrage). Par ailleurs, cette étude propose également une démarche pour corréliser les paramètres hydrauliques caractérisant une station de pompage aux paramètres numériques de la modélisation CFD dans le but d'évaluer l'intensité d'un potentiel vortex de surface.

Mots-clés : Autosurveillance – Déversoir d'orage – Loi hauteur débit – Vortex – Q critérium – Mécanique des fluides