

**Mémoire de fin d'étude  
Présenté pour l'obtention du diplôme d'ingénieur de  
l'ENGEES**

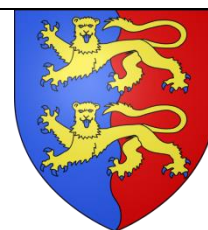
**Nom prénom :**

**AIT AMI Oussama**

**Promotion**

**Manche**

**2012-2015**



**Sujet :**

**Création d'un déversoir d'orage associant performance hydraulique  
et facilité d'instrumentation suivant les contraintes extérieures**

**Organisme d'accueil : iCUBE en collaboration avec l'Eurométropole de Strasbourg**

**Maître de stage : José VAZQUEZ**

**Date de stage : 02/02/2015 au 30/06/2015**

**Mémoire non confidentiel**

---

# Remerciements

*En premier lieu je tiens à remercier M. José VAZQUEZ, professeur, mon maître de stage, pour son enthousiasme, ses conseils et sa disponibilité. Il a su me communiquer sa passion de l'hydraulique et son envie d'avancer, c'est grâce à cela que j'ai pu mener à bien les recherches qui m'ont été confiées.*

*Je remercie également Mme. Marie Manceau, responsable de la gestion centralisée - Adjoint au responsable du département Qualité et Télécontrôle des Rejets chez l'Eurométropole de Strasbourg, pour sa gentillesse et sa disponibilité tout au long de l'étude sur laquelle nous avons travaillé ensemble.*

*J'adresse aussi mes remerciements à M. Madjid Sebsadji, M. Maxime TRAUTMANN, M. Gilles ISENMANN et M. David LEFEBURE pour l'abondance de bonne humeur, leurs encouragements et leur gentillesse.*

*Enfin, je remercie l'ensemble des membres de l'équipe technique du département Qualité et Télé-contrôle des Rejets de l'Eurométropole de Strasbourg, et de l'équipe Hydraulique Urbaine de l'Icube pour leur accueil, leur collaboration et leur dynamisme.*

---

## Résumé

### **Création d'un déversoir d'orage associant performance hydraulique et facilité d'instrumentation suivant les contraintes extérieures**

L'objectif de ce stage est de créer un déversoir d'orage associant performance hydraulique et facilité d'instrumentation suivant certaines contraintes géométriques et hydrauliques extérieures. Le déversoir d'orage doit répondre aux besoins et aux contextes de l'Eurométropole de Strasbourg.

Dans un premier temps, nous avons rappelé le contexte réglementaire et nous avons réalisé un diagnostic des déversoirs d'orages existants à Strasbourg. Dans la continuité du travail menée depuis 3 ans sur les déversoirs d'orage entre le laboratoire Icube et l'Eurométropole de Strasbourg, une base de données des différents déversoirs présents sur le réseau de Strasbourg a été réalisée. Cette cartographie des déversoirs a permis de classer et de définir les contraintes géométriques et hydrauliques du contexte strasbourgeois.

Dans un deuxième temps, en s'appuyant sur la base de données précédente, une étude spécifique des jonctions de collecteur en entrée de l'ouvrage a été faite. L'impact hydrodynamique de ces jonctions sur le fonctionnement du déversoir a contribué à définir des critères de dimensionnement des conduites et ouvrages amont.

Dans un troisième temps, nous avons dimensionné le déversoir, en se basant sur les contraintes géométriques du réseau existant, c'est un déversoir d'orage latéral à crête haute. Nous avons créé un fichier de dimensionnement du déversoir sous Excel pour atteindre notre objectif.

Enfin, La modélisation 3D nous a permis de montrer les complexités d'écoulement du déversoir d'orage et de comparer les lignes d'eaux des simulations 3D avec l'étude de dimensionnement du déversoir d'orage en 1D. L'analyse des modélisations contribue à la rédaction d'un guide (une note technique) qui indique les conclusions de l'étude.

## **Abstract**

### **Creating a sewer overflow linking hydraulic performance and easing instrumentation to outside's constraints**

To create a sewer overflow linking hydraulic performance, easing instrumentation to outside's geometrical and hydraulic constraints, the purpose should be realized respecting the contexts of the Eurometropolis of Strasbourg.

First of all, we analyze the statutory context and the sewer overflows existing in Strasbourg. This is why, we remember the work led for 3 years between the laboratory Icube and the Eurometropolis of Strasbourg, and so a database of the various present overflows on the network of Strasbourg was realized. This mapping of overflows allowed to classify and to define the geometrical and hydraulic constraints of the context of Strasbourg.

Subsequently, the sizing's criteria of the conducts and the upstream works has been defined by: Analyzing the previous database; Studying of collector's junctions; Simulating the hydrodynamic impact of these junctions.

After that, by using the geometrical constraints of the existing network and the last conclusions of our studies it is the sewer overflow with high crest that has been chosen.

Finally, we have developed the 3D modeling allowing us to show the difficulties of the sewer overflows and comparing the water's lines simulations with the study of sizing of the sewer overflows 1D. The analysis of modeling contributes to the writing of a guide or a technical note, which indicates the different studies.

# Sommaire

<b>Table des figures</b>	<b>7</b>
<b>Table des tableaux</b>	<b>7</b>
<b>Introduction</b>	<b>9</b>
<b>I. Contexte de stage</b>	<b>10</b>
<b>I.1. Présentation du laboratoire ICube</b>	<b>10</b>
<b>I.2. Cadre technique et législatif de l'étude</b>	<b>10</b>
<b>I.3. Rappel sur les déversoirs d'orages</b>	<b>11</b>
<b>II. Diagnostic et résultats des DO existants</b>	<b>13</b>
<b>II.1. Diagnostic</b>	<b>13</b>
<b>II.2. Résultats</b>	<b>13</b>
II.2.1. Le nombre de la conduite amont	14
II.2.2. La pente de la conduite amont	15
II.2.3. Les diamètres de la conduite amont	15
II.2.4. Les diamètres de la conduite conservée	16
II.2.5. La condition aval du réseau	17
II.2.6. L'influence du milieu naturel	17
II.2.7. Le type du déversoir d'orage	18
II.2.8. Le type de la crête	19
II.2.9. L'emplacement des clapets	19
II.2.10. Le type de clapet	20
<b>II.3. Conclusion et synthèse</b>	<b>21</b>
<b>III. La jonction</b>	<b>22</b>
<b>III.1. Bibliographie sur les jonctions</b>	<b>22</b>
<b>III.2. Etude de la jonction</b>	<b>24</b>
III.2.1. Présentation d'OpenFOAM®	24
III.2.2. Objectif de l'étude	25
III.2.3. Géométrie de la jonction 3D	25
III.2.4. Maillage du domaine de simulation	26
III.2.5. Analyse hydraulique et simulation	29
III.2.6. Résultats et détermination de la longueur de rétablissement	30
<b>IV. Dimensionnement DO latéral à crête haute</b>	<b>37</b>
<b>IV.1. Avantage d'un déversoir latéral à crête haute</b>	<b>37</b>
<b>IV.2. Principe de dimensionnement</b>	<b>38</b>
<b>IV.3. Données d'entrées géométriques</b>	<b>38</b>
<b>IV.4. Détermination des débits de référence, débit de projet et débit aval maximum</b>	<b>39</b>
IV.4.1. Courbe de fonctionnement	39

IV.4.2. Principe de fonctionnement	39
IV.4.3. Les données d'entrées des débits	40
<b>IV.5. Analyse hydraulique des débits</b>	<b>41</b>
<b>IV.6. Dimensionnement de la conduite aval étranglée (et)</b>	<b>41</b>
IV.6.1. Les contraintes	41
IV.6.2. Calcul la hauteur amont de la conduite aval $ham - C - av$	43
IV.6.3. Calcul de la longueur de la conduite aval étranglée $Ldet$ au Qréf	46
<b>IV.7. Dimensionnement du déversoir (DO)</b>	<b>47</b>
IV.7.1. Le choix de la pente de radier $Id(DO)$ et le type de la crête	47
IV.7.2. Calcul la hauteur d'eau à l'aval du déversoir d'orage $hav - DO$	48
IV.7.3. Calcul la longueur de la crête du déversoir $Ld(DO)$ et la hauteur d'eau dans la conduite amont $ham$	49
<b>IV.8. La ligne d'eau de la modèle 1D au long de la crête</b>	<b>50</b>
<b>IV.9. Conclusion</b>	<b>52</b>
<b>V. Modélisation de déversoir d'orage</b>	<b>53</b>
<b>V.1. Contexte et objectif de l'étude</b>	<b>53</b>
<b>V.2. Analyse hydraulique</b>	<b>54</b>
<b>V.3. Géométrie pour la modélisation 3D</b>	<b>55</b>
<b>V.4. Maillage du modèle 3D</b>	<b>56</b>
<b>V.5. Résultats de la modélisation 3D</b>	<b>57</b>
V.5.1. Les lignes d'eaux pour un débit d'entrée = 538 l/s	59
V.5.2. Les lignes d'eaux pour un débit d'entrée = 1000 l/s	60
V.5.3. Les lignes d'eaux pour $Q_{entrée} = 250$ l/s	61
V.5.4. Solution retenue pour l'emplacement du capteur	61
V.5.5. Conclusion	64
<b>Conclusion</b>	<b>66</b>
<b>Bibliographie</b>	<b>67</b>
<b>ANNEXE 1 : PLAN DE L'EUROMETROPOLE DE STRASBOURG</b>	<b>68</b>
<b>ANNEXE 2 : LA VARIATION DE LA SURFACE LIBRE ENTRE LES DEUX TYPES DE JONCTION POUR CHAQUE SIMULATION</b>	<b>69</b>
<b>ANNEXE 3 : RESULTATS POUR L'ENSEMBLE DES SIMULATIONS DE LA JONCTION</b>	<b>70</b>
<b>ANNEXE 4 : FEUILLE D'EXCEL DE DIMENSIONNEMENT DU DO</b>	<b>71</b>
<b>ANNEXE 5 : EXEMPLE DE DIMENSIONNEMENT DU DO</b>	<b>73</b>
<b>ANNEXE 6: Modélisation la ligne d'eau du déversoir</b>	<b>80</b>
<b>ANNEXE 7 : Runge-Kutta classique d'ordre deux et quatre</b>	<b>81</b>

## Table des tableaux

Tableau 1:Condition à limite de la jonction .....	28
Tableau 2:Liste des simulations et débits correspondants pour la jonction.....	30
Tableau 3:Variation des vitesses moyennes pour la jonction .....	35
Tableau 4:Liste des simulations et débits correspondants pour la modélisation du DO .....	55
Tableau 5: Erreur relative sur le débit d'entrée.....	63

## Table des figures

Figure 1: Représentation schématique d'un déversoir d'orage – source [1] .....	12
Figure 2: Les différents types d'organes de dérivation – source [1] .....	12
Figure 3:Diagnostic de nombre de la conduite amont .....	15
Figure 4: Diagnostic pente de la conduite amont .....	15
Figure 5: Diagnostic des diamètres de la conduite amont .....	16
Figure 6: Diagnostic des diamètres de la conduite conservée .....	17
Figure 7: Diagnostic de la condition aval du réseau .....	17
Figure 8:Diagnostic de l'influence du milieu naturel .....	18
Figure 9: Diagnostic de type des déversoirs d'orages .....	18
Figure 10: Diagnostic le type de la crête .....	19
Figure 11: Diagnostic de l'emplacement des clapets .....	20
Figure 12: Diagnostic le type de clapet .....	20
Figure 13: Descriptions des structures d'écoulement identifiées par Best (1987) lors d'une étude en 2D d'un écoulement en jonction [6] .....	23
Figure 14:Structure hydrodynamique d'une jonction à 90° en canaux rectangulaires [6] .....	24
Figure 15: Géométrie de la jonction de 45 degré .....	26
Figure 16: Maillage de la jonction .....	29
Figure 17: Représentation de la surface libre pour la jonction de 45 degré (Sim1) .....	30
Figure 18: Variation de la surface libre pour la jonction de 45 degré .....	31
Figure 19: Variation de la surface libre pour la jonction de 90 degré .....	32
Figure 20: Representation de la vitesse moyenne d'écoulement suivant l'axe « x » pour la jonction de 90 degré (Sim1) .....	33
Figure 21:Déversoir à crête haute [3] .....	37
Figure 22: Les paramètres de dimensionnement du déversoir d'orage [3] .....	38
Figure 23: Courbe de fonctionnement du déversoir d'orage [3] .....	39
Figure 24: Position de la ham-c-av .....	43
Figure 25: Organigramme de la décision de la Hauteur amont de la conduite aval .....	44

---

Figure 26: Vue de dessus de la zone de recirculation	46
Figure 27: Position de la hav-DO	48
Figure 28: Position de la ham et $L_d(DO)$	49
Figure 29: La ligne d'eau au niveau de la crête pour $Q_{entrée} = 538$ l/s et $Q_{conservé} = 63$ l/s	51
Figure 30: Géométrie du modèle 3D pour le DO	56
Figure 31: Maillage du modèle 3D du DO	56
Figure 32: Représentation de la surface libre pour la simulation 1	57
Figure 33: Représentation de la surface libre pour la simulation 4	57
Figure 34: Représentation de la surface libre pour la simulation 7	58
Figure 35: Débit conservé et déversé pour la simulation 1 du DO	58
Figure 36: Les lignes d'eaux au niveau de la crête pour un débit d'entrée = 538 l/s	59
Figure 37: Les lignes d'eaux au niveau de la crête pour un débit d'entrée = 1000 l/s	60
Figure 38: Les lignes d'eaux au niveau de la crête pour $Q_{entrée} = 250$ l/s	61
Figure 39: L'emplacement du capteur d'instrumentation	62
Figure 40: Hauteur d'eau 1D et 3D à l'endroit du capteur( $x=1,75$ m )	63
Figure 41: L'évolution sur l'erreur relative du débit d'entrée	64



## **Introduction**

Le contexte de ce stage se situe dans deux projets menés en parallèles par l'Eurométropole de Strasbourg : le schéma directeur d'assainissement et un programme d'auto-surveillance de son réseau. Les déversoirs d'orages s'imposent directement dans les différentes phases d'études de ces deux projets.

L'intérêt de l'Eurométropole de Strasbourg est la rédaction d'un guide technique (note technique) dont l'objectif est de définir les prescriptions techniques en termes de dimensionnement hydraulique d'un déversoir d'orage adapté au contexte de l'Eurométropole de Strasbourg, tout en intégrant le contrôle des rejets (auto-surveillance).

Afin de construire un déversoir d'orage associant performance hydraulique et facilité d'instrumentation, trois étapes seront abordées :

- Le diagnostic des déversoirs d'orages existants qui est une source utile de documentation bibliographique, ainsi qu'un outil d'information et surtout de justification des choix de différents paramètres géométriques du déversoir d'orage à créer ;
- Le dimensionnement du déversoir d'orage 1D qui doit répondre aux besoins de l'Eurométropole de Strasbourg ;
- L'étude de la jonction à l'amont du déversoir d'orage et l'étude de déversoirs d'orages en vue de leur instrumentation en utilisant la modélisation 3D.

---

# **I. Contexte de stage**

## **I.1. Présentation du laboratoire ICube**

Le laboratoire des sciences de l'ingénieur, de l'informatique et de l'imagerie ICube, créée en 2013, est une unité mixte de recherche sous la cotutelle de l'Université de Strasbourg, du CNRS, de l'ENGEES et de l'INSA de Strasbourg. Il est le résultat de la fusion des anciens laboratoires LSIT, InESS, IMFS, IPB-LINC. Ces anciens laboratoires sont réorganisés en 4 départements, chacun divisés en équipes. L'équipe Mécaflu du département Mécanique d'ICube est axée sur la modélisation, l'expérimentation et la simulation numérique de fluides en interaction avec leur environnement. Elle est organisée en 3 groupes de projets :

- ✓ Hydraulique Urbaine,
- ✓ Instabilités, turbulence, diphasique,
- ✓ Traitement des eaux usées et rhéologie.

J'ai réalisé mon travail de fin d'études au sein du groupe de projet Hydraulique Urbaine.

## **I.2. Cadre technique et législatif de l'étude**

Dans le cadre d'un programme de recherche et de développement entre l'Eurométropole de Strasbourg et laboratoire « Systèmes Hydrauliques Urbains » de l'Ecole Nationale du Génie de l'Eau et de l'Environnement de Strasbourg (ENGEES), une convention d'étude et recherche a été mise en place entre l'Eurométropole de Strasbourg et l'ENGEES – Icube pour objet : Gestion de l'eau en milieu urbain : Maitrise des rejets vers le milieu naturel à travers les déversoirs d'orages.

L'Eurométropole de Strasbourg veut choisir avec pertinence la géométrie de l'ouvrage en fonction des performances hydrauliques et des facilités d'instrumentation. Afin d'apporter la compétence du laboratoire Icube dans cette démarche, il est envisagé la création d'un guide

---

technique adapté au contexte strasbourgeois. La mise en place de l'autosurveillance des déversoirs de l'Eurométropole de Strasbourg est quasiment terminée. Cependant, il reste quelques ouvrages spécifiques à instrumenter. Afin de permettre à l'Eurométropole de Strasbourg de finaliser cette démarche d'instrumentation, le laboratoire apportera sa compétence en termes de soutien scientifique aux modélisations 3D réalisées par l'Eurométropole de Strasbourg au sein de l'Icube.

C'est dans le cadre d'expertise que j'ai pu réaliser mon stage de fin d'études.

### **I.3. Rappel sur les déversoirs d'orages**

Les déversoirs d'orage sont bien le lien direct entre le réseau d'assainissement et le milieu naturel. En effet ils assurent la régulation hydraulique des effluents unitaires dans le réseau d'assainissement en temps de pluie ainsi que le partage des débits restant dans le réseau et ceux devant être évacués.

Un déversoir d'orage est un ouvrage constitutif des systèmes d'assainissement permettant l'évacuation des sur-débits ne pouvant pas être pris en charge par l'aval du réseau (STEU) [2]. Les déversoirs d'orages ont deux fonctions principales :

- ✓ La régulation du débit à l'aval du réseau en dessous d'un débit de consigne (« Flux conservé » sur la Figure 1),
- ✓ L'évacuation des sur-débits, via une canalisation de décharge, vers un exutoire (souvent le milieu naturel).

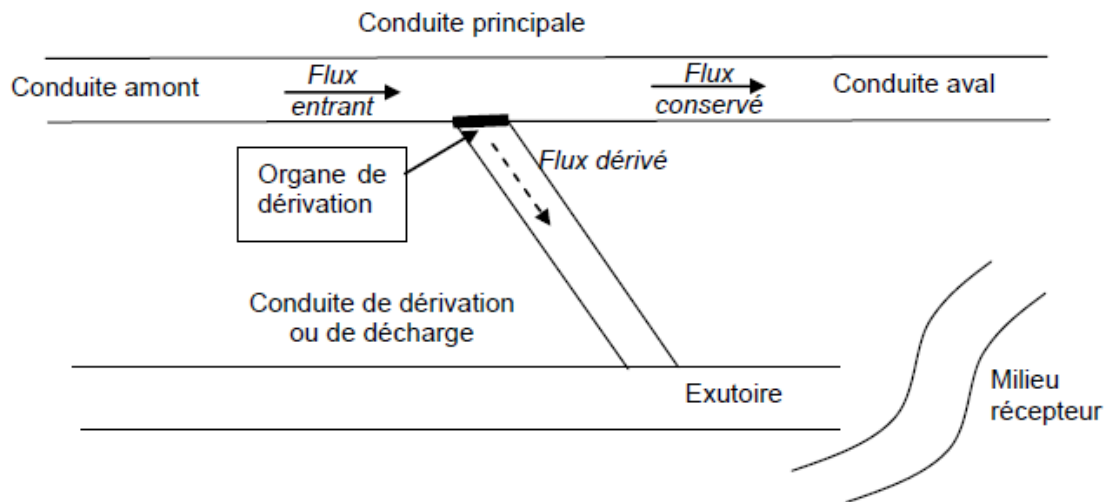


Figure 1: Représentation schématique d'un déversoir d'orage – source [1]

Le déversoir d'orage est représenté sur la Figure 1 sous le nom « Organe de dérivation ». La conception des déversoirs diffère en fonction des conditions topographiques du réseau (pente, profondeur) et des conditions hydrauliques du réseau (débits amont, conservé souhaité, dérivé). La majorité des déversoirs d'orages sont équipés de crêtes latérales mais il existe une grande quantité d'organes de dérivation (voir la Figure 2).

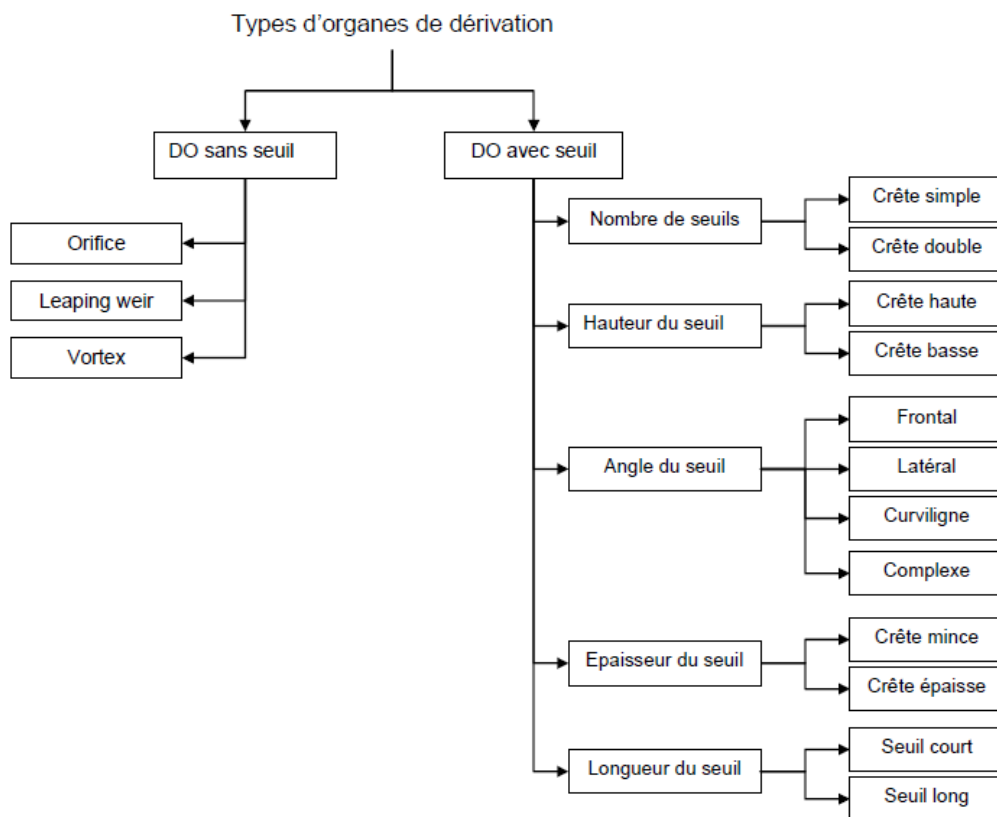


Figure 2: Les différents types d'organes de dérivation – source [1]

---

## **II. Diagnostic et résultats des DO existants**

L'objectif de cette partie est de réaliser une cartographie des déversoirs afin de permettre une classification et de définir les contraintes géométriques et hydrauliques du contexte strasbourgeois. La finalité étant la conception d'un déversoir adapté à l'Eurométropole de Strasbourg.

### **II.1. Diagnostic**

Dans la continuité du travail menée depuis 4 ans entre le laboratoire Icube et l'Eurométropole de Strasbourg, une quarantaine de déversoirs instrumentés ont permis de constituer une base de données de ces ouvrages et de leur fonctionnement hydraulique [4]. Cette banque de données est alimentée au quotidien par l'ensemble des capteurs mesurant en permanence les niveaux d'eau dans ces ouvrages. L'exploitation et la valorisation de ses données nécessitent une analyse approfondie. Ils seront donc une source utile de documentation bibliographique, ainsi qu'un outil d'information et surtout de justification des choix de différents paramètres géométriques du déversoir d'orage à créer.

Le diagnostic s'appuie d'abord sur la collecte d'information utile des rapports techniques existants, ensuite sur une classification des variables qui nous s'intéressent. L'information est plus précise au niveau de la conduite amont et la conduite conservé par rapport la conduite de décharge. Enfin, la fonction fréquence sous Excel nous a permis de qualifier chaque variable, afin de justifier le choix des paramètres de dimensionnement.

Les variables retenus pour la classification sont : les conduites amont (Nombre, diamètre, pente), les conduites conservées (Diamètre, pente), la condition aval de réseau, l'influence de milieu naturel, le type de déversoir d'orage, l'emplacement des clapets, le type de clapets et le type de crête.

### **II.2. Résultats**

Pour affiner les résultats de la fonction fréquence sous Excel, l'intervalle de classe pour chaque variable quantitative est déterminé d'une façon qu'il soit plus significatif possible. Par exemple, pour le variable "diamètre de conduite amont", le diamètre minimum

est 400mm et le maximum est 2400mm, l'intervalle de classe retenu est 200 mm, pour lequel la classification est basée. Cependant, les variables qualitatives comme « la condition aval de réseau » leurs classes sont explicites (Siphon, réseau, pompage, etc.).

Les variables choisies sont les suivantes :

- Le nombre de la conduite amont,
- La pente de la conduite amont,
- Les diamètres de la conduite amont,
- Les diamètres de la conduite conservée,
- La condition aval du réseau,
- L'influence du milieu naturel,
- Le type du déversoir d'orage,
- Le type de la crête,
- L'emplacement des clapets,
- Le type de clapet.

Les résultats du diagnostic pour chaque variable est illustré en dessous :

### **II.2.1. Le nombre de la conduite amont**

A l'amont du déversoir d'orage, le nombre de conduites amont détermine l'existence de la jonction ou non. Les déversoirs d'orages étudiés dans le contexte de l'Eurométropole de Strasbourg montrent que 21 DO ont une seule conduite à l'amont (50%), 17 DO ont deux conduites à l'amont (41%), 3 DO ont 3 conduites à l'amont (7%) et 1 DO avec 4 conduite à l'amont (2%). Ainsi, l'étude de la jonction avec deux conduites est plus fréquente dans ce contexte.

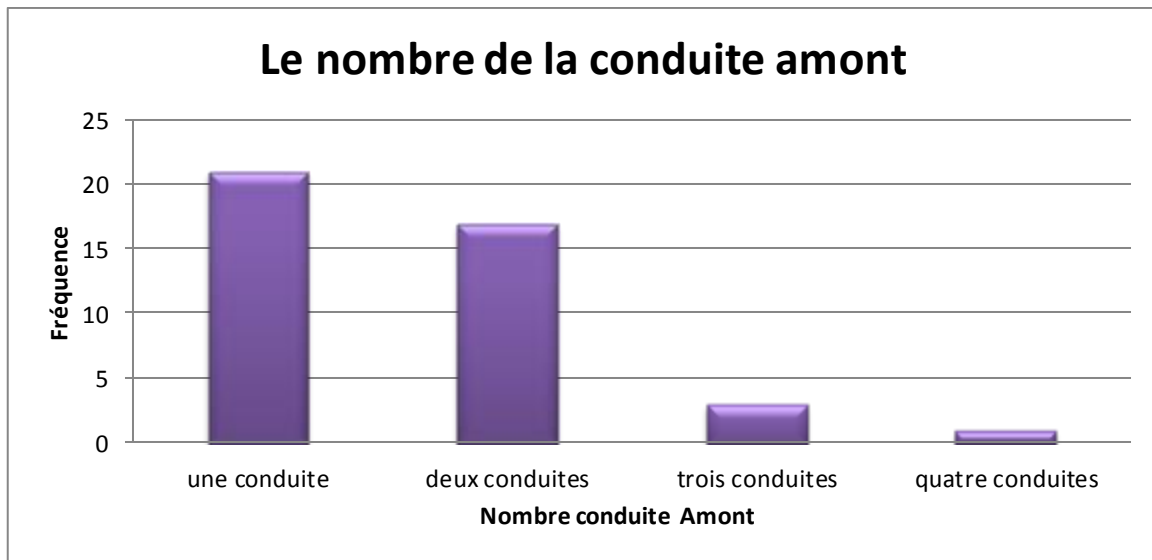


Figure 3: Diagnostic de nombre de la conduite amont

### II.2.2. La pente de la conduite amont

La pente des conduites est un paramètre très sensible au fonctionnement hydraulique des déversoirs d'orages par rapport à la détermination du régime d'écoulement dans la canalisation. Parmi les 64 conduites amont étudiés, l'étude montre que 56 conduites amont se situent entre 0,1% et 0,2% (88%), avec une tendance plus vers une pente de 0,2 %.

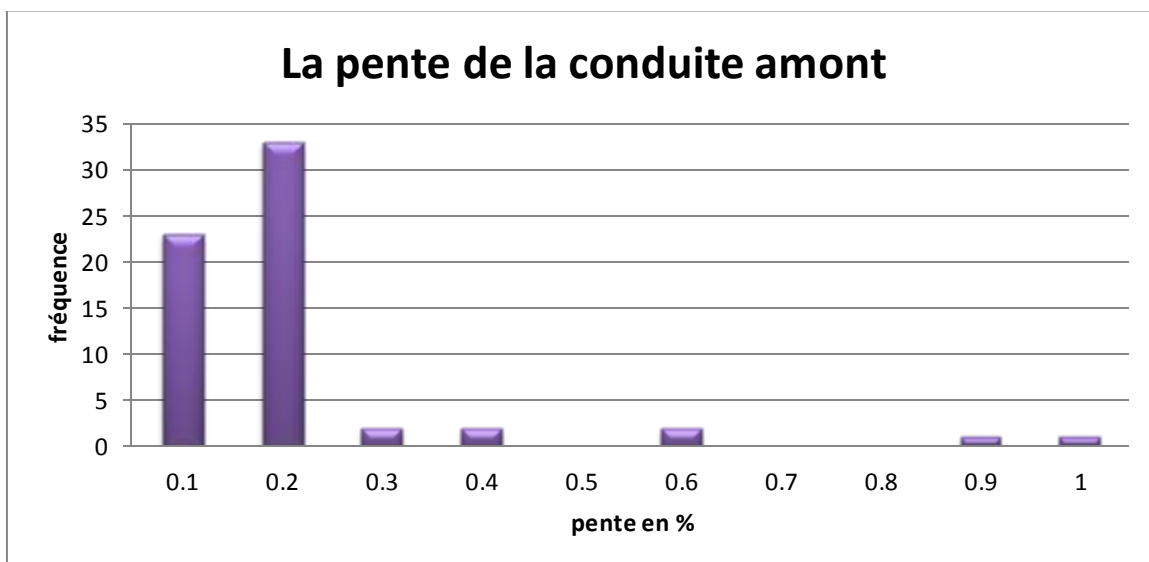


Figure 4: Diagnostic pente de la conduite amont

### II.2.3. Les diamètres de la conduite amont

L'analyse du résultat des diamètres de la conduite amont montre que les diamètres entre 600 mm et 800 mm sont les plus fréquents dans le contexte d'étude de l'Eurométropole de Strasbourg (45 % des diamètres amont étudiés), avec une tendance claire vers le diamètre de 800mm (28 % des diamètres amont étudiés). Les diamètres de 1000 mm et de 1600 mm se situent après avec un pourcentage de 13 % des diamètres étudiés pour chacun.

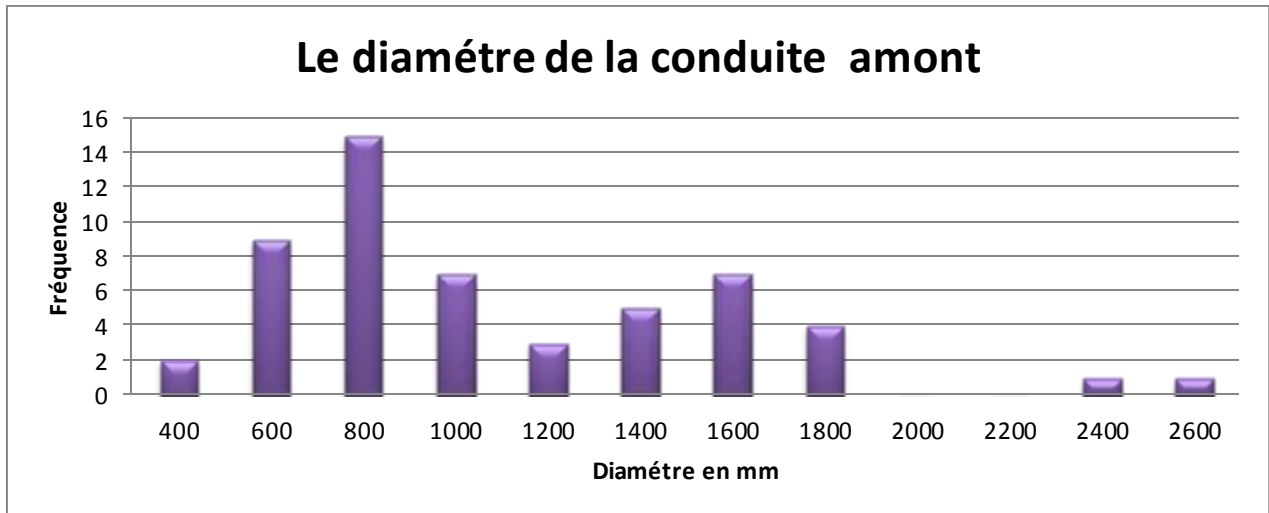


Figure 5: Diagnostic des diamètres de la conduite amont

#### II.2.4. Les diamètres de la conduite conservée

Les diamètres entre 300 mm et 800 mm sont les plus fréquents avec un pourcentage de 78% des conduites conservées, avec une tendance vers les diamètres de 400 mm (31% des diamètres conservés) et vers les diamètres de 800 mm (28 % des diamètres conservés).



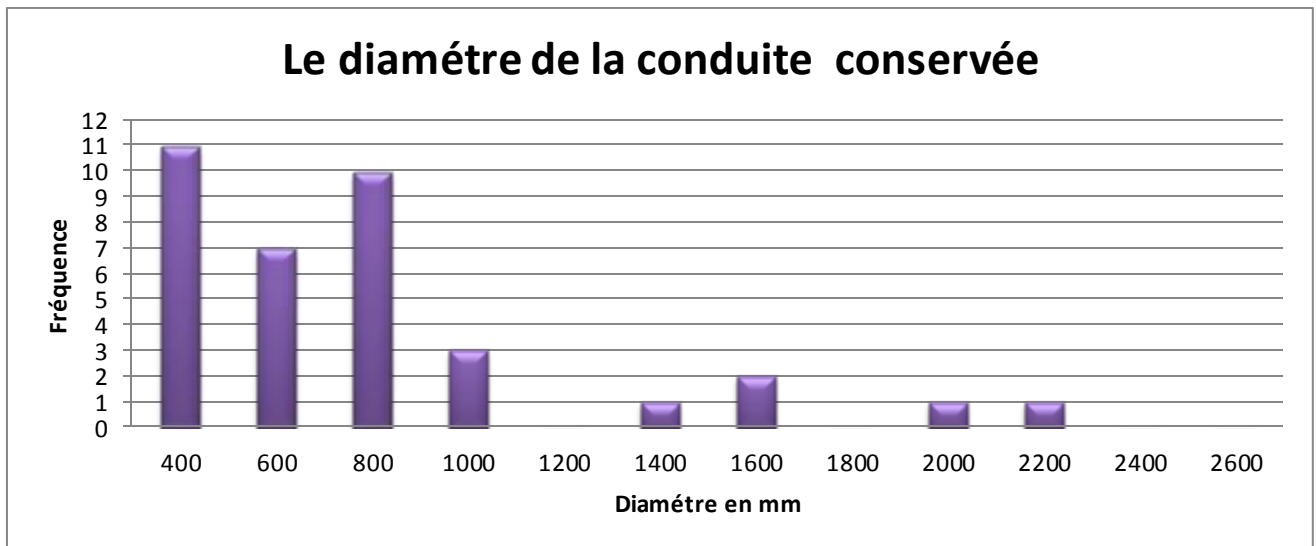


Figure 6: Diagnostic des diamètres de la conduite conservée

### II.2.5. La condition aval du réseau

Les déversoirs d'orages étudiés dans le contexte de l'Eurométropole de Strasbourg se situent à l'amont d'un réseau classique (62%), à l'amont des stations de pompage (22 %) et à l'amont des siphons (12%). La condition hydraulique aval STEP et bassin n'existe qu'une seule fois.

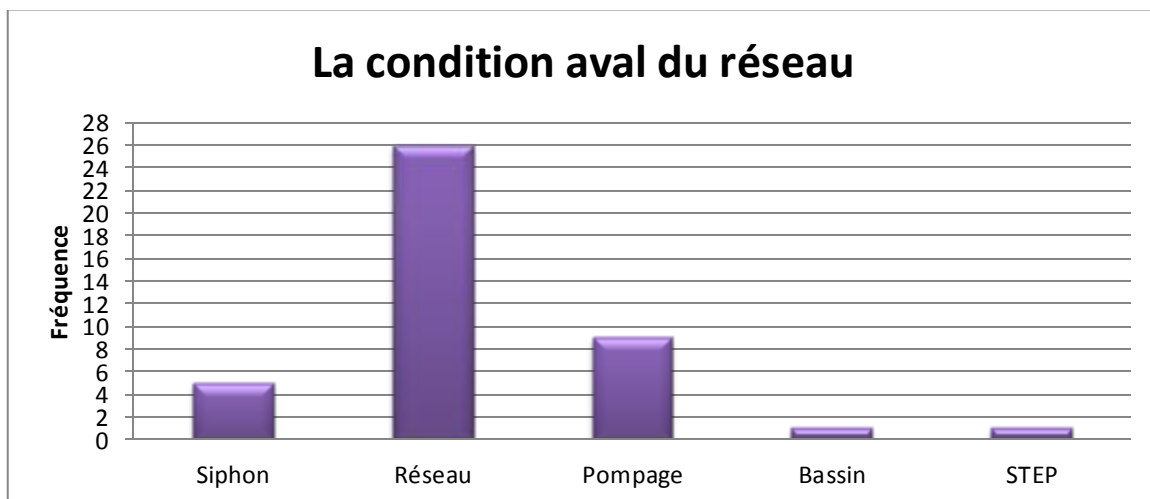


Figure 7: Diagnostic de la condition aval du réseau

### II.2.6. L'influence du milieu naturel

Le graphe ci-dessous illustre bien l'influence du milieu naturel par la remonté d'eau au niveau de la crête du déversoir d'orage.

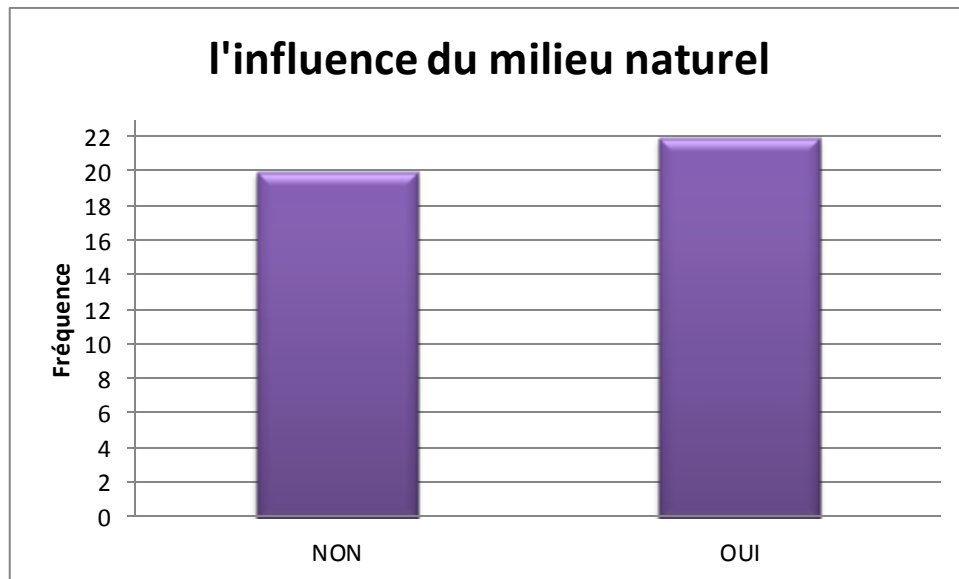


Figure 8: Diagnostic de l'influence du milieu naturel

### II.2.7. Le type du déversoir d'orage

Les déversoirs d'orages de type latéraux sont les plus fréquents avec un pourcentage de 62% des déversoirs d'orages étudiés. Les déversoirs d'orages doubles latéraux et frontaux se trouvent en deuxième position avec un pourcentage de 31%. Les déversoirs frontaux ont un pourcentage de 7% des déversoirs étudiés.

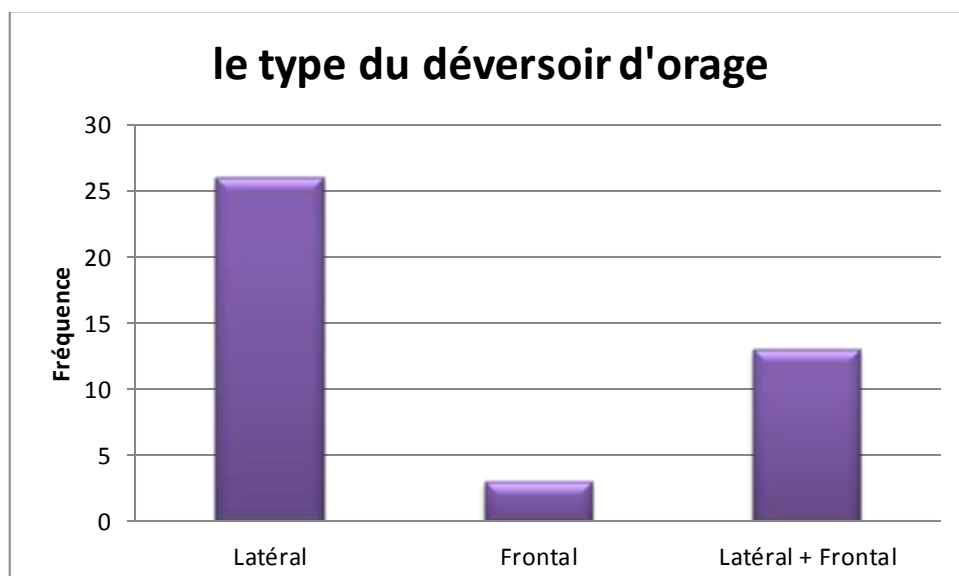


Figure 9: Diagnostic de type des déversoirs d'orages

## II.2.8. Le type de la crête

Une crête mince est le type de crête le plus fréquent des déversoirs d'orages étudiés avec un pourcentage de 72 %. La crête épaisse se trouve après avec un pourcentage de 26%. Les trop pleins représentent 1%.

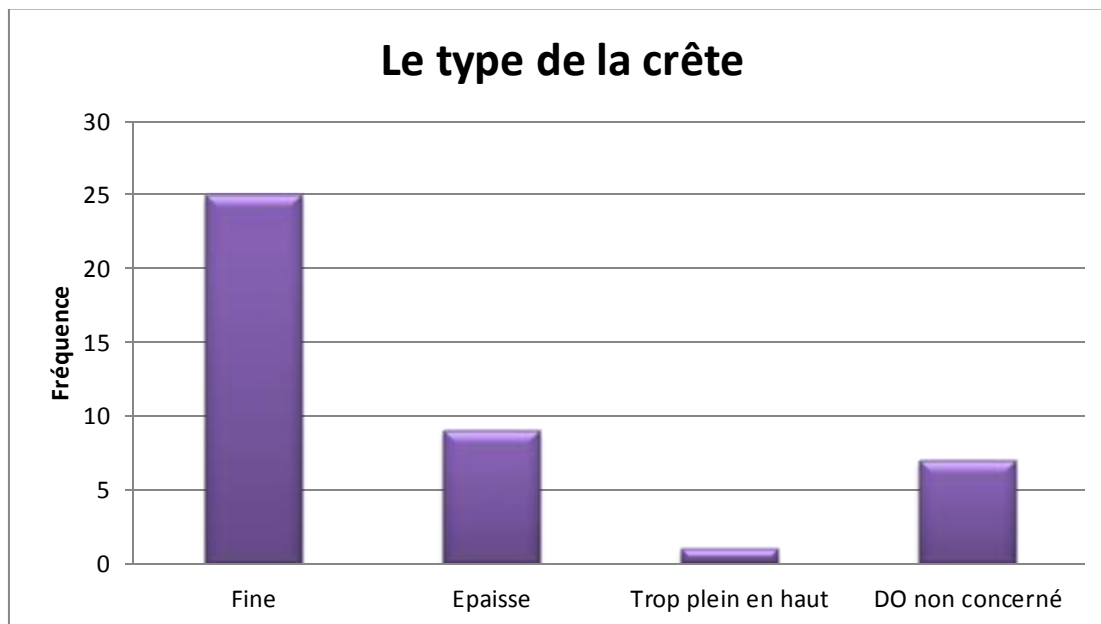


Figure 10: Diagnostic le type de la crête

## II.2.9. L'emplacement des clapets

Avant de parler sur l'emplacement des clapets, le diagnostic montre que 20 déversoirs d'orages ne contiennent pas de clapets. Donc pour les déversoirs d'orages concernés, l'emplacement des clapets en tête de déversement sont identifiés par 41 %, l'emplacement des clapets au niveau de la crête est illustrés par 37 %, enfin, les clapets au niveau des conduites occupent 22% qui restent.

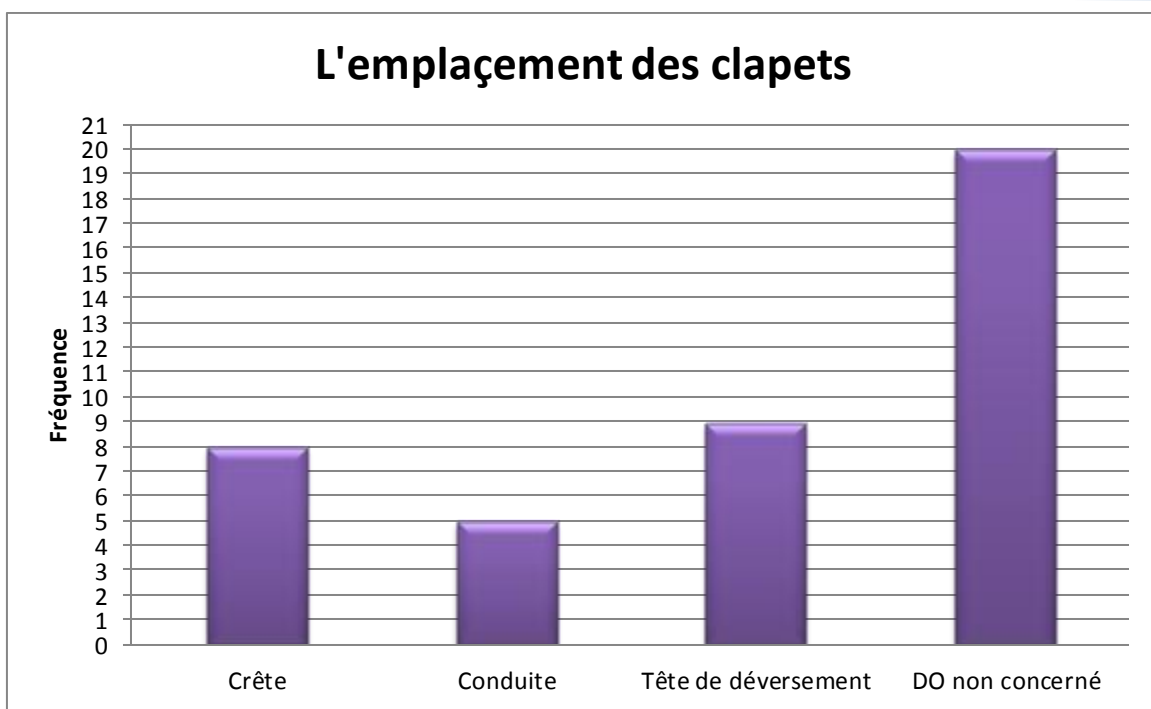


Figure 11: Diagnostic de l'emplacement des clapets

### II.2.10. Le type de clapet

La majorité des clapets sont de type rigide avec un pourcentage de 73% des déversoirs d'orages concernés. Le reste des clapets sont de type souple avec un pourcentage de 27%.

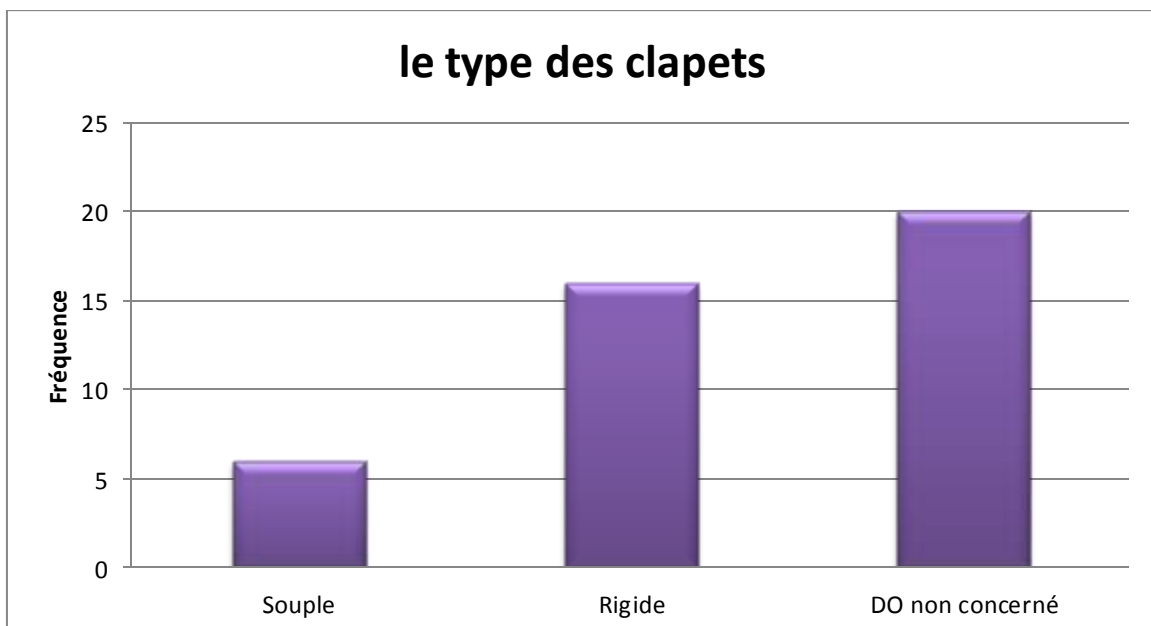


Figure 12: Diagnostic le type de clapet

## **II.3. Conclusion et synthèse**

A travers ce diagnostic, la vision sur l'étude de dimensionnement du déversoir d'orage est plus claire, en effet une identification des différents paramètres du déversoir, dans le contexte strasbourgeois, a permis de justifier le choix de dimensionnement. Par suite on donne une synthèse de ce diagnostic :

Au niveau des diamètres, la tendance est vers un DN800 pour les conduites amont et un DN400 pour les conduites aval. La plupart des jonctions à l'amont du déversoir se constituent de deux conduites. Au niveau des pentes, on a une pente de 0,2% majoritaire sur l'ensemble du réseau. La condition aval des déversoirs est une suite de réseau en premier lieu et des stations de pompes en deuxième lieu. Le type des déversoirs plus existants dans cette étude est un déversoir d'orage latéral.

L'influence du milieu naturel sur la partie déversée est partagée en moitié (avec et sans influence). Cependant la majorité des clapets pour les déversoirs concernés sont de type rigide et leur emplacement est partagé soit au niveau de la tête de déversement soit au niveau de la crête. Finalement la majorité des déversoirs ont une crête de type fine.

### **III. La jonction**

L'étude de la base de données précédente a montré que 21 DO ont une seule conduite à l'amont (50%), 17 DO ont deux conduites à l'amont (41%), 3 DO ont 3 conduites à l'amont (7%) et 1 DO avec 4 conduite à l'amont (2%). Une étude spécifique des jonctions de collecteur en entrée de l'ouvrage fait l'objet de ce chapitre. L'impact hydrodynamique de ces jonctions sur le fonctionnement du déversoir contribue à définir des critères de dimensionnement des conduites et ouvrages amont.

#### **III.1. Bibliographie sur les jonctions**

La jonction est le rassemblement de deux canalisations ou plus en amont qui se rejoignent pour ne former qu'une seule canalisation à l'aval. Elle peut se faire avec différentes angles (généralement 30°, 45°, 60° et 90°), avec différentes forme de canalisations (circulaire, ovoïde, rectangulaire, trapézoïdale, triangulaire).

La bibliographie sur l'historique des jonctions dans le contexte d'assainissement, nous guide à plusieurs chercheurs qui ont travaillé dans ce domaine. Taylor (1944) est probablement le premier à avoir mené une analyse théorique et expérimentale sur une confluence de deux canaux en régime fluvial. Sur la base des équations de quantité de mouvement et de conservation de la masse et à travers un modèle 1D, il est arrivé à calculer le ratio entre les hauteurs d'eau amont et aval, avec l'hypothèse d'égalité des hauteurs dans les deux canaux amont. Par la suite une correction empirique au modèle de Taylor est faite par d'autres chercheurs.

Cependant, l'applicabilité de ces modèles 1D est très limitée par le caractère fortement tridimensionnel du comportement hydrodynamique d'un écoulement en jonction. L'utilisation d'un model 2D a permis d'exploiter théoriquement les points de stagnation et la zone de séparation avec Modi et al. (1981) [6].Le caractère 2D de ce modèle ne peut pas décrire correctement la zone de séparation selon la hauteur dans le canal.

Best (1987) a proposé un descriptif de l'écoulement, en 2D, par l'intermédiaire de 6 zones distinctes : la réverbération de l'écoulement, la stagnation de l'écoulement, la

séparation de l'écoulement, le maximum de vitesse, une couche de cisaillement et le rétablissement de l'écoulement.

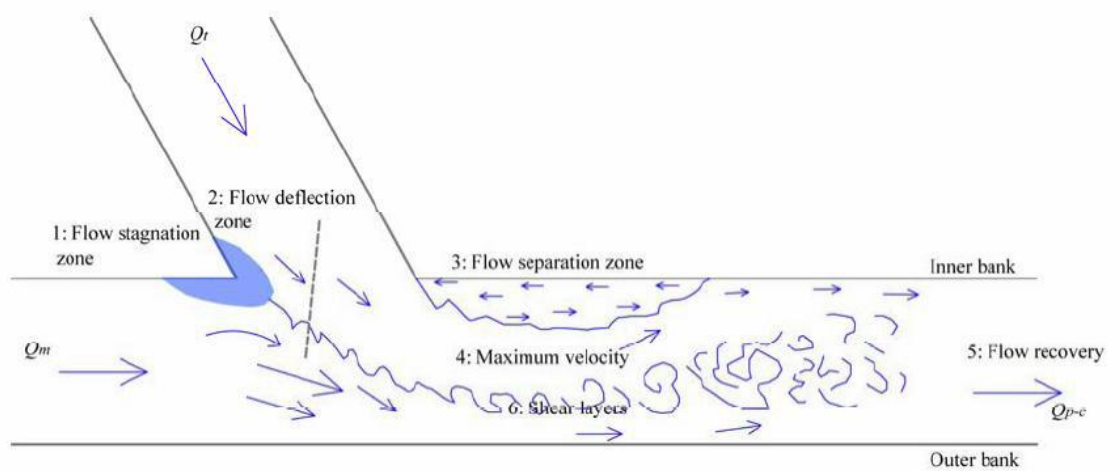


Figure 13: Descriptions des structures d'écoulement identifiées par Best (1987) lors d'une étude en 2D d'un écoulement en jonction [6]

L'utilisation des mesures 3D des vitesses et de turbulence, pour une jonction horizontale à 90 degré avec des canaux de 0,91 cm de large, a permis une schématisation précise des structures propres de ce genre d'écoulement. Ces études expérimentales ont été faites par Weber et al. (2001) [6], et montrent clairement le caractère tridimensionnel d'un écoulement à travers une jonction de 90 degré, ils illustrent bien la zone de séparation de deux écoulements par élargissement de la surface libre. Le schéma suivant illustre la structure hydrodynamique de la jonction :

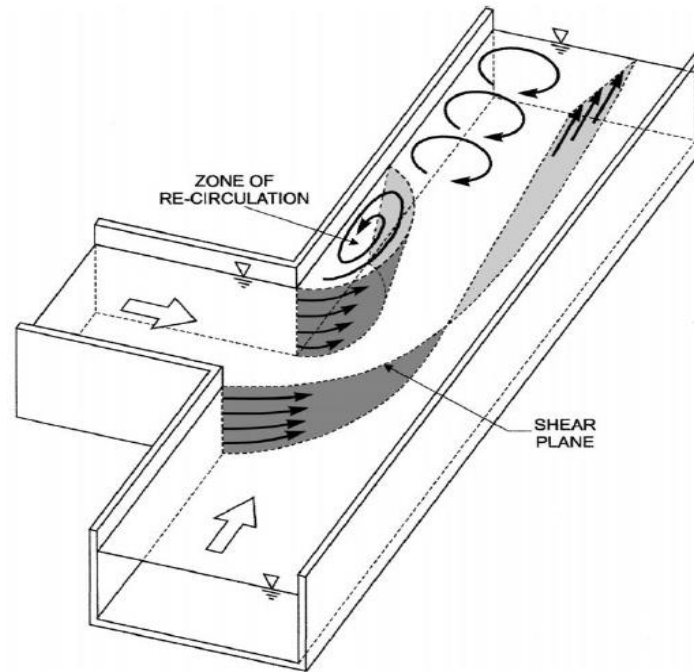


Figure 14: Structure hydrodynamique d'une jonction à 90° en canaux rectangulaires [6]

## III.2. Etude de la jonction

### III.2.1. Présentation d'OpenFOAM®

L'utilisation de la modélisation 3D en hydraulique permet un gain de temps et d'argent par rapport à la modélisation physique, la CFD (computational fluid dynamics) permet de solutionner un grand nombre de problématiques. Pour la bonne réalisation de l'étude, il est nécessaire de suivre un certain nombre d'étapes primordiales.

Pour la réalisation des études 3D présentées dans ce travail, le code de calcul 3D a été utilisé est le code open-source OpenFOAM®. Ce code de calcul résolve les équations régissant les écoulements par la méthode des volumes finis.

Pour l'utilisation du code OpenFOAM®, nous avons dû utiliser l'outil de création de géométrie SALOME, le maillage via une ligne de code utilisable par OpenFOAM® et le post-processeur ParaFOAM® qui est également open-source.



---

### III.2.2. Objectif de l'étude

La jonction qui fait l'objet de cette étude est un rassemblement de deux conduites en amont, l'objectif est de comprendre hydrauliquement l'écoulement au niveau de la jonction. En effet, une turbulence se crée après la jonction, le rétablissement d'écoulement nécessite une certaine longueur avant qu'il se stabilise. C'est important dans le fonctionnement des déversoirs d'orages, afin de contrôler la lame déversante et assurer la performance hydraulique.

La détermination de la longueur de rétablissement après la jonction est basée sur deux niveaux:

- ✓ La stabilisation de la vitesse dans la surface perpendiculaire à l'écoulement ;
- ✓ La stabilisation de la surface libre de l'écoulement par l'atténuation des vagues.

### III.2.3. Géométrie de la jonction 3D

La jonction qui fait l'objet de cette étude est un rassemblement de deux conduites de diamètre 800 mm, une longueur de 20 m après la jonction et 10 m avant la jonction, les pentes des canalisations amont sont faibles ( $\approx 0,2\%$ ) : l'écoulement provenant de l'amont est fluvial. La conduite à l'aval de la jonction est aussi de diamètre 800mm et une pente de 0,2 %. On utilise alors le logiciel de création de géométrie SALOME pour construire la jonction en 3D.

Le choix des différents paramètres géométriques de la jonction est basé sur les résultats de diagnostic des déversoirs d'orages existants dans le territoire de Strasbourg. (Voir chapitre 2).

La figure 16 montre la manière dont la jonction a été modélisée :

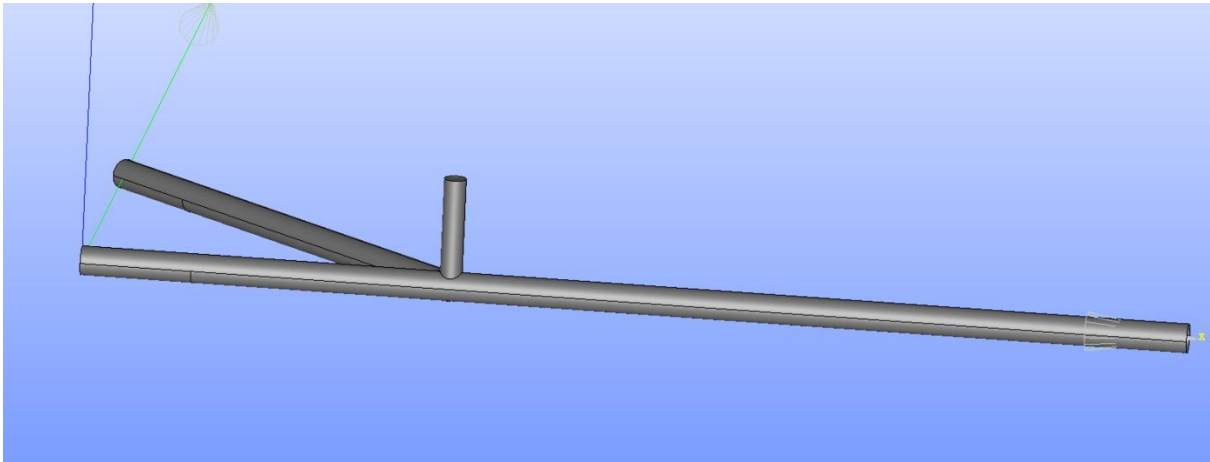


Figure 15: Géométrie de la jonction de 45 degré

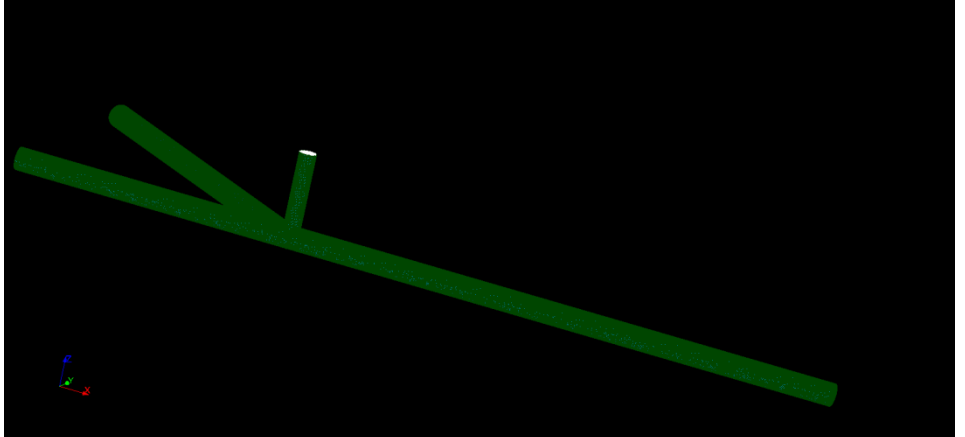
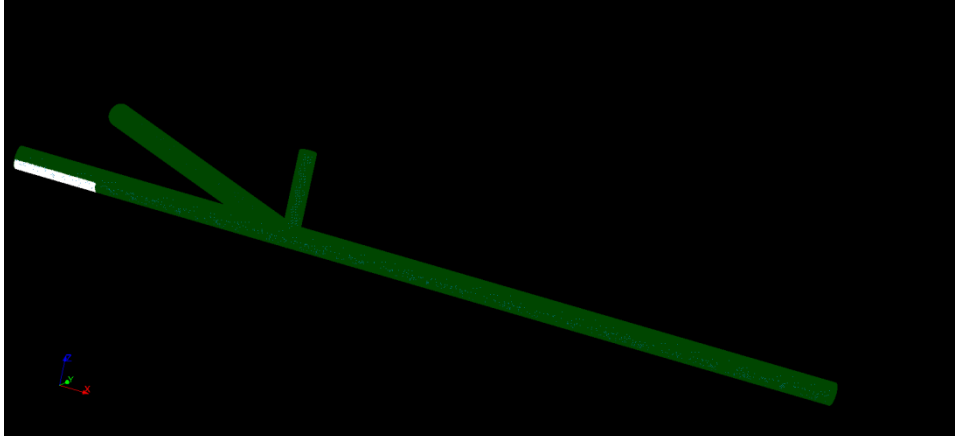
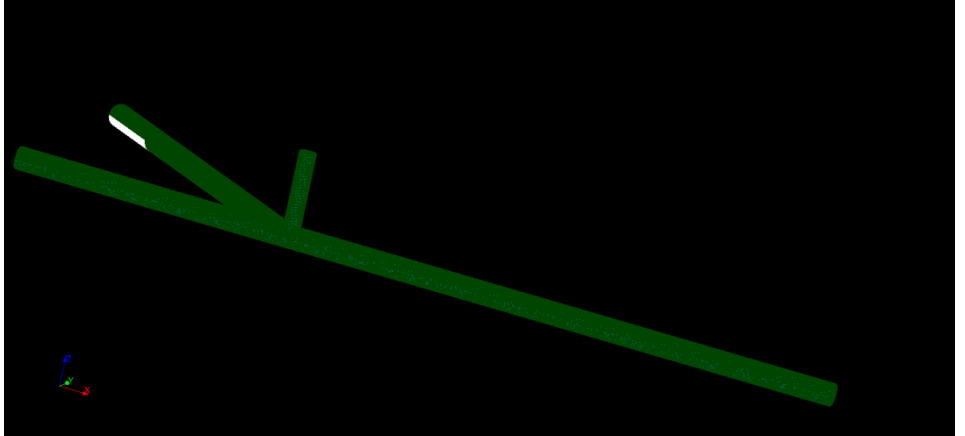
### III.2.4. Maillage du domaine de simulation

Les figures suivantes représentent la géométrie de la jonction ainsi que les conditions aux limites appliquées à chaque limite du domaine de définition.

La sortie de la jonction a été modélisée par une hauteur d'eau aval alors les deux entrées sont modélisée par une vitesse d'entrée. La surface d'entrée est choisie en dessous de la canalisation (Voir Tableau 1 : l'entrée 1 et 2) afin d'éviter le ressaut hydraulique qui perturbe l'écoulement.

Le toit correspondant au plafond du regard est modélisé par une condition limite de pression atmosphérique.

Enfin, les parois sont modélisées par une condition limite de type mur (*Wall*) avec prise en compte d'une loi de paroi standard sur la vitesse.

Localisation	Condition	Représentation
Toit du regard	Pression Atmosphérique	
Entrée 1	Vitesse d'entrée	
Entrée 2	Vitesse d'entrée	

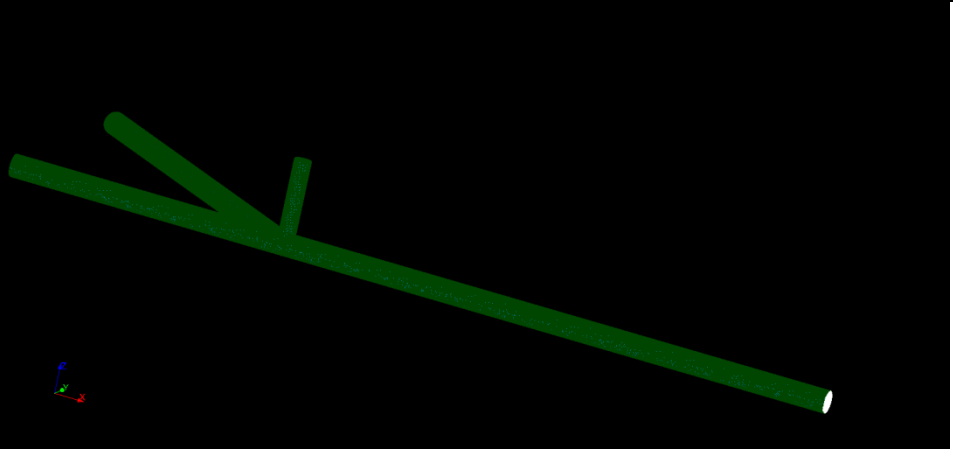
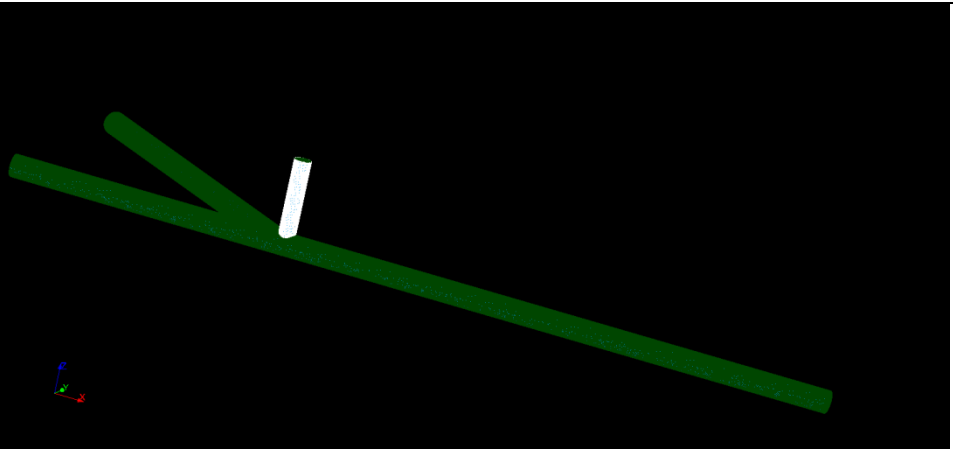
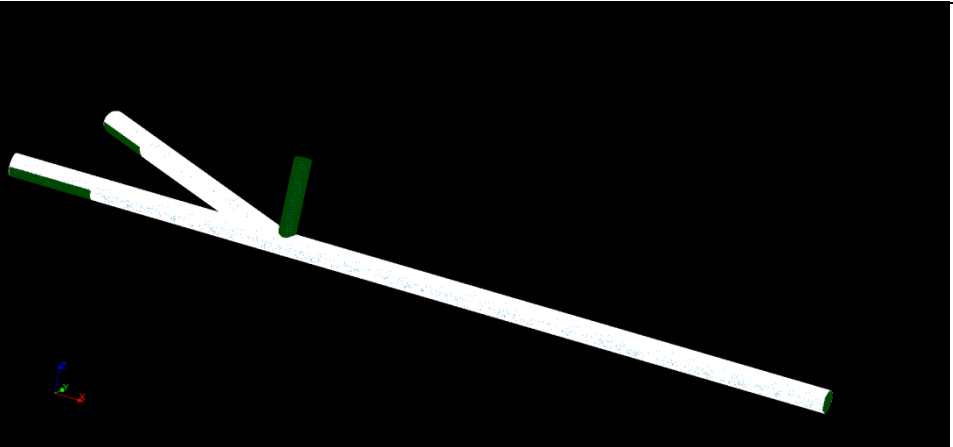
Sortie	Hauteur aval	
Regard	Murs	
Les parois	Murs	

Tableau 1:Condition à limite de la jonction

Cet ouvrage a été modélisé à l'aide d'un maillage constitué de 201 459 cellules. Les mailles ont été affinées dans la zone d'intersection des deux conduites où de forts gradients des variables sont attendus. La figure 16 suivante illustre le maillage de l'ouvrage :

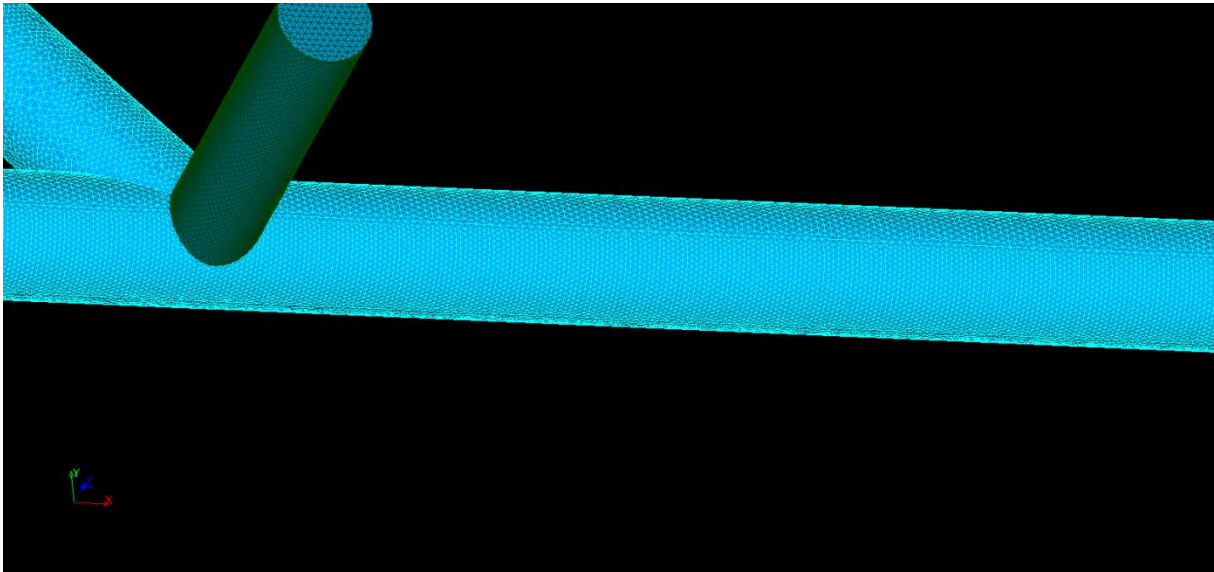


Figure 16: Maillage de la jonction

### III.2.5. Analyse hydraulique et simulation

Le débit de pleine section de la conduite aval de la jonction a été calculé. Il s'agit d'un débit maximum de  $0,538 \text{ m}^3/\text{s}$ . Le débit à l'aval de la jonction est 60 % du débit maximum, soit  $0,323 \text{ m}^3/\text{s}$  qui correspondent à une hauteur aval de 0,44 mètre. Cette dernière est la condition à limite en sortie de la jonction. Ce choix est justifié pour assurer un écoulement à surface libre sur l'ensemble de la jonction et pour imposer le régime fluvial dans la conduite aval conservée.

Pour un débit aval fixé de 60% du débit maximum, les simulations sont effectuées par la variation de la gamme des débits d'entrées, le tableau suivant illustre les combinaisons des débits d'entrées pour chaque simulation :

Simulation	Débit d'entrée 1 Q1 ( $m^3/s$ )	Pourcentage Q1	Débit d'entrée 2 Q2 ( $m^3/s$ )	Pourcentage Q2	Hauteur aval (m)
Sim1	0,1614	30%	0,1614	30%	0,44
Sim2	0,1077	20%	0,2152	40%	0,44
Sim3	0,0538	10%	0,2691	50%	0,44
Sim4	0,2152	40%	0,1077	20 %	0,44
Sim5	0,2691	50%	0,0538	10%	0,44

Tableau 2: Liste des simulations et débits correspondants pour la jonction

Pour une jonction de 45 degrés, cinq simulations ont été réalisées en faisant varier les couples (Q1, Q2) pour un même débit de sortie par la condition de la hauteur aval. De même, cinq simulations ont été réalisées pour la jonction de 90 degrés, soient en total dix simulations.

### III.2.6. Résultats et détermination de la longueur de rétablissement

Le déversement par les déversoirs d'orages est très sensible à la vitesse moyenne d'écoulement et à la forme de la surface libre de cet écoulement. Pour cela la démarche de la détermination s'appuie sur deux points :

- Détermination de la longueur de rétablissement vis-à-vis de la forme de la surface libre de l'écoulement (Voir figure 17).
- Détermination de la longueur de rétablissement vis-à-vis à la variation des vitesses moyennes dans le sens d'écoulement et les vitesses transversales.

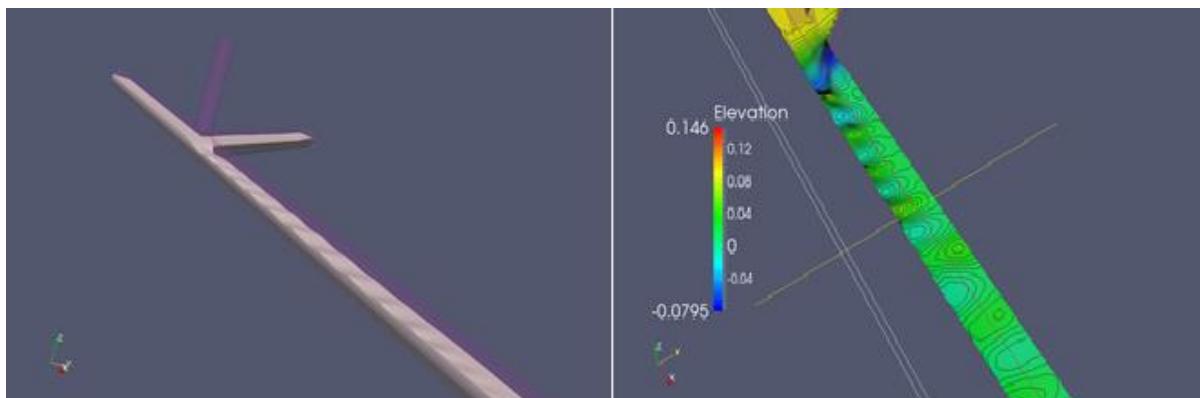


Figure 17: Représentation de la surface libre pour la jonction de 45 degré (Sim1)

### Vis-à-vis de la forme de la surface libre de l'écoulement

L'analyse des résultats de simulation montrent que :

- ✓ Pour la jonction de 45 degrés : après 1 m de la jonction, la variation de la surface libre est de 12 cm. Dans la gamme de 2 m à 9 m la variation est de moins de 5 cm. Après 12 m, la surface libre est plus stable, la variation est de moins 2 cm (Voir figure 18).

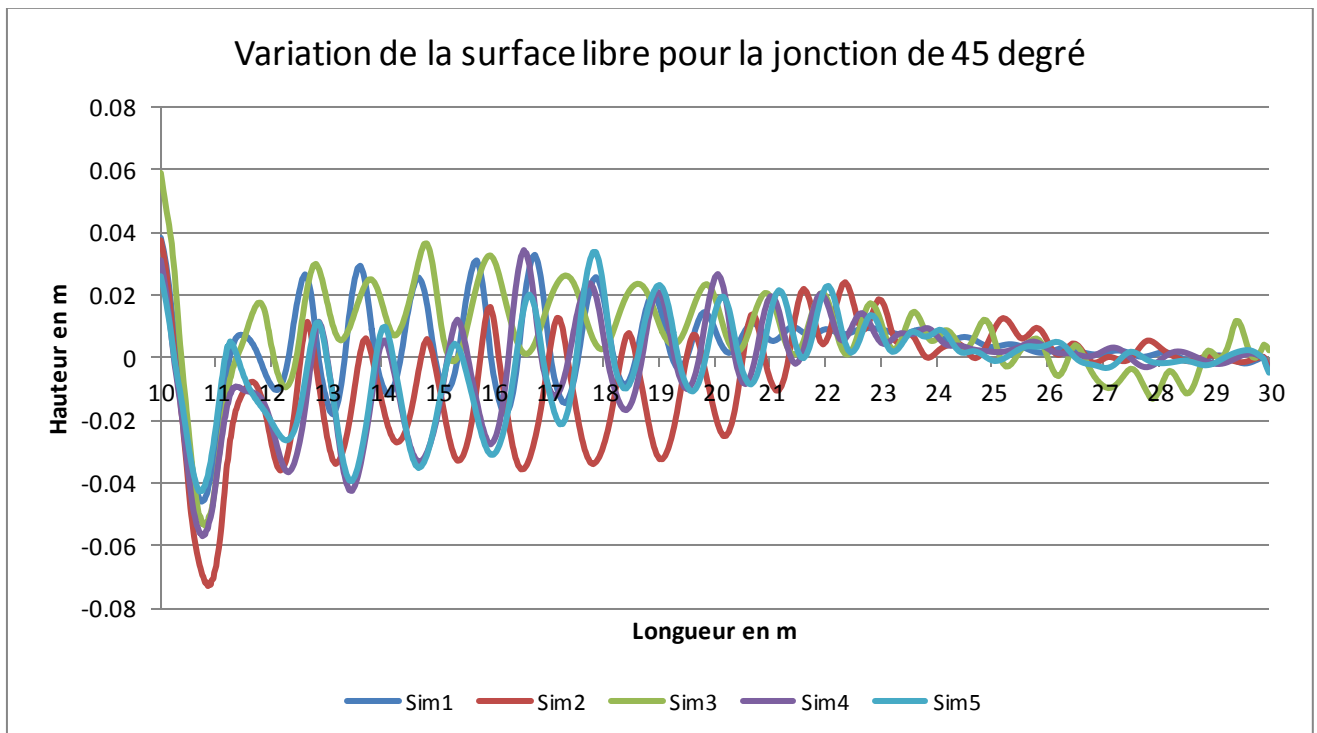


Figure 18: Variation de la surface libre pour la jonction de 45 degré

- ✓ Pour la jonction de 90 degrés : dans l'intervalle de 3 m à 9 m après la jonction, la variation de la surface libre est de 5 cm. Après, la variation est de moins de 2 cm jusqu'à 13 m. A partir de 14 m, la forme de la surface libre est plus stable avec une variation de moins de 1 cm (Voir figure 19).

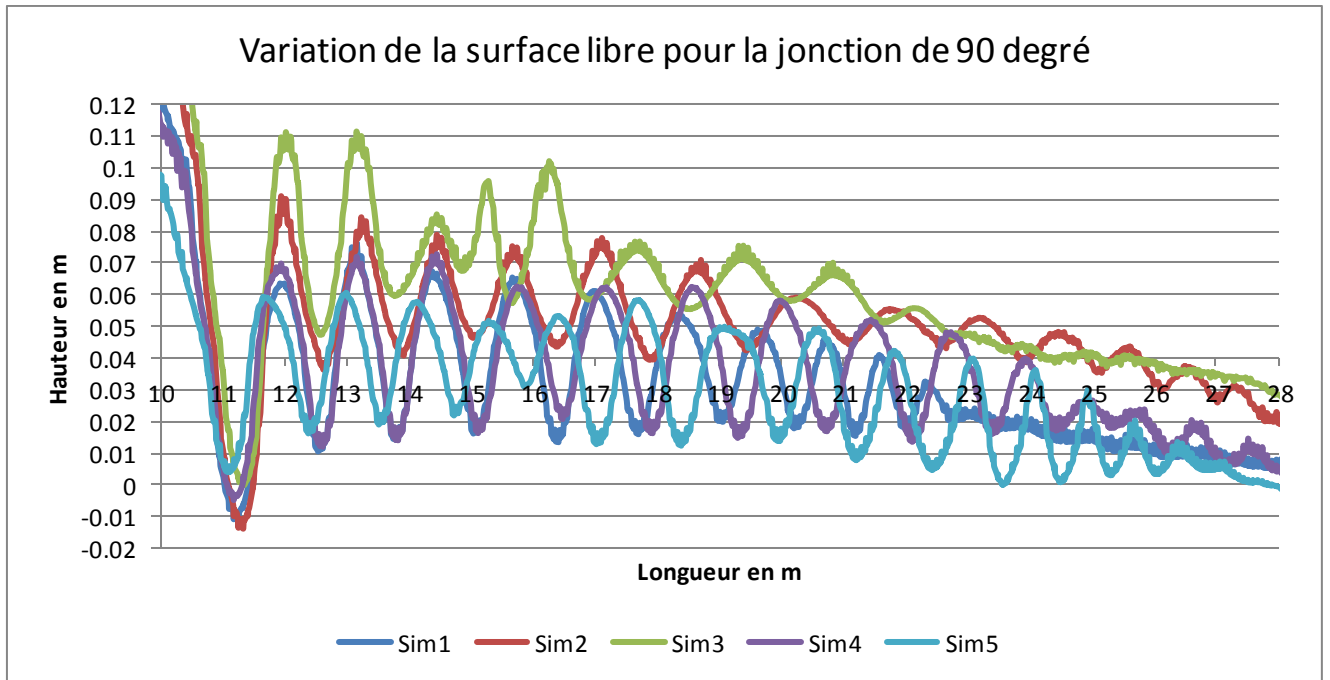


Figure 19: Variation de la surface libre pour la jonction de 90 degré

Conclusion : Les deux figures montrant la variation de la surface libre pour une jonction de 45 degrés et de 90 degrés illustrent bien qu'une longueur de rétablissement de 13 m à 14 m suffit pour ne pas perturber le déversement dans le déversoir d'orage.

Remarque : La comparaison de la variation de la surface libre entre les deux types de jonction pour chaque simulation (représenté dans l'annexe 2), illustre bien que le changement de l'angle de la jonction n'influence pas sur la variation de la hauteur de la surface libre.



### Vis-à-vis des vitesses moyennes d'écoulement

L'analyse des résultats des vitesses moyennes se base sur deux types de vitesses : les vitesses moyennes dans le sens d'écoulement suivant l'axe «x» et les vitesses moyennes transversales suivant l'axe «y» et «z» (voir figure 20). Cependant, ces dernières jouent un rôle très sensible pour ne pas favoriser le déversement au niveau de la crête, par contre les vitesses moyennes dans le sens d'écoulement ont moins d'influence sur le fonctionnement des déversoirs d'orages, vu qu'elles se stabilisent.

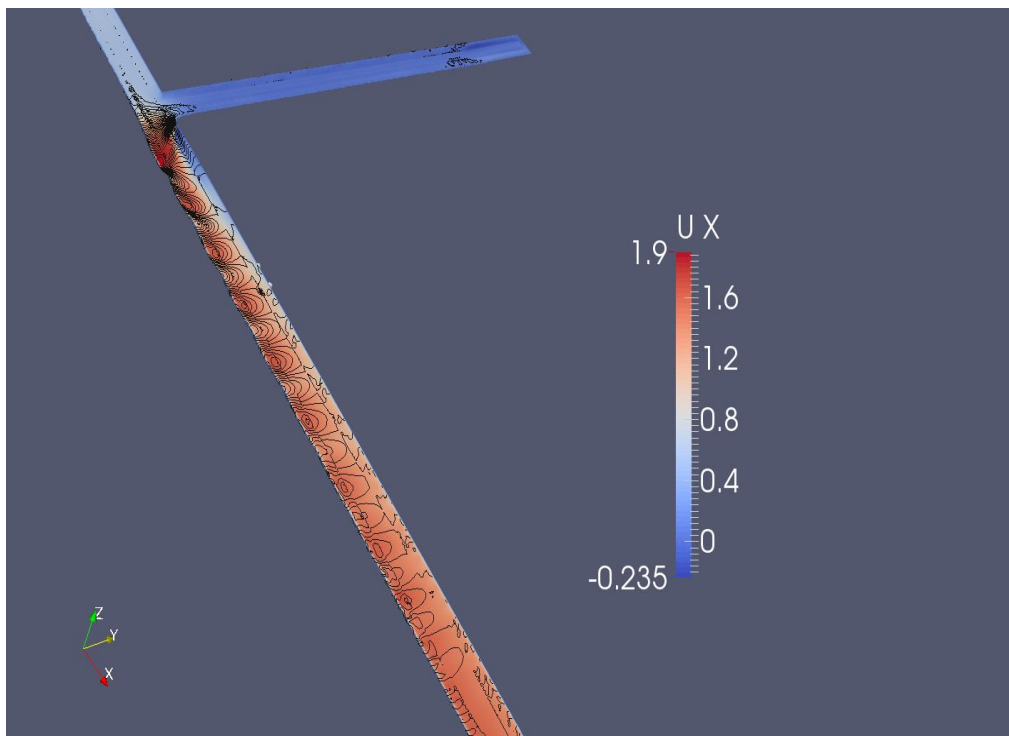
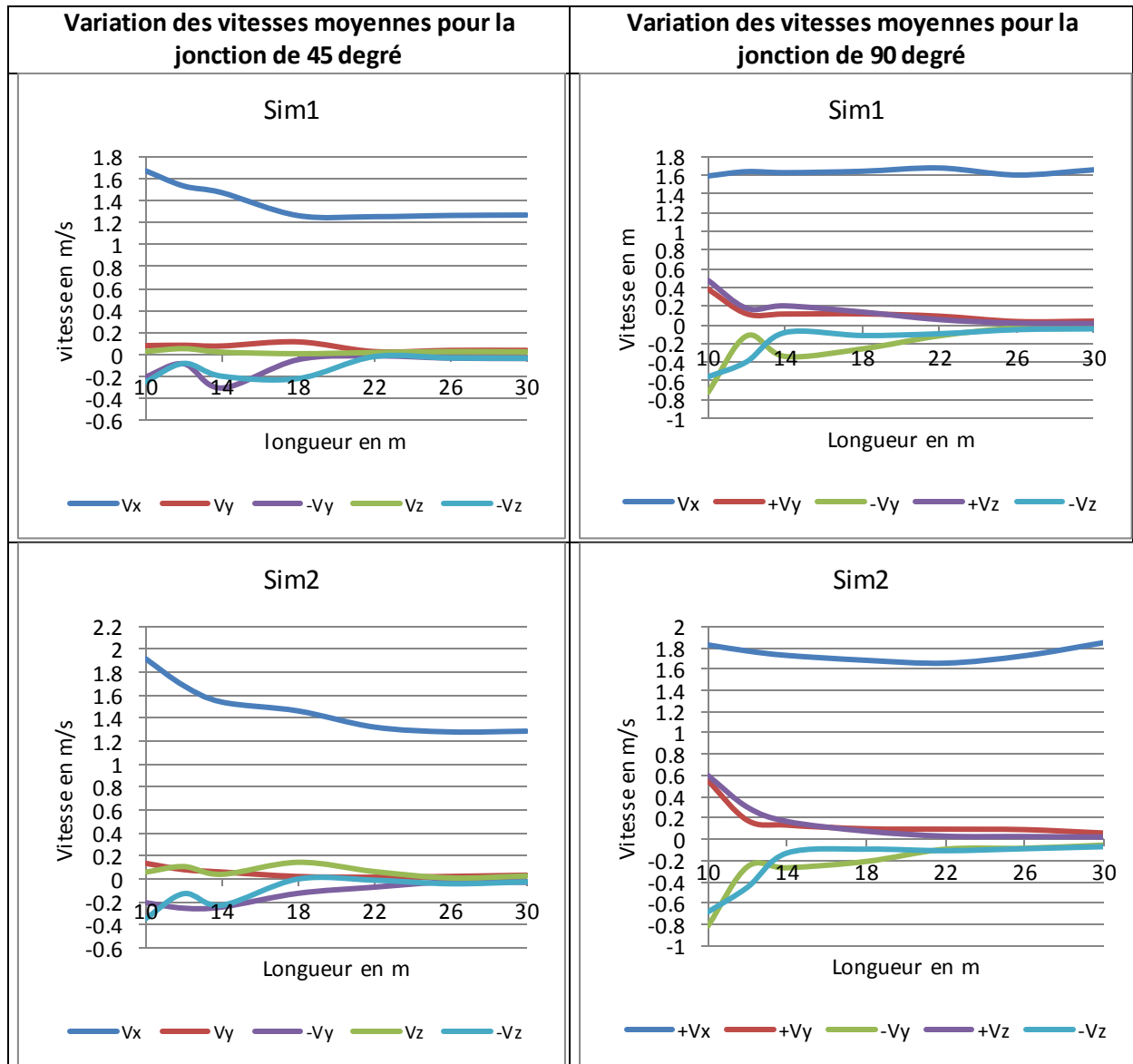


Figure 20: Représentation de la vitesse moyenne d'écoulement suivant l'axe « x » pour la jonction de 90 degré (Sim1)

Le tableau suivant illustre l'évolution de différentes vitesses moyennes d'écoulement, pour les deux types de la jonction et pour chaque simulation :



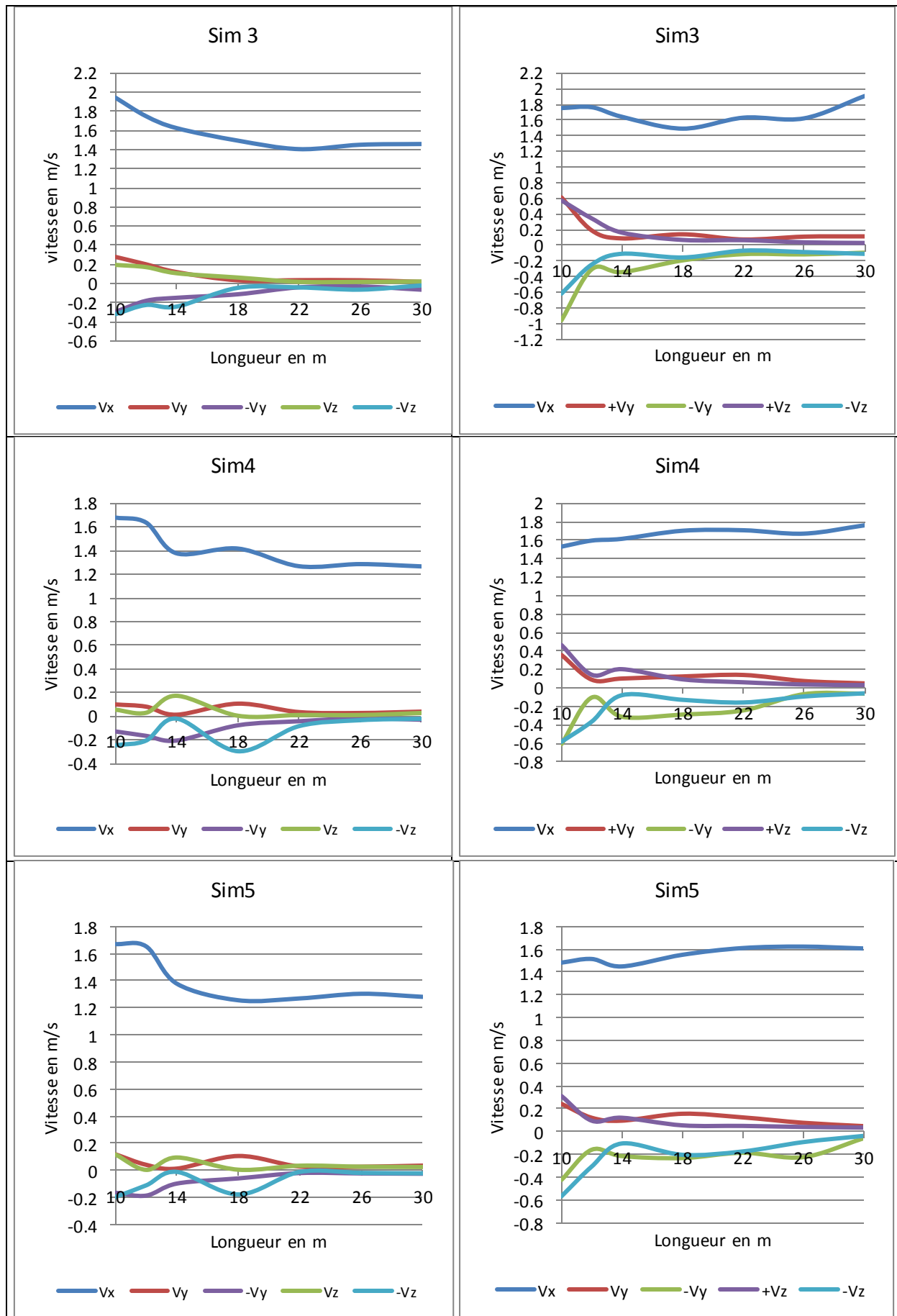


Tableau 3:Variation des vitesses moyennes pour la jonction

---

D'après le tableau, les vitesses moyennes transversales ( $-V_y, V_y, -V_z, V_z$ ) convergent vers zéro pour une longueur de 12 m pour les deux types de jonction. Cette distance est largement suffisante pour le rétablissement de l'écoulement. Cependant pour une longueur de 4 m, les vitesses moyennes transversales ont un écart de moins 0,2 m/s, cette marge peut être considérée acceptable pour la stabilité de l'écoulement. L'étude ramenée sur les deux types de jonction nous a montré que la variation de l'angle de la jonction (ici 90 degré et 45 degré) n'a pas une grande influence sur la longueur de rétablissement vu que la variation des vitesses moyennes transversales entre les deux types reste proche.

Les résultats graphiques de la surface libre pour les dix simulations sont représentés dans l'annexe 2.

### **Solution retenue :**

L'étude de la jonction à l'amont des déversoirs d'orages est primordiale dans le but de maîtriser le bon fonctionnement hydraulique de ces déversoirs. Nous avons trouvé une longueur de rétablissement de 14 m vis-à-vis de la forme de la surface libre de l'écoulement et une longueur de rétablissement de 12 m vis-à-vis des vitesses moyennes d'écoulement, Nous recommandons enfin pour le bureau d'étude, en considérant les deux critères précédents, une longueur de rétablissement de 13 m avec une incertitude de 10%.

Il est bien de noter que l'étude peut se ramener sur plusieurs diamètres d'entrées et sorties, avec d'autres angles de la jonction et sur des conditions limites plus variées. Cependant la solution retenue pour cette étude est désignée au contexte strasbourgeois.

## IV. Dimensionnement DO latéral à crête haute

Dans ce chapitre, nous avons détaillé les étapes de dimensionnement d'un déversoir d'orage latéral à crête haute, le choix de ce type de déversoir est justifié par sa performance hydraulique [3]. La feuille Excel de dimensionnement fournit à l'Eurométropole de Strasbourg (Voir annexe 4), est basée sur la démarche de calcul abordée dans la suite de ce chapitre.

**NB** : les équations de base du dimensionnement du déversoir d'orage sont dans la source [3].

### IV.1. Avantage d'un déversoir latéral à crête haute

Les déversoirs d'orages sont dits à crête haute lorsque le niveau de la crête déversante se situe au-dessus du niveau de la génératrice supérieure de la conduite aval (niveau à partir duquel il y a mise en charge de la conduite) et donc la conduite aval est généralement en charge lors d'un déversement (Voir Figure 21).

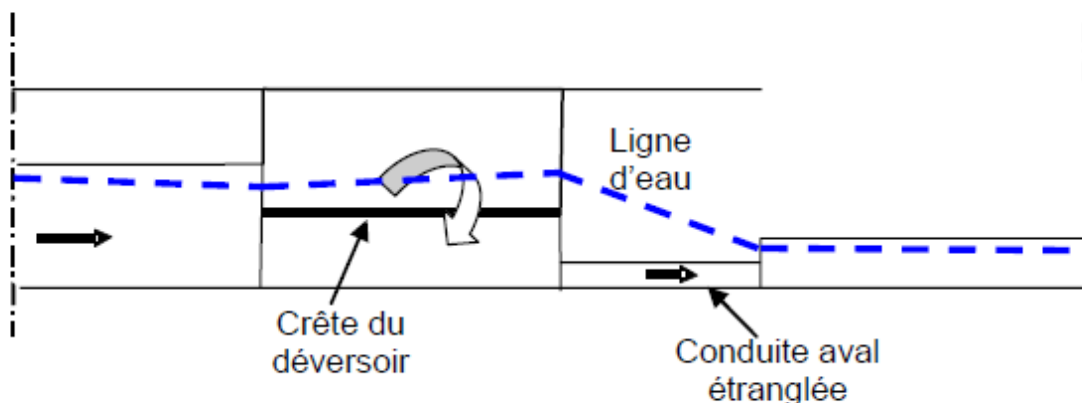


Figure 21: Déversoir à crête haute [3]

Ce type de déversoir est favorisé lorsqu'on a un régime d'écoulement fluvial à l'amont (le cas fréquent au contexte strasbourgeois). Parmi ses avantages, le comportement hydraulique performant dû à la mise en charge de la conduite aval de l'ouvrage et le dimensionnement est accessible avec une bonne marge de sécurité.

## IV.2. Principe de dimensionnement

En général, les déversoirs d'orages à crête haute nécessitent une longueur de crête plus courte par rapport aux déversoirs latéraux à crête basse, mais nécessite la présence d'une conduite étranglée à l'aval. Cette dernière pilote le fonctionnement du déversoir en imposant un régime fluvial à l'extrémité aval de la crête.

Le déversoir latéral à crête haute se décompose en différentes parties : la partie amont (**am**), la partie déversante (**DO**), la conduite aval étranglée (**et**) et la conduite aval (**av**).

La figure 22 suivante illustre les différents paramètres de l'ouvrage :

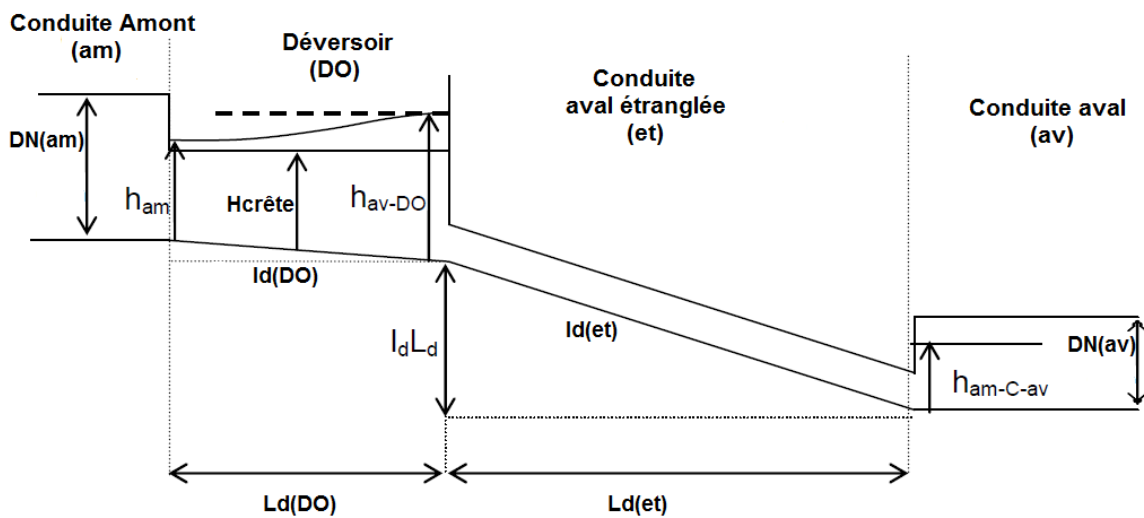


Figure 22: Les paramètres de dimensionnement du déversoir d'orage [3]

## IV.3. Données d'entrées géométriques

La première étape consiste à définir les données d'entrées géométriques du réseau, au niveau de la conduite amont (le diamètre : **DN(am)**, la pente : **Id(am)**), de la conduite aval (diamètre : **DN(av)**, pente : **Id(av)**) et la rugosité (**Ks**). Ce sont les données d'entrées à saisir par l'utilisateur afin de caractériser le réseau d'étude et de dimensionner le déversoir d'orage.

## IV.4. Détermination des débits de référence, débit de projet et débit aval maximum

### IV.4.1. Courbe de fonctionnement

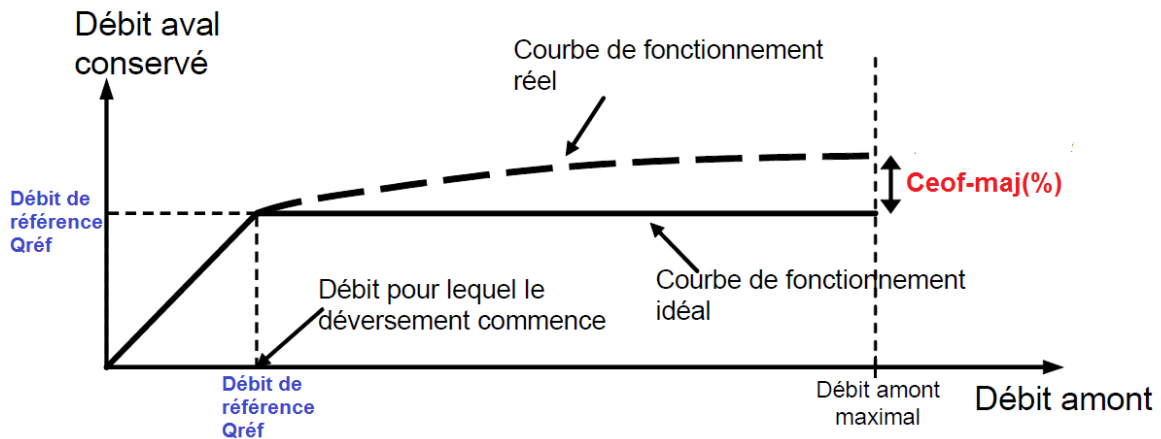


Figure 23: Courbe de fonctionnement du déversoir d'orage [3]

- Débit de référence : il dépend de la condition aval du réseau, généralement il s'agit du débit aval maximum admissible.
- Courbe de fonctionnement théorique : c'est une régulation idéale du déversoir d'orage.
- Courbe de fonctionnement réelle : en réalité, le débit aval augmente quand le débit dépasse le débit de référence

L'objectif est de contrôler le débit aval et de respecter au maximum le débit de référence.

### IV.4.2. Principe de fonctionnement

Le dimensionnement du déversoir d'orage exige l'identification du débit de référence et du débit amont maximum. Ils sont en fonction des conditions imposées par le réseau ainsi que des objectifs de fonctionnement du déversoir.

Le débit de référence a permis de dimensionner la géométrie de l'ouvrage par la condition de non déversement, en fonction de la pente et du diamètre des conduites amont et aval du déversoir. Un déversoir d'orage latéral à crête haute exige le dimensionnement de la hauteur de crête, cette dernière est influencée par l'existence de l'entonnement dans le déversoir d'orage.

La hauteur de crête est fixée par le débit de référence et les conditions d'écoulement dans la conduite aval.

### IV.4.3. Les données d'entrées des débits

Le dimensionnement des différentes parties de l'ouvrage exige la connaissance des débits suivants :

Le débit de référence ( $Q_{réf}$ ), le débit de projet ( $Q_{projet}$ ) et le coefficient de majoration.

On définit par suite :

- Le débit de déversement:  $Q_{dév} = Q_{projet} - Q_{réf}$
- Le débit aval maximum  $Q_{av-max}$  tant que :  $Ceof - maj = \frac{Q_{av-max} - Q_{réf}}{Q_{réf}}$

Il est à noter qu'une valeur de coefficient de majoration autour de **1,3** (soit une augmentation de 30%) est recommandée pour une performance hydraulique du déversoir d'orage.



## IV.5. Analyse hydraulique des débits

L'analyse hydraulique des débits au niveau des conduites amont et aval, est primordiale pour identifier le type d'écoulement dans ces conduites en fonction des pentes. Cela passe par l'identification de la hauteur normale ( $h_n$ ) et la hauteur critique ( $h_c$ ) dans :

- La conduite amont pour  $Q_{réf}$  et  $Q_{projet}$
- La conduite aval pour  $Q_{réf}$  et  $Q_{av-max}$

On se basant sur les formules suivantes :

Relation approchée :

$$h_c = \left( \frac{Q}{(gD)^{1/2}} \right)^{1/2}$$

$$y_N = \frac{h_n}{D}$$

$$y_N \leq 0.95 \quad ; \quad q_N = \frac{Q}{KI^{1/2}D^{8/3}} = \frac{3}{4}y_N^2 \left( 1 - \frac{7y_N^2}{12} \right) \text{ erreur à 1\%}$$

$$y_N = 0.926 \left( 1 - (1 - 3.11q_N)^{1/2} \right)^{1/2}$$

La comparaison de la hauteur critique et la hauteur normale pour une conduite et débit donnés, nous permet de d'identifier le type d'écoulement.

Si  $h_c \geq h_n$  donc : le régime d'écoulement est **torrentiel**

Si  $h_c \leq h_n$  donc : le régime d'écoulement est **fluvial**

## IV.6. Dimensionnement de la conduite aval étranglée (et)

### IV.6.1. Les contraintes

Le but est d'avoir un comportement hydraulique à surface libre dans la conduite aval, d'où l'intérêt de créer une conduite aval étranglée qui assure la perte de charge juste après le déversoir d'orage.

Afin de construire la conduite aval étranglée, on respecte les recommandations suivantes :

- Le diamètre de la conduite aval étranglée  $DN(et)$

Les diamètres de la conduite aval étranglée possibles sont compris entre **300mm** et **1000mm** avec la contrainte  $DN(et) < DN(av)$ . On recommande de prendre un diamètre deux classes en dessous du diamètre de la conduite aval  $DN(av)$ . La valeur de  $DN(et)$  choisie est à saisir par l'utilisateur pour la suite du calcul.

- la longueur de conduite aval étranglée  $L_d(et)$

La valeur de  $L_d(et)$  (qui sera calculée par la suite) doit respecter la condition :

$$20.DN(et) < L_d(et) < 100m \text{ avec } DN(et) \text{ en m}$$

- La pente de la conduite aval étranglée  $I_d(et)$  :

Pour assurer la mise en charge au début de la conduite étranglée, la pente doit vérifier la condition :

$$I_d(et) \leq \frac{1}{80} \cdot \left( \frac{L_d(et)}{DN(et)} + 20 \right)$$

La valeur de  $I_d(et)$  est à saisir par l'utilisateur pour la suite de calcul.

On limite le choix en calculant  $I_d(et) \min$  pour  $L_d(et) = 20.DN(et)$

$$\text{Tant que : } I_d(et) \leq I_d(et) \min$$

- La hauteur de crête aval du déversoir  $h_{crête}(DO)$  :

On exige une hauteur crête supérieure à 25 cm et inférieure à 60% de diamètre de la conduite amont (inférieure à 75% de diamètre de la conduite amont en cas d'influence du milieu naturel).

$$\text{Soit la condition suivante : } 25 \text{ cm} \leq h_{crête}(DO) \leq 60\%.DN(am)$$

On recommande une valeur de  $h_{crête}(DO) = 60\%.DN(am)$

La valeur de  $h_{crête}(DO)$  est à saisir par l'utilisateur pour la suite de calcul.

#### IV.6.2. Calcul la hauteur amont de la conduite aval

$$h_{am-C-av}$$

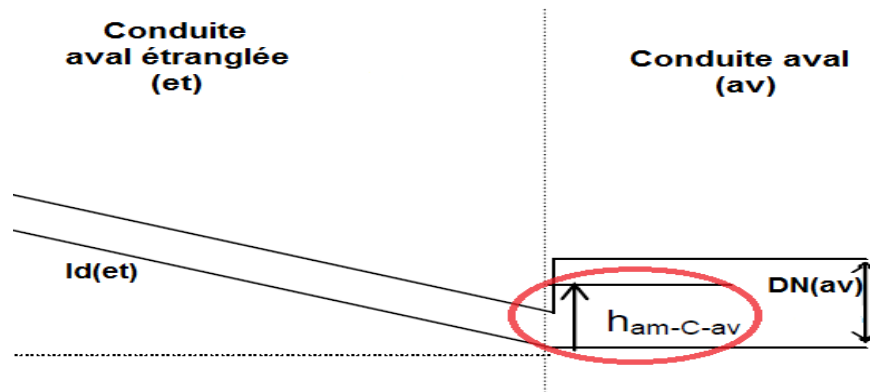


Figure 24: Position de la ham-c-av

On calcule la hauteur amont de la conduite aval étranglée pour les deux débits : Débit de référence et le débit aval maximum. Le calcul de  $h_{am-C-av}$  dépend du régime d'écoulement au niveau de la conduite aval, le calcul se fait selon l'organigramme suivant :

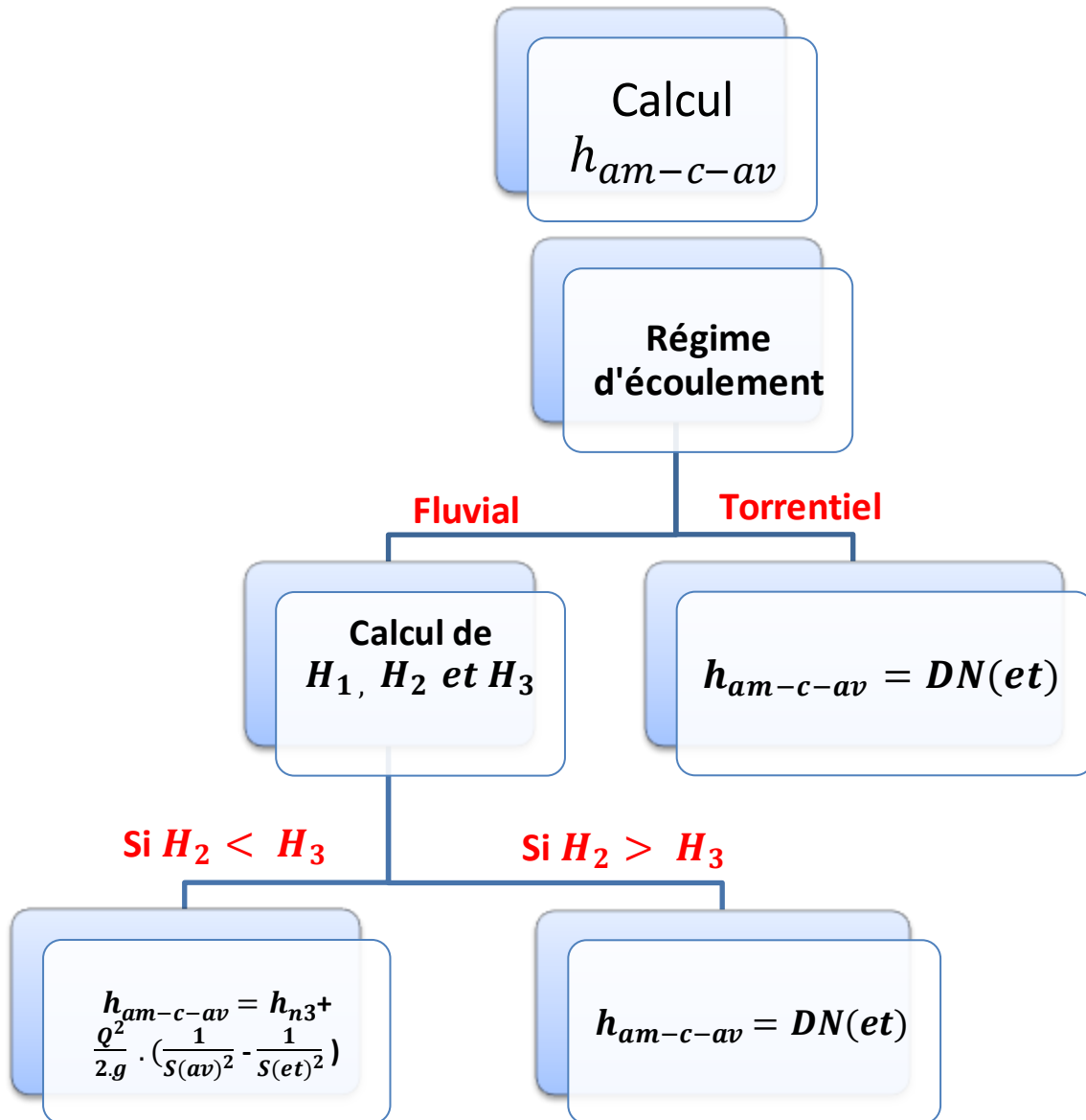


Figure 25: Organigramme de la décision de la Hauteur amont de la conduite aval

- Si le régime d'écoulement est torrentiel, on a  $h_{c-av} \geq h_{n-av}$

On a un pilotage par l'amont, donc :  $h_{am-c-av} = DN(et)$

- Si le régime d'écoulement est fluvial, on a  $h_{c-av} \leq h_{n-av}$

On a un pilotage par l'aval, donc :

On calcule la charge  $H_1$ ,  $H_2$  et  $H_3$  correspond aux sections 1, 2 et 3.

$$\text{Avec : } H_1 = h_{n1} + \frac{Q^2}{2gS_{et}^2}$$

$$H_2 = H_1 - J_s$$

$J_s$  La perte de charge singulière de **Carnot-Borda**. [5]

$$\text{Tant que : } J_s = \frac{Q^2}{2gS_{et}^2} \cdot \left(1 - \frac{a}{b}\right)^2$$

$$H_3 = h_{n3} + \frac{Q^2}{2gS_{av}^2}$$

- Si  $H_2 > H_3$  :  
C'est l'amont qui porte donc :  $h_{am-c-av} = DN(et)$
- Si  $H_2 < H_3$  :  
On calcule  $h_{am-c-av}$  tant que :  $H_1 = H_3$

$$\text{Donc } h_{am-c-av} = h_{n3} + \frac{Q^2}{2.g} \cdot \left(\frac{1}{S_{av}^2} - \frac{1}{S_{et}^2}\right)$$

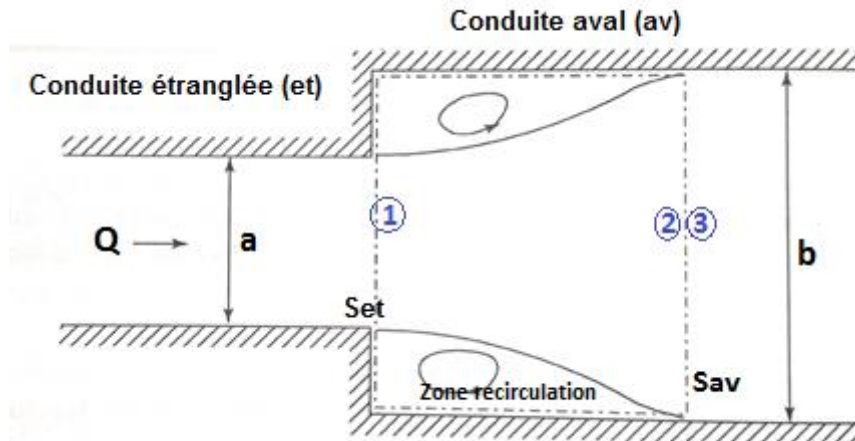


Figure 26: Vue de dessus de la zone de recirculation

### IV.6.3. Calcul de la longueur de la conduite aval étranglée $L_d(et)$ au $Q_{réf}$

Le calcul de la longueur de la conduite étranglée  $L_d(et)$ , se fait par la formule du débit conservé, on prend le débit de référence  $Q_{réf}$ , on remplace  $Q_{cons}$  par  $Q_{réf}$  et on en déduit finalement la valeur de  $L_d(et)$ .

La formule de débit conservé est :

$$Q_{conservé} = S_d \cdot \left( \frac{h_{av-DO} - h_{am-C-av} + I_d \cdot L_d}{\frac{\xi + 1}{2 \cdot g} + \frac{L_d}{K_d^2 \cdot R_h^{4/3}} - \frac{S_d^2}{2 \cdot g \cdot (h_{av-DO} \cdot D_d)^2}} \right)^{0.5}$$

Avec:

- ✓  $h_{av-DO}$  est la hauteur d'eau à l'aval du déversoir.
- ✓  $h_{am-C-av}$  est la hauteur d'eau à l'amont de la canalisation aval
- ✓  $I_d(et)$  est la pente de la canalisation étranglée
- ✓  $I_d(DO) = I_{do}$  est la pente du déversoir

- ✓  $L_d(et)$  est la longueur de la canalisation étranglée
- ✓  $K_d$  est la rugosité de Strickler de la canalisation étranglée
- ✓  $S_d(et)$  est la section de la canalisation étranglée
- ✓  $R_H$  est le rayon hydraulique de la canalisation étranglée

$\varepsilon$  est le coefficient de perte de charge singulière au passage entre le déversoir et la canalisation étranglée

On calcule  $\varepsilon$  par la formule suivante :

$$\varepsilon = 1,635 - 2,221 \cdot \left( \frac{h_{av-DO}}{D_d(et)} \right)^{-1,5} + 2,682 \cdot e^{-\left( \frac{h_{av-DO}}{D_d(et)} \right)}$$

## IV.7. Dimensionnement du déversoir (DO)

### IV.7.1. Le choix de la pente de radier $I_d(DO)$ et le type de la crête

La valeur de la pente de radier du déversoir est comprise entre 0,5% et 1%. Il est préférable de choisir 1% pour éviter le dépôt dans le déversoir d'orage. Le type de la crête choisit est une crête mince pour le bon fonctionnement du déversement, avec une largeur entre 5 cm et 20 cm.

La valeur de  $I_d(DO)$  est à saisir par l'utilisateur pour la suite de calcul.

## IV.7.2. Calcul la hauteur d'eau à l'aval du déversoir d'orage

$h_{av-DO}$

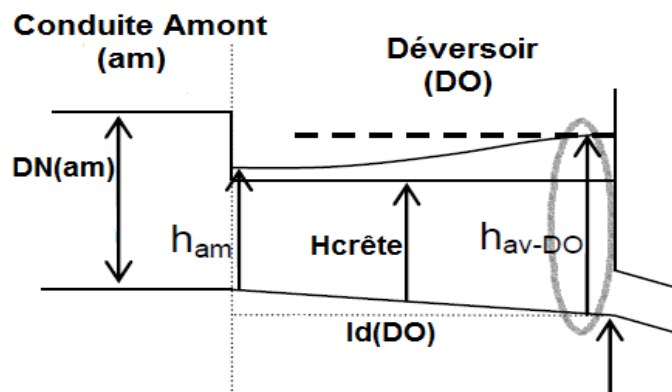


Figure 27: Position de la  $h_{av-DO}$

Le calcul de la hauteur d'eau à l'aval du déversoir d'orage  $h_{av-DO}$ , se fait par :

- ✓ D'abord, l'utilisation de la formule du débit conservé pour le calcul de  $Q_{cons-calculé}$ , en se basant sur la valeur de  $L_d(et)$  calculée .
- ✓ Ensuite, on calcule  $Q_{cons} = Q_{réf} * C_{eof} - maj = Q_{av-max}$
- ✓ Enfin, on utilise un Solveur sous *Excel* pour le variable  $h_{av-DO}$ , avec la contrainte :

$$Q_{cons-calculé} - Q_{cons} = 0$$

On rappelle que la formule de débit conservé est :

$$Q_{conservé} = S_d \cdot \left( \frac{h_{av-DO} - h_{am-c-av} + I_d \cdot L_d}{\frac{\xi + 1}{2 \cdot g} + \frac{L_d}{K_d^2 \cdot R_h^{4/3}} - \frac{S_d^2}{2 \cdot g \cdot (h_{av-DO} \cdot D_d)^2}} \right)^{0.5}$$

On obtient la valeur de  $h_{av-DO}$ , en faisant une vérification de la condition :

$$h_{av-DO} > h_{crête-av}$$



### IV.7.3. Calcul la longueur de la crête du déversoir $L_d(DO)$ et la hauteur d'eau dans la conduite amont $h_{am}$

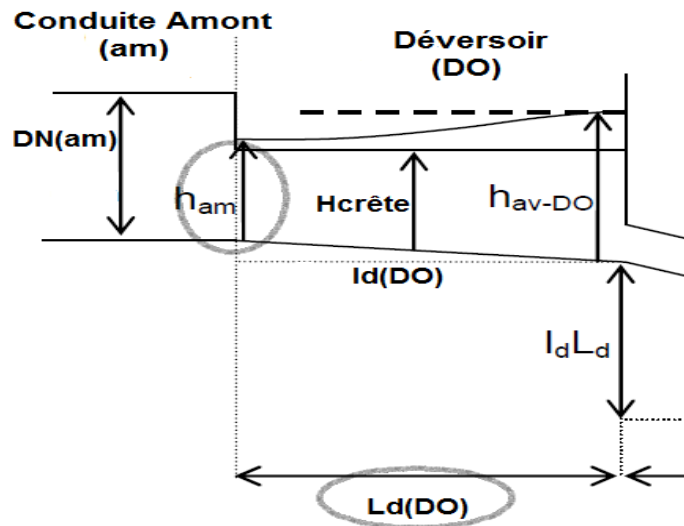


Figure 28: Position de la ham et  $L_d(DO)$

Le calcul de la longueur de la crête du déversoir  $L_d(DO)$  et la hauteur d'eau dans la conduite amont  $h_{am}$  se basent sur les deux équations suivantes :

Equation 1 :

$$Q_{\text{déversé}} = L_{do} \cdot n^* \cdot c_w \cdot g^{0.5} \cdot h_{av-DO}^{1.5} \cdot 0,2 \cdot \left( \frac{h_{am}}{h_{av-DO}} + 2 - 3 \frac{W_{DOm}}{h_{av-DO}} \right)^{1.5} \cdot \left( \frac{1 - \frac{W_{DOm}}{h_{av-DO}}}{5 - 2 \frac{h_{am}}{h_{av-DO}} - 3 \frac{W_{DOm}}{h_{av-DO}}} \right)^{0.5}$$

Equation 2

$$I_{do} \cdot L_{do} + h_{am} + \frac{Q_{\text{amont}}^2}{2 \cdot g \cdot D_{am}^2 \cdot h_{am}^2} = h_{av-DO} + \frac{Q_{\text{conservé}}^2}{2 \cdot g \cdot D_d^2 \cdot h_{av-DO}^2}$$

Avec :

- ✓  $DN(am)$  est le diamètre de la canalisation amont.
- ✓  $I_d(DO) = I_{do}$  est la pente du déversoir.
- ✓  $h_{am}$  est la hauteur d'eau dans la canalisation amont.

- ✓  $h_{\text{crête-milieu}} = W_{DOm}$  est la hauteur de la crête au milieu du déversoir.
- ✓  $n^*$  le nombre des crêtes déversantes (= 1)
- ✓  $C_w$  vaut 1 pour les crêtes minces.
- ✓  $L_{do}(DO)$  est la longueur de la crête du déversoir.

En faisant un solveur sous Excel sur les deux variables  $L_d(DO)$  et  $h_{am}$  avec la contrainte :

$$Eq1^2 + Eq2^2 = 0$$

On obtient les valeurs de  $L_d(DO)$  et  $h_{am}$ , en vérifiant la condition :

$$h_{am} > h_{\text{crête-av}}$$

## IV.8. La ligne d'eau de la modèle 1D au long de la crête

Le but est de tracer une courbe de la hauteur d'eau au niveau de la crête, en s'appuyant sur la valeur de la hauteur d'eau à aval du déversoir  $h_{av-DO}$  calculée (Voir chapitre 4 paragraphe 6.2), ainsi que le débit conservé à l'aval  $Q_{cons}$ .

Une loi de type  $Q = f((h-w)^{3/2})$  est utilisée pour ce but, en ajoutant des coefficients permettant de prendre en compte l'effet de la vitesse latérale et de sa direction ( $\omega_u$ ), ainsi que l'effet de l'entonnement du déversoir ( $\omega_\theta$ ). (Voir Annexe 6)

$$Q' = -\frac{dQ}{dx} = -0.6n^* \cdot \sqrt{g} (h-w)^{3/2} \times c_w \times \omega_u \times \omega_\theta$$

Avec :

$n^*$  : nombre de crêtes déversantes

$c_w$  : 1.0 crête mince et 0.8 crête épaisse

$h$  : tirant d'eau

$w$  : hauteur de crête

$\theta$  : angle d'entonnement

$$\frac{dQ}{dx} = -0.6n * c_w \sqrt{g} (h-w)^{3/2} \times \sqrt{\frac{H_0 - w}{3H_0 - 2h - w}} \times \left[ 1 - \tan(\theta) \left( \frac{3(H_0 - h)}{h - w} \right)^{1/2} \right]$$

On utilise après la méthode de Runge et Kutta en se basant sur les développements limités d'ordre 2 et 4. Cela se passe par la discrétisation le canal selon son axe d'écoulement (Voir annexe 7).

Il s'agit de pouvoir calculer les variables  $Q$  et  $h$  à chaque nœud de notre maillage en fonction des valeurs de ces variables aux nœuds précédents.

$$\text{Soit } (h_{i+1}, Q_{i+1}) = f((h_i, Q_i))$$

On note que cette loi a permis de trouver des valeurs du débit déversé plus fortes par rapport à une formule classique, grâce à la prise en compte des effets de la vitesse latérale et de l'entonnement.

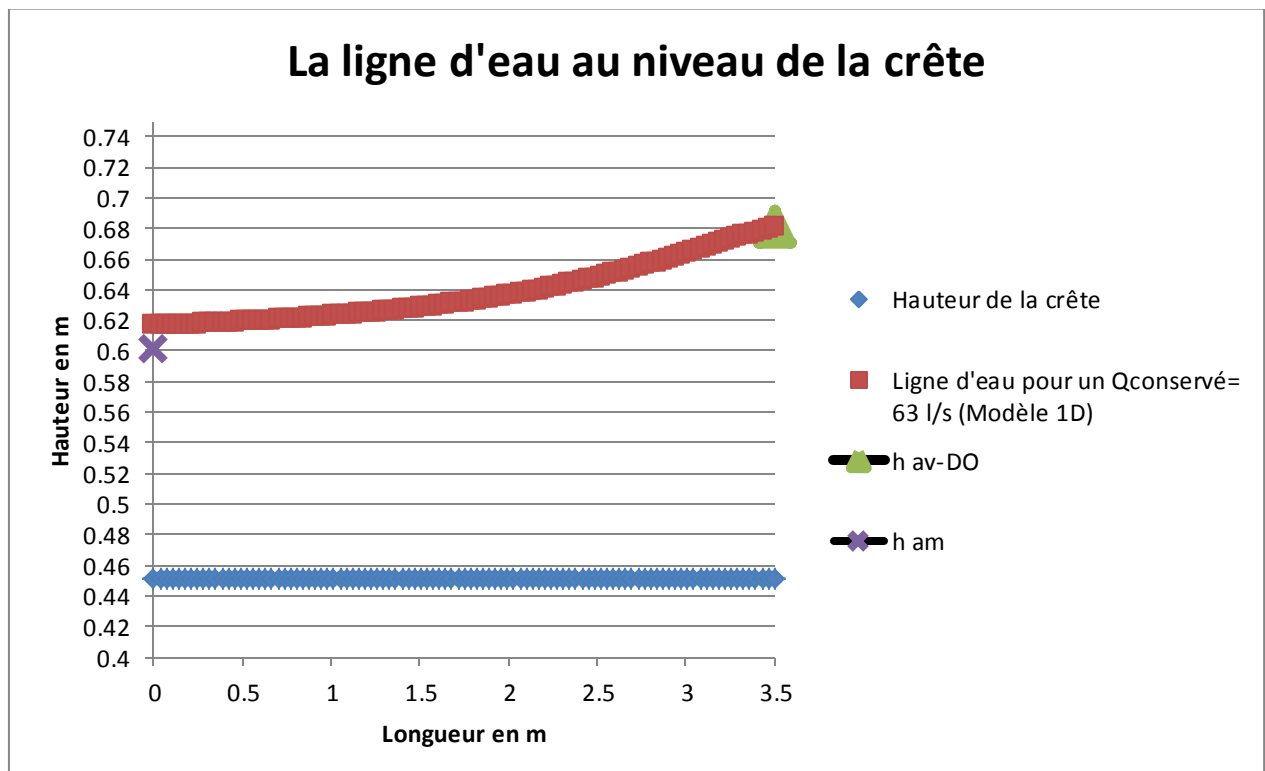


Figure 29: La ligne d'eau au niveau de la crête pour  $Q_{entrée} = 538 \text{ l/s}$  et  $Q_{conservé} = 63 \text{ l/s}$

---

La figure 29 illustre la ligne d'eau au long de la crête pour un exemple de calcul donné (Voir annexe 5), le débit d'entrée est de 538 l/s et le débit conservé est de 63 l/s, la hauteur de la crête est de 0,45 m, pour  $h_{av-DO} = 0,68 \text{ m}$ , On obtient la ligne d'eau présentée en dessus. Nous avons remarqué que la hauteur amont de cette ligne est surestimé par rapport à la hauteur d'eau amont  $h_{am} = 0.60 \text{ m}$  calculée dans cette chapitre (voir paragraphe 7.3).

## IV.9. Conclusion

Le guide technique nous a permis donc de dimensionner les différents paramètres du déversoir d'orage (Longueur de la crête, hauteur de la crête, ligne d'eau amont et aval) suivant les contraintes géométriques extérieures (diamètre, pente, débits). En terme de sensibilité des paramètres de calcul, on remarque que la hauteur d'eau aval du déversoir est une condition limite sensible au débit conservé, Cependant la hauteur amont du déversoir et la longueur de la crête sont liées au débit de référence ainsi que à la hauteur d'eau aval. Donc l'utilisateur du guide technique doit faire attention à la valeur d'entrée du débit conservé de telle façon qu'elle ne dépasse pas le débit pleine section de la conduite aval.

### Remarque :

Un exemple de calcul basé sur les résultats de diagnostic des déversoirs d'orages existants sur le territoire de l'Eurométropole de Strasbourg, est abordé dans l'annexe 5.

---

## V. Modélisation de déversoir d'orage

### V.1. Contexte et objectif de l'étude

La Directive Cadre sur l'Eau et la Loi sur l'Eau et les Milieux Aquatiques prévoit un bon état écologique des masses d'eau au futur, nous devons connaître l'impact des rejets d'eaux usées sur le milieu naturel.

L'arrêté du 22 juin 2007 [8] gère la réglementation des rejets au milieu naturel des STEU, des colleteurs d'eau usée et des ouvrages de déversements. C'est le dernier texte traitant des conditions d'autosurveillance des réseaux. Il informe les collectivités de manière précise dans les actions à mettre en œuvre pour assurer leurs obligations réglementaires.

En ce qui concerne les déversoirs d'orage, l'arrêté du 22 juin 2007 stipule que :

*« Les déversoirs d'orage et dérivations éventuelles situés sur un tronçon destiné à collecter une charge brute de pollution organique par temps sec supérieure à 120 kg/j de DBO<sub>5</sub> et inférieure ou égale à 600 kg/j de DBO<sub>5</sub> font l'objet d'une surveillance permettant d'estimer les périodes de déversement et les débits rejetés. Les déversoirs d'orage et dérivations éventuelles situés sur un tronçon destiné à collecter une charge brute de pollution organique par temps sec supérieure à 600 kg/j de DBO<sub>5</sub> font l'objet d'une surveillance, permettant de mesurer en continu le débit et d'estimer la charge polluante (MES, DCO) déversée par temps de pluie ou par temps sec.*

*Le préfet peut remplacer les prescriptions de l'alinéa précédent par le suivi des déversoirs d'orage représentant plus de 70 % des rejets du système de collecte. »*

Dans ce contexte d'obligation légale d'instrumentation des déversoirs d'orage des collectivités publiques font appel aux compétences de l'équipe Hydraulique Urbaine accumulées dans ce domaine pour réaliser les études d'instrumentation de leurs déversoirs. L'intérêt est le positionnement des sondes de niveau dans l'ouvrage et la fourniture des lois de déversements  $Q_{\text{déversé}} = f(h)$ .

L'objectif de cette étude du déversoir d'orage en 3D, est de comparer et d'évaluer la hauteur d'eau au niveau de la crête ainsi que les erreurs relatives des débits d'entrées pour le modèle 1D vu en chapitre précédente. Les résultats de la modélisation 3D nous a permis d'établir un emplacement plus précis et de valider le comportement hydraulique des déversoirs d'orages en 1D.

---

## V.2. Analyse hydraulique

La construction de la géométrie du déversoir d'orage est basée sur :

- ✓ Les paramètres géométriques : le diamètre et la pente des conduites sont choisis par rapport à la base de données des résultats de diagnostic des déversoirs d'orages existants sur le territoire de l'Eurométropole de Strasbourg. (Voir chapitre 2) ;
- ✓ Le dimensionnement 1D du déversoir d'orage : le type de crête, la longueur de la crête, la hauteur de la crête et la pente du déversoir (Voir chapitre 4).

On rappelle que le but de cette étude est d'évaluer la hauteur d'eau et les débits d'entrées du modèle 1D avec la modélisation 3D.

Le déversoir d'orage est constitué d'une entrée de DN800, d'une sortie conservée de DN300 et d'une canalisation de décharge. La crête de déversement est latérale d'une longueur de 3,5 m, d'une hauteur de 0.45m et d'une pente de 1% pour éviter les dépôts.

Le régime hydraulique dans la canalisation amont est fluvial, le pilotage se fait donc par l'aval. La condition aux limites amont sera donc une vitesse d'entrée. La conduite aval conservée est en charge compte tenu du mode de fonctionnement des déversoirs à crête haute. La condition aux limites pour la conduite déversée sera une pression de sortie. Pour fixer le débit aval conservé, nous imposons une condition aux limites de vitesse de sortie à l'aval conservé.

L'analyse hydraulique de la conduite amont nous donne un débit pleine section amont de 538 l/s. Pour ce même débit d'entrée, nous simulons le couple de débits conservé/déversé en imposant le débit aval. Toutes les simulations (9 simulations pour 3 débits d'entrées) sont listées dans le Tableau suivant.

	Débit d'entrée ( $m^3/s$ )	Débit conservé ( $m^3/s$ )	Condition limite à la sortie conservée	Débit déversé ( $m^3/s$ )
Simulation1	0,538	0,063	Vitesse de sortie	0,475
Simulation2		0,174	Pression atmosphérique	0,364
Simulation3		0	Wall	0,538
Simulation4	1	0,063	Vitesse de sortie	0,937
Simulation5		0,212	Pression atmosphérique	0,788
Simulation6		0	Wall	1
Simulation7	0,25	0,063	Vitesse de sortie	0,187
Simulation8		0,145	Pression atmosphérique	0,105
Simulation9		0	Wall	0,25

Tableau 4: Liste des simulations et débits correspondants pour la modélisation du DO

La condition au limite imposée au modèle 3D du DO pour :

- ✓ la conduite amont est *velocity inlet* ,
- ✓ la conduite déversée et le toit est *pressure outlet*,
- ✓ la conduite aval conservée est *velocity inlet*, en renseignant une vitesse négative (Sim1, Sim4, Sim 7), *pressure outlet* (Sim2, Sim5, Sim 8) et *Wall* (Sim3, Sim6, Sim 9).

### V.3. Géométrie pour la modélisation 3D

L'utilisation de l'outil de création de géométrie SALOME nous a permis de construire le déversoir d'orage en 3D. Nous n'avons pas représenté la conduite de décharge dans la géométrie du modèle. Cette simplification est possible car la conduite de décharge n'est pas influencée par le milieu naturel et donc l'étude ne s'intéresse pas à la partie déversée.

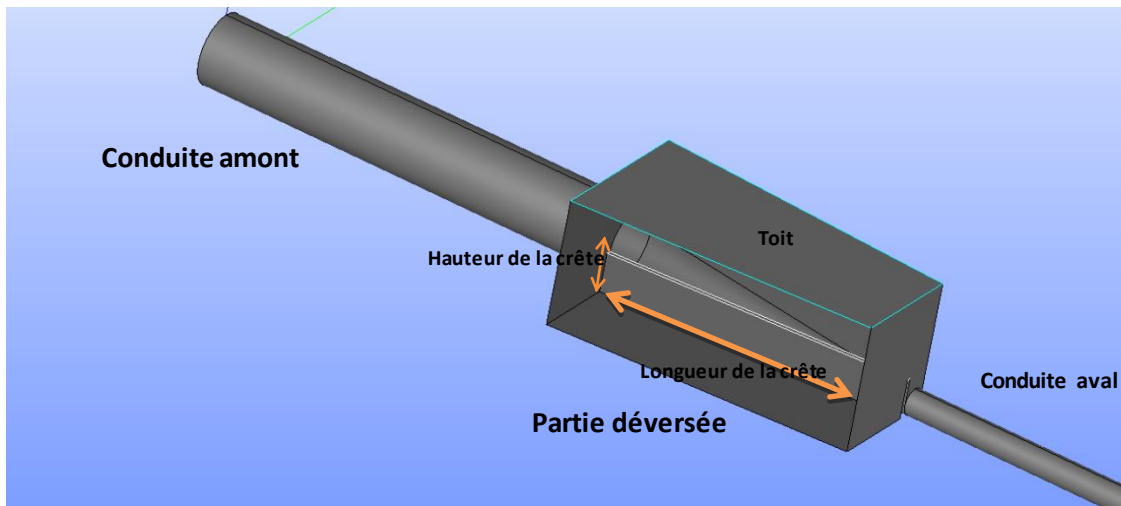


Figure 30: Géométrie du modèle 3D pour le DO

## V.4. Maillage du modèle 3D

Le maillage de la géométrie fait partie des étapes les plus importantes dans la modélisation de l'ouvrage. Il s'agit de trouver une taille de maille suffisamment fine pour obtenir un résultat correct mais suffisamment grande pour diminuer le temps de calcul. Le maillage du déversoir d'orage comporte 156 598 nœuds, 188 905 éléments. Le maillage est plus affiné au niveau de la crête où le gradient hydraulique est plus fort.

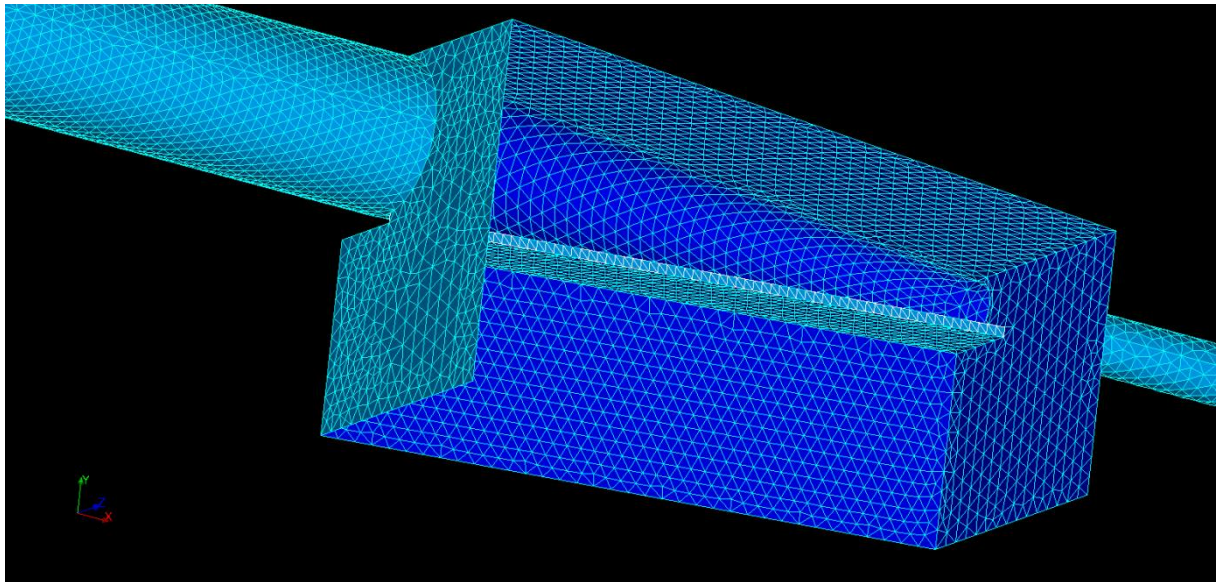


Figure 31: Maillage du modèle 3D du DO



## V.5. Résultats de la modélisation 3D

La simulation des débits d'entrées listés dans le Tableau 4 est basée sur le débit de dimensionnement (538l /s), un débit plus fort (1000 l/s) et un débit plus faible (250 l/s). En effet, les Figure 32, 33 et 34 montrent que la surface libre, pour ces débits, ne présente pas de remous au niveau de la crête, l'écoulement dans le déversoir peut être considéré comme « tranquilisé ».

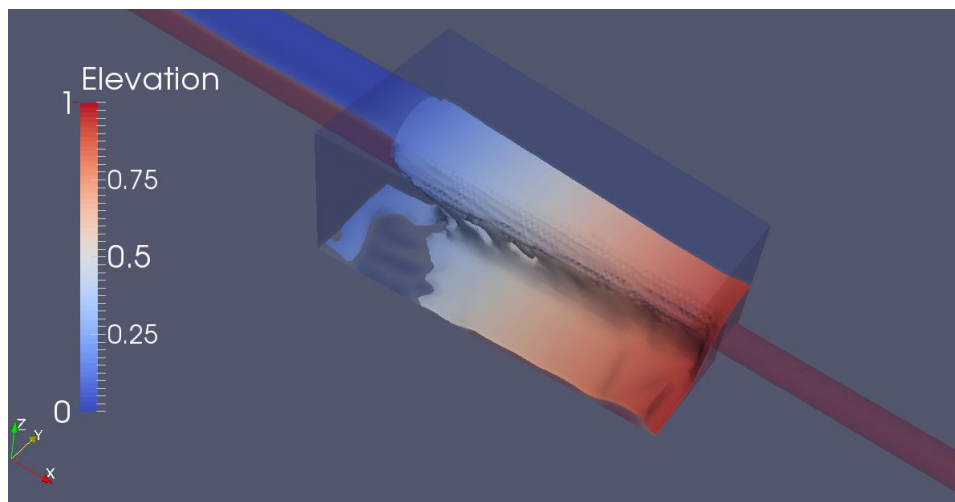


Figure 32: Représentation de la surface libre pour la simulation 1

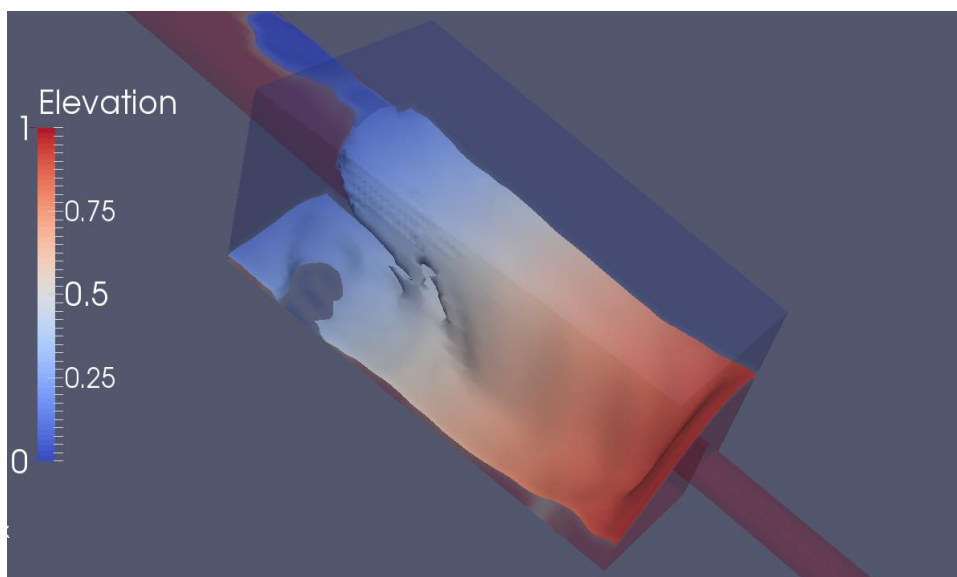


Figure 33: Représentation de la surface libre pour la simulation 4

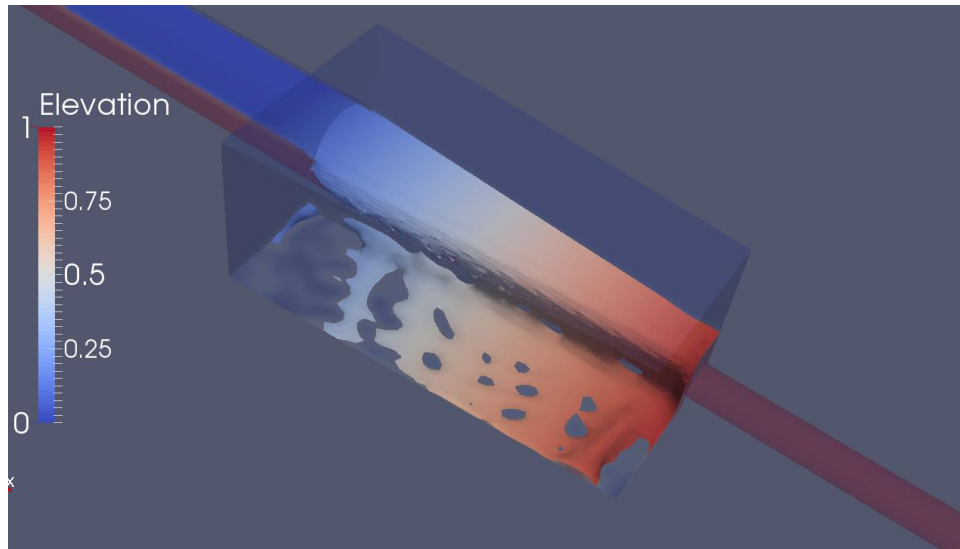


Figure 34: Représentation de la surface libre pour la simulation 7

Le bilan de masse du débit déversé pour un débit conservé fixe de 63 l/s illustre des fluctuations au niveau de la courbe de déversement, à cause de la chute d'eau juste après la crête dans la partie déversée (Voir figure 35).

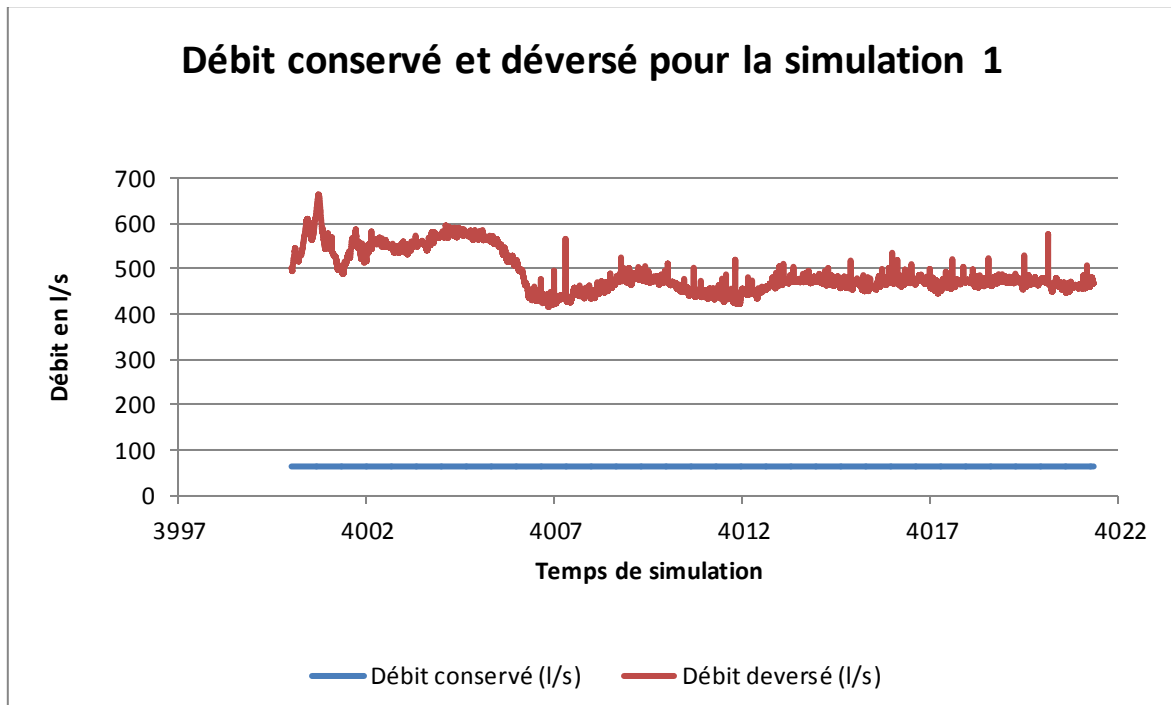


Figure 35: Débit conservé et déversé pour la simulation 1 du DO

Les simulations nous ont permis d'identifier pour chaque débit d'entrée la forme de la ligne d'eau pour plusieurs débits conservés, ainsi que le débit déversé.

Le dimensionnement 1D nous a permis aussi de tracer la ligne d'eau le long de la crête, en se basant sur les mêmes paramètres géométrique du déversoir (longueur et hauteur de la crête) et les conditions aux limites (débit d'entrée, débit déversé), les lignes d'eaux simulées pour chaque débit d'entrée seront comparées avec la ligne d'eau du modèle 1D.

Ainsi, une fois que nous avons évalué la hauteur d'eau au long de la crête pour chaque débit d'entrée, nous pouvons trouver l'emplacement du capteur.

L'incertitude liée au déversement est évaluée en général suivant :

- ✓ L'erreur commise lors de la modélisation 3D,
- ✓ L'incertitude des conditions aux limites,
- ✓ L'incertitude de l'appareil de mesure ( $\pm 1$  cm).

Notre étude s'intéresse donc à l'évaluation de la ligne d'eau le long de la crête pour le modèle 1D, afin de valoriser et maîtriser la performance hydraulique du déversoir, en s'appuyant sur les résultats de la modélisation 3D.

### V.5.1. Les lignes d'eaux pour un débit d'entrée = 538 l/s

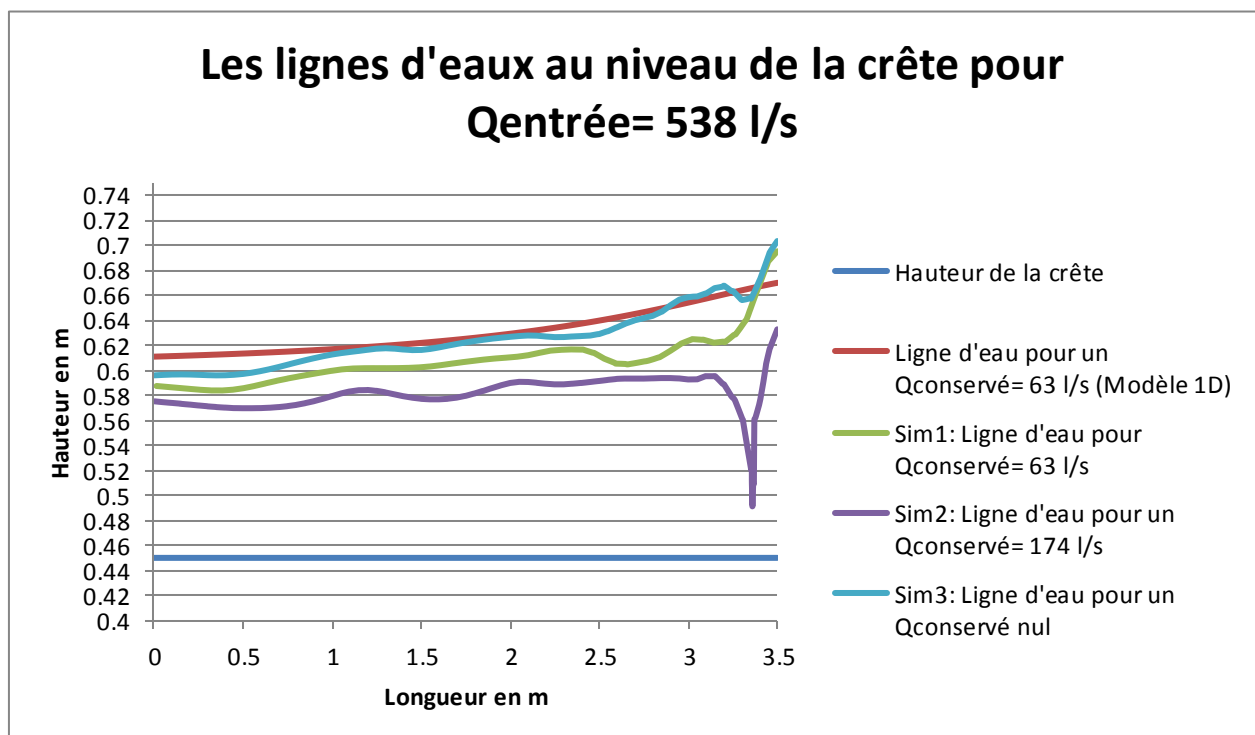


Figure 36: Les lignes d'eaux au niveau de la crête pour un débit d'entrée = 538 l/s

La hauteur de la crête est de 0,45 m. La simulation 2 illustre bien le phénomène d'aspiration à l'aval du déversoir par une chute de la ligne d'eau. Cela est expliqué par la condition aux limites de la sortie qui est une pression atmosphérique. Cependant, la hauteur d'eau du modèle 1D est plus exigeante que les lignes d'eaux de la simulation 3D au niveau de l'amont, par contre elle est moins exigeante au niveau de l'aval. La différence des hauteurs d'eaux entre les deux modèles est plus faible dans l'intervalle de 1m à 2,5m. C'est dans cet endroit du déversoir on recommande de placer les capteurs d'instrumentation.

### V.5.2. Les lignes d'eaux pour un débit d'entrée = 1000 l/s

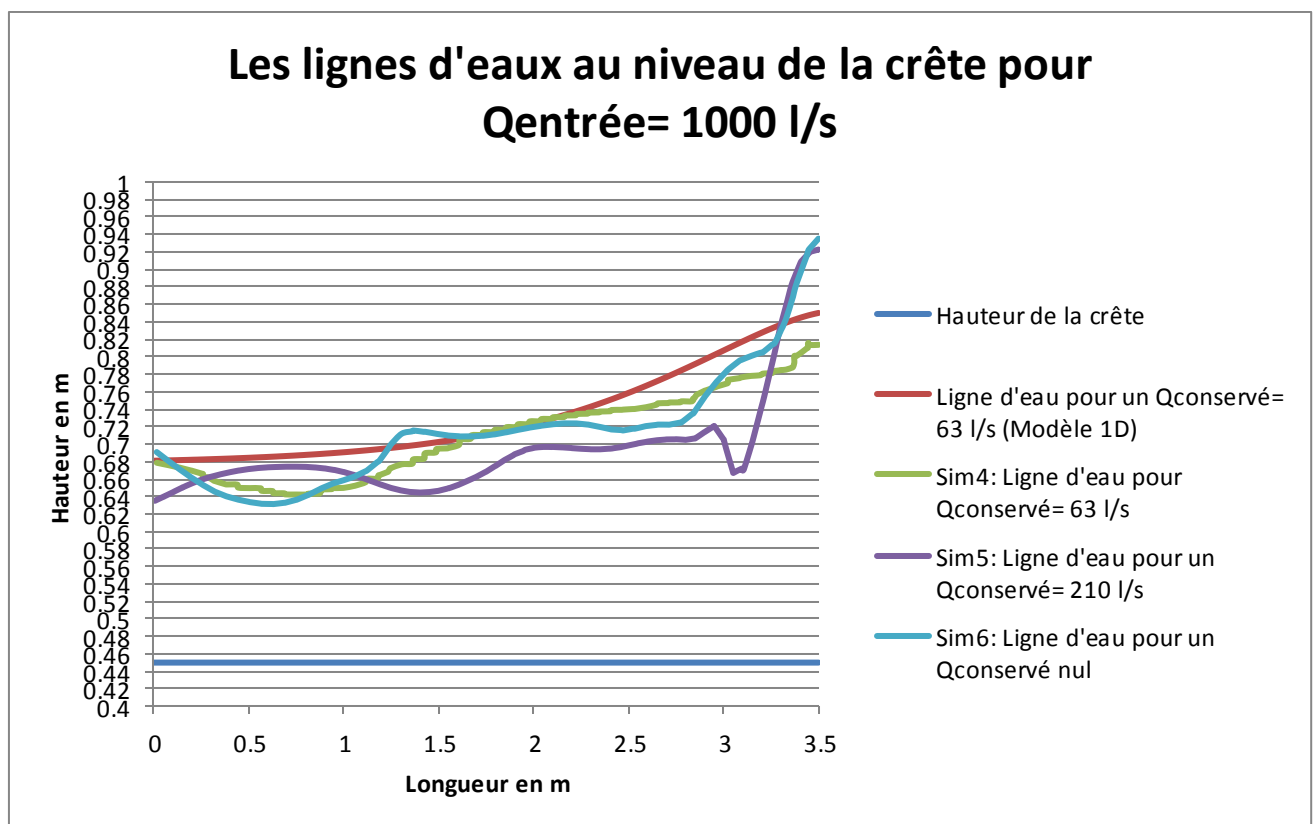


Figure 37: Les lignes d'eaux au niveau de la crête pour un débit d'entrée= 1000 l/s

A l'amont du déversoir, la comparaison entre la hauteur d'eau du modèle 1D et les simulations 4 et 5 donne les mêmes résultats. A l'aval la hauteur d'eau du modèle 1D est placée entre la hauteur d'eau des simulations 4 et 5. Cela est expliqué par les conditions aux limites de la modélisation 3D. Cependant, les lignes d'eaux coïncident bien dans la plage de 1,5 m à 2 m au long de la crête, pour tous les cas sauf dans la simulation 5 qui n'impose pas un débit conservé à l'aval.

### V.5.3. Les lignes d'eaux pour Qentrée= 250 l/s

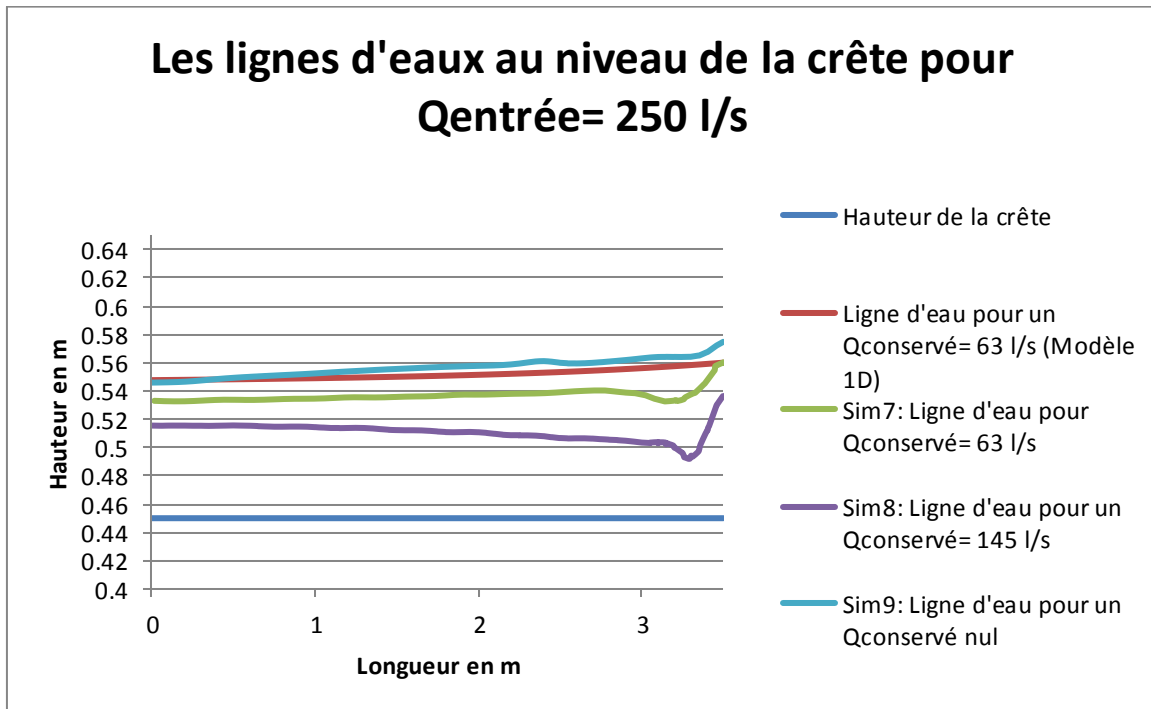


Figure 38: Les lignes d'eaux au niveau de la crête pour Qentrée= 250 l/s

Ce débit d'entrée implique des lignes d'eaux plus stables. En effet, la hauteur d'eau du modèle 1D le long de la crête est positionnée entre les lignes d'eaux des simulations 7 et 9 de la modélisation 3D qui imposent un débit aval conservé. La pression atmosphérique à la sortie conservée implique toujours une baisse de la ligne d'eau à l'aval (simulation 8). Le choix de l'emplacement des capteurs est plus large dans ce cas.

### V.5.4. Solution retenue pour l'emplacement du capteur

L'étude s'intéresse maintenant aux simulations 3D qui ont un débit conservé à l'aval de 63 l/s (simulations 1,4 et 7) avec les lignes d'eaux correspondantes du modèle 1D pour les différents débits d'entrées.

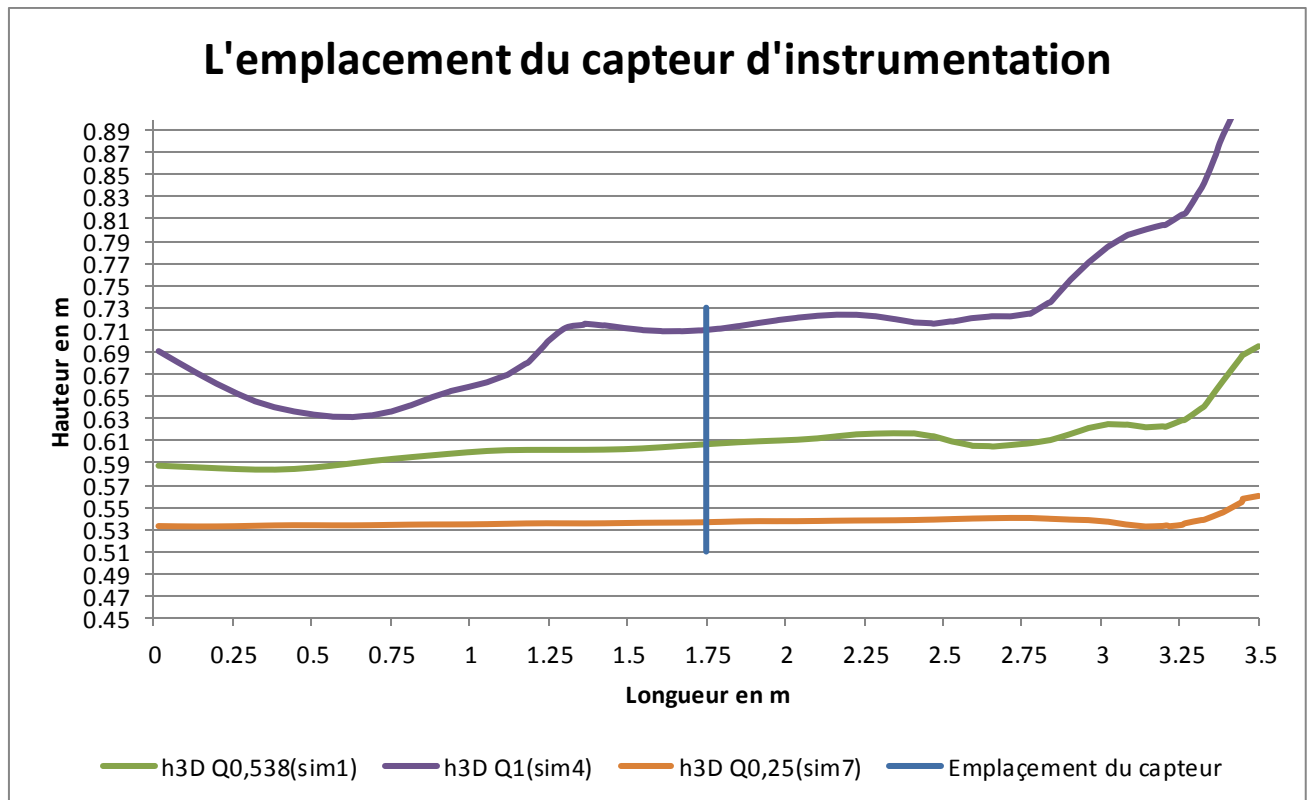


Figure 39: L'emplacement du capteur d'instrumentation

La solution retenue est choisie de telle façon que l'endroit du capteur nous a permis une lecture plus précise de la lame déversante. En effet pour une distance de 1,75 m au long de la crête, la surface libre des lignes d'eau de la modélisation 3D est plus stable, la simulation 3D nous informe sur la perturbation de la ligne d'eau à l'aval de crête pour les trois débits d'entrées (Voir figure 39), donc il est recommandé de placer les capteurs plutôt en milieu.

Le choix de l'emplacement du capteur ( $x = 1,75$  m) a permis de calculer l'erreur sur les débits d'entrées pour le modèle 1D, en se basant sur la ligne d'eau de la simulation 3D correspondante au modèle 1D.

Nous avons tracé d'abord les hauteurs d'eau du modèle 3D à l'emplacement du capteur, pour les différents débits d'entrées, ensuite nous avons tracé la courbe de tendance pour ces hauteurs et nous avons obtenu l'équation de la hauteur en fonction du débit  $h_{3D} = 0,23.Q + 0,4804$  (Voir figure 40). Enfin nous avons déterminé l'erreur sur les débits d'entrées pour le modèle 1D par rapport à la modélisation 3D, en remplaçant  $h_{3D}$  par  $h_{1D}$  dans l'équation de la courbe de tendance.

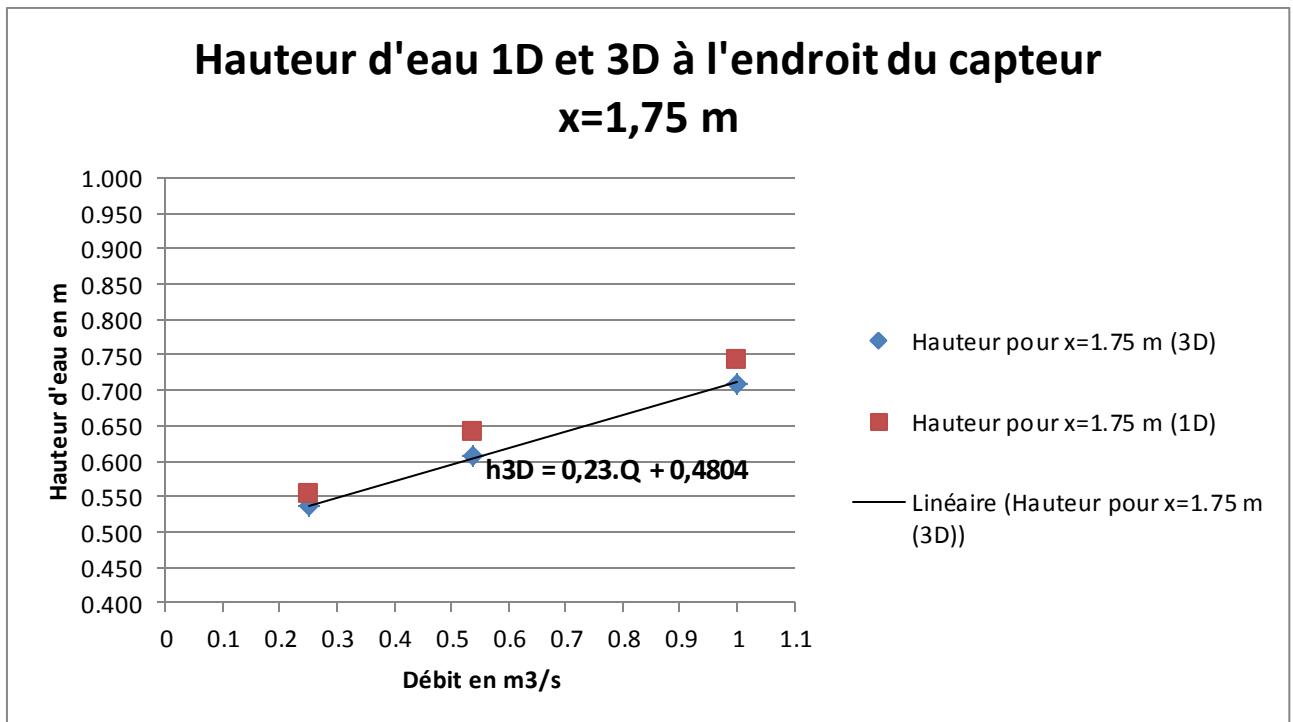


Figure 40: Hauteur d'eau 1D et 3D à l'endroit du capteur( x=1,75 m )

Grâce à cette démarche nous avons la possibilité de déterminer la variabilité des hauteurs d'eaux sur le calcul du débit d'entrée du modèle 1D. En effet la modélisation 3D est utilisée dans cette partie pour calculer l'erreur relative sur les débits d'entrées du modèle 1D en fixant le même débit conservé à l'aval et par suite donner une incertitude sur le débit pour la solution retenue.

Le tableau suivant indique les valeurs d'erreurs relatives pour chaque débit d'entrée pour le modèle 1D

Q entrée m3/s	Hauteur pour x=1.75 m (3D)	Hauteur pour x=1.75 m (1D)	Q entrée = f(h1D) m3/s	Erreur relative sur Q entrée
0,25	0,536	0,553	0,316	26%
0,538	0,607	0,640	0,695	29%
1	0,709	0,744	1,144	14%

Tableau 5: Erreur relative sur le débit d'entrée

### V.5.5. Conclusion

La précision concernant le dimensionnement du déversoir d'orage pour le modèle 1D a été améliorée, grâce au rajout d'une erreur relative sur les débits d'entrées. En effet cette incertitude nous a permis de déterminer la variabilité sur les débits d'entrées et donc les débits déversés tant que le débit conservé est fixé, mais nous a permis aussi d'avoir une préconisation sur l'emplacement du capteur.

Bien que l'erreur relative est plus intéressante pour les faibles et moyens débits, il est moins intéressante pour les forts débits. La figure 41 montre l'évolution de l'erreur relative sur le débit en fonction du débit d'entrée. Nous avons trouvé donc une incertitude moyenne de 23% sur le débit pour ce choix de l'emplacement du capteur retenu.

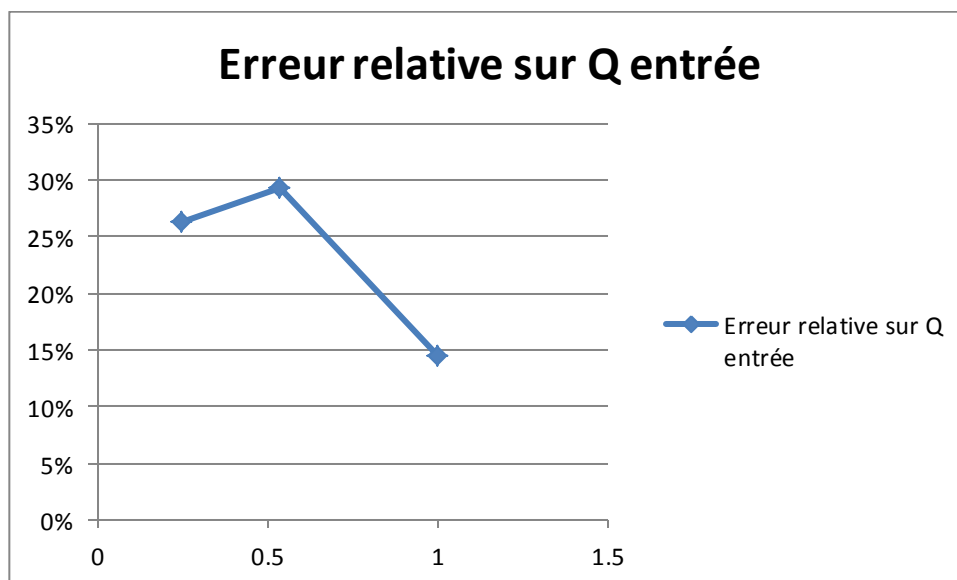


Figure 41: l'évolution sur l'erreur relative du débit d'entrée

Pour conclure, les emplacements seront définis de façon à ce que la zone mesurée soit la plus plane possible et de façon à ce que la hauteur d'eau mesurée soit reliée au débit. Nous avons pris en considération l'emplacement des capteurs de chaque débit d'entrée pour avoir l'emplacement final préconisé. De plus, les capteurs seront placés au-dessus du temps sec afin d'obtenir des informations sur le réseau en dehors des périodes de déversements et surtout de déceler des pannes des capteurs.



La modélisation 3D nous a permis, en ayant une bonne connaissance de la géométrie d'un déversoir et ses conditions aux limites, de connaître son comportement hydraulique et d'y représenter de façon fiable les hauteurs d'eau, les lignes de courant et les champs de vitesses. On peut alors évaluer la hauteur d'eau du modèle 1D et par la suite de définir une instrumentation afin de répondre à l'obligation légale d'autosurveillance des déversoirs d'orages.

---

## **Conclusion**

Commençons par rappeler la démarche de cette étude. Après avoir rappelé le contexte de l'étude et le cahier de charge qui pousse l'Eurométropole de Strasbourg à la création d'un guide technique permettant de choisir la géométrie du déversoir d'orage adaptée au contexte strasbourgeois, en fonction des performances hydrauliques et des facilités d'instrumentation, nous avons diagnostiqué globalement les déversoirs d'orages instrumentés existants à l'Eurométropole de Strasbourg, nous avons pris soin, avant de commencer la création et le dimensionnement le nouveau déversoir d'orage, d'utiliser les différents paramètres géométriques et hydrauliques de ces déversoirs les plus fréquents. Cependant, une étude de la jonction à l'amont du déversoir d'orage nous a permis de préconiser une longueur de rétablissement de l'écoulement. Nous avons ensuite créé un guide technique dont l'utilisateur renseigne les paramètres d'entrées géométriques et le débit de référence, afin d'aboutir les paramètres de dimensionnement du déversoir d'orage latéral à crête haute (longueur de la crête, hauteur amont et aval d'eau...) répondant aux besoins de l'Eurométropole de Strasbourg.

Le second objectif était une recommandation de l'emplacement des capteurs pour faciliter l'instrumentation. Nous avons réussi à évaluer les lignes d'eaux du modèle 1D avec les lignes de la modélisation 3D pour les mêmes conditions limites et paramètres géométriques. En effet La modélisation numérique tridimensionnelle permet de représenter le comportement hydrodynamique du déversoir d'orage. Nous avons pu accéder à une grande quantité de données représentatives de l'écoulement en tous points du modèle (hauteur d'eau, champ de vitesse, pressions, lignes de courant,...). Pour l'instrumentation du déversoir d'orage, nous avons déterminé l'emplacement du capteur prévu tout en indiquant l'incertitude sur le débit d'entrée pour le modèle 1D, avec la meilleure précision et sécurité possible.

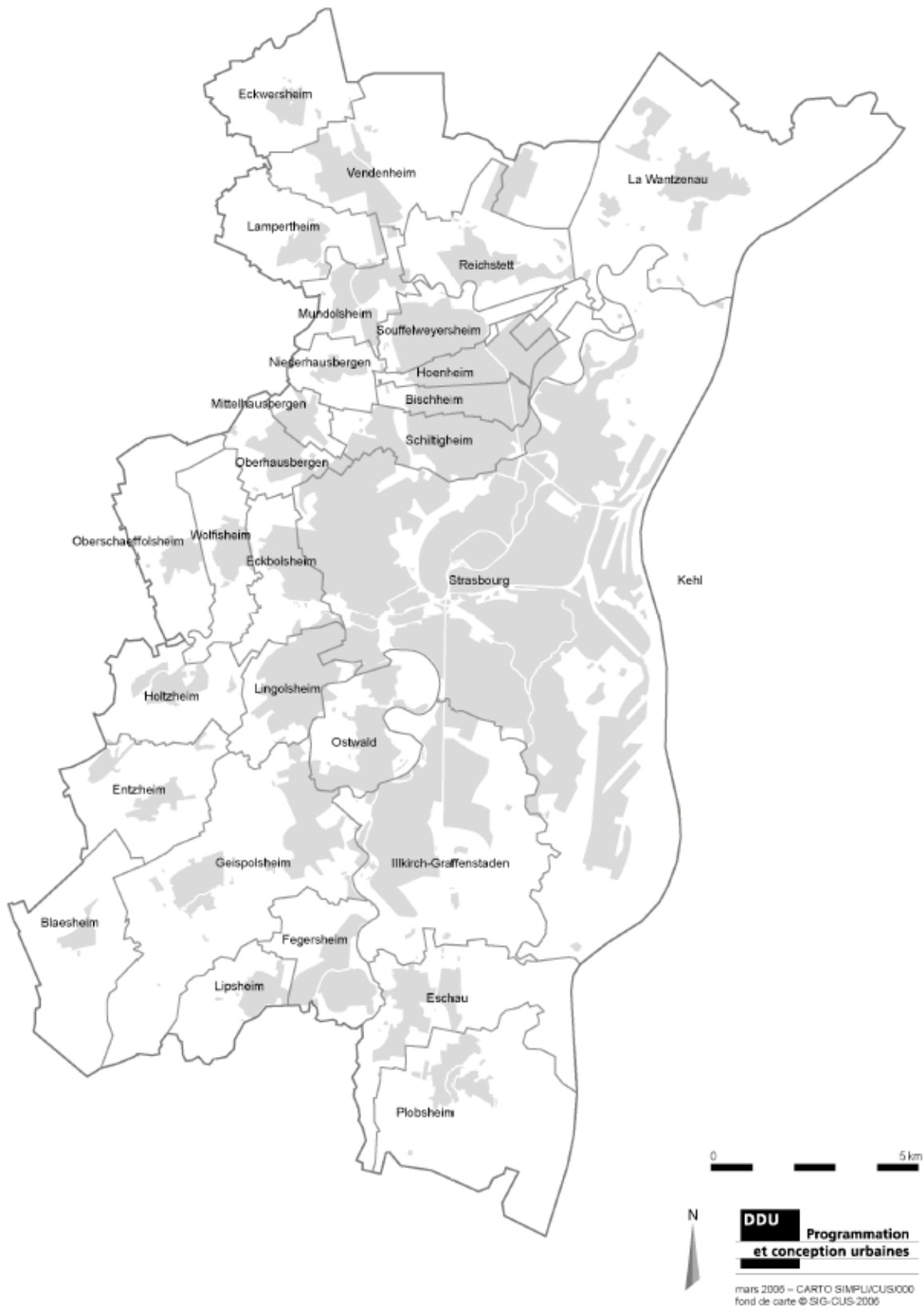
Finalement, grâce à cette étude, nous sommes maintenant capables de fournir à l'Eurométropole de Strasbourg ou à l'exploitant un outil de calcul développé afin de créer un déversoir d'orage associant performance hydraulique et facilité d'instrumentation suivant les contraintes extérieures.

---

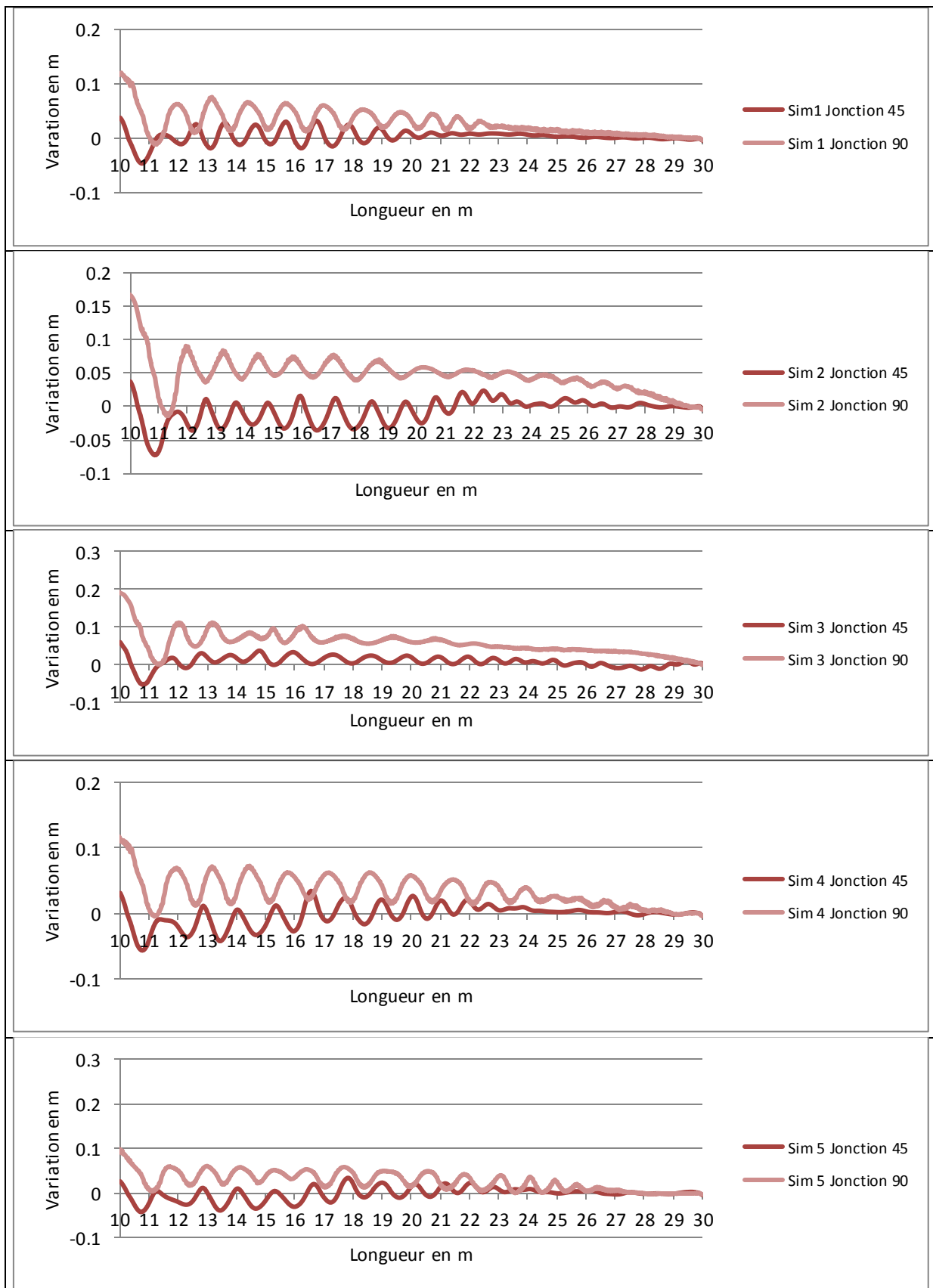
## **Bibliographie**

- [1] J. VAZQUEZ, C. JOANNIS, et M. ZUG, « Fonctions et typologie des déversoirs d'orage », *Tech. Ing.*, no W 6 901, p. 9.
- [2] J. VAZQUEZ, M. ZUG, L. PHAN, et C. ZOBRIST, « Guide technique sur le fonctionnement des déversoirs d'orage ». ENGEES / VEOLIA WATER ANJOU RECHERCHE / FNDAE, juill-2006.
- [3] VAZQUEZ José « Hydrologie et hydraulique Urbaine en réseau d'assainissement » Cours de l'ENGEES, formation d'ingénieur - 2013 –.
- [4] Eurométropole de Strasbourg - Icube , « 44 Rapports d'études d'instrumentation des déversoirs d'orages ». 2011-2014
- [5] Pierre Pernès, «Analyse dimensionnelle et similitude ; Généralités sur les écoulements unidimensionnels ; écoulement en charge –écoulement à surface libre», Cemagref et ENGEES, 2003– 358p.
- [6] Adrien Momplot, «Evaluation des modèles RANS à travers l'étude des écoulements au droit d'ouvrages spéciaux», l'institut National des Sciences Appliquées de Lyon, 2014 – 38p.
- [7] VAZQUEZ José «Hydraulique à surface libre » Cours de l'ENGEES, 2010.
- [8] *Arrêté du 22 juin 2007 relatif à la collecte, au transport et au traitement des eaux usées des agglomérations d'assainissement ainsi qu'à la surveillance de leur fonctionnement et de leur efficacité, et aux dispositifs d'assainissement non collectif recevant une charge brute de pollution organique supérieure à 1,2 kg/j de DBO5.*
- [9] M. EVRARD, « Travail de Fin d'Études - Autosurveillance des déversoirs d'orage de la Communauté Urbaine de Strasbourg - Étude des données existantes et instrumentation de nouveaux sites ». ENGEES, juill-2011.
- [10] PINEAU-AKAZI Audrey « Validation de données et instrumentation d'un déversoir d'orage à l'aide de la modélisation 3D dans le cadre de l'autosurveillance – Mémoire de fin d'étude » .Ecole Nationale du Génie de l'Eau et de l'Environnement de Strasbourg (ENGEES) – 2005 –63p.

ANNEXE 1 : PLAN DE L'EUROMETROPOLE DE STRASBOURG



**ANNEXE 2 : LA VARIATION DE LA SURFACE LIBRE ENTRE LES DEUX TYPES DE JONCTION POUR CHAQUE SIMULATION**



ANNEXE 3 : RESULTATS POUR L'ENSEMBLE DES SIMULATIONS DE LA JONCTION

	Jonction 45 degré	Jonction 90 degré
Sim1	<p>Elevation 0.146 0.1 0 -0.107 -0.1</p>	<p>UX 1.9 1.6 1.2 0.8 0.4 0 -0.235</p>
Sim2	<p>Elevation 0.146 0.1 0 -0.107 -0.1</p>	<p>UX 2.03 2 1 0 -0.332</p>
Sim3	<p>Elevation 0.146 0.12 0.08 0.04 0 -0.04 -0.0795</p>	<p>UX 2.05 2 1 0 -0.29</p>
Sim4	<p>Elevation 0.146 0.1 0 -0.107 -0.1</p>	<p>UX 1.9 1.6 1.2 0.8 0.4 0 -0.24</p>
Sim5	<p>Elevation 0.146 0.1 0 -0.107 -0.1</p>	<p>UX 1.78 1.6 1.2 0.8 0.4 0 -0.256</p>

ANNEXE 4 : FEUILLE D'EXCEL DE DIMENSIONNEMENT DU DO

**Dimensionnement DO latéral à crête haute**

Données d'entrée géométries			
<b>Conduite amont</b>		<b>Conduite aval</b>	
Diamètre(D):	300 mm	Diamètre(D):	400 mm
Pente:	0.22	Pente:	0.22
		<b>Rugosité</b>	
		Ks	
		70	

Les débits			
Débit de référence	Q <sub>réf</sub>	0.061	m <sup>3</sup> /s
Débit de projet	Q <sub>p</sub>	0.538	m <sup>3</sup> /s
Débit de déversement	Q <sub>dév</sub>	0.471	m <sup>3</sup> /s
Coefficient de majorat	Coef-maj	1.3	
Débit aval maximum	Q <sub>av-max</sub>	0.619	m <sup>3</sup> /s

$$Coef - maj = \frac{Q_{av-max} - Q_{réf}}{Q_{réf}}$$

Le graphique illustre la relation entre le débit amont et le débit aval conservé. La courbe de fonctionnement idéal est une droite, tandis que la courbe réelle est courbée. Le débit de référence Q<sub>réf</sub> est le point de départ. Le débit pour lequel le déversement commence est également indiqué. Le coefficient de majoration Coef-maj(%) est la différence relative entre le débit réel et idéal.

Analyse hydraulique			
<b>Conduite amont</b>		<b>Conduite aval</b>	
Débit	Q <sub>réf</sub>	Q <sub>p</sub>	m <sup>3</sup> /s
Hauteur critique (hc)	0.186	0.438	m
q <sub>p</sub>	0.035	0.312	
Hauteur normal (hn)	0.176	0.673	m
Type de pente	Pente faible	Pente faible	
Type d'écoulement	fluvial	fluvial	

Dimensionnement de la conduite aval étranglée (et)			
<b>Choix de diamètre de la conduite aval étranglée DN(et):</b>			
300mm ≤ DN(et) ≤ 1000 mm			
Contrainte DN(et) < 400 On recommande de prendre 2 classes en dessous du DN(am)			
Diamètre disponible	300	350	400 450 500 550 600 650 700 750 800 850 900 950 1000
Diamètre réseau DN(r)	300 mm		

**Condition sur la longueur de conduite aval étranglée Ld(et):**

20\*DN(et) ≤ Ld(et) ≤ 100 m  
 6 m ≤ Ld(et) ≤ 100 m

**Choix de pente de la conduite aval étranglée Id(et):**

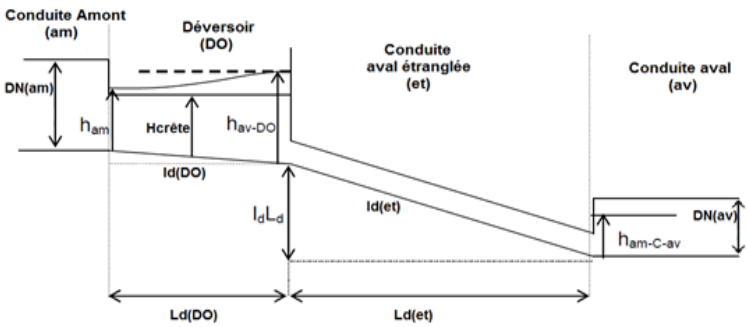
Id(et) ≤ Id (Ld(et) max) et Id(et) ≥ Id (Ld(et) min)  
 Id(et) ≤ 0.502

**Choix de la hauteur de crête aval du déversoir hcrête(DO):**

25 cm ≤ hcrête(DO) ≤ 602\*DN(am) Cas ordinaire  
 25 cm ≤ hcrête(DO) 0.48 m

25 cm ≤ hcrête(DO) ≤ 752\*DN(am) Cas protection milieu naturel  
 25 cm ≤ hcrête(DO) 0.6 m

Hauteur retenue hcrête: 0.48 m



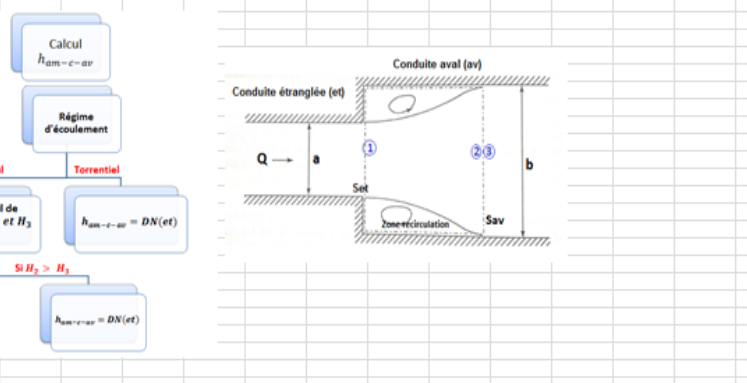
**Calcul la hauteur amont de la conduite aval h<sub>am-c-av</sub>**

Si le régime d'écoulement est fl<sub>av-av</sub> > hc<sub>av</sub>  
 Donc h<sub>am-c-av</sub> = DN(et)

	Q <sub>réf</sub>	Q <sub>av-max</sub>
h <sub>am-c-av</sub>	0.3	0.3 m

Si le régime d'écoulement est fl<sub>av-av</sub> < hc<sub>av</sub>  
 On calcule H1, H2 et H3 correspond aux sections 1, 2 et 3  
 Si H2 > H3 Doac h<sub>am-c-av</sub> = DN(et)  
 Si H2 < H3 Doac h<sub>am-c-av</sub> se calcule tant que H1 =

	Q <sub>réf</sub>	Q <sub>av-max</sub>
H1	0.336	0.364 m
J <sub>s</sub>	0.002	0.004
H2	0.336	0.360 m
H3	0.277	0.338 m
h <sub>am-c-av</sub>	0.30	0.30 m



**Quel de calcul**

	Q <sub>réf</sub>	Q <sub>av-max</sub>
h <sub>s3</sub>	0.249	0.309 m
Phi	1.8158	2.145928 rad
Sav moill	0.082	0.104095 m <sup>2</sup>

$$h = R \cdot (1 - \cos \delta)$$

$$S = \frac{D^2}{4} (\delta - \sin \delta \cos \delta)$$

**Calcul de la longueur de la conduite aval étranglée Ld(et) au Qréf :**

hcrête(DC)	0.48 m
ham-C-av	0.300 m
ld	0.202 m
Kd	70
Sd	0.071 m <sup>2</sup>
Rh	0.075 m
ε	1.079
hav-DO/Dd	1.6

$$Q_{conduit} = K_d \left( \frac{h_{av-DO} - h_{am-C-av} + \zeta \cdot L_d}{2 \cdot g \cdot \left( \frac{L_d}{R_h^3} + K_d^2 \cdot R_h^{4/3} + \zeta \cdot (h_{av-DO} - h_{am-C-av})^2 \right)^{0.5}} \right)^{0.5}$$

h<sub>av-DO</sub> est la hauteur d'eau à l'aval du déversoir.  
 h<sub>am-C-av</sub> est la hauteur d'eau à l'amont de la canalisation aval.  
 L<sub>d</sub> est la longueur de la canalisation étranglée.  
 L<sub>d</sub> est la pente du déversoir (prendre autour de 1% pour éviter le dépôt)  
 K<sub>d</sub> est la rugosité de Strickler de la canalisation étranglée.  
 S<sub>d</sub> est la section de la canalisation étranglée.  
 R<sub>h</sub> est le rayon hydraulique de la canalisation étranglée.  
 ζ est le coefficient de perte de charge singulière au passage entre le déversoir et la canalisation étranglée.

**Outil de calcul**

Qcoas	0.061 m <sup>3</sup> /s
T1	0.242
T2	0.094
T3	0.004
Ld	39.29 m

**Vérification :**

Vérificati	Condition
Diamètre DN(et)	Ok DM(et) < 400 mm
Longueur Ld(et)	Ok 6 m ≤ Ld(et) ≤ 100 m
Pente ld(et)	Ok ld(et) ≤ 1.892
hcrête	Ok 25 cm ≤ hcrête(DC) 0.48 m

**Dimensionnement du déversoir (DO) :**

**Choix de la pente de radier ldo(DO) :**

0.5Z ≤ ldo(DO) ≤ 1Z

Pente retenue ldo(DO) = 1.00Z

**De préférence choisir 1Z pour éviter le dépôt dans le DO**

**Choix du type de crête Cw(DO) :**

Type	crête mince
Valeur	1

**Largeur de la crête mince entre 5 et 20 cm**

Valeur retenue Cw(D) = 1

**Calcul la hauteur d'eau à l'aval du déversoir d'orage hav-DO au Qav-max :**

ham-C-av	0.300 m
ld(et)	39.29 m
ld	0.202 m
Kz-d	70
Sd	0.071 m <sup>2</sup>
Rh	0.075 m
hav-DO/Dd	2.286
Ksi	1.265
Qcoas	0.0793 m <sup>3</sup> /s
Qcoas-cal	0.0793 m <sup>3</sup> /s
Qcoas calculé-Qcoas	*****

Qcoas = Qréf x Coef-maj = Qav

Qcoas calculé-Qcoas = 0

**Solveur sur hav-DO tel que Qcoas calculé-Qcoas = 0**

h<sub>av-DO</sub> est la hauteur d'eau à l'aval du déversoir.  
 h<sub>am-C-av</sub> est la hauteur d'eau à l'amont de la canalisation aval.  
 L<sub>d</sub> est la pente de la canalisation étranglée.  
 L<sub>d</sub> est la pente du déversoir (prendre autour de 1% pour éviter le dépôt)  
 L<sub>d</sub> est la longueur de la canalisation étranglée.  
 K<sub>z-d</sub> est la rugosité de Strickler de la canalisation étranglée.  
 S<sub>d</sub> est la section de la canalisation étranglée.  
 R<sub>h</sub> est le rayon hydraulique de la canalisation étranglée.  
 ζ est le coefficient de perte de charge singulière au passage entre le déversoir et la canalisation étranglée.

**Vérification de hav-DO**

hav-DO	0.69 m
--------	--------

**avec la condition hav-DO > hcrête-av**

Lame déversante à l'av = 20.58 cm

**Calcul la longueur de la crête du déversoir Ldo(DO) et la hauteur d'eau dans la conduite amont (ham)**

Qdéversé	0.459 m <sup>3</sup> /s
Qamont	0.538 m <sup>3</sup> /s
Qaval	0.079 m <sup>3</sup> /s
n	1
Cw	1
Wdom	0.46 m
ldo	1.02 m
Dam	0.8 m
Dd	0.3 m
Ldo(DO)	3.9 m
ham-DO	0.60 m

Qdéversé = Qamont - Qaval

Qamont = Qprojet

Qaval = Qcoas-calculé

D<sub>am</sub> est le diamètre de la canalisation amont.  
 h<sub>am</sub> est la hauteur d'eau dans la canalisation amont.  
 W<sub>dom</sub> est la hauteur de crête au milieu du déversoir.  
 n le nombre de crêtes déversantes (1 ou 2).  
 c<sub>w</sub> vaut 1 pour les crêtes minces et 0.8 pour les crêtes épaisses.  
 L<sub>do</sub> est la longueur de la crête du déversoir.  
 L<sub>d</sub> pente du déversoir.  
 θ angle d'entonnement (>0)

$$Q_{déversé} = 1.49 \cdot n^2 \cdot c_w \cdot g^{0.5} \cdot h_{crête}^{1.5} \cdot D_d \cdot \left( \frac{h_{am}}{h_{av-DO}} + 2 \right) \cdot \left( \frac{1 - \frac{W_{dom}}{h_{av-DO}}}{5 - 2 \cdot \frac{h_{am}}{h_{av-DO}} - 3 \cdot \frac{W_{dom}}{h_{av-DO}}} \right)^{0.5}$$

$$L_{do} \cdot L_{d0} + h_{am} + \frac{Q_{amont}^2}{2 \cdot g \cdot D_{am}^3 \cdot h_{am}^3} = h_{av-DO} + \frac{Q_{déversé}^2}{2 \cdot g \cdot D_d^3 \cdot h_{av-DO}^3}$$

Eq1

Eq2

Eq1+Eq2 = 1.42E-03

**Solveur sur Ldo(DO) et ham tel que Eq1+Eq2=0**

**Calcul la Hauteur de crête amont pour une pente de la crête nulle**

hcrête ava	0.48 m
hcrête amc	0.45 m
hcrête mila	0.46 m

**Vérification de ham-DO**

ham-DO	0.60 m
--------	--------

**avec la condition ham-DO > hcrête-am**

Lame déversante à l'av = 15.98 cm



## ANNEXE 5 : EXEMPLE DE DIMENSIONNEMENT DU DO

	Cellule à saisir
	Cellule calculée

L'exemple suivant explique les étapes de dimensionnement d'un déversoir d'orage, pour un cas de régime d'écoulement fluvial dans la conduite amont et aval. En effet, le diagnostic des déversoirs d'orages existants sur le territoire de l'Eurométropole de Strasbourg montre que ce cas est très fréquent, ainsi les paramètres géométriques dans cet exemple, tant que le diamètre et la pente sont choisis de la base de ce diagnostic.

### Données d'entrée géométries [Ligne7 ; Ligne10]

#### Conduite amont

Le diamètre et la pente de la conduite amont sont des paramètres à saisir par l'utilisateur, soit un diamètre amont de 800mm et une pente de 0,2%.

On note que la pente moyenne dans le réseau d'assainissement est autour de 0,2 %.

Diamètre DN(am)	800	mm
Pente	0,2%	

#### Conduite aval

De même, on saisit la pente de la conduite aval, ainsi que son diamètre.

Diamètre DN(av)	400	mm
Pente	0,2%	

#### Rugosité

On général, la rugosité dans les canalisations du réseau d'assainissement est de 70

Ks	70
----	----

### Les débits [Ligne13 ; Ligne34]

L'utilisateur doit saisir le débit de référence  $Q_{réf}$ , un débit de projet  $Q_p$  et le coefficient de majoration définit par  $C_{coef - maj}(\%) = \frac{Q_{av-max} - Q_{réf}}{Q_{réf}}$ , une de valeur de 1,3 est recommandé pour ce coefficient.

On obtient alors  $Q_{dév} = Q_{projet} - Q_{réf}$  et  $Q_{av-max}$  pour la suite de calcul.

Débit de référence	$Q_{réf}$	0,061	m3/s
--------------------	-----------	-------	------

Débit de projet	$Q_p$	0,538	m3/s
Débit de déversement	$Q_{dév}$	0,477	m3/s
Coefficient de majoration	Coef-maj	1,3	
Débit aval maximum	$Q_{av-max}$	0,079	m3/s

## Analyse hydraulique [Ligne36 ; Ligne44]

### Conduite amont :

L'analyse hydraulique pour la conduite amont se fait pour le débit de référence et le débit de projet.

Par exemple pour un  $Q_{réf}$

On a :  $h_n = 0,176 \text{ m} > h_c = 0,148 \text{ m}$

Donc : le type de pente est faible.

Débit	$Q_{réf}$	$Q_p$	m3/s
Hauteur critique ( $h_c$ )	0,148	0,438	m
qn	0,035	0,312	
Hauteur normal ( $h_n$ )	0,176	0,673	m
Type d'écoulement	Fluvial	Fluvial	

### Conduite aval :

De même, on fait une analyse hydraulique pour la conduite aval, mais pour un débit de référence et un débit aval maximum.

Débit	$Q_{réf}$	$Q_{av-max}$	m3/s
Hauteur critique ( $h_c$ )	0,175	0,200	m
qn	0,224	0,292	
Hauteur normal ( $h_n$ )	0,249	0,309	m
Type d'écoulement	fluvial	fluvial	

## Dimensionnement de la conduite aval étranglée (et) [Ligne46 ; Ligne130]

### Choix de diamètre de la conduite aval étranglé DN(et): [Ligne47 ; Ligne51] :

Initialement, on a un choix de diamètre de la conduite aval étranglée entre 300mm et 1000mm, ce choix est limité par le diamètre de la conduite aval qui est égal à 400mm dans notre cas. On recommande de prendre deux classes en dessous du  $DN(av) = 400 \text{ mm}$

Soit un diamètre retenu  $DN(et) = 300 \text{ mm}$  ; cette valeur est à saisir par l'utilisateur.

$$300 \text{ mm} \leq DN(et) \leq 1000 \text{ mm}$$

Contrainte DN(et) < DN(av) =400mm		
Diamètre disponible :	300	350
Diamètre retenu :	300	mm

### Condition sur la longueur de conduite aval étranglée $L_d(et)$ [Ligne53 ; Ligne55] :

La contrainte sur la longueur est :  $20.DN(et) \leq L_d(et) \leq 100$  m

Pour un DN(et) = 300mm on aura :  $6 \text{ m} \leq L_d(et) \leq 100$  m  
cette contrainte sera vérifié après le calcul de la longueur.

### Choix de pente de la conduite aval étranglée $I_d(et)$ [Ligne57 ; Ligne61] :

La contrainte de la pente est en fonction la longueur minimale de la conduite aval étranglée (6 m dans ce cas). Donc :  $I_d(et) \leq 0,50\%$

Soit une retenue  $I_d(et) = 0,10\%$  ; cette valeur est à saisir par l'utilisateur.

$I_d(et) \leq 0,50\%$	
Pente retenue $I_d(et)$ :	0,10%

### Choix de la hauteur de crête aval du déversoir $h_{crête} (DO)$ [Ligne63 ; Ligne70] :

La hauteur de crête aval du déversoir doit être comprise entre 25 cm et 60% de diamètre de la conduite amont (Cas sans influence du MN). Pour un DN(am)=800mm,

on a  $25 \text{ cm} \leq h_{crête} (DO) \leq 0,48$  m.

Soit la hauteur retenue  $h_{crête} = 0,45$  m ; une valeur à saisir par l'utilisateur.

$25 \text{ cm} \leq H_{crête} (DO) \leq 60\%. DN(am)$	
$25 \text{ cm} \leq H_{crête} (DO) \leq$	0,48 m

Hauteur retenue $H_{crête}$	0,45 m
-----------------------------	--------

### Calcul la hauteur amont de la conduite aval $h_{am-C-av}$ [Ligne73 ; Ligne104] :

C'est une étape intermédiaire avant le calcul les paramètres de dimensionnement du déversoir d'orage.

Le calcul de  $h_{am-C-av}$  se fait pour le débit de référence et le débit aval maximum.

Pour les deux débits, on se réfère sur l'organigramme de décision pour le calcul de  $h_{am-C-av}$ , On est dans le cas :  $H_2 > H_3$ , donc :  $h_{am-C-av} = DN(et)$

Soit  $h_{am-c-av} = 0,3 \text{ m}$

**Calcul de la longueur de la conduite aval étranglée  $L_d(et)$  au  $Q_{réf}$  [Ligne105 ; Ligne121] :**

L'utilisation de la formule de débit conservé pour  $Q_{réf}$ , ainsi la valeur de  $h_{am-c-av}$  calculé ci-dessus permet de calculer la longueur de la conduite aval étranglée

La valeur calculée est  $L_d(et) = 21,96 \text{ m}$

$h_{crête} (DO)$	0,45	m
$h_{am-c-av}$	0,300	m
$I_d(et)$	0,10%	
Kd	70	
$S_d(et)$	0,071	m <sup>2</sup>
Rh	0,075	m
$\varepsilon$	1,024	
$h_{av-DO}/DN(et)$	1,5	

$Q_{cons}$	0,061	m <sup>3</sup> /s
T1	0,193	
T2	0,089	
T3	0,005	
$L_d(et)$	21,96	m

**Vérification [Ligne124; Ligne130] :**

On vérifie dans cette étape toutes les contraintes de dimensionnement de la conduite aval étranglée :

		Vérification	Condition
Diamètre	DN(et)	Ok	DN(et) < DN(av) = 400 mm
Longueur	$L_d(et)$	Ok	$6m \leq L_d(et) \leq 100 \text{ m}$
Pente	$I_d(et)$	Ok	$I_d(et) \leq 1,16\%$
Hcrête	$h_{crête} (DO)$	Ok	$25 \text{ cm} \leq h_{crête} (DO) \leq 0,48 \text{ m}$

## Dimensionnement du déversoir (DO) [Ligne132 ; Ligne216]

**Choix de la pente de radier  $I_{do}(DO)$  [Ligne133; Ligne136] :**

La pente de radier du déversoir d'orage est entre 0,5% et 1%, on recommande une valeur de 1% pour éviter le dépôt dans le DO

$0,5\% \leq I_{do}(DO) \leq 1\%$
----------------------------------

Pente retenue $I_{do}(DO)$	1,00%
----------------------------	-------

Soit la pente retenue  $I_{do}(DO) = 1\%$  ; cette valeur est à saisir par l'utilisateur.

Choix du type de crête [Ligne139; Ligne143] :

Type	crête mince
Valeur	1

On note que la largeur de la crête de type mince est entre 5 et 20 cm.

Valeur retenue $C_w(DO)$ :	1
----------------------------	---

Calcul la hauteur d'eau à l'aval du déversoir d'orage  $h_{av-DO}$  au  $Q_{av-max}$  [Ligne148; Ligne164] :

Le calcul de la hauteur d'eau à l'aval du déversoir d'orage se fait par un Solveur sous Excel suivant la démarche suivante :

- ❖ Barre de menus → Données → Solveur
- ❖ Objectif à définir → la cellule suivante :

Qcons calculé-Qcons	1.17E-09
---------------------	----------

Avec la valeur Qcons calculé – Qcons = 0

- ❖ Cellules variables → la cellule: « hav-DO »
- ❖ Un clic sur le bouton « Résoudre »

Calcul la hauteur d'eau à l'aval du déversoir d'orage  $h_{av-DO}$  au  $Q_{av-max}$

ham-C-av	0.300 m
Ld(et)	21.96 m
Id(et)	0.10%
Ks-d	70
Sd	0.071 m <sup>2</sup>
Rh	0.075 m
hav-DO/Dd	1.994
Ksi	1.211
Qcons	0.0793 m <sup>3</sup> /s
Qcons = Qréf x C	
hav-DO	0.60 m
Qcons-calculé	0.0793 m <sup>3</sup> /s
Qcons calculé-Qcons	1.17E-09

Solveur sur hav-DO tel que Qcons calculé-Qcons = 0

Vérification de Hav-DO

hav-DO	0.60 m
--------	--------

Paramètres du solveur

Objectif à définir : \$D\$163

À :  Max  Min  Valeur : 0

Cellules variables : \$C\$160

Contraintes :

Rendre les variables sans contrainte non négatives

Sélect. une résolution : GRG non linéaire

Méthode de résolution

Sélectionnez le moteur GRG non linéaire pour des problèmes non linéaires simples de solveur. Sélectionnez le moteur Simplex PL pour les problèmes linéaires, et le moteur Évolutionnaire pour les problèmes complexes.

Régoudre

$h_{am-C-av}$	0,300	m
$L(et)$	21,96	m
$I_d(et)$	0,10%	
Kd	70	
$S_d(et)$	0,071	m <sup>2</sup>
Rh	0,075	m
$h_{av-DO}/DN(et)$	1,994	
Ksi	1,211	
$Q_{cons}$	0,0793	m <sup>3</sup> /s
$h_{av-DO}$	0,60	m
$Q_{cons-calculé}$	0,0793	m <sup>3</sup> /s

Cellule variable

On obtient la valeur :

$$h_{av-DO} = 0.60 \text{ m}$$

Vérification de  $H_{av-DO}$  [Ligne167; Ligne170] :

Pour un débit aval maximum, la  $h_{av-DO}$  doit être supérieure à la  $h_{crête-av}$

On vérifie donc  $h_{av-DO} = 0,60\text{m} > h_{crête-av} = 0,45\text{m}$

Calcul la longueur de la crête du déversoir  $L_d(DO)$  et la hauteur d'eau dans la conduite amont  $H_{am}$  [Ligne176; Ligne191] :

De même, le calcul la longueur de la crête du déversoir et la hauteur d'eau dans la conduite amont se fait par un Solveur sous Excel suivant la même démarche précédente:

❖ Objectif à définir → la cellule suivante :

$Eq1^2+Eq2^2$	5.95E-08
---------------	----------

Avec la valeur  $Eq1^2+Eq2^2= 0$

❖ Cellules variables → les deux cellules: « Ham-DO » et « Ldo(DO) »

$Q_{déversé}$	0,459	m <sup>3</sup> /s
$Q_{amont}$	0,538	m <sup>3</sup> /s
$Q_{aval}$	0,079	m <sup>3</sup> /s
$n^*$	1	
Cw	1	
$h_{crête-milieu}$	0,42	m
$I_{do}(DO)$	1,0%	

DN(am)	0,8	m
DN(et)	0,3	m
$L_d(DO)$	3,27	m
$h_{am-DO}$	0,60	m

Cellules variables

On obtient les valeurs :

$$L_d(DO) = 3,27 \text{ m}$$

$$h_{am-DO} = 0,60 \text{ m}$$

Calcul la Hauteur de crête amont pour une pente de la crête nulle [Ligne198; Ligne203] :

Le calcul de  $L_d(DO)$  permet de déduire  $h_{crête \text{ amont}}$  et  $h_{crête \text{ milieu}}$ , soit :

$h_{crête \text{ aval}}$	0,48	m
$h_{crête \text{ amont}}$	0,45	m
$h_{crête \text{ milieu}}$	0,46	m

Vérification de  $h_{am-DO}$  [Ligne209; Ligne212] :

Toujours pour un débit aval maximum, on compare  $H_{am-DO}$  et  $H_{crête-am}$

On a  $h_{am-DO} = 0,60\text{m} > h_{crête-am} = 0,45\text{m}$

La lame déversante à l'aval est de 15 cm.

## ANNEXE 6: Modélisation la ligne d'eau du déversoir

Un déversoir est caractérisé d'un point de vue hydraulique par une charge spécifique constante :

$$H = H_0 = \frac{Q^2}{2gS^2} + h = C_{ste} \quad \frac{dH}{dx} = 0 \quad \text{soit} \quad \frac{d}{dx} \left( \frac{Q^2}{2gS^2} + h \right) = 0$$

$$\frac{2Q}{dx} \frac{dQ}{dx} S^2 - 2S \frac{dS}{dx} \frac{Q^2}{2gS^4} + \frac{dh}{dx} = \frac{Q}{gS^2} \frac{dQ}{dx} - \frac{Q^2}{gS^3} \frac{dS}{dx} + \frac{dh}{dx} = 0$$

$$S(x) = b(x)h + m(x)h^2$$

$$\text{avec} \quad b(x) = b_0 + \alpha x \quad \alpha < 0$$

$$m(x) = m_0 + \beta x \quad \beta < 0$$

$$\text{avec} : \quad \frac{dS}{dx} = \frac{\partial S}{\partial h} \frac{dh}{dx} + \frac{\partial S}{\partial x}$$

$$\frac{\partial S}{\partial h} = 2h(m_0 + \beta x) + (b_0 + \alpha x)$$

$$\frac{\partial S}{\partial x} = \alpha h + \beta h^2$$

$$\frac{Q}{gS^2} Q' - \frac{Q^2}{gS^3} \left( \alpha h + \beta h^2 + (2h(m_0 + \beta x) + b_0 + \alpha x) \frac{dh}{dx} \right) + \frac{dh}{dx} = 0$$

$$\frac{dh}{dx} = \frac{\frac{Q^2}{gS^3} (\alpha h + \beta h^2) - \frac{QQ'}{gS^2}}{1 - (2hm(x) + b(x)) \frac{Q^2}{gS^3}} = \frac{2 \left( \frac{H_0 - h}{S} \right) (\alpha h + \beta h^2) - \frac{Q'}{gS} \sqrt{2g(H_0 - h)}}{1 - (2hm(x) + b(x)) 2 \frac{(H_0 - h)}{S}}$$

On utilise une loi de type  $Q = f((h-w)^{3/2})$  et on ajoute des coefficients permettant de prendre en compte l'effet de la vitesse latérale et de sa direction ( $\omega_u$ ), ainsi que l'effet de l'entonnement du déversoir ( $\omega_\phi$ ).

$$Q' = -\frac{dQ}{dx} = -0.6n^* \cdot \sqrt{g} (h-w)^{3/2} \times c_w \times \omega_u \times \omega_\phi$$

$n^*$  : nombre de crêtes déversantes

$w$  : hauteur de crête

$c_w$  : 1.0 crête mince et 0.8 crête épaisse

$\theta$  : angle d'entonnement

$h$  : tirant d'eau

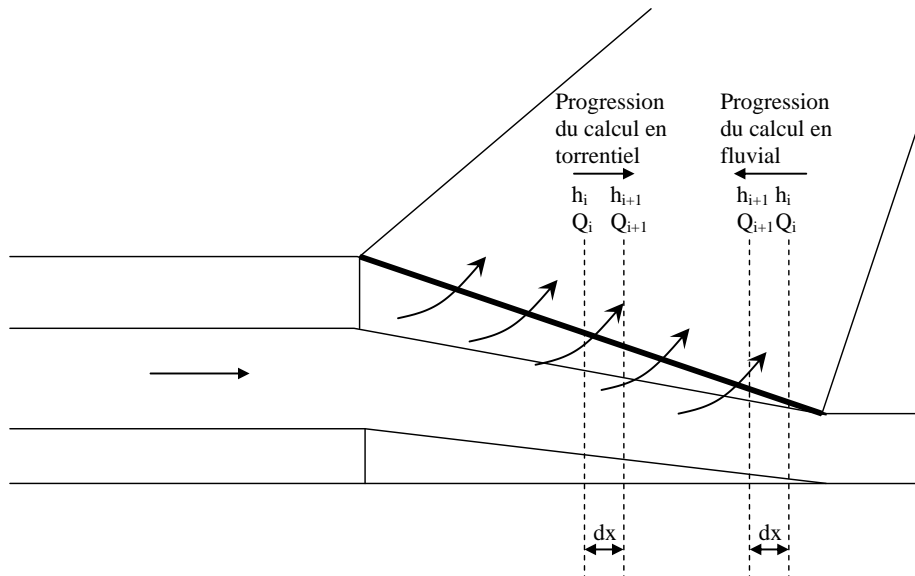
$$\boxed{\frac{dQ}{dx} = -0.6n^* c_w \sqrt{g} (h-w)^{3/2} \times \sqrt{\frac{H_0 - w}{3H_0 - 2h - w}} \times \left[ 1 - \tan(\theta) \left( \frac{3(H_0 - h)}{h-w} \right)^{1/2} \right]}$$

Par rapport à une formule classique, on trouve des valeurs du débit déversé plus fortes grâce à la prise en compte des effets de la vitesse latérale et de l'entonnement.



## ANNEXE 7 : Runge-Kutta classique d'ordre deux et quatre

Cette méthode est basée sur la méthode des différences finies. Nous discrétisons le canal selon son axe d'écoulement comme illustré sur le dessin.



Il s'agit de pouvoir calculer les variables  $Q$  et  $h$  à chaque nœud de notre maillage en fonction des valeurs de ces variables aux nœuds précédents.

$$\text{Soit } (h_{i+1}, Q_{i+1}) = f((h_i, Q_i))$$

Il est possible d'utiliser un schéma basique de type explicite d'Euler progressif :

$$Q_{i+1} = Q_i + \Delta x \cdot g(h_i)$$

$$h_{i+1} = h_i + \Delta x \cdot f(x_i, h_i, Q_i)$$

Pour améliorer le calcul (diminuer la diffusion), on peut utiliser la méthode de Runge et Kutta en se basant sur les développements limités d'ordre 2 et 4. Ainsi l'erreur commise lors de l'utilisation de la méthode est de l'ordre de  $O(\Delta x^2)$  et  $O(\Delta x^4)$ .

Nous avons obtenu précédemment deux équations de la forme  $h' = f(x, h, Q)$  et  $Q' = g(h)$  que nous allons résoudre en écrivant Runge et Kutta d'ordre 2 :

$$h_{i+1} = h_i + \frac{\Delta x}{2} (k_{1,h} + k_{2,h})$$

avec

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

$$k_{2,h} = f(x_i + \Delta x, h_i + \Delta x \cdot k_{1,h}, Q_i + \Delta x \cdot k_{1,Q})$$

$$Q_{i+1} = Q_i + \frac{\Delta x}{2} (k_{1,Q} + k_{2,Q})$$

avec

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

$$k_{2,Q} = g(h_i + \Delta x \cdot k_{1,h})$$