



HAL
open science

Utilisation de la modélisation 3D dans la conception d'un venturi en canaux ouverts

J. Vazquez, C. Fagot, J. Wertel, T. Mechaouat, D. Kuss, M. Fischer

► To cite this version:

J. Vazquez, C. Fagot, J. Wertel, T. Mechaouat, D. Kuss, et al.. Utilisation de la modélisation 3D dans la conception d'un venturi en canaux ouverts. Novatech 2010 - 7ème Conférence internationale sur les techniques et stratégies durables pour la gestion des eaux urbaines par temps de pluie / 7th International Conference on sustainable techniques and strategies for urban water management, Jun 2010, Lyon, France. pp.1-10. <hal-03296467>

HAL Id: hal-03296467

<https://hal.science/hal-03296467v1>

Submitted on 22 Jul 2021

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

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



HAL Authorization

Utilisation de la modélisation 3D dans la conception d'un venturi en canaux ouverts

Using 3D modelling to design a venturi channel

José Vazquez*, Cédric Fagot **, Jonathan Wertel*, Tarik Mechaouat**, Damien Kuss*, Martin Fischer*

* Ecole nationale du génie de l'eau et de l'environnement de Strasbourg, Institut de mécanique des fluides et des solides de Strasbourg, Equipe « Hydraulique urbaine »

IMFS, 2 rue Boussingault, 67000 Strasbourg, France

jvazquez@engees.u-strasbg.fr

** Endress + Hauser, 3, rue du Rhin, 68331 HUNINGUE CEDEX BP 150, FRANCE

RÉSUMÉ

Les venturis en canaux ouverts sont couramment utilisés en assainissement pour mesurer le débit en sortie de station d'épuration. Suivant le processus de traitement utilisé, la variation du débit peut avoisiner des rapports de 50 entre le débit minimal et maximal. Dans ce contexte, l'objectif de cette article est la conception d'un venturi permettant la mesure d'une plage de débit allant de 1.5 à 90 m³/h. Afin de pouvoir garantir un label qualité au canal venturi, celui-ci doit être construit suivant la norme AFNOR ISO 4359 de telle sorte qu'on n'ait pas besoin d'étalonnage sur place et que la loi hauteur-débit puisse être définie par les lois de l'hydraulique. Sur le marché, il n'existe pas de venturi respectant cette norme tout en proposant une large gamme de débit. Après avoir optimisé les dimensions du venturi pour répondre aux critères hydrauliques précédemment définis, on constate que le venturi choisi ne répond pas aux contraintes de la norme 4359 qui impose une largeur de col supérieure à 10 cm. Afin de ne pas réaliser un prototype sans garantie de la courbe hauteur-débit, la modélisation 3D sera utilisée pour confirmer le comportement hydrodynamique du venturi. L'objectif est de garantir la théorie de la couche limite utilisée dans la norme AFNOR ISO 4359 pour caractériser la loi de fonctionnement. Un essai en laboratoire sur pilote expérimental a permis de valider l'ensemble de la démarche.

ABSTRACT

Free surface venturi channels are often used to measure the outflow rate of sewer treatment plants. Depending on the treatment process, the ratio between the maximum and minimum outflow rate can reach 50. In this context, the present paper deals with the design of a venturi channel that enables the measurement of flow rates from 1.5 to 90 m³/h. In order to guarantee a quality label, the venturi channel has to abide by the norm AFNOR ISO 4359, so that there is no need of on-site calibration and the flow rate can be predicted as a function of the water level thanks to usual hydraulics laws. There is no venturi channel on the market that abides by this norm and makes it possible to measure a wide scale of flow rates. In order to avoid making a prototype with flow/water level function that is not satisfying, 3D flow modeling is used to confirm the hydraulics of the venturi channel. The objective is to guarantee the boundary layer theory used in the norm AFNOR ISO 4359 to characterize the venturi law. The whole scientific approach has been validated thanks to pilot experimental tests.

KEYWORDS

CFD, 3D modeling, design flume, boundary layer

1 INTRODUCTION

Dans le cadre de l'autosurveillance, la mesure du débit à l'aval de certains ouvrages (par exemple pour les stations de traitement des eaux usées) est une obligation réglementaire. Il est parfois nécessaire de mesurer une grande variabilité de débit avec une fiabilité importante. La plupart des venturis présente les caractéristiques de fiabilité requises mais dispose d'une plage de mesure réduite. En effet, Endress+Hauser commercialise une gamme de 5 canaux venturis à section rectangulaire pour des débits allant de 5,2 m³/h à 1318 m³/h. Chaque canal venturi est prévu pour une gamme de débits d'amplitude relativement restreinte. Le tableau suivant décrit la gamme des débits de quelques venturis.

Type de venturi	Q minimal (m ³ /h) (hauteur 5 cm)	Q maximal (m ³ /h)
Venturi ISO type 415	5,2	42,5
Venturi ISO type 425	8,6	130,3
Venturi ISO type 430	13,6	322,2

Tableau des gammes de débits pour les venturis E+H

Il existe sur le marché plusieurs venturis ayant une gamme de débit large comme par exemple les venturis ISMA :

Type de venturi	Q minimal (m ³ /h) (hauteur 5 cm)	Q maximal (m ³ /h)
ISMA section exponentielle II	1.62	43
ISMA section exponentielle III	2.29	90
ISMA section exponentielle IV	2.69	180

Tableau des gammes de débits pour les venturis ISMA

Aqualyse commercialise aussi le jaugeur Furtiflo® ayant une plage de débit large. Bien que la gamme de débit soit intéressante, ces venturis ne disposent pas du label de qualité garantie par la norme NF ISO 4359 : Mesure de débit des liquides dans les canaux découverts : Canaux jaugeurs à col rectangulaire, à col trapézoïdal et à col en U (Norme ISO 4659, 1996).

Dans ce contexte, l'objectif de cette étude est la mise au point d'un venturi permettant la mesure d'une plage de débit allant de 1.5 à 90 m³/h. Afin de pouvoir garantir un label au canal venturi, celui-ci doit être construit suivant la norme ISO 4359.

La **première étape** va consister à détailler le cahier des charges au niveau de la géométrie et des plages de débits envisageables du venturi. Le support principal pour cette étape est la norme ISO 4359 ainsi que les contraintes géométriques et hydrauliques du constructeur Endress + Hauser.

La **deuxième étape** est l'optimisation de la forme et des lois de débit. Elle se fera en utilisant la norme ISO 4359 ainsi que la modélisation 3D avec le logiciel FLUENT. Cette étude permettra :

- d'affiner la géométrie et de choisir la forme la plus pertinente du venturi,
- d'extrapoler la norme pour des géométries particulières.

La **troisième étape** consiste à réaliser le prototype afin de faire les essais fonctionnels en laboratoire pour valider le concept et la précision de mesure.

2 LE CAHIER DES CHARGES

L'ensemble des contraintes imposées dans ce cahier des charges provient de la Norme Internationale ISO 4359-1986 (F).

- La norme ISO 4359 ne considère que les venturis qui jouissent d'une reconnaissance unanime s'appuyant sur des travaux de recherche adéquats et des essais in situ, et qui **n'ont pas besoin d'être étalonnés sur place**.
- La mesure des débits se fait en canaux artificiels à régime permanent ou à variation lente de débit.
- Les conditions d'écoulement ne dépendent que de la hauteur de charge à l'amont.
- L'écoulement est fluvial à l'amont du canal jaugeur, une accélération se produit au passage de la contraction et atteint la hauteur critique pour passer à un écoulement torrentiel à l'aval.
- Le canal jaugeur à col trapézoïdal est **approprié** dans le cas où la **gamme des débits à mesurer est large** et doit être mesurée avec une précision constante suivant la hauteur.

- Les sections des transitions à l'entrée et à la sortie peuvent être planes ou incurvées selon les besoins de la construction.
- Si la paroi est incurvée, elle peut être cylindrique inclinée, cylindrique oblique ou en forme de cône à axe vertical. L'ensemble de ces formes incurvées doivent être à l'intérieur des plans définissant de chaque côté la convergence 1:3 et doivent être tangents aux plans formant le col.
- Les surfaces définissant la section de sortie ont un évasement minimum de 1:3. Un évasement de 1:6 est préconisé.
- Il doit exister une contraction quel que soit le niveau de la surface de l'eau entre le canal d'approche et le col.

Au niveau des dimensions :

- $2m \geq \text{hauteur limite amont} \geq 0,05m$ ou $0,05 \times \text{Longueur du col}$
- $\frac{\text{hauteur amont}}{\text{Longueur du col}} \leq 0,50$
- $Froude_{\text{canal d'approche}} \leq 0,50$, (Froude : rapport entre la vitesse de l'eau et la célérité des ondes),
- Largeur du col $\geq 0,10m$. Cette limite résulte du manque de données expérimentales confirmées pour des largeurs de col $< 0,10m$.

3 OPTIMISATION DE LA FORME DU VENTURI

3.1 Les équations de la norme ISO 4359

En canal venturi trapézoïdal, la relation donnant le débit en fonction du tirant d'eau mesuré est donnée par (§ 11.4.1. de la norme 4359) :

$$Q = \left(\frac{2}{3}\right)^{3/2} \cdot \sqrt{g} \cdot C_v \cdot C_s \cdot C_d \cdot b \cdot h^{3/2}$$

Avec :

- Q : débit (m^3/s) ;
- C_v : coefficient sans dimension tenant compte de l'influence de la vitesse d'approche sur le niveau mesuré en amont du canal jaugeur (sans unité);
- C_d : coefficient de débit (sans unité);
- b : largeur du col (m) ;
- h : tirant d'eau au niveau de la section de mesure (m).

On a par ailleurs, en se reportant au § 11.4.1 de la norme :

$$C_d = \left(1 - \eta \frac{0,006 \cdot L}{b}\right) \cdot \left(1 - \frac{0,003 \cdot L}{h}\right)^{3/2} ; \text{ avec : } \eta = \sqrt{1 + m^2} - m$$

$$C_v^{2/3} - 1 = \frac{4}{27} \cdot C_s^2 \cdot C_v^2 \cdot \frac{(b - 0,006 \cdot L)^2 \cdot (h - 0,003 \cdot L)^2}{A^2}$$

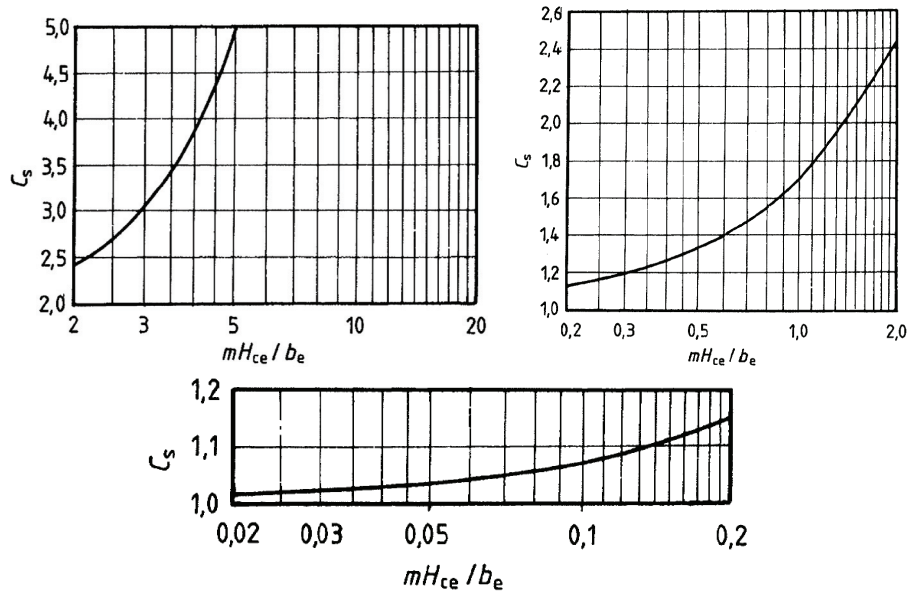
Avec :

- L : longueur de la section prismatique de la contraction (m) ;
- A : section du canal d'approche (amont du venturi) $A = B \cdot h$;
- B : Largeur du canal d'approche,
- h : tirant d'eau au niveau de la section de mesure (m),
- m : inclinaison des parois du canal jaugeur (fruit des berges).

Ces formules sont obtenues en formulant les hypothèses suivantes :

- $Re > 2 \cdot 10^5$; (Nombre de Reynolds)
- $L/ks > 4 \cdot 000$, où ks est la rugosité du canal $\Rightarrow \delta/L = 0,003$, où δ est l'épaisseur de la couche limite.

Le coefficient C_s est obtenu en numérisant (utilisation de fonctions d'interpolation de type spline) les courbes suivantes (Norme ISO 4359) :

Figure 1 : Graphique représentant le coefficient C_s (Norme ISO 4359)

Avec : $m \cdot \frac{H_{ce}}{b_e} = m \cdot \frac{h - 0,003 \cdot L}{b - 0,006 \cdot L} \cdot C_v^{2/3}$

- H_{ce} : Charge spécifique dans le col à la hauteur critique (m),
- b_e : Largeur du col (m).

L'objectif consiste donc à se fixer les variables suivantes :

- h : tirant d'eau dans le canal d'approche du venturi (m),
- m : le fruit des berges,
- Forme du canal d'approche (canal rectangulaire de largeur B),
- L : longueur du canal jaugeur.

Le calcul consiste à déterminer les variables :

- Q : Débit (m^3/s),
- C_v : coefficient sans dimension tenant compte de l'influence de la vitesse d'approche sur le niveau mesuré en amont du canal jaugeur (sans unité);
- C_s : Facteur de forme des canaux jaugeurs à col trapézoïdal.

La résolution de l'ensemble de ces équations nécessite l'utilisation d'un solveur. Nous avons utilisé Matlab® pour résoudre l'ensemble de ces équations.

3.2 Etude de sensibilité de la géométrie sur la loi de débit

L'objectif de cette partie est de faire une étude de sensibilité des différentes caractéristiques géométriques pour un débit $Q \leq 90 m^3/h$ et largeur d'entrée 190mm.

Les paramètres d'optimisation sont :

- La hauteur amont maximale :

La hauteur amont maximale sera évaluée pour le débit amont maximal.

- L'inclinaison des parois du canal jaugeur :

La norme exige l'existence d'une contraction quel que soit le niveau de la surface de l'eau entre le canal d'approche et le col. En fonction de la hauteur maximale et de la largeur dans le canal d'approche, on est contraint à choisir une valeur maximale du fruit m .

Afin de pouvoir atteindre la hauteur d'eau maximale sans risque de débordement du venturi, on choisira pour le calcul de m la hauteur $h_{\max \text{ amont}}$ majorée de 10%.

- La longueur du canal jaugeur :

On doit respecter une longueur du col supérieure à deux fois la hauteur amont. En choisissant une hauteur amont maximale la longueur minimale du col est de $2 \cdot h_{\text{amont}}$.

- La largeur du col :

La norme fixe la largeur du col au minimum à 0,10m. Afin de pouvoir réaliser une étude de sensibilité, on fera varier la largeur du col jusqu'à 0,02m.

Les figures suivantes représentent : les formes des canaux jaugeurs au droit du col et les lois hauteur débit associées à chaque venturi.

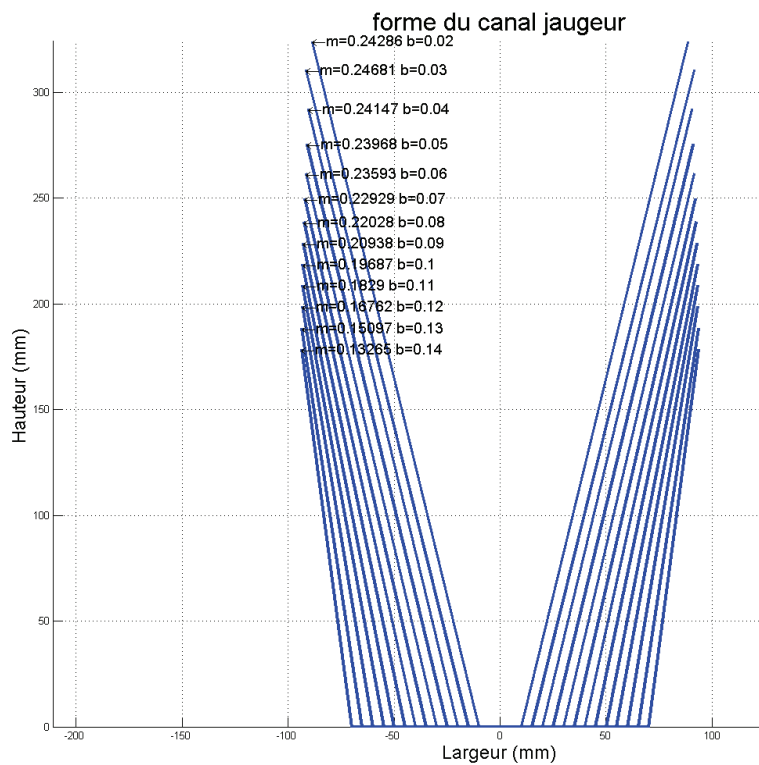


Figure 2 : Formes des venturis

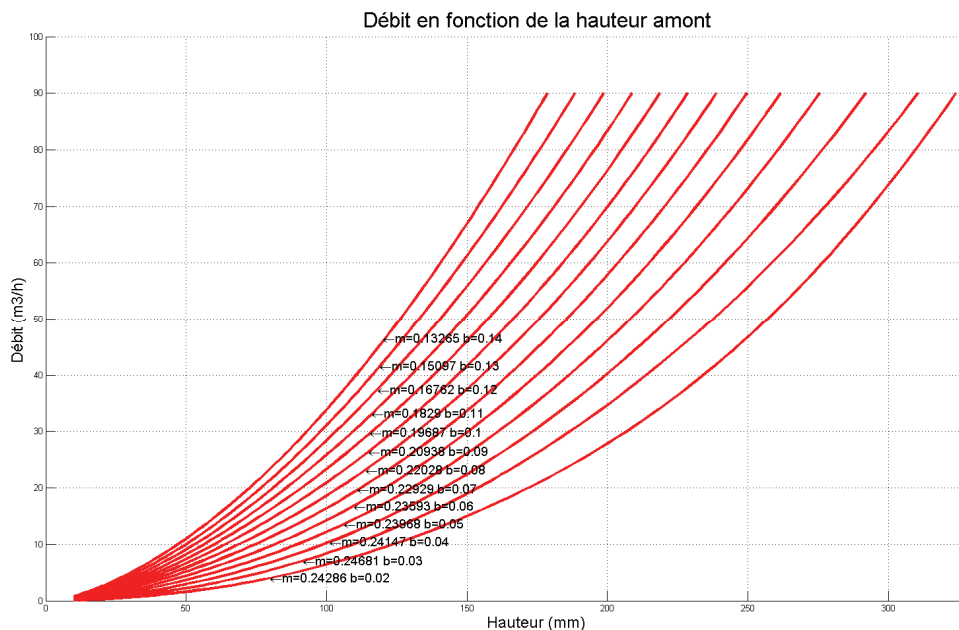


Figure 3 : Courbe de fonctionnement hauteur-débit

On remarque que le venturi ayant la gamme de validité la plus large est celui correspondant aux données géométriques suivantes :

- Largeur d'entrée : 190mm
- Largeur au col : 20mm
- Fruit : 0.24286
- Plage de débit : [1.6 ; 90] (m³/h)
- Plage de hauteur : [50 ; 324] (mm)

Le venturi choisi ne répond pas aux contraintes de la norme 4359 qui impose une largeur de col de supérieure à 10 cm. Toutefois, cette limite résulte du manque de données expérimentales. Afin de ne pas réaliser un prototype sans garantie hydraulique de la courbe de fonctionnement, la modélisation 3D sera utilisée pour confirmer le comportement hydrodynamique du venturi. L'objectif est de garantir la théorie de la couche limite classique utilisée pour caractériser le paramètre C_d (annexe D de la norme ISO 4359).

4 VALIDATION NUMERIQUE ET EXPERIMENTALE DU VENTURI CHOISI

4.1 Modélisation 3D

La modélisation tridimensionnelle 3D est un outil particulièrement performant pour permettre la connaissance fine du champ de vitesse dans un ouvrage hydraulique. Les outils CFD (Computational Fluid Dynamics) sont aujourd'hui suffisamment validés par rapport à l'expérimental pour permettre des études d'optimisation de forme afin d'atteindre un comportement hydraulique précis. Le code retenu pour cette étude est Fluent (Fluent, 2001), déjà utilisé pour l'étude des déversoirs d'orage (Lipeme-Kouyi, G., 2005). et des bassins d'orage (Stovin, V. R. et *al.*, 1994), (Adamsson, Å. et *al.*, 2003), (Dufresne M. et *al.*, 2008).

Des lois de paroi semi empiriques ont été choisies dans Fluent pour modéliser la couche limite. Dans ce cas, la première couche de mailles doit englober toute la couche limite. Nous présentons ici les lois de paroi standards utilisées par le code de calcul (Fluent, 2001). Elles correspondent à un régime turbulent lisse.

Fluent (2001) décrit la vitesse proche de la paroi au moyen des grandeurs adimensionnelles définies dans les équations suivantes :

$$U^* = \frac{U_P C_\mu^{1/4} k_P^{1/2}}{\tau_w / \rho} \qquad y^* = \frac{\rho C_\mu^{1/4} k_P^{1/2} y_P}{\mu}$$

Ici, U_P est la vitesse moyenne au point P situé à la distance y_P de la paroi ; C_μ , la constante du modèle de turbulence $k-\varepsilon$; k_P , l'énergie cinétique turbulente au point P ; τ_w , la contrainte de cisaillement.

Deux zones sont distinguées près de la paroi : la sous-couche laminaire et la zone logarithmique. Entre les deux, une zone de transition prend place.

La loi logarithmique, valide pour $30 < y^* < 300$, est employée par Fluent (2001) dès $y^* > 11,2$. Elle correspond à l'équation suivante :

$$U^* = \frac{1}{\kappa} \ln(E y^*)$$

dans laquelle κ et E sont des constantes dont les valeurs respectives sont 0,42 et 9,79.

Dans la sous-couche laminaire étendue à $y^* < 11,2$, les deux grandeurs définies précédemment sont reliées par l'équation suivante :

$$U^* = y^*$$

4.2 Vérification du venturi par rapport au modèle 3D

Le venturi choisi a fait l'objet d'un maillage 3D représenté à la figure suivante. Le nombre de maille est de 189040 cellules de calcul.

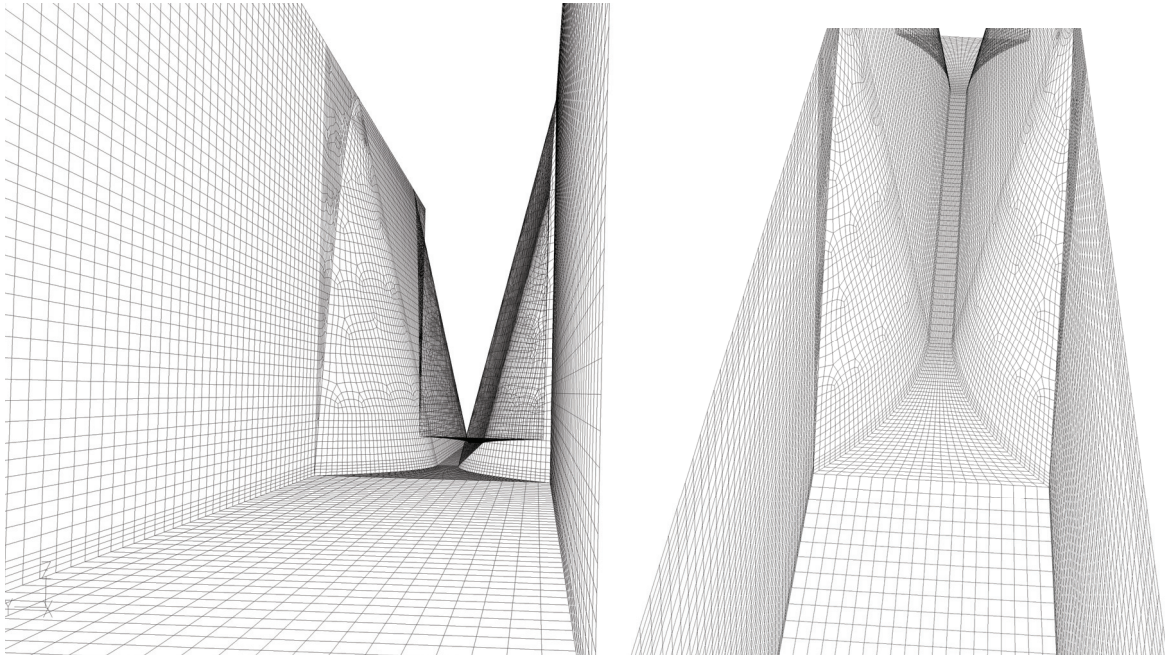


Figure 4 : Maillage du modèle

La comparaison des résultats 3D avec la courbe de fonctionnement de la norme ISO 4359 est représentée à la figure suivante. La hauteur a été calculée à l'amont du venturi conformément à la norme ISO 4359.

Validation de la courbe de fonctionnement du venturi (Barre d'erreur à 2%)

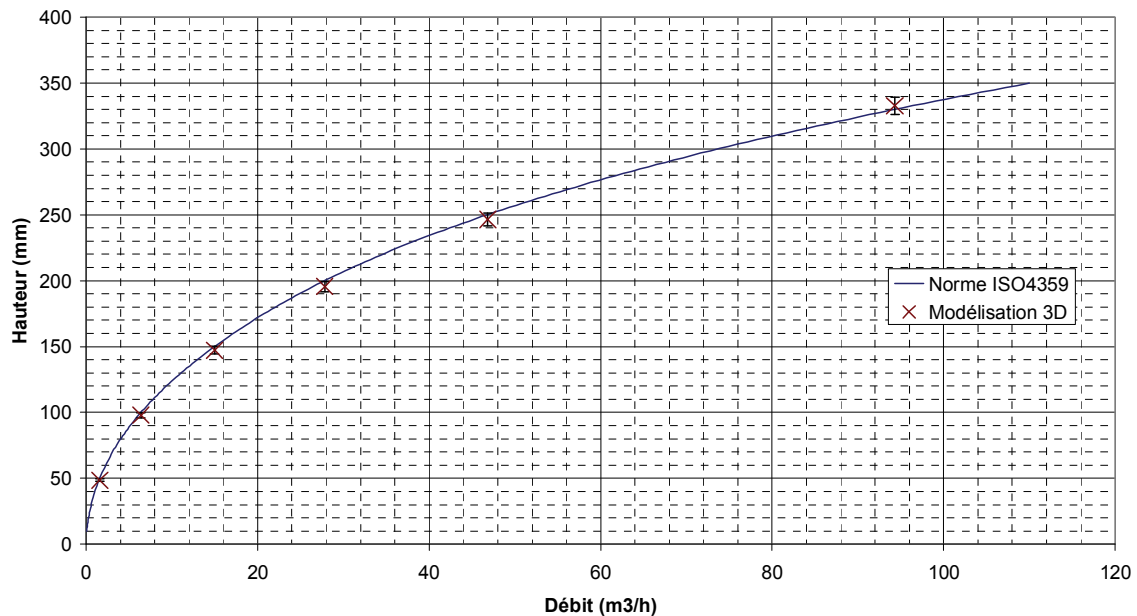


Figure 5 : Evolution de la courbe de fonctionnement du venturi

On constate une excellente adéquation entre la norme ISO 4359 et la modélisation 3D et ceci pour toute la gamme de débit. Les erreurs sont inférieures à 2%. La théorie de la couche limite utilisée pour caractériser le paramètre C_D de la norme a pu être étendue pour des largeurs de col allant jusqu'à 2 cm.

La figure suivante représente l'évolution du tirant d'eau le long du venturi

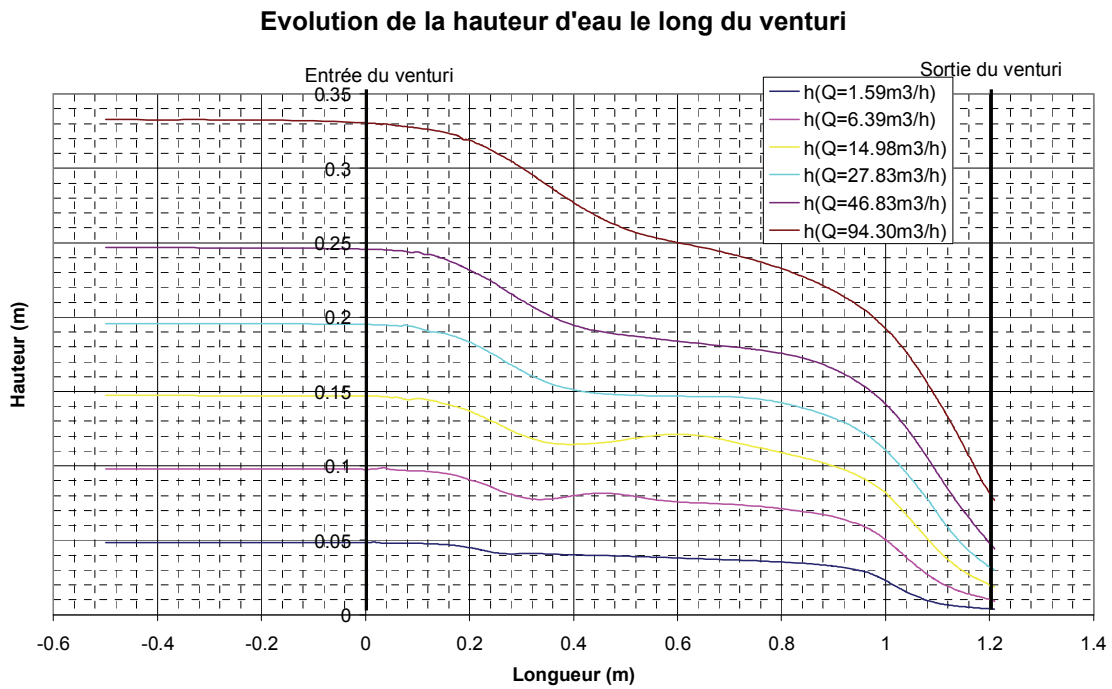


Figure 6 : Evolution de la hauteur d'eau le long du venturi

La modélisation 3D permet d'avoir la hauteur à l'aval du venturi. Celle-ci va permettre de calculer la hauteur maximale aval en fluvial afin que le venturi fonctionne en dénoyé.

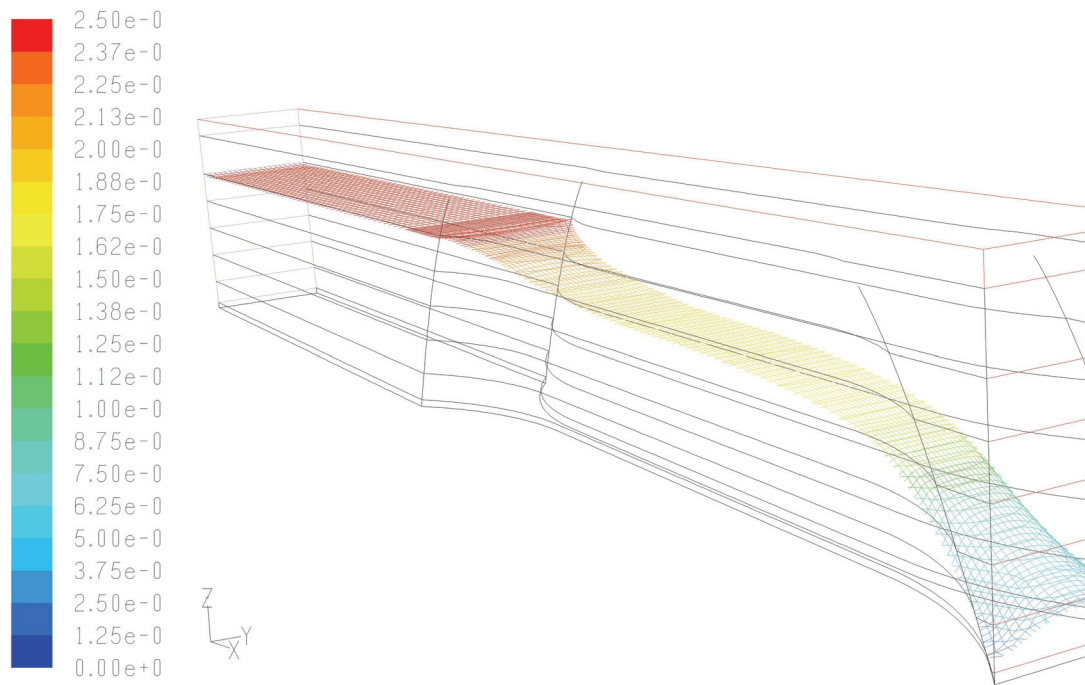


Figure 7 : Evolution du profil de la surface libre dans le venturi pour un débit amont de 46.83m³/h.

4.3 Validation du venturi expérimentalement

Afin de valider non seulement le modèle 3D mais également la norme, le venturi choisi dans le paragraphe 3 a été testé sur le banc expérimental d'Obernai pour déterminer sa courbe de fonctionnement. La figure suivante schématise le banc d'essai.

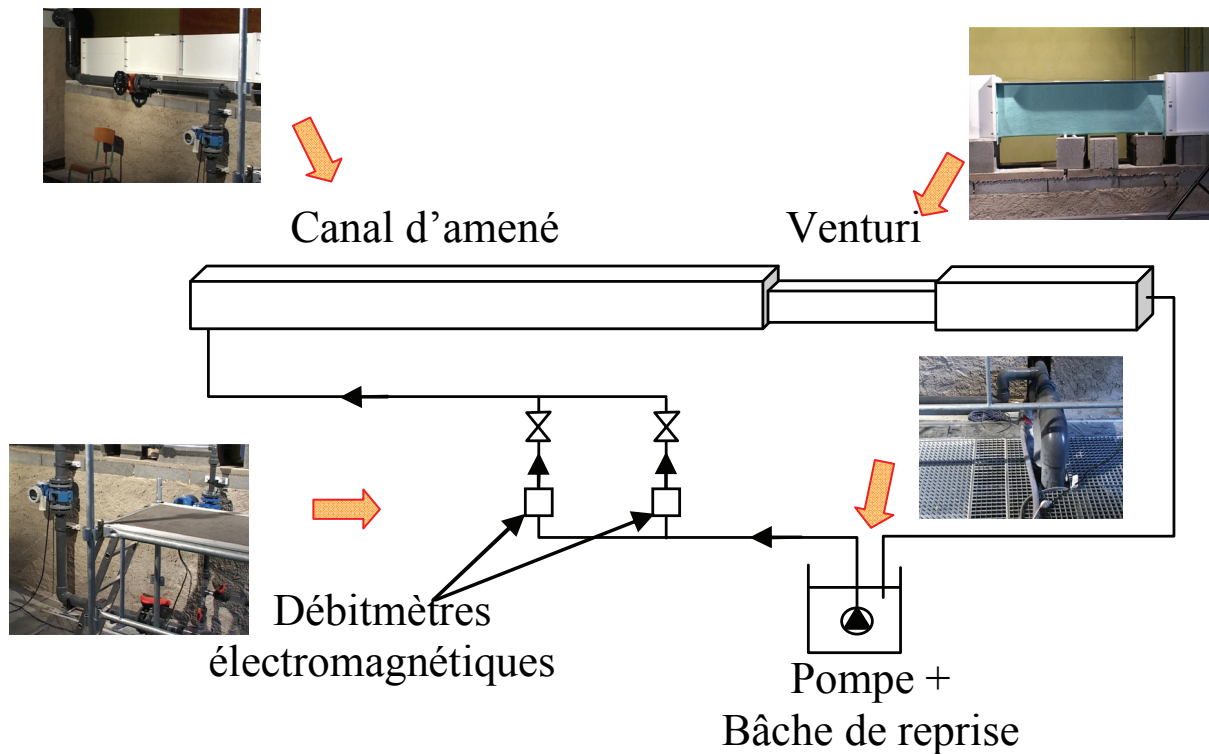


Figure 8 : Banc expérimental

La régulation par une vanne aval a permis de faire varier le débit sur le banc d'essai de $0.8\text{m}^3/\text{h}$ à $58\text{m}^3/\text{h}$. L'erreur sur la mesure de hauteur est estimée à $\pm 0.5\text{mm}$. L'erreur sur le débit est estimée à 0.5% sur la mesure et 2.5% sur la variabilité dans le temps.

Le graphique suivant compare les résultats de la modélisation 3D avec les données expérimentales.

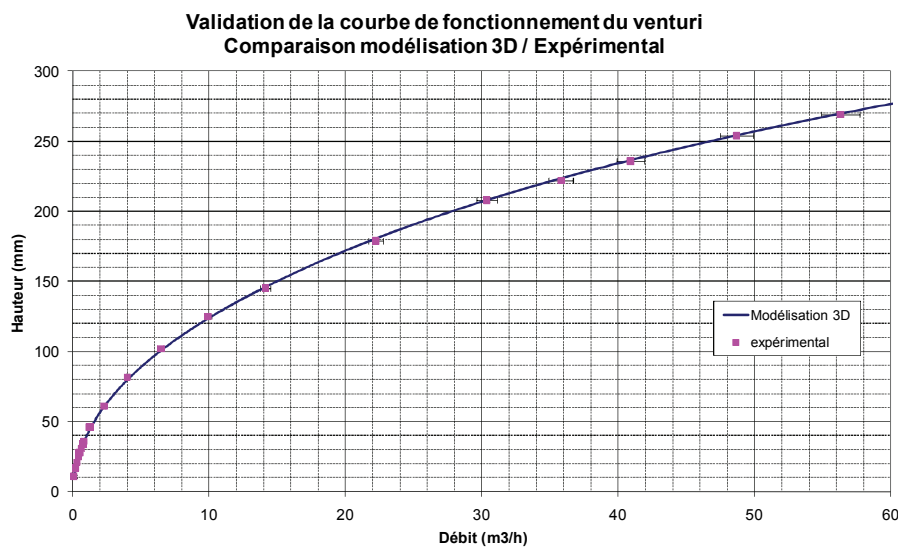
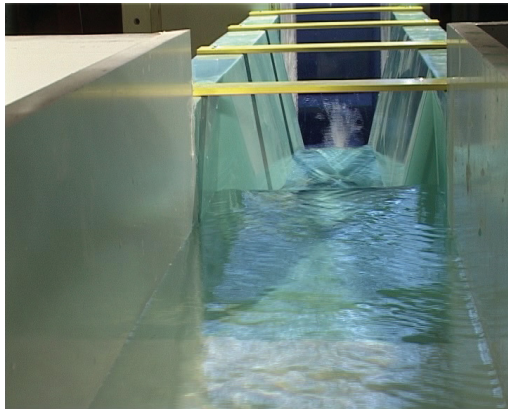


Figure 9 : comparaison modélisation 3D / expérimental

On remarque une excellente adéquation entre les données expérimentales et la modélisation 3D. Ce résultat permet de confirmer l'utilisation de la théorie de la couche limite classique prise en compte

dans la norme pour des cols de venturi inférieurs à 10 cm. Les photos suivantes montrent l'évolution de la surface libre le long du venturi.



Vue amont du venturi



Vue du col du venturi



Vue de la section de mesure du venturi



Vue de la hauteur d'eau à l'aval du venturi

Figure 10 : Photos du comportement hydraulique du venturi

5 CONCLUSION

Cette étude a permis la création d'un venturi trapézoïdal respectant la norme ISO 4359 et vérifiant la gamme de débit $1.6\text{m}^3/\text{h} - 94\text{m}^3/\text{h}$ pour une variation de hauteur de 50mm à 330mm. Il a été nécessaire d'optimiser la forme du col en utilisant les équations de la norme ISO 4359. Afin de permettre d'étendre la gamme de validité des équations utilisées dans cette norme, la modélisation numérique 3D et le banc expérimental ont permis de valider l'ensemble de la courbe de fonctionnement du venturi. La théorie de la couche limite utilisée pour caractériser le paramètre C_D de la norme a pu être étendue pour des largeurs de col allant jusqu'à 2 cm.

BIBLIOGRAPHIE

- Adamsson, Å., Stovin, V. R. & Saul, A. J. (2003). - *Bed shear stress boundary condition for storage tank sedimentation*. J. Environ. Eng., 129(7), 651-658.
- Dufresne M, Vazquez J, Terfous A, Ghenaïm A, Poulet J-B (2009). *Experimental investigation and CFD modelling of flow, sedimentation, and solids separation in a combined sewer detention tank*. Computers & Fluids N°38, pp-1042-1049.
- Fluent (2001). - *Fluent 6.0 software User's Guide*. Fluent Inc.
- Lipeme-Kouyi, G. (2004). - *Expérimentations et modélisations tridimensionnelles de l'hydrodynamique et de la séparation particulaire dans les déversoirs d'orage*. PhD thesis, Louis Pasteur University (Strasbourg, France).
- Norme NF ISO 4359, (1986), *Mesure de débit des liquides dans les canaux découverts : Canaux jaugeurs à col rectangulaire, à col trapézoïdal et à col en U*. AFNOR 86591.
- Stovin, V. R. & Saul, A. J. (1994). - *Sedimentation in storage tank structures*. Wat. Sci. Tech., 29(1-2), 363-372.