

EXTENSION DE LA NORME NF ISO 4359 AUX CANAUX JAUGEURS VENTURI À SECTION EXPONENTIELLE

Extension of the French Standard NF ISO 4359 to exponential-shaped Venturi flumes

Matthieu Dufresne, José Vazquez, Martin Fischer, Sandra Isel, Quentin Araud

Ecole nationale du génie de l'eau et de l'environnement de Strasbourg (ENGEES). 1 quai Koch, BP 61039, 67070 Strasbourg cedex, France

Institut de mécanique des fluides et des solides de Strasbourg (IMFS) – FRE 3240 (CNRS, Université de Strasbourg, ENGEES, INSA Strasbourg). 2 rue Boussingault, 67000 Strasbourg, France

Tél: +33 (0)3 68 85 29 33, e-mail: matthieu.dufresne@engees.unistra.fr

Jean-Paul Forêt

ISMA, rue Hector Malot, 57600 Forbach, France

Tél: +33 (0)3 87 87 62 16, Fax: +33 (0)3 87 88 18 59, e-mail: contact@isma.fr

La norme NF ISO 4359 propose une approche théorique pour déterminer la loi hauteur-débit des canaux jaugeurs Venturi. Elle se limite néanmoins à des canaux jouissant d'une reconnaissance unanime, à savoir les canaux présentant des cols rectangulaires, des cols trapézoïdaux ou des cols en U. Elle se limite par ailleurs à des cols suffisamment grands (en termes de largeur et de longueur). Grâce à des approches expérimentales et numériques, la présente étude étend la validité de la norme NF ISO 4359 aux canaux jaugeurs à section exponentielle. Elle étend notamment la validité de la norme à des cols de plus petite largeur et de plus petite longueur.

MOTS CLEFS

Canaux Venturi, expérimentation, mécanique des fluides numérique, norme NF ISO.

I INTRODUCTION

Les canaux Venturi sont des ouvrages hydrauliques de mesure du débit ; ils sont par exemple très souvent utilisés en sortie de station de traitement des eaux usées. Si la Norme NF ISO 4359 propose un calcul théorique fin pour déterminer la loi hauteur-débit de tels ouvrages de mesure, elle se limite néanmoins à des formes de col bien spécifiques (col rectangulaire, col trapézoïdal et col en U) ainsi qu'à des tailles relativement grandes : la largeur de col doit ainsi être supérieure à 0.10 m ; le rapport de la hauteur d'eau sur la longueur de col doit quant à lui être inférieur à 0.50 [1]. Or, de nombreuses applications de débitmétrie nécessitent la mesure de faibles débits sur une plage de variations relativement étendue. Les industriels ont donc mis sur le marché des ouvrages de petite taille (largeur de col inférieure à 0.10 m) présentant une forme de col plus adaptée à une plage étendue. Parmi ceux-ci, nous trouvons les canaux Venturi à section exponentielle (col évasé). Par ailleurs, la longueur de col est souvent raccourcie pour des raisons d'encombrement. La Norme NF ISO 4359 ne saurait néanmoins justifier la loi hauteur-débit de tels canaux sans investigation supplémentaire.

L'objectif de cette étude est de confronter la norme NF ISO 4359 à une large gamme de canaux Venturi à section exponentielle.

II CANAUX VENTURI ETUDIÉS

Plusieurs industriels proposent une gamme de canaux Venturi à col évasé (ISMA, Endress-Hauser, etc.). Dans cette étude, nous utiliserons les sept canaux Venturi à section exponentielle de la gamme ISMA. Le Tableau 1 en présente les principales caractéristiques géométriques issues de mesures effectuées dans le cadre de cette étude. Dans ce tableau, L est la longueur du col ; B_c , la largeur du col au sommet du Venturi (cette grandeur est donnée à titre informatif, elle n'est pas utile à l'étude) ; B , la largeur du chenal d'approche. Afin de ne pas introduire d'irrégularités géométriques ni dans le calcul selon la norme NF ISO 4359 ni dans la modélisation 3D, une relation $y = f(z)$ a été déterminée pour chaque col de Venturi. Une loi puissance, exprimée dans (1), s'est révélée être la plus pertinente.

$$y = az^b, \quad (1)$$

Ici, y est la composante horizontale (demi-largeur) ; z , la composante verticale. Dans ce tableau, a et b sont tels que y et z sont exprimés en cm. L'erreur introduite par l'utilisation d'une loi puissance pour la géométrie du col est limitée à 2.8%. L'étréouesse du col diminue du Venturi n°7 au Venturi n°1, ce qui est traduit mathématiquement par un coefficient a décroissant du n°7 au n°1, le coefficient b étant quasiment constant.

Venturi n°		1	2	3	4	5	6	7
Col (mesure)	a	0.9655	1.0965	1.6765	2.2282	3.0462	4.0123	4.3883
	b	0.4786	0.4946	0.4449	0.4659	0.4643	0.4293	0.4456
	Erreur relative moyenne sur y	2.8%	2.2%	2.6%	1.6%	2.1%	1.1%	1.9%
	L (cm)	6.0	9.0	14.0	21.5	34.0	43.0	60.0
	B_c (cm)	8.1	10.8	15.5	24.3	36.0	46.5	61.9
Chenal d'approche (donnée ISMA)	B (cm)	9.0	13.0	19.0	28.0	42.0	55.0	73.0

Tableau 1. Dimensions des sept canaux Venturi testés (a et b sont tels que y et z sont exprimés en cm).

III NORME NF ISO 4359 : APPROCHE THÉORIQUE

III.1 Démarche hydraulique

La norme NF ISO 4359 précise dans sa première page qu'elle ne traite que des canaux jaugeurs jouissant d'une reconnaissance unanime, à savoir les canaux à col rectangulaire, à col trapézoïdal et à col en U [1]. Si les canaux Venturi à section exponentielle ne sont pas directement traités par la norme, la démarche scientifique qui est proposée par la norme est tout à fait applicable à ce type de géométrie. Une méthode de calcul de la relation hauteur-débit est ainsi présentée dans le §11.5 de la norme.

La méthode consiste à choisir une gamme de valeurs de d_c , profondeur critique dans le col. Pour chacune de ces valeurs, l'utilisation de la loi $w = f(d)$ caractérisant la géométrie du col (w étant la largeur de col ; d , la hauteur d'eau) permet de calculer w_c , largeur au miroir, et A_c , section mouillée, au niveau du passage par la profondeur critique. Pour les 7 canaux Venturis testés, la loi $w = f(d)$ est de la forme :

$$w = 2ad^b, \quad (2)$$

Où a et b sont des coefficients constants (un couple de paramètres pour chaque canal jaugeur). D'où :

$$w_c = 2ad_c^b, \quad (3)$$

$$A_c = \frac{2a}{b+1} h^{b+1}, \quad (4)$$

La charge totale utile H_e peut alors être calculée selon l'expression suivante :

$$H_e = d_c + \frac{A_c}{2w_c}, \quad (5)$$

Afin de tenir compte de l'épaisseur de déplacement de la couche limite dans le col, une correction de la hauteur de charge $H_{correction}$ est calculée comme suit :

$$H_{correction} = \frac{P_c}{w_c} \frac{\delta}{L}, \quad (6)$$

Dans (6), P_c est le périmètre mouillé, calculé par intégration numérique connaissant la profondeur d_c et la loi $w = f(d)$; δ , l'épaisseur du déplacement de la couche limite ; et L , la longueur du col. L'épaisseur relative du déplacement de la couche limite, δ/L , peut être déterminée en utilisant la Figure 13 de la norme NF ISO 4359 [1]. Pour cela, deux nombres adimensionnels doivent être calculés : le nombre de Reynolds au

niveau du passage par la vitesse critique dans le col (Re , voir l'équation ci-dessous) ainsi que le rapport de la longueur du col sur la rugosité du matériau L/k_s . Ici, k_s est la rugosité au sens de Nikuradsé.

$$Re = \frac{QL}{\nu A_c}, \quad (7)$$

Ici, ν est la viscosité cinématique de l'eau (m^2/s). La norme NF ISO 4359 précise que 0.003 est une valeur typique pour δ/L . Une fois la correction de la hauteur de charge calculée, la hauteur de charge totale s'écrit comme suit :

$$H = H_e + H_{correction}, \quad (8)$$

Pour convertir la hauteur de charge totale, H , en hauteur jaugée, h , l'équation suivante doit être résolue par solveur :

$$H = h + \frac{Q^2}{2gA_a^2}, \quad (7)$$

Ici, A_a est la section mouillée dans le chenal d'approche. La géométrie y étant rectangulaire sans dénivellation au niveau du col, cette section s'écrit :

$$A_a = Bh, \quad (7)$$

Ici, B est la largeur du lit du chenal d'approche.

III.2 Limitations

La norme NF ISO 4359 précise plusieurs limites d'application. Parmi celles-ci, le rapport de la hauteur jaugée sur la longueur de col, h/L , doit être inférieur à 0.50 (la valeur 0.67 est tolérée pour h_{max}/L avec une erreur limite supplémentaire de 2%). La norme NF ISO 4359 précise que cette limitation est due à l'obligation de maintenir un écoulement parallèle dans la section critique du col. Cette condition est très souvent non respectée du fait de la petite longueur des cols des canaux jaugeurs testés.

La norme NF ISO 4359 précise par ailleurs un certain de limitations dues à un « manque de données expérimentales sûres » [1]. Parmi celles-ci, la largeur du col doit être supérieure à 0.10 m. Précisons que pour les canaux jaugeurs à col trapézoïdal, qui sont ceux dont la forme du col se rapproche le plus des canaux à section exponentielle, la largeur du col se calcule au niveau du fond (ce n'est pas la largeur au miroir). Les largeurs de cols données dans le Tableau 1 sont celles au niveau du sommet du Venturi ; elles tendent vers zéro en se déplaçant vers le fond du col. Cette limitation de la norme étant uniquement liée à un manque de données expérimentales sûres, le fait que les canaux Venturi testés ne la respectent pas ne remet en rien en cause la démarche d'application de la norme NF ISO 4359 aux canaux jaugeurs à section exponentielle. Ce manque de données pourra être comblé par expérimentation ou encore par simulation numérique.

IV ESSAIS EN LABORATOIRE : APPROCHE EXPÉRIMENTALE

Le canal jaugeur n°2 a été testé expérimentalement. Pour cela, nous avons utilisé le banc d'essai expérimental dont nous disposons au Lycée agricole d'Obernai. Afin de garantir un fonctionnement du Venturi en régime dénoyé (écoulement « modulaire » selon la norme NF ISO 4359 [1]), l'aval est installé en chute d'eau. Deux débitmètres électromagnétiques, de gammes différentes et installés en parallèle, ont été utilisés pour mesurer le débit. Pour les débits inférieurs à $0.54 m^3/h$ (hors plage du plus petit débitmètre), il a été procédé par empotage (mesure du volume évacué dans un laps de temps). La mesure de hauteur d'eau s'est faite 0.700 m en amont de la contraction du col. La loi expérimentale hauteur/débit pour le Venturi testé est présentée dans le Tableau 2.

L'incertitude maximale sur la mesure du débit est estimée à +/- 4% ; cette valeur tient compte à la fois de l'incertitude sur la valeur instantanée du débit mais aussi des faibles fluctuations du débit autour de sa valeur moyenne en cours de mesure. L'incertitude maximale sur la mesure de hauteur d'eau est estimée à 1 mm, soit +/- 2% au maximum pour des hauteurs mesurées supérieures à 30 mm.

Débit Q (m ³ /h)	Hauteur d'eau h (mm)	Incertitude sur le débit	Incertitude sur la hauteur d'eau
0.13*	11	+/- 3.0%*	+/- 4.5%
0.31*	19	+/- 2.7%*	+/- 2.6%
0.62*	28	+/- 3.6%*	+/- 1.8%
1.26	40	+/- 0.8%	+/- 1.3%
2.56	57	+/- 0.6%	+/- 0.9%
3.63	67	+/- 0.8%	+/- 0.7%
5.05	79	+/- 0.8%	+/- 0.6%
7.65	96	+/- 2.0%	+/- 0.5%
9.10	104	+/- 1.5%	+/- 0.5%
11.60	117	+/- 0.9%	+/- 0.4%
13.75	126	+/- 0.5%	+/- 0.4%
17.25	140	+/- 2.6%	+/- 0.4%
22.40	158	+/- 1.8%	+/- 0.3%
26.10	168	+/- 1.9%	+/- 0.3%
31.30	182	+/- 1.3 %	+/- 0.3%
37.00	196	+/- 1.1%	+/- 0.3%
43.80	211	+/- 1.6%	+/- 0.2%
54.60	230	+/- 0.7%	+/- 0.2%

Tableau 2. Résultats expérimentaux pour le Venturi n°2 (*débits mesurés par emportage).

V MODELISATION 3D : APPROCHE NUMÉRIQUE

V.1 Présentation du modèle

Les écoulements ont été simulés en utilisant le code de calcul Fluent, déjà utilisé avec succès pour un grand nombre d'écoulements à surface libre, notamment pour les déversoirs d'eau excédentaire [2, 3, 4, 5, 6]. Ce code de calcul commercial résout les équations tridimensionnelles de Reynolds au moyen d'une approche de type volumes finis. Le modèle diphasique *volume of fluid* a été choisi, les deux phases du modèle étant l'eau et l'air. Concernant la turbulence, le modèle $k-\varepsilon$ standard a été utilisé. Les conditions limites imposées sont des murs pour les parois des canaux (avec des lois de paroi standard), la pression atmosphérique pour la section aval du canal (chute d'eau) ainsi que pour le toit du domaine (contact avec l'atmosphère), et une distribution uniforme de vitesse en entrée du chenal d'approche (injection d'eau sur la partie inférieure, injection d'air sur la partie supérieure). Le schéma de discrétisation de la pression de type *body-force-weighted* ainsi que l'algorithme de résolution *SIMPLE* ont été utilisés. Un schéma amont du second ordre a été choisi pour la discrétisation spatiale. Précisons que le modèle numérique ainsi défini est un modèle déterministe ne présentant aucun coefficient de calage.

V.2 Définition de la surface libre

Lorsque le modèle *volume of fluid* est utilisé, la surface libre est définie en post-traitement comme la surface pour laquelle les fractions volumiques en eau et en air sont égales à 0.5. Les hauteurs jaugées rapportées dans la partie expérimentale ont été déterminées dans le plan de symétrie longitudinal à la même distance en amont de la contraction que celle indiquée dans la documentation des canaux jaugés. Un exemple de résultat de surface libre est illustré sur la Figure 1.

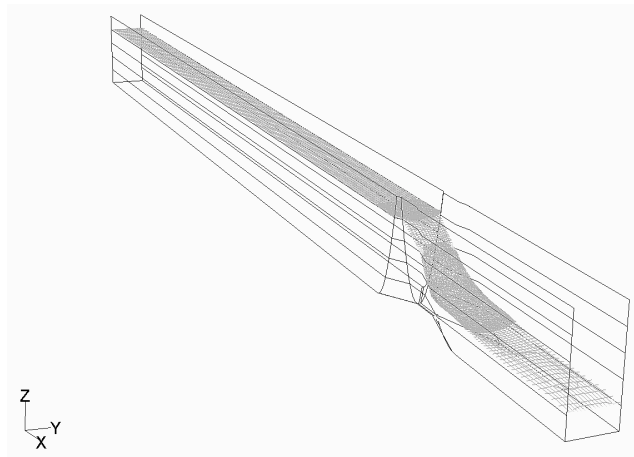


Figure 1. Exemple de surface libre simulée par modélisation numérique.

V.3 Maillage et vérification du modèle

En simulation numérique, le maillage doit être suffisamment fin pour que le résultat obtenu soit indépendant de la taille des mailles. Cependant, afin d'éviter un temps de calcul prohibitif, on cherche à limiter le nombre de mailles. En pratique, on accepte une petite erreur numérique qu'il faut être capable d'évaluer.

Dans cette étude, nous avons utilisé deux maillages pour le premier canal modélisé, à savoir le Venturi n°1 : un maillage grossier (47 984 cellules) et un maillage fin (325 939 cellules). La comparaison des résultats obtenus pour chacun de ces deux maillages nous a permis d'estimer la solution exacte par extrapolation de Richardson [7], l'ordre de précision du schéma numérique étant égal à 2. L'erreur calculée entre les résultats obtenus pour chacun des deux maillages et la solution extrapolée est un indicateur de l'erreur numérique. Cette démarche est illustrée dans le Tableau 3.

Q (m ³ /h)	h (m)			Erreur relative sur h (valeur absolue)	
	Grossier	Fin	Solution exacte estimée	Grossier	Fin
0.27	0.0160	0.0160	0.0160	0.0%	0.0%
0.91	0.0384	0.0379	0.0377	1.8%	0.4%
2.05	0.0538	0.0553	0.0558	3.6%	0.9%
3.08	0.0672	0.0683	0.0687	2.1%	0.5%
4.61	0.0794	0.0817	0.0825	3.7%	0.9%
6.92	0.0980	0.0985	0.0987	0.7%	0.2%
10.38	0.1165	0.1164	0.1164	0.1%	0.0%
15.57	0.1378	0.1381	0.1382	0.3%	0.1%
23.35	0.1633	0.1625	0.1622	0.7%	0.2%

Tableau 3. Analyse de sensibilité au maillage pour le Venturi n°1

Nous pouvons ainsi constater que l'erreur numérique effectuée en utilisant le maillage fin est au maximum de 0.9% ; elle monte jusqu'à 3.7% en utilisant le maillage grossier. Le temps de calcul pour le maillage fin étant important (plusieurs jours sur un ordinateur de bureau standard) et compte tenu du nombre de simulations à effectuer (plusieurs débits pour chacun des sept venturis), nous avons choisi de construire les maillages des canaux n°2 à 7 sur la base du maillage grossier construit pour le Venturi n°1. Plus précisément, nous avons conservé le nombre de cellules dans chacune des directions ; le nombre de mailles augmente néanmoins des canaux les plus petits aux plus grands du fait de l'utilisation de cellules tétraédriques dans les parties convergente et divergente des canaux. Le nombre de cellules des différents maillages est présenté dans le Tableau 4. Sur base du Tableau 3, on estime que l'erreur numérique commise en procédant ainsi est, pour l'ensemble des simulations, inférieure à 5%.

Venturi n°	1	2	3	4	5	6	7
Maillage grossier	47 984	62 049	62 559	83 648	101 559	103 892	102 208
Maillage fin	325 939	-	-	-	-	-	-

Tableau 4. Nombres de cellules pour les maillages des canaux Venturi n°1 à 7

V.4 Critère de convergence

La convergence d'un calcul est atteinte lorsque les résidus de toutes les équations sont faibles et qu'ils n'évoluent plus. En pratique, nous avons vérifié que la distribution de la hauteur d'eau évoluait de moins de 10^{-4} m en faisant 5 000 itérations supplémentaires.

VI RÉSULTATS

VI.1 Validation de la modélisation numérique

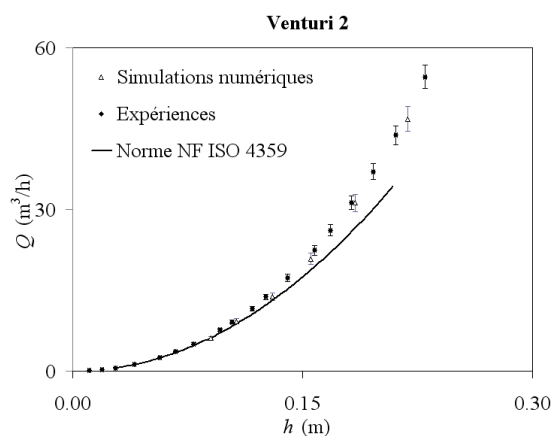


Figure 2. Comparaison entre les mesures expérimentales, les simulations numériques et la norme NF ISO 4359 pour le Venturi n°2.

Les expériences effectuées sur le Venturi n°2 ont été utilisées pour tester la pertinence de la modélisation numérique 3D à simuler l'écoulement dans les canaux jaugeurs à section exponentielle. La comparaison expérimental/numérique est illustrée sur la Figure 2 où nous pouvons constater que les résultats numériques sont en accord avec les résultats expérimentaux : les barres d'erreurs expérimentale et numérique sont en effet très largement superposées. Compte tenu de cette comparaison effectuée pour le Venturi 2, nous pouvons conclure que le modèle 3D est validé. Celui-ci peut donc être considéré comme la référence pour les canaux Venturi n°1, 3, 4, 5, 6 et 7.

Sur la Figure 2, nous constatons par ailleurs que la norme NF ISO 4359 est valide pour les hauteurs d'eau inférieures à 0.10 m.

VI.2 Application de la modélisation numérique

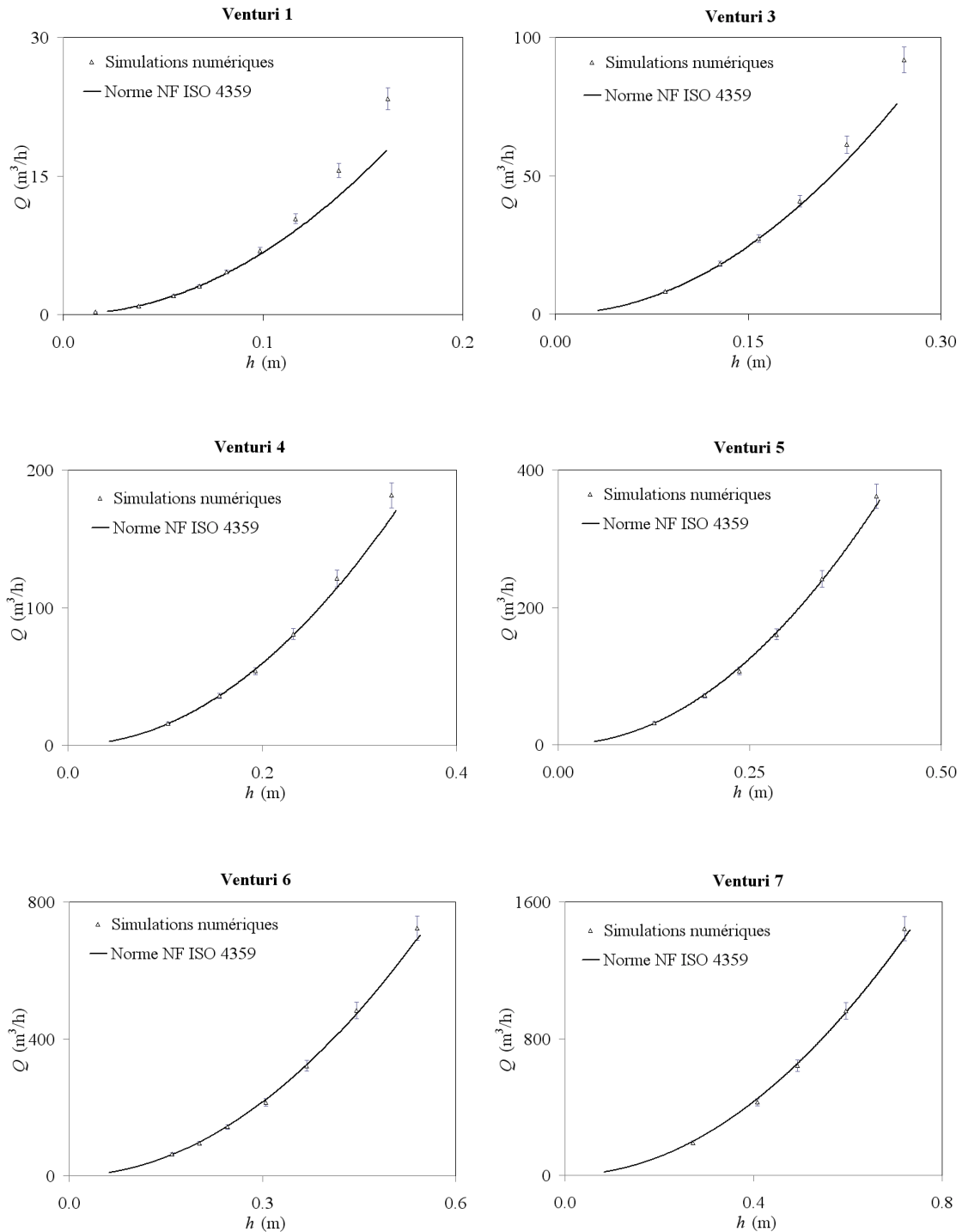


Figure 3. Comparaison entre les simulations numériques et la norme NF ISO 4359 pour les canaux Venturi n°1, 3, 4, 5, 6 et 7.

La comparaison des résultats du modèle numérique à ceux obtenus en application de la norme NF ISO 4359 montre que la loi hauteur-débit déterminée selon la norme est valide jusqu'à une certaine hauteur jaugée pour les canaux n°1 à 4 et juste pour l'ensemble de la gamme de hauteurs testées pour les canaux 5 à 7. Les domaines de validité des résultats issus de l'application de la norme NF ISO 4359 sont donnés dans le Tableau 5.

Venturi n°	Domaine de validité de la loi établie selon la norme NF ISO 4359	Condition h/L
1	$h \leq 0.100$ m	$h/L \leq 1.7$
2	$h \leq 0.130$ m	$h/L \leq 1.4$
3	$h \leq 0.190$ m	$h/L \leq 1.4$
4	$h \leq 0.280$ m	$h/L \leq 1.3$
5	Valable jusqu'au moins $h = 0.42$ m	Valable jusqu'au moins $h/L = 1.2$
6	Valable jusqu'au moins $h = 0.54$ m	Valable jusqu'au moins $h/L = 1.3$
7	Valable jusqu'au moins $h = 0.72$ m	Valable jusqu'au moins $h/L = 1.2$

Tableau 5. Domaine de validité des lois établies selon la norme NF ISO 4359.

La troisième colonne indique le domaine de validité adimensionné par la hauteur d'eau. Ceci permet de se rendre compte qu'alors que la norme NF ISO 4359 limite le rapport h/L à 0.50, l'analyse des résultats de la présente étude permet d'étendre le domaine d'application de la norme jusqu'à une valeur de h/L au moins égale à 1.2, davantage pour certains canaux.

VII CONCLUSIONS

Sept canaux jaugeurs Venturi à section exponentielle ont été testés selon une triple approche : théorique avec la norme NF ISO 4359, expérimentale avec des essais en laboratoire et numérique avec des modélisations 3D. L'objectif était de confronter la norme NF ISO 4359 à une large gamme de canaux Venturi à section exponentielle pour lesquels elle n'était *a priori* pas valable en raison de la forme et des dimensions du col.

La comparaison entre les mesures expérimentales effectuées sur le Venturi n°2 et les résultats de simulation numérique 3D ont permis de conclure à la validation du modèle numérique. Celui-ci a donc servi de référence pour tester l'applicabilité de la norme NF ISO 4359 sur les six autres canaux.

Voici les conclusions de à cette étude :

- La loi hauteur-débit des canaux jaugeurs Venturi à section exponentielle peut être déterminée en utilisant la démarche théorique proposée par la norme NF ISO 4359.
- La limitation proposée dans la norme NF ISO 4359 sur la largeur de col n'est pas à prendre en compte, au moins jusqu'à des dimensions correspondant au Venturi n°1 qui est le canal jaugeur le plus étroit testé dans cette étude.
- La limitation du rapport h/L de la hauteur d'eau sur la longueur de col proposée à 0.5 dans la norme NF ISO 4359 peut être étendue jusqu'à au moins 1.2.

VIII REFERENCES ET CITATIONS

- [1] AFNOR (1986). - *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*. Association française de normalisation, **X10-313**.
- [2] Lipeme Kouyi, G. (2004). - *Expérimentations et modélisations tridimensionnelles de l'hydrodynamique et de la séparation particulaire dans les déversoirs d'orage*. Thèse de doctorat, Université de Strasbourg.
- [3] Lipeme Kouyi, G., Vazquez, J., Gallin, Y., Rollet, D & Sadowski, A.-G. (2005). - Use of 3D modelling and several ultrasound sensors to assess overflow rate. *Water Science and Technology*, **51**, 187-194.
- [4] Lipeme Kouyi, G., Vazquez, J. & Poulet, J.-B. (2005). - Méthodologie d'utilisation de la modélisation 3D des déversoirs d'orage dans le cadre de l'autosurveillance. *La Houille Blanche*, **6**, 59-67.
- [5] Vazquez, J., Zug, M., Buyer, M. & Lipeme Kouyi, G. (2005). - CSOs: tools for assessing their operation in our systems. *Water Science and Technology*, **51**, 179-185.
- [6] Vazquez, J., Lipeme Kouyi, G. & Zug, M. (2006). - Modelling and instrumentation of the storm overflows of the combined sewer system of Sélestat. *Urban Water Journal*, **3**, 91-110.
- [7] Roache, P.J. (1994). - Perspective: a method for uniform reporting of grid refinement studies. *Journal of Fluids Engineering*, **116**, 405-413.