



**Ecole nationale du
génie de l'eau et de
l'environnement de
Strasbourg**
1 quai Koch BP 1039F
67070 Strasbourg



**Institut de
mécanique des
fluides et des
solides de
Strasbourg**
2 rue Boussingault
67000 Strasbourg



ISMA
Rue Hector Malot
57600 Forbach

Etude hydraulique des venturis à section exponentielle ISMA



Auteurs :
Matthieu DUFRESNE
José VAZQUEZ
Martin FISCHER

Sommaire

I.	Erratum	4
II.	But et méthodologie de l'étude.....	5
II.A.	<i>Objectif</i>	5
II.B.	<i>Méthodologie</i>	5
III.	Lois ISMA	5
IV.	Expérimentation	6
IV.A.	<i>Mesure des géométries des moules</i>	6
IV.B.	<i>Banc hydraulique</i>	7
IV.C.	Résultats expérimentaux.....	10
V.	Application de la norme NF ISO 4359	10
V.A.	<i>Calcul du débit selon la norme NF ISO 4359</i>	10
V.B.	<i>Limitations de la norme NF ISO 4359</i>	13
V.B.1.	<i>Limitations sur la hauteur d'eau</i>	13
V.B.2.	<i>Autres limitations</i>	13
V.C.	Relations hauteur/débit selon la norme NF ISO 4359 pour les venturis ISMA.....	13
VI.	Modélisation 3D de l'écoulement	14
VI.A.	<i>Présentation du modèle</i>	14
VI.B.	<i>Définition de la surface libre</i>	15
VI.C.	<i>Maillage et vérification du modèle</i>	16
VI.D.	<i>Critère de convergence</i>	18
VII.	Analyse des résultats	18
VII.A.	<i>Remarque préliminaire</i>	18

VII.B. Validation du modèle numérique 3D pour le venturi 2	19
VII.C. Méthodologie d'application du modèle 3D	19
VII.D. Confrontation des résultats de la norme NF ISO 4359 aux résultats numériques.....	23
VII.E. Extension des lois ISMA aux petits débits	24
VIII. Conclusion	24
IX. Référence	29

I. Erratum

La version de ce rapport datée du 11/03/2010 présente une erreur. Dans le tableau 11, la formule $Q = -0.3311xh + 735.1xh^2 - 80.7xh^3 + 6210xh^4$ est fautive (erreur de signe sur le troisième coefficient) ; elle doit être remplacée par la formule suivante : $Q = -0.3311xh + 735.1xh^2 + 80.7xh^3 + 6210xh^4$.

La formulation correcte est donnée dans le tableau 11 de ce rapport.

II. But et méthodologie de l'étude

II.A. Objectif

La société ISMA souhaite entreprendre une démarche scientifique visant à caractériser le comportement hydraulique de leurs venturis à section exponentielle. Bien que cette forme de venturi ne soit pas prévue par la norme NF ISO 4359, le but est de s'inscrire dans la même démarche scientifique et de montrer l'intérêt d'un tel dispositif de mesure par rapport aux canaux venturis normés.

Sept venturis font l'objet de cette étude : ISMA 1 à 7. La société ISMA dispose des lois hauteur/débit pour l'ensemble de ses venturis ; elle nous demande de les confronter à la norme NF ISO 4359, de les mettre à jour et de les étendre à de plus faibles hauteurs d'eau.

II.B. Méthodologie

La première étape de cette étude sera une phase d'expérimentations. Dans un premier temps, nous mesurerons l'ensemble des géométries des venturis afin de disposer d'une description précise de l'ensemble des géométries, indispensable à la suite de l'étude. Dans un second temps, nous effectuerons une campagne de mesures sur le venturi ISMA 2.

La deuxième étape sera l'étude complète de la norme NF ISO 4359 et son application aux sept canaux jaugeurs ISMA à section exponentielle.

La troisième étape sera une phase de modélisation numérique 3D des sept venturis ISMA. Les données expérimentales collectées sur le venturi ISMA 2 seront utilisés comme support de validation du modèle numérique 3D. Si le modèle est validé, nous l'utiliserons pour caractériser les lois hauteur/débit des venturis ISMA 1, 3, 4, 5, 6 et 7.

La quatrième étape sera une phase d'analyse des résultats.

Enfin, nous conclurons au sujet des lois hauteur/débit pour l'intégralité de la gamme des canaux jaugeurs à section exponentielle. Nous proposerons alors de nouvelles lois hauteur/débit valides sur une plage étendue de hauteurs d'eau.

III. Lois ISMA

Les lois hauteur/débit que nous allons tester sont les « lois ISMA » présentées dans la documentation ISMA et rappelées dans le *Tableau 1*. La validité de ces lois est limitée par une hauteur d'eau minimale et une hauteur d'eau maximale ; la société ISMA souhaite étendre cette plage vers le bas.

Venturi n°	Plage de hauteurs d'eau	Loi ISMA (Q en m ³ /h et h en m)
1	22 mm ≤ h ≤ 162 mm	Q = 1434.42xh ^{2.3}
2	29 mm ≤ h ≤ 209 mm	Q = 1590.732xh ^{2.3}
3	33 mm ≤ h ≤ 266 mm	Q = 1669.032xh ^{2.2}
4	42 mm ≤ h ≤ 338 mm	Q = 1959.084xh ^{2.2}
5	47 mm ≤ h ≤ 420 mm	Q = 2226.636xh ^{2.1}
6	61 mm ≤ h ≤ 545 mm	Q = 2582.136xh ^{2.1}
7*	82 mm ≤ h ≤ 732 mm	Q = 2777.472xh ^{2.1}

Tableau 1. Lois hauteur/débit ISMA pour les sept venturis (*La loi du venturi 7 présentée dans la documentation est erronée ; la formule présentée ici a été corrigée par rapport aux résultats du tableau de colonnes d'eau)

IV. Expérimentation

IV.A. Mesure des géométries des moules

Les cols des moules des venturis ISMA 1 à 7 ont été mesurés au moyen d'un portique afin de caractériser finement leurs géométries ; le dispositif est illustré sur la Figure 1. Le Tableau 2 rapporte les résultats principaux.

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 l'équation ci-dessous, s'est révélée être la plus pertinente.

$$y = az^b$$

Ici, y est la composante verticale ; z, la composante horizontale (demi-largeur).

Cette mesure précise peut également constituer une information utile à la société ISMA si elle souhaite construire un gabarit de vérification de la géométrie du col de ses venturis. Ce type de gabarit pourrait par ailleurs être intéressant pour vérifier – par un simple test géométrique – la loi hauteur/débit une fois le venturi installé *in situ*.



Figure 1. Mesure des géométries des sept moules des venturis ISMA

Le *Tableau 2* présente les principales mesures pour les moules des sept venturis ISMA ; 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%.

Venturi ISMA 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
Chenal d'approche (donnée ISMA)	B (cm)	9.0	13.0	19.0	28.0	42.0	55.0	73.0

Tableau 2. Dimensions des sept venturis ISMA (a et b sont tels que y et z sont exprimés en cm)

IV.B. Banc hydraulique

Nous avons utilisé le banc d'essai expérimental dont nous disposons au lycée agricole d'Obernai pour déterminer les courbes de fonctionnement du venturi ISMA 2. La figure suivante schématise le dispositif.

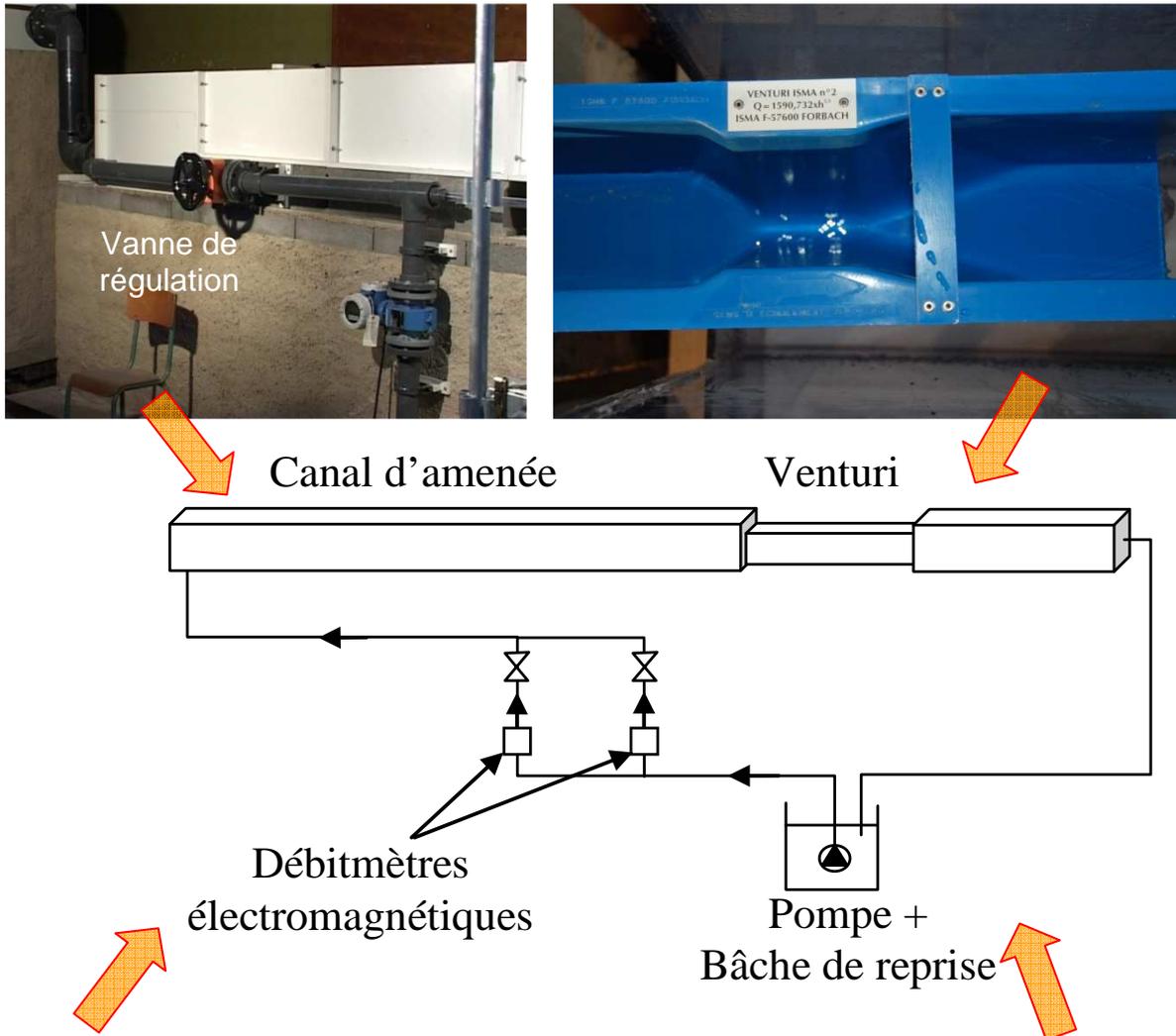


Figure 2. Schéma et photographies du banc hydraulique

Afin de garantir un fonctionnement du venturi en régime dénoyé (écoulement « modulaire » selon la norme NF ISO 4359), l'aval est installé en chute d'eau.

Deux débitmètres électromagnétiques en parallèle ont été utilisés pour mesurer le débit. Les caractéristiques de chaque capteur sont décrites ci-dessous.

Promag 50W80
 Numéro de série 2A013491000
 N° certification calibration 91002357
 Qmin (m³/h) 5.4
 Qmax (m³/h) 180



Figure 3. Débitmètre pour la gamme 5.4 – 180 m³/h

Promag 50W25
 Numéro de série 31007291000
 N° certification calibration 91002356
 Qmin (m³/h) 0.54
 Qmax (m³/h) 18



Figure 4. Débitmètre pour la gamme 0.54 – 18 m³/h

Pour les débits inférieurs à 0.54 m³/h, il a été procédé par empotage (mesure du volume évacué dans un laps de temps).

La mesure de hauteur d'eau s'est faite au niveau du point de mesure préconisé dans la documentation ISMA au moyen d'une règle (voir le *Tableau 3*).

Venturi ISMA n°	2
Position du point de mesure / entrée contraction (m)	0.700

Tableau 3. Position du point de mesure de la hauteur jaugée pour le venturi testé

IV.C. Résultats expérimentaux

Les lois expérimentales hauteur/débit pour le venturi testé sont présentées dans les tableaux ci-dessous.

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 4. Résultats expérimentaux pour le venturi ISMA 2

* Débit mesuré par empotage (hors plage du débitmètre)

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.

V. Application de la norme NF ISO 4359

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. Si les canaux 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.

V.A. Calcul du débit selon la norme NF ISO 4359

Une méthode de calcul de la relation hauteur/débit est présentée dans le §11.5 de la norme NF ISO 4359.

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 permet de calculer w_c , largeur au miroir, et A_c , section mouillée, au niveau du passage par la profondeur critique. Pour les 7 venturis ISMA, la loi $w = f(d)$ est de la forme :

$$w = 2ad^b$$

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

D'où :

$$w_c = 2ad_c^b$$
$$A_c = \frac{2a}{b+1} h^{b+1}$$

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

$$H_e = d_c + \frac{A_c}{2w_c}$$

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

$$H_{\text{correction}} = \frac{P_c}{w_c} \times \frac{\delta}{L} \times L$$

Dans l'équation précédente, 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 (*Figure 5* reproduite ci-dessous). 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.

$$Re = \frac{QL}{\nu A_c}$$

avec :

- ✓ L : longueur du col (m)
- ✓ ν : viscosité cinématique de l'eau (m^2/s).

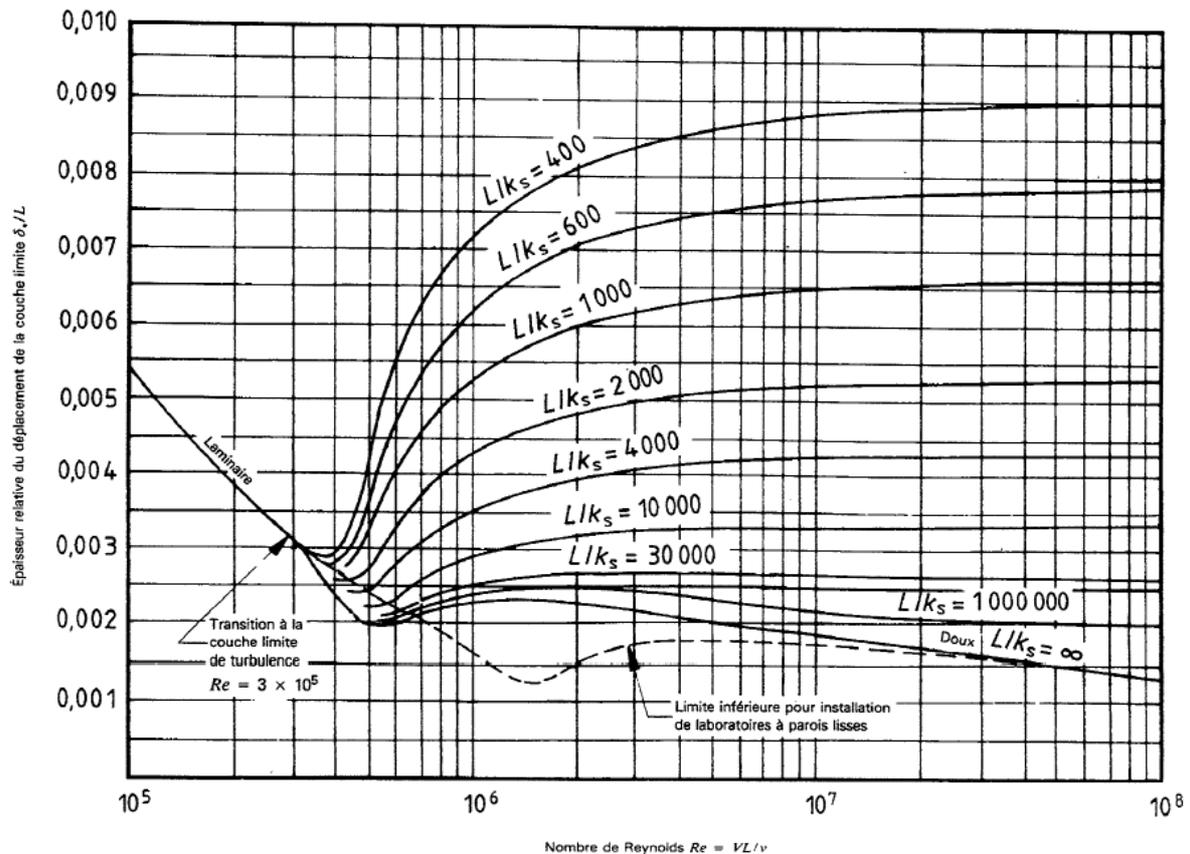


Figure 5. Epaisseur relative du déplacement de la couche limite δ/L en fonction du nombre de Reynolds Re (d'après la norme ISO 4359).

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 :

$$H = H_e + H_{\text{correction}}$$

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

$$H = h + \frac{Q^2}{2gA_a^2}$$

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 :

$$A_a = Bh$$

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

V.B. Limitations de la norme NF ISO 4359

V.B.1. Limitations sur la hauteur d'eau

La norme NF ISO 4359 précise plusieurs limites d'application. Ainsi, la limite inférieure recommandée pour la hauteur d'eau, h , est de 50 mm.

De plus, 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, écrite en termes de hauteur d'eau dans le *Tableau 5*, est très souvent non respectée du fait de la petite longueur des cols des canaux jaugeurs ISMA.

Venturi n°	L (mm)	$h/L \leq 0.50$	$h_{\max}/L \leq 0.67$
1	60	$h \leq 30$ mm	$h_{\max} \leq 40$ mm
2	90	$h \leq 45$ mm	$h_{\max} \leq 60$ mm
3	140	$h \leq 70$ mm	$h_{\max} \leq 94$ mm
4	215	$h \leq 108$ mm	$h_{\max} \leq 144$ mm
5	340	$h \leq 170$ mm	$h_{\max} \leq 228$ mm
6	430	$h \leq 215$ mm	$h_{\max} \leq 288$ mm
7	600	$h \leq 300$ mm	$h_{\max} \leq 402$ mm

Tableau 5. Limites de hauteur d'eau pour maintenir un écoulement parallèle dans la section critique du col (norme NF ISO 4359)

Précisons que ceci n'est pas un problème en soi : un venturi ne respectant pas la norme NF ISO 4359 peut mesurer tout à fait précisément le débit si on dispose de sa courbe d'étalonnage hauteur/débit.

V.B.2. Autres limitations

La norme précise par ailleurs un certain de limitations dues à un « manque de données expérimentales sûres ». Parmi celles-ci, la largeur du col doit être supérieure à 0.10 m. Cette limitation étant uniquement liée à un manque de données, le fait que les venturis ISMA 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 levé par expérimentation ou encore par simulation numérique.

V.C. Relations hauteur/débit selon la norme NF ISO 4359 pour les venturis ISMA

Comme décrit précédemment, la prise en compte de l'épaisseur de déplacement de la couche limite nécessite la détermination du paramètre adimensionnel δ/L au moyen de la *Figure 5* ; pour cela, le nombre de Reynolds tel que défini plus haut est nécessaire. La petite taille de certains des venturis ISMA fait que ce nombre est hors de la plage de la *Figure 5* pour une partie des hauteurs pour les canaux jaugeurs n°3 et 4 (voir le *Tableau 6*).

Venturi n°	Plage h de validité de la norme	Plage $Re = \frac{QL}{vA_c}$
1	-	-
2	-	-
3	$50 \text{ mm} \leq h \leq 70 \text{ mm}$	$6.2 \times 10^4 (< 10^5) \leq Re \leq 7.4 \times 10^4 (< 10^5)$
4	$50 \text{ mm} \leq h \leq 108 \text{ mm}$	$9.5 \times 10^4 (< 10^5) \leq Re \leq 1.4 \times 10^5$
5	$50 \text{ mm} \leq h \leq 170 \text{ mm}$	$1.5 \times 10^5 \leq Re \leq 2.8 \times 10^5$
6	$50 \text{ mm} \leq h \leq 215 \text{ mm}$	$1.9 \times 10^5 \leq Re \leq 4.0 \times 10^5$
7	$50 \text{ mm} \leq h \leq 300 \text{ mm}$	$2.6 \times 10^5 \leq Re \leq 6.5 \times 10^5$

Tableau 6. Gamme de nombre de Reynolds pour les canaux jaugeurs n°1 à 7

Pour les venturis 5, 6 et 7, la valeur de 0.003, recommandée par défaut par la norme NF ISO 4359 pour le paramètre δ/L , est tout à fait pertinente. Pour les venturis plus petits, plutôt que de chercher à extrapoler les valeurs de ce paramètre alors que les conditions physiques nécessaires à l'application de la norme ne sont pas nécessairement respectées, nous avons considéré une valeur constante et égale ici aussi à 0.003. L'erreur commise en procédant ainsi est estimée entre 2% et 3% pour les venturis n°3 et 4¹.

Le Tableau 7 donne des régressions calées sur les résultats obtenus en application de la norme NF ISO 4359 **dans son domaine de validité** pour les venturis ISMA 3 à 7.

Venturi n°	Domaine de validité de la norme	Relation hauteur/débit (Q en m ³ /h et h en m)
1	-	-
2	-	-
3	$50 \text{ mm} \leq h \leq 70 \text{ mm}$	$Q = 1096.5xh^{2.00}$
4	$50 \text{ mm} \leq h \leq 108 \text{ mm}$	$Q = 1506.4xh^{2.01}$
5	$50 \text{ mm} \leq h \leq 170 \text{ mm}$	$Q = 1981.1xh^{2.00}$
6	$50 \text{ mm} \leq h \leq 215 \text{ mm}$	$Q = 2310.1xh^{1.97}$
7	$50 \text{ mm} \leq h \leq 300 \text{ mm}$	$Q = 2655.5xh^{1.99}$

Tableau 7. Relations hauteur/débit selon la norme NF ISO 4359

VI. Modélisation 3D de l'écoulement

L'objectif de cette partie est de décrire la modélisation 3D de l'écoulement dans les canaux jaugeurs.

VI.A. Présentation du modèle

L'écoulement a été simulé en utilisant le code de calcul Fluent. Celui-ci 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

¹ Ces valeurs sont les erreurs obtenues en considérant pour δ/L les valeurs 0.006 (valeur extrapolée hors diagramme) et 0.003 (valeur utilisée dans cette étude) pour le venturi 3 ; les valeurs 0.0054 (valeur valable pour un nombre de Reynolds égal à 10^5) et 0.003 pour le venturi 4.

modèle étant l'eau et l'air. Concernant la turbulence, le modèle $k-\varepsilon$ standard a été utilisé. Les conditions limites imposées, illustrées sur la *Figure 6*, sont des murs pour les parois des venturis (avec des lois de paroi standard), la pression atmosphérique pour la section aval du canal ainsi que pour le toit du domaine, 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 3D ainsi défini est un modèle déterministe ne présentant aucun coefficient de calage.

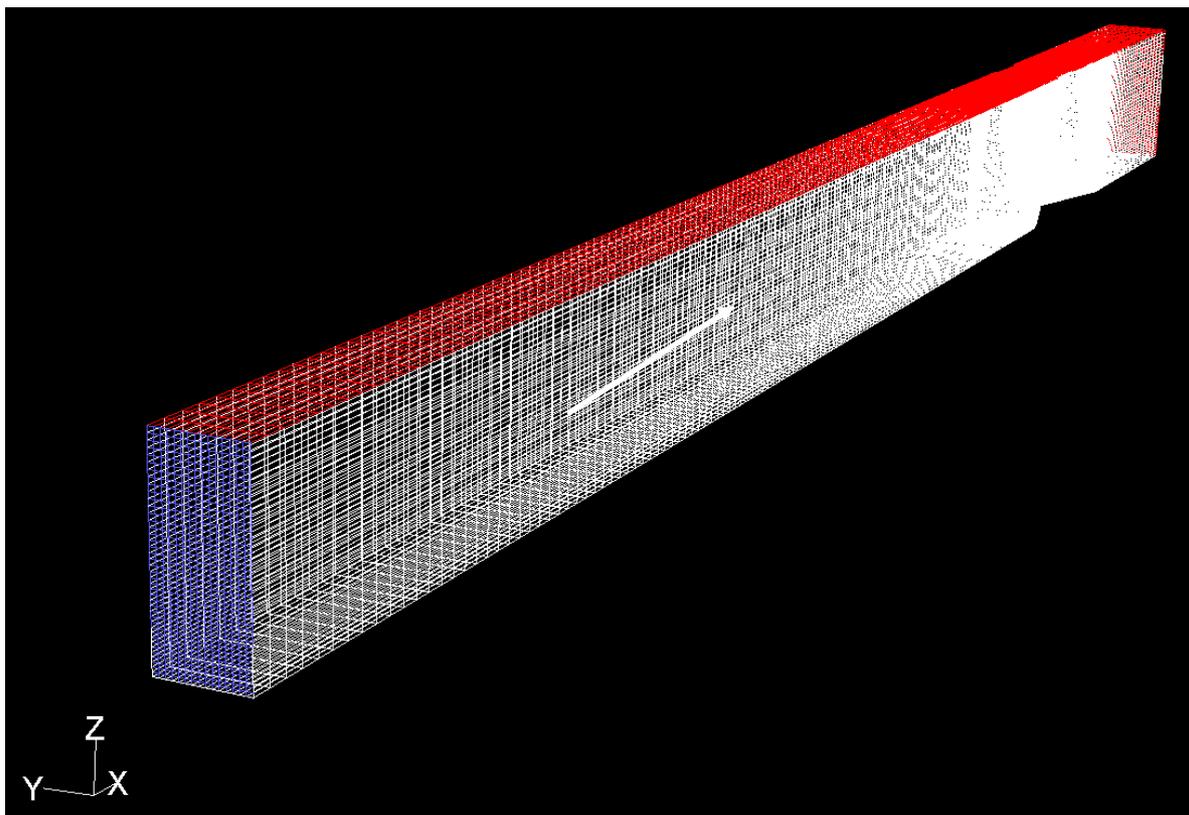


Figure 6. Maillage et conditions limites pour le venturi ISMA 1 (blanc : mur ; bleu : vitesse uniforme ; rouge : pression atmosphérique)

VI.B. 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. Un exemple est donné sur la *Figure 7*. 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 ISMA.

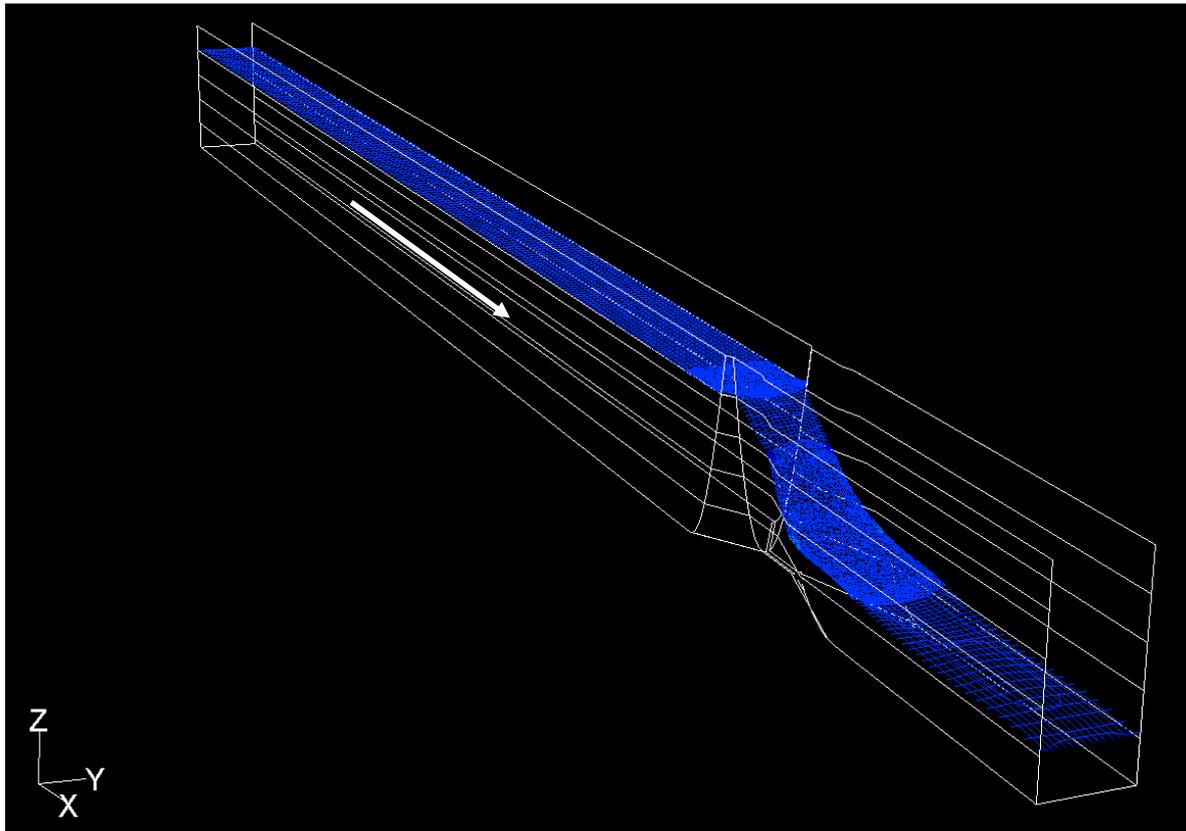


Figure 7. Exemple de surface libre dans le canal jaugeur ISMA 1

VI.C. 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.

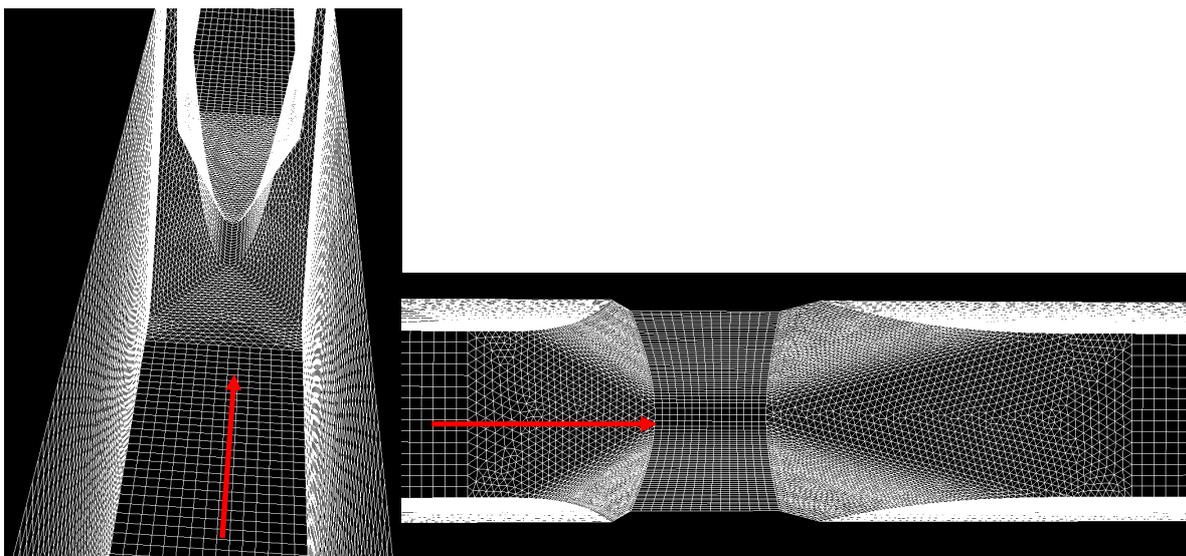


Figure 8. Vue depuis l'amont et vue de dessus du maillage fin du venturi ISMA 1

Dans cette étude, nous avons utilisé deux maillages pour le venturi ISMA 1 : un maillage « grossier » (47 984 cellules) et un maillage « fin » (325 939 cellules, voir la *Figure 8*). La comparaison des résultats obtenus pour chacun de ces deux maillages nous a permis d'estimer la solution exacte par extrapolation de Richardson, 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 8*.

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 8. Analyse de sensibilité au maillage pour le venturi ISMA 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 PC 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 venturis ISMA 2 à 7 sur la base du maillage grossier construit pour le venturi ISMA 1. Plus précisément, nous avons conservé le nombre de cellules dans chacune des directions ; le nombre de mailles augmente néanmoins des venturis 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 9*. Sur base du *Tableau 8*, on estime que l'erreur numérique commise en procédant ainsi est, pour l'ensemble des simulations, inférieure à 5%.

Venturi ISMA 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 9. Nombres de cellules pour les maillages des venturis ISMA 1 à 7

VI.D. Critère de convergence

Afin de vérifier la convergence d'un calcul avant d'en extraire les résultats, nous avons vérifié que la distribution de la hauteur d'eau évoluait de moins de 10^{-4} m en faisant 5 000 itérations supplémentaires. Ceci est illustré sur la *Figure 9* où les courbes correspondant à 30 000 itérations et à 35 000 itérations sont confondues (la vérification à 10^{-4} m a été effectuée en zoomant à l'abscisse x de la mesure).

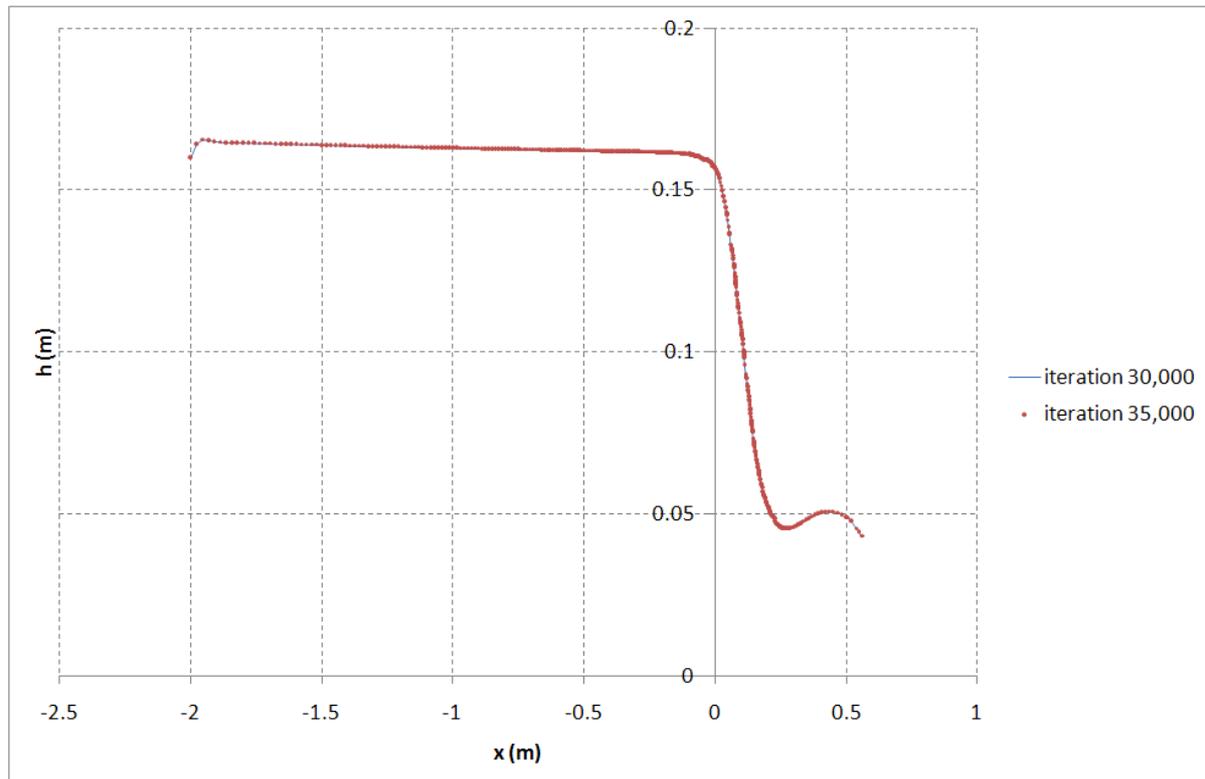


Figure 9. Exemple de distribution de la hauteur d'eau dans le plan de symétrie longitudinal du venturi ISMA 1 après 30 000 (courbe bleue) et 35 000 itérations (points rouges)

VII. Analyse des résultats

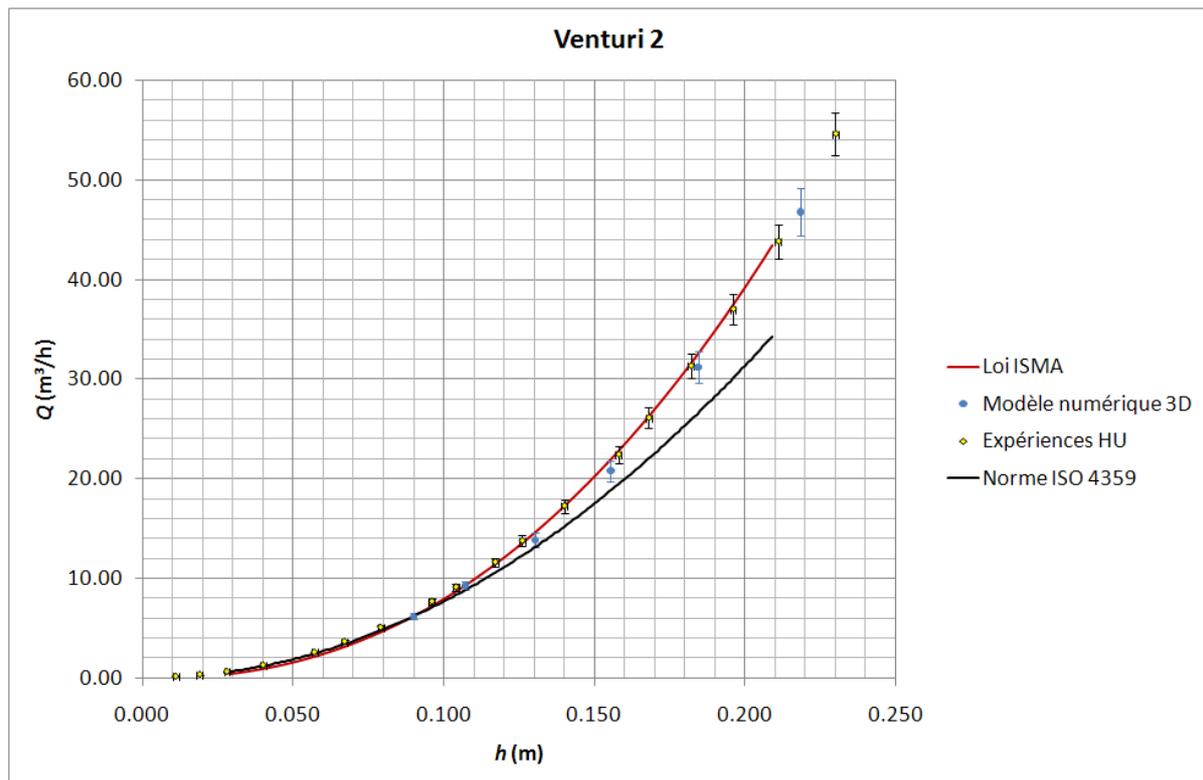
VII.A. Remarque préliminaire

Les barres d'erreur tracées sur les figures de cette partie correspondent à une erreur absolue de 1 mm sur la hauteur d'eau mesurée, une erreur relative de 4% sur le débit mesuré et une erreur relative de 5% sur le débit simulé ; précisons que ces erreurs correspondent aux *maxima* des incertitudes estimées dans les parties précédentes.

Précisons par ailleurs que sur l'ensemble des figures de cette partie, la loi hauteur/débit obtenue selon les équations de la norme NF ISO 4359 a été déterminée même hors de son domaine de validité.

VII.B. Validation du modèle numérique 3D pour le venturi 2

Les expériences effectuées sur le venturi 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 10*. Sur cette figure, 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 la comparaison des résultats expérimentaux et numériques pour le venturi 2, nous pouvons conclure que le modèle 3D est validé. Celui-ci peut donc être considéré comme la référence pour les venturis ISMA 1, 3, 4, 5, 6 et 7.

VII.C. Méthodologie d'application du modèle 3D

Afin de montrer des résultats sous une forme identique pour l'ensemble des sept venturis, la confrontation des lois ISMA et des relations établies selon la norme NF ISO 4359 seront toutes comparées aux résultats numériques. Les résultats sont illustrés de la *Figure 11* à la *Figure 17*.

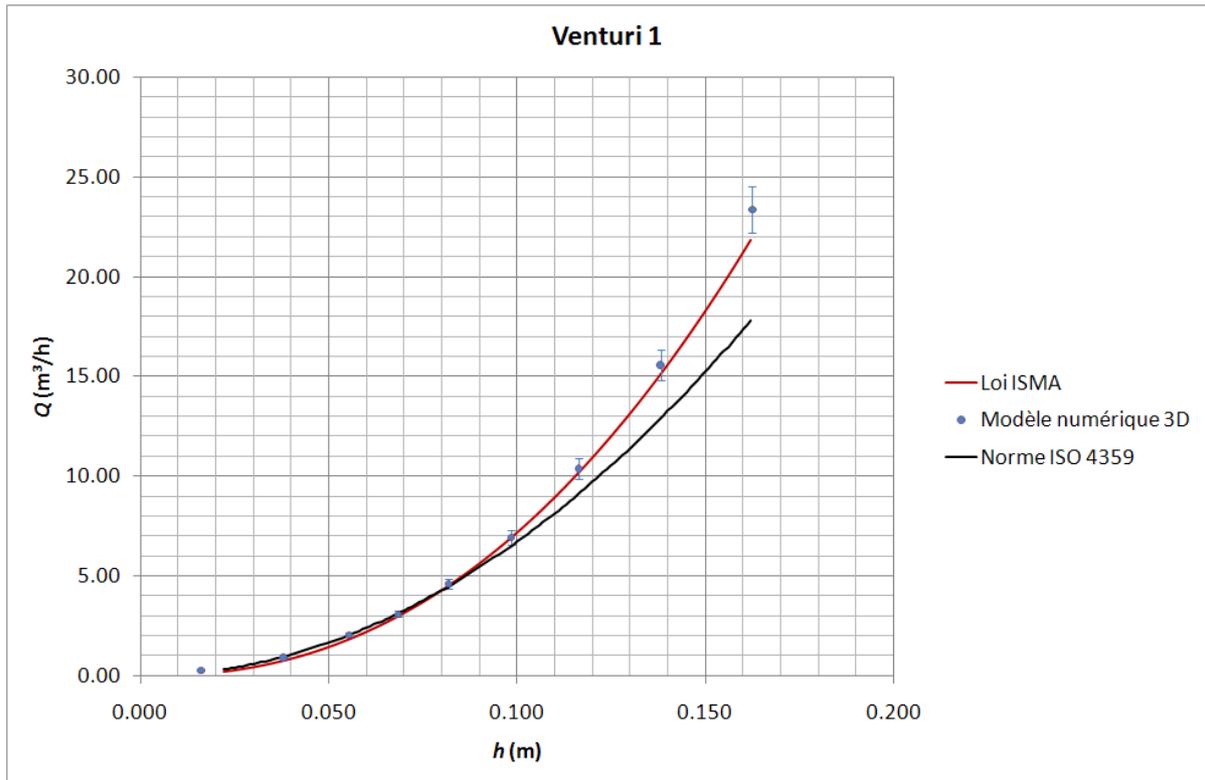


Figure 11. Résultats obtenus pour le venturi ISMA 1

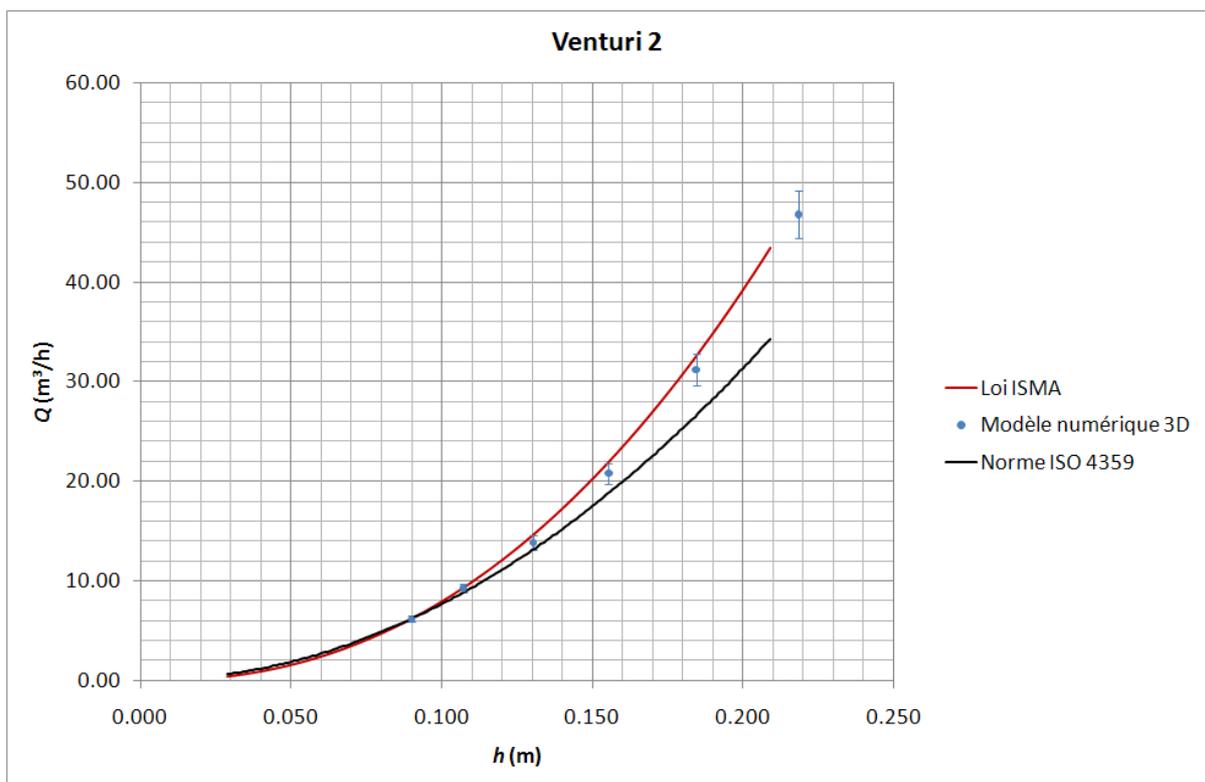


Figure 12. Résultats obtenus pour le venturi ISMA 2

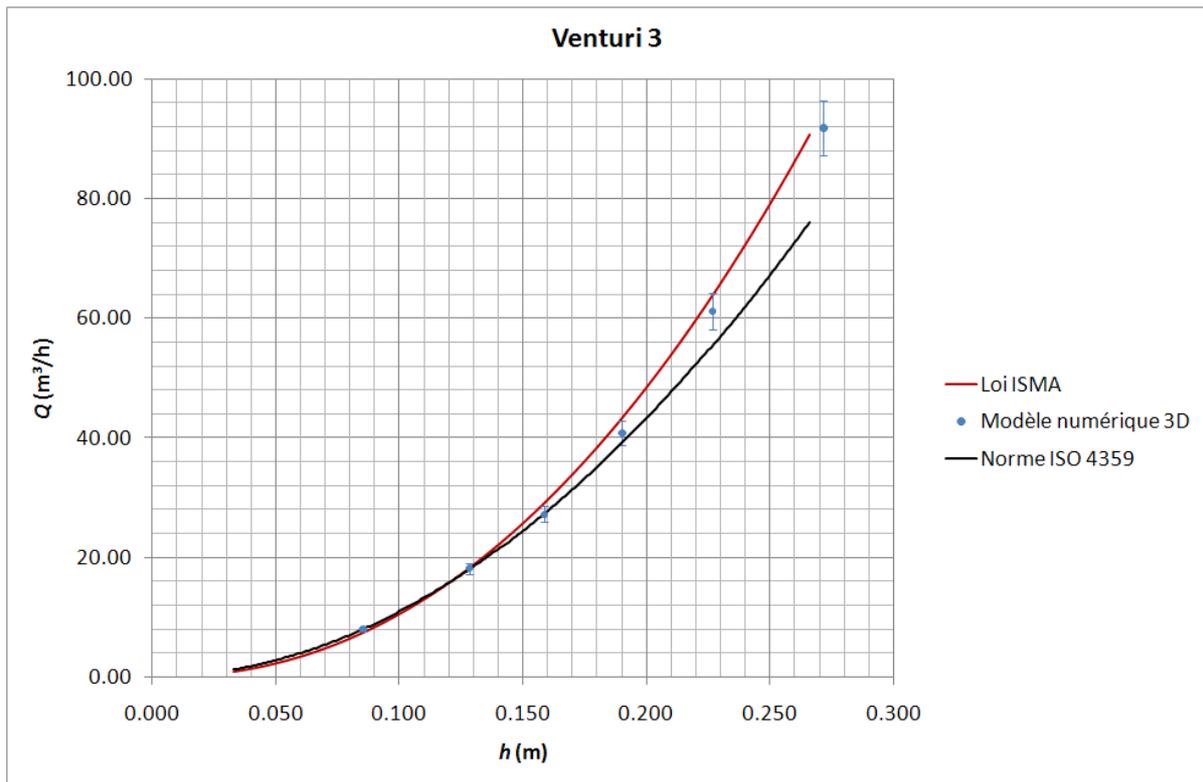


Figure 13. Résultats obtenus pour le venturi ISMA 3

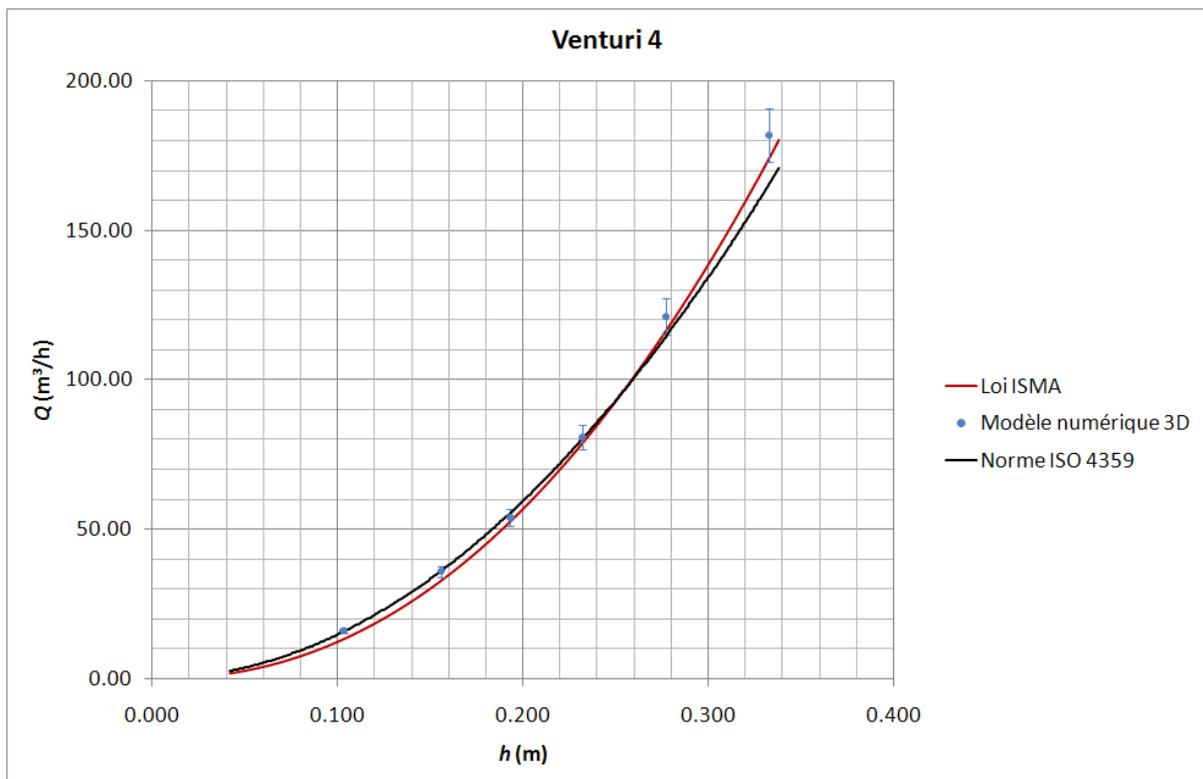


Figure 14. Résultats obtenus pour le venturi ISMA 4

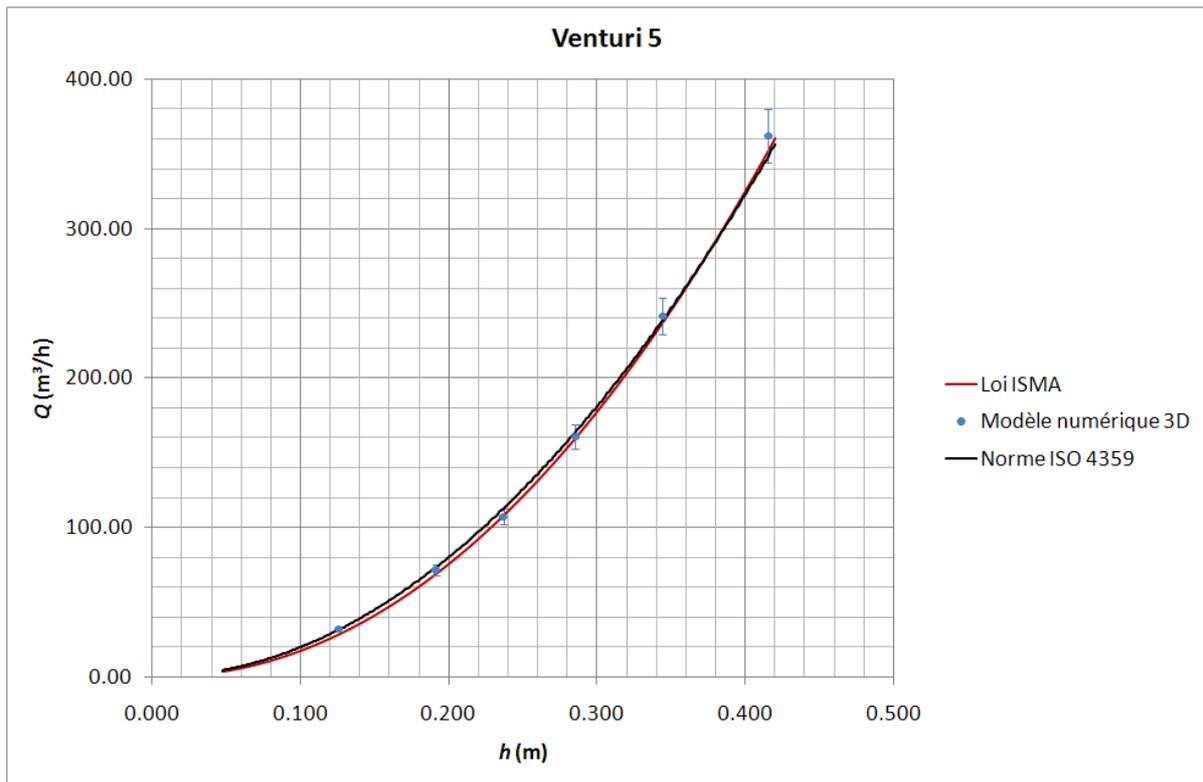


Figure 15. Résultats obtenus pour le venturi ISMA 5

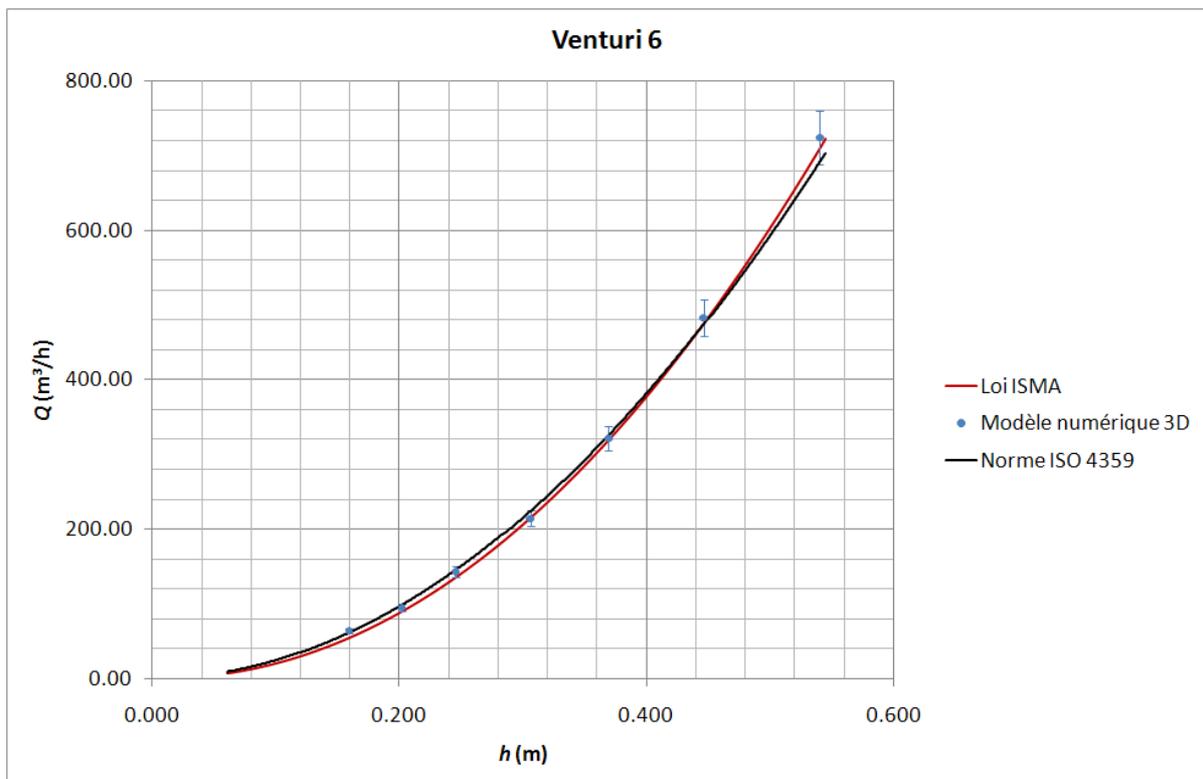


Figure 16. Résultats obtenus pour le venturi ISMA 6

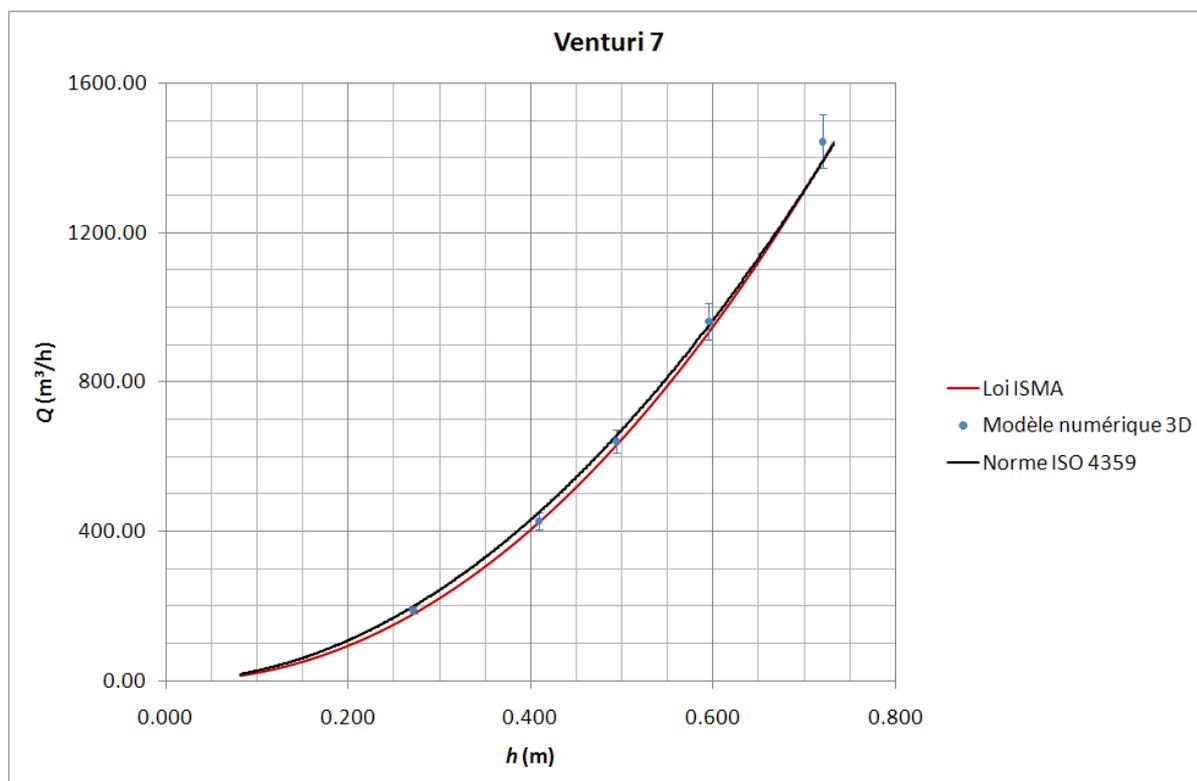


Figure 17. Résultats obtenus pour le venturi ISMA 7

VII.D. Confrontation des résultats de la norme NF ISO 4359 aux résultats numériques

La comparaison des résultats du modèle numérique 3D à ceux obtenus en application de la norme NF ISO 4359 montre que la loi hauteur/débit déterminée selon la norme est juste jusqu'à une certaine hauteur jaugée pour les venturis 1 à 4 et juste pour l'ensemble de la gamme de hauteur pour les venturis 5 à 7. Les domaines de validité des résultats issus de l'application de la norme NF ISO 4359 sont donnés dans le *Tableau 10*.

Venturi n°	Domaine de validité de la loi établie selon la norme NF ISO 4359	Condition h/L
1	$h \leq 0.100 \text{ m}^*$	$h/L \leq 1.7^*$
2	$h \leq 0.130 \text{ m}^*$	$h/L \leq 1.4^*$
3	$h \leq 0.190 \text{ m}^*$	$h/L \leq 1.4^*$
4	$h \leq 0.280 \text{ m}^*$	$h/L \leq 1.3^*$
5	Toujours valable	Toujours valable
6	Toujours valable	Toujours valable
7	Toujours valable	Toujours valable

Tableau 10. Domaine de validité des lois établies selon la norme NF ISO 4359 (*valeurs approximatives)

La troisième colonne indique le domaine de validité adimensionnalisé 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 des valeurs supérieures comprise entre 1.3 à 1.7 selon le venturi considéré.

VII.E. Extension des lois ISMA aux petits débits

Suite à la volonté de la société ISMA d'étendre la gamme de ses canaux jaugeurs jusqu'à un débit nul, nous recommandons d'utiliser pour ces faibles hauteurs les résultats issus de l'application de la norme NF ISO 4359, même si cette dernière n'est strictement valide qu'au dessus de 50 mm de hauteur d'eau. Nous invitons la société ISMA à préciser la dégradation de la loi hauteur/débit pour de telles hauteurs.

VIII. Conclusion

Compte tenu des résultats présentés précédemment, nous recommandons d'utiliser les relations issues de l'application de la norme NF ISO 4359 tant que celle-ci est valable. Pour les hauteurs pour lesquelles les résultats s'écartent de la norme (hauteurs d'eau trop grandes par rapport à la longueur du col), nous recommandons de conserver les lois ISMA.

Par ailleurs, suite à la volonté de la société ISMA d'étendre la gamme de ses canaux jaugeurs jusqu'à un débit nul, nous recommandons d'utiliser pour ces faibles hauteurs les résultats issus de l'application de la norme NF ISO 4359.

ISMA n°	Plage de hauteur d'eau	Loi recommandée (Q en m ³ /h et h en m)	Erreur moy.	Erreur max.
1	0 – 162 mm	$Q = -0.19xh + 672.7xh^2 - 734xh^3 + 11400xh^4$	0.9%	2.6%
2	0 – 209 mm	$Q = -0.3311 \times h + 735.1 \times h^2 + 80.7 \times h^3 + 6210 \times h^4$	1.2%	3.3%
3	0 – 266 mm	$Q = -0.58461xh + 1156.085xh^2 - 1125xh^3 + 6550xh^4$	1.2%	3.5%
4	0 – 338 mm	$Q = -1.535xh + 1537.5xh^2 - 834xh^3 + 2820xh^4$	0.3%	1.0%
5	0 – 420 mm	$Q = -3.171xh + 2056xh^2 - 470xh^3 + 1050xh^4$	0.2%	0.8%
6	0 – 545 mm	$Q = -4.423xh + 2661.66xh^2 - 1360xh^3 + 1690xh^4$	0.6%	3.1%
7	0 – 732 mm	$Q = -7.223xh + 2873.2xh^2 - 766xh^3 + 770xh^4$	0.4%	1.9%

Tableau 11. Lois hauteur/débit recommandées

Le *Tableau 11* synthétise les lois recommandées suite à cette étude pour l'ensemble des canaux jaugeurs ISMA. Parmi ces lois, les quatre premières sont issues d'une régression sur les résultats issus de la norme NF ISO 4359 pour les faibles hauteurs d'eau et de la loi ISMA pour les grandes hauteurs d'eau. Les trois dernières proviennent d'une régression sur les résultats issus de l'application directe de la norme NF ISO 4359, celle-ci étant valable sur l'intégralité de la plage de hauteurs d'eau. L'écriture sous la forme d'une formule unique – plutôt qu'un tableau de hauteurs d'eau – pour l'intégralité de la plage de hauteurs d'eau introduit une erreur intrinsèque à la formule dont les valeurs moyenne et maximale sont précisées dans le *Tableau 11*. L'ensemble des lois sont exprimées sous la forme d'un polynôme de degré 4.

Les figures 29 à 35, en illustrant la confrontation des lois recommandées aux résultats du modèle numérique 3D pour les sept venturis ISMA, montrent la pertinence des lois recommandées.

Précisons enfin qu'en raison de l'erreur couramment faite sur la mesure de hauteur d'eau *in situ* (de l'ordre de 1 à 3 mm), l'extension des lois hauteur/débit jusqu'à un débit nul ne doit pas faire perdre de vue que la mesure du débit aux faibles hauteurs d'eau sera entachée d'une incertitude importante (du simple au double pour une hauteur voisine de 10 mm).

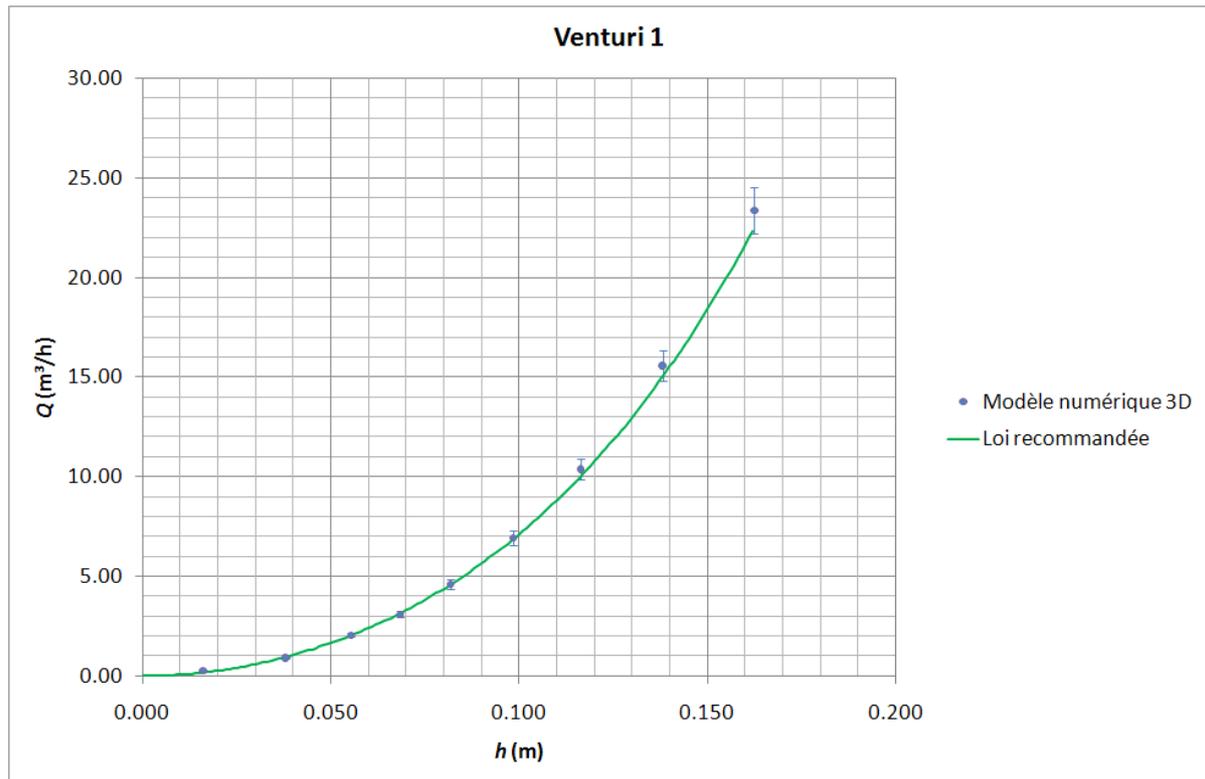


Figure 18. Confrontation de la loi recommandée aux résultats du modèle numérique 3D pour le venturi ISMA 1

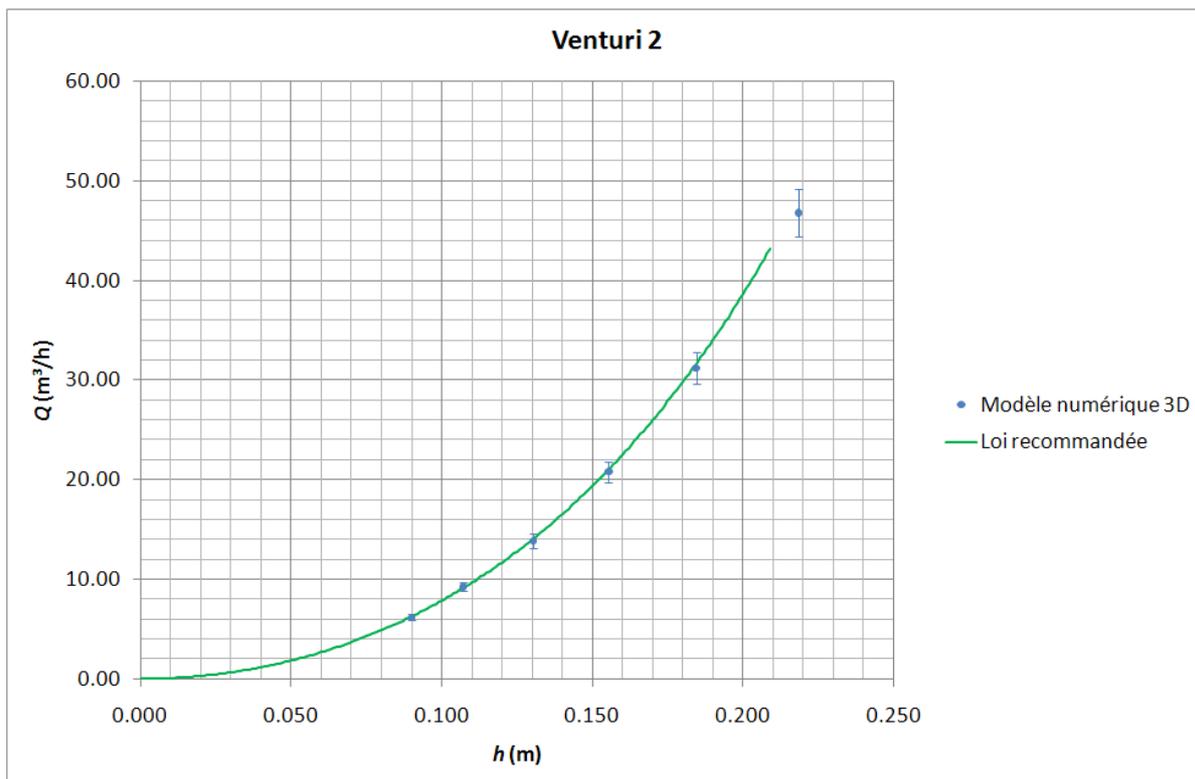


Figure 19. Confrontation de la loi recommandée aux résultats du modèle numérique 3D pour le venturi ISMA 2

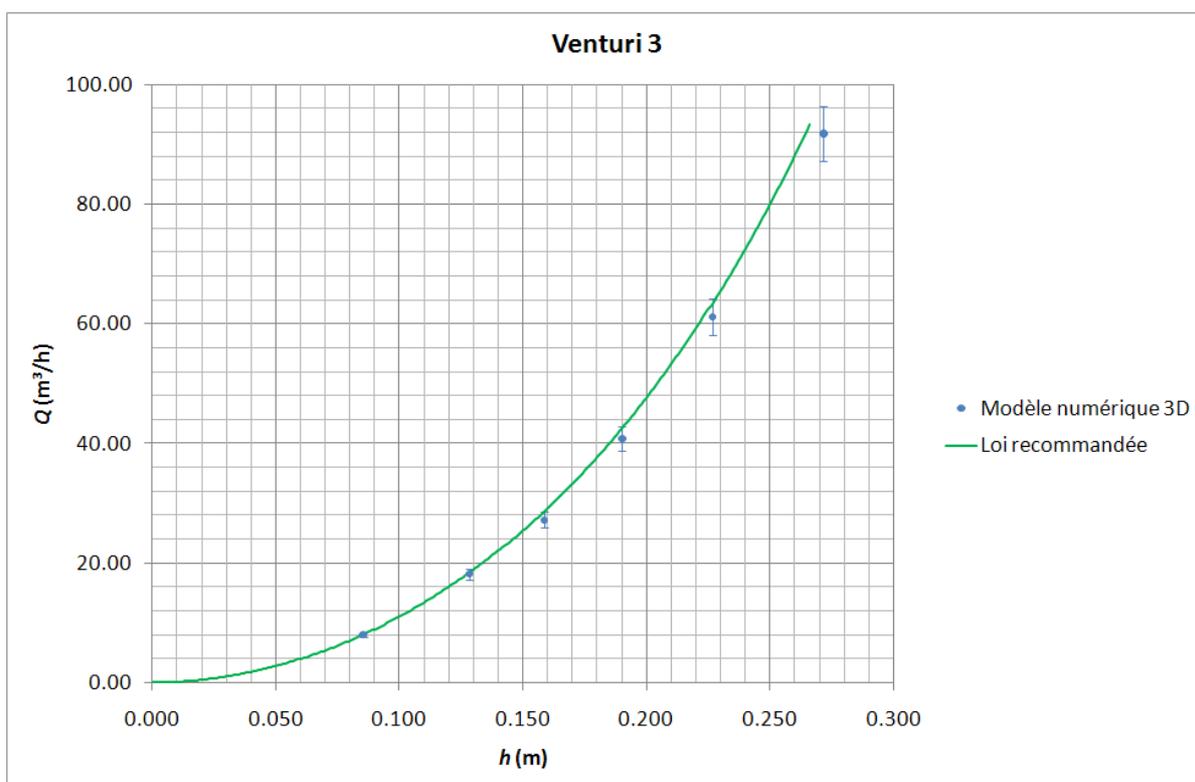


Figure 20. Confrontation de la loi recommandée aux résultats du modèle numérique 3D pour le venturi ISMA 3

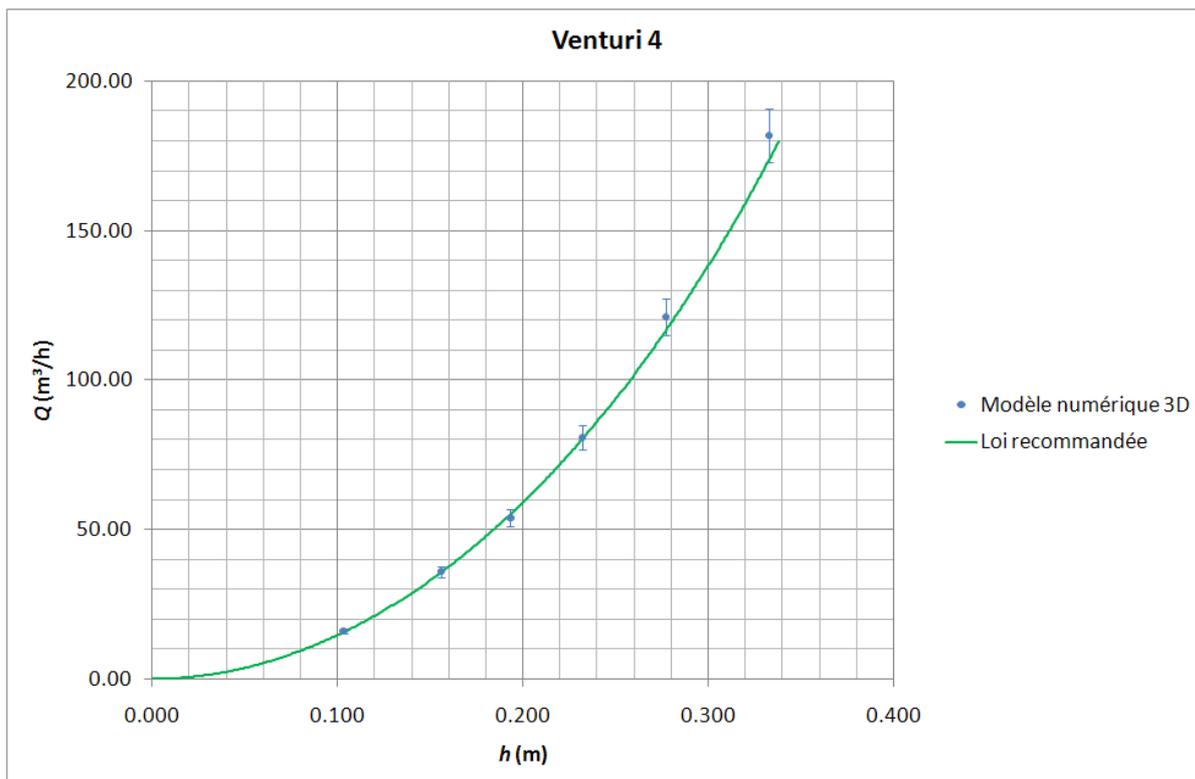


Figure 21. Confrontation de la loi recommandée aux résultats du modèle numérique 3D pour le venturi ISMA 4

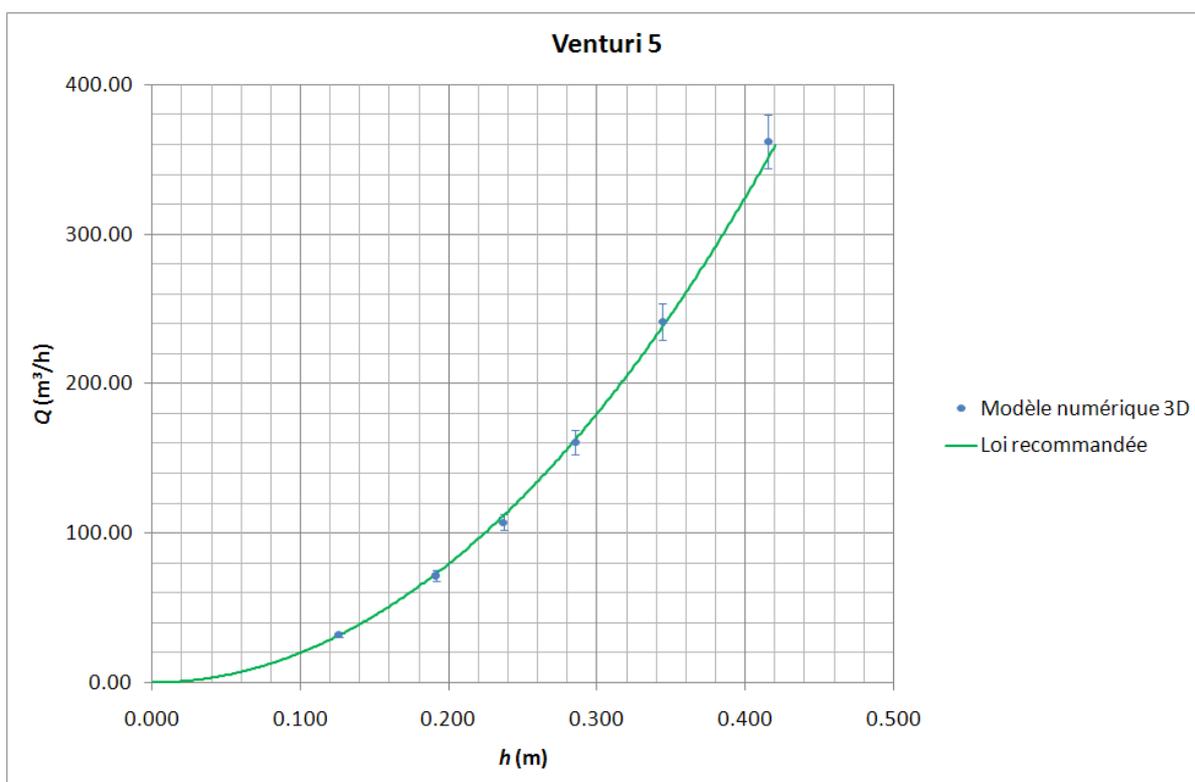


Figure 22. Confrontation de la loi recommandée aux résultats du modèle numérique 3D pour le venturi ISMA 5

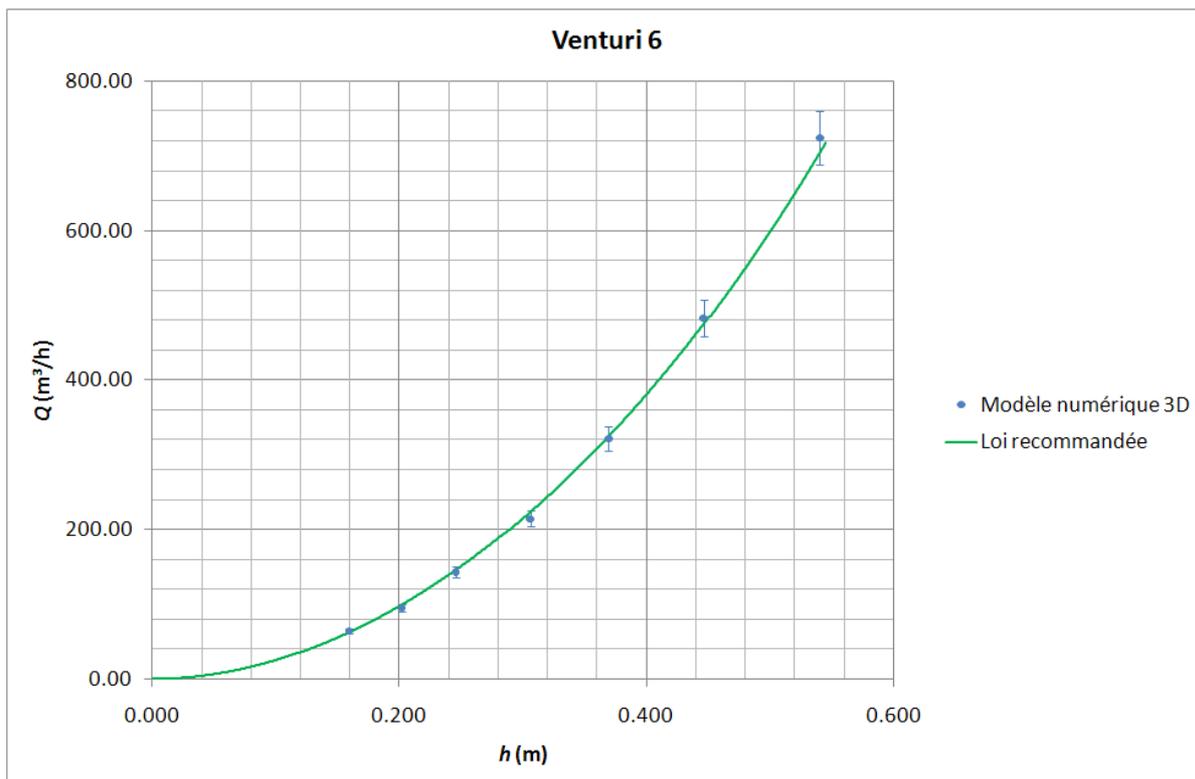


Figure 23. Confrontation de la loi recommandée aux résultats du modèle numérique 3D pour le venturi ISMA 6

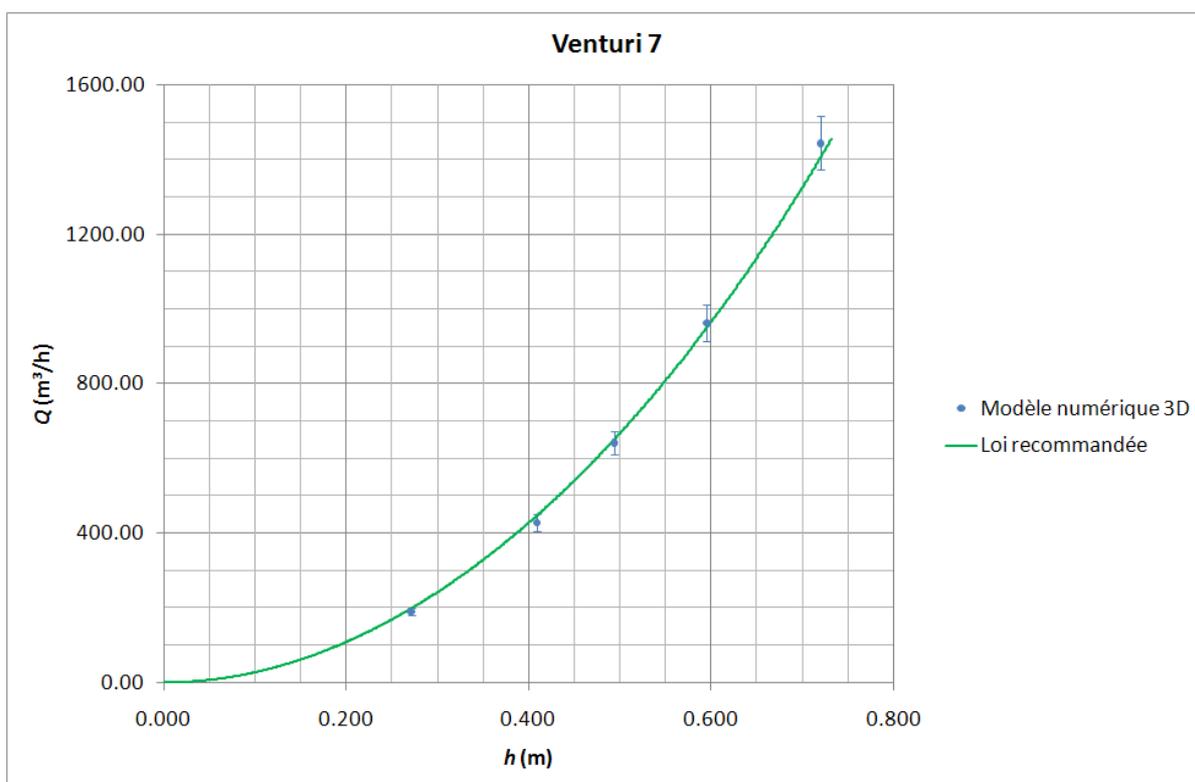


Figure 24. Confrontation de la loi recommandée aux résultats du modèle numérique 3D pour le venturi ISMA 7

IX. Référence

AFNOR (novembre 1986). NF ISO 4359 – Mesures de débit des liquides dans les canaux découverts – Canaux jaugeurs à col rectangulaire, à col trapézoïdal et à col en U.