



3D EAU

3D EAU

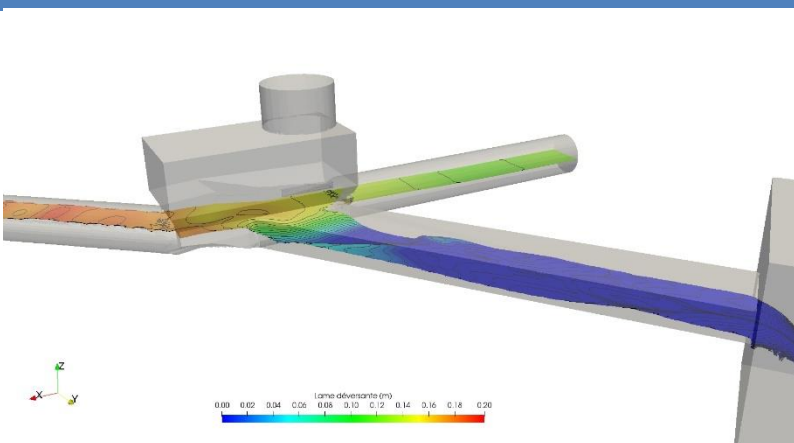
21 rue Jacobi-Netter 67000 Strasbourg

3 rue des Camélias 75014 Paris

www.3deau.fr

contact@3deau.fr

ETUDE POUR L'INSTRUMENTATION D'AUTOSURVEILLANCE DES DEVERSOIRS D'ORAGE N°15 ET N°16 PAR MODELISATION HYDRAULIQUE 3D – DEVERSOIR D'ORAGE DO16 DEGOMBERT



Etude effectuée par 3D EAU pour :



Remise du rapport le 27/08/2020

Etude réalisée avec le concours financier de
l'Agence de l'Eau Rhône Méditerranée Corse.



Table des matières

1. CONTEXTE, OBJECTIFS ET METHODOLOGIE	4
1.1. CONTEXTE	4
1.2. OBJECTIFS	4
1.3. METHODOLOGIE	4
2. PRESENTATION DE L'OUVRAGE ET DE SON ENVIRONNEMENT HYDRAULIQUE.....	5
2.1. RELEVES GEOMETRIQUES DE L'OUVRAGE	5
2.2. PRESENTATION DE L'OUVRAGE ETUDIE	5
2.3. ENVIRONNEMENT HYDRAULIQUE	9
2.3.1. <i>Profils en long et type d'écoulement dans chaque canalisation</i>	9
2.3.2. <i>Gamme de débits</i>	9
2.3.3. <i>Lames et débits déversés</i>	11
2.3.4. <i>Influence du milieu naturel sur les déversements</i>	13
2.3.5. <i>Impact du clapet anti-retour sur l'écoulement</i>	14
3. DIAGNOSTIC DU FONCTIONNEMENT HYDRAULIQUE	15
3.1. REGIME D'ECOULEMENT AMONT	15
3.2. RISQUE DE RESSAUT HYDRAULIQUE LIE A L'ARRIVEE DANS L'OUVRAGE	15
3.3. RISQUE D'ENNOIEMENT DU SEUIL PAR L'AVAL DEVERSE	16
3.4. PERTURBATION PAR UN OBSTACLE.....	16
3.5. PERTURBATION PAR LA VITESSE D'ENGOUFFREMENT A L'AVAL.....	16
3.6. ECOULEMENT TRES BIEN TRANQUILLISE ?	17
3.7. INCERTITUDES COMPATIBLES AVEC L'AUTOSURVEILLANCE.....	17
3.8. SYNTHESE DE L'ANALYSE PREALABLE	17
3.9. AMENAGEMENT PRECONISE DU SEUIL DU DEVERSOIR D'ORAGE	17
3.10. METHODOLOGIE POUR FIABILISER LA MESURE DE DEBIT	18
4. MODELISATION HYDRAULIQUE 3D	19
4.1. CONSTRUCTION DU MODELE 3D	19
4.2. MAILLAGE DE LA GEOMETRIE	19
4.3. PARAMETRE DU MODELE.....	20
4.4. LISTE DES SIMULATIONS EFFECTUEES.....	21
5. RESULTATS ET ANALYSE DES SIMULATIONS 3D	22
5.1. CONVERGENCE DES CALCULS	22
5.2. VISUALISATION DE LA SURFACE LIBRE	22
5.3. LAMES DEVERSANTES ET DEBITS	27
5.4. ANALYSE PHENOMENOLOGIQUE	29
5.4.1. <i>Comportement hydraulique dans le déversoir</i>	29
5.4.2. <i>Influence aval</i>	31
5.5. CONCLUSIONS DES RESULTATS DE SIMULATIONS.....	32
6. ELABORATION DE L'AUTOSURVEILLANCE	33
6.1. PRESENTATION DE LA SOLUTION DE MESURE	33

6.2.	POSITION DES CAPTEURS DE MESURE DE HAUTEUR D'EAU	33
6.2.1.	<i>Capteur amont</i>	33
6.2.2.	<i>Capteur aval</i>	34
6.3.	VALIDATION DE LA POSITION DU CAPTEUR AMONT	36
6.3.1.	<i>Unicité</i>	36
6.3.2.	<i>Stabilité dans l'espace</i>	36
6.3.3.	<i>Stabilité dans le temps</i>	36
6.3.4.	<i>Conclusion sur la position de la future sonde</i>	36
6.4.	ELABORATION DE LA LOI D'ÉTALONNAGE	36
6.4.1.	<i>Prérequis importants sur l'application de la loi d'étalonnage</i>	36
6.4.2.	<i>Sans influence aval</i>	37
6.4.3.	<i>Avec influence aval</i>	39
6.4.4.	<i>Logigramme de fonctionnement</i>	42
6.5.	PROCEDURE DE CONTROLE	43
6.6.	QUANTIFICATION DE L'INCERTITUDE GLOBALE SUR LA DETERMINATION DU DEBIT	45
7.	CONCLUSION	47
8.	REFERENCES	48
	ANNEXE 1 : LOI HAUTEUR-DEBIT	49
	ANNEXE 2 : VALEURS DU COEFFICIENT D'ENNOIEMENT K	50

1. CONTEXTE, OBJECTIFS ET METHODOLOGIE

1.1. Contexte

Le présent rapport est rédigé à la demande du Grand Belfort dans le cadre de la mise en place de l'autosurveillance de deux points de déversement du réseau d'assainissement de la commune de Belfort. Dans le cadre de l'arrêté du 21/07/2015 pour l'autosurveillance des réseaux d'assainissement, le Grand Belfort a fait réaliser une modélisation complète de son réseau. Le calage de ce modèle a mis en évidence des écarts non négligeables entre les mesures sur site et les résultats du modèle. Une étude diagnostique spécifique aux déversoirs d'orage a alors été réalisée. Elle conclut à la nécessité de réaliser des études spécifiques et notamment des modélisations 3D de certains ouvrages afin d'en fiabiliser les mesures de débit. **Ainsi la présente étude a pour objectif d'élaborer le dispositif de mesure des débits déversés du déversoir d'orage DO16 Degombert via la modélisation numérique 3D.**

1.2. Objectifs

Les objectifs de l'étude sont :

- Comprendre et expliciter le comportement hydraulique du site,
- Déterminer et valider hydrauliquement une solution de mesure,
- Déterminer la position du capteur ou des capteurs de niveau d'eau (plusieurs capteurs dans le cas d'une influence aval),
- Etablir la relation entre la hauteur mesurée par le capteur et le débit déversé (ou autre dans le cas où une autre solution serait recommandée),
- Evaluer l'incertitude globale sur le débit de la solution de mesure.

1.3. Méthodologie

Dans l'objectif d'établir la loi hauteur-débit du DO16 Degombert, la modélisation numérique 3D sera utilisée comme outil de référence. La méthodologie se décompose comme suit :

- Collecte et analyse des données d'entrée :
 - Collecte des données (débits, plans, etc.) auprès du client,
 - Analyse hydraulique de l'ouvrage sur la base des informations collectées.
- Modélisation hydraulique 3D pour établir la relation hauteur-débit :
 - Construction du modèle,
 - Simulations du fonctionnement hydraulique de l'ouvrage en faisant varier les conditions d'apport en débit et d'influence aval du milieu naturel,
 - Détermination et validation hydraulique de la position du(es) capteur(s),
 - Etablissement de la relation hauteur-débit,
 - Evaluation de l'incertitude globale sur le débit (en tenant compte de toutes les sources d'incertitudes potentielles).

2. PRESENTATION DE L'OUVRAGE ET DE SON ENVIRONNEMENT HYDRAULIQUE

2.1. Relevés géométriques de l'ouvrage

L'ouvrage a été relevé lors de la visite de terrain du 19/05/2020 par 3D EAU. Les résultats des relevés ont été analysés par 3D EAU. Cela a permis de déterminer :

- Les caractéristiques géométriques (hauteur, largeur, diamètre) de toutes les conduites ainsi que leurs pentes,
- Les caractéristiques géométriques du déversoir d'orage : longueur, épaisseur et pente de la crête ainsi que les hauteurs de pelle amont et aval,
- La position des différents obstacles à l'écoulement (réduction de la section de passage, etc.).

2.2. Présentation de l'ouvrage étudié

Le DO16 Degombert est un déversoir d'orage latéral à crête basse avec entonnement (maçonnerie au droit de la conduite aval conservé). L'ouvrage présente un seul apport d'effluents. L'entrée correspond à un collecteur circulaire DN500, dont l'axe d'écoulement est parallèle par rapport à la crête. La conduite aval conservé est un collecteur circulaire DN500. Son axe d'écoulement présente un angle de 140° par rapport à l'axe de la conduite amont.

En réalité, la majorité du déversement au droit de cet ouvrage provient du réseau aval conservé qui subit des mises en charge importantes se traduisant par une inversion du sens d'écoulement dans le collecteur aval conservé du déversoir. Ce fonctionnement hydraulique particulier est explicité en termes de débit au paragraphe 2.3.2.

A noter la présence sur la partie amont de la chambre du DO, d'une arrivée secondaire en DN150 correspondant à une descente de gouttière d'un bâtiment à proximité. Cet apport ne sera pas pris en compte dans la suite de l'analyse compte tenu du fait qu'il représente un volume minoritaire par rapport à l'arrivée principale circulaire.

La crête du déversoir présente une forme rectiligne d'une longueur de 0,96 m et est constituée d'une lame déversante fine (cf. Figure 3). Elle est en bon état mais elle n'est pas horizontale sur toute la largeur. On relève une pente de 2,1 % selon l'axe d'écoulement « entrée amont → aval conservé », soit une différence de 20 mm. La hauteur de pelle à l'amont de la crête (côté réseau) est de 7,5 cm (différence entre le radier de la chambre en amont de la crête côté conservé et le niveau moyen de la crête) et à l'aval (côté décharge) également de 7,5 cm (différence entre le niveau moyen de la crête et le fil d'eau du radier de la conduite aval déversé à son amont). Enfin, la distance verticale entre la crête et la voute de l'ouvrage varie entre 22 cm et 26 cm.

Les mesures géométriques sont synthétisées par les deux figures ci-après.

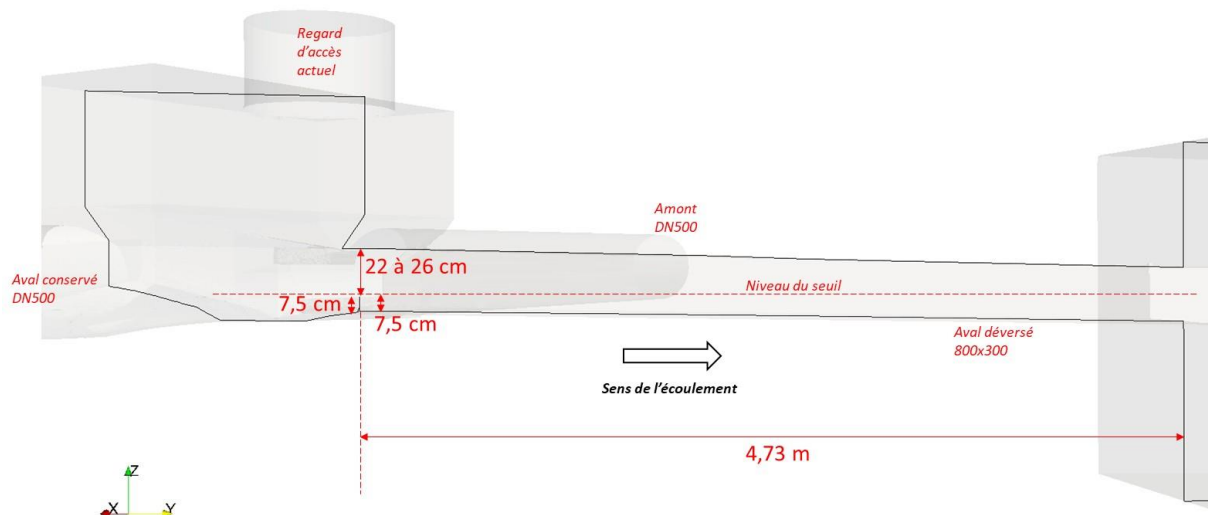


Figure 1. Coupe transversale du réseau côté déversé.

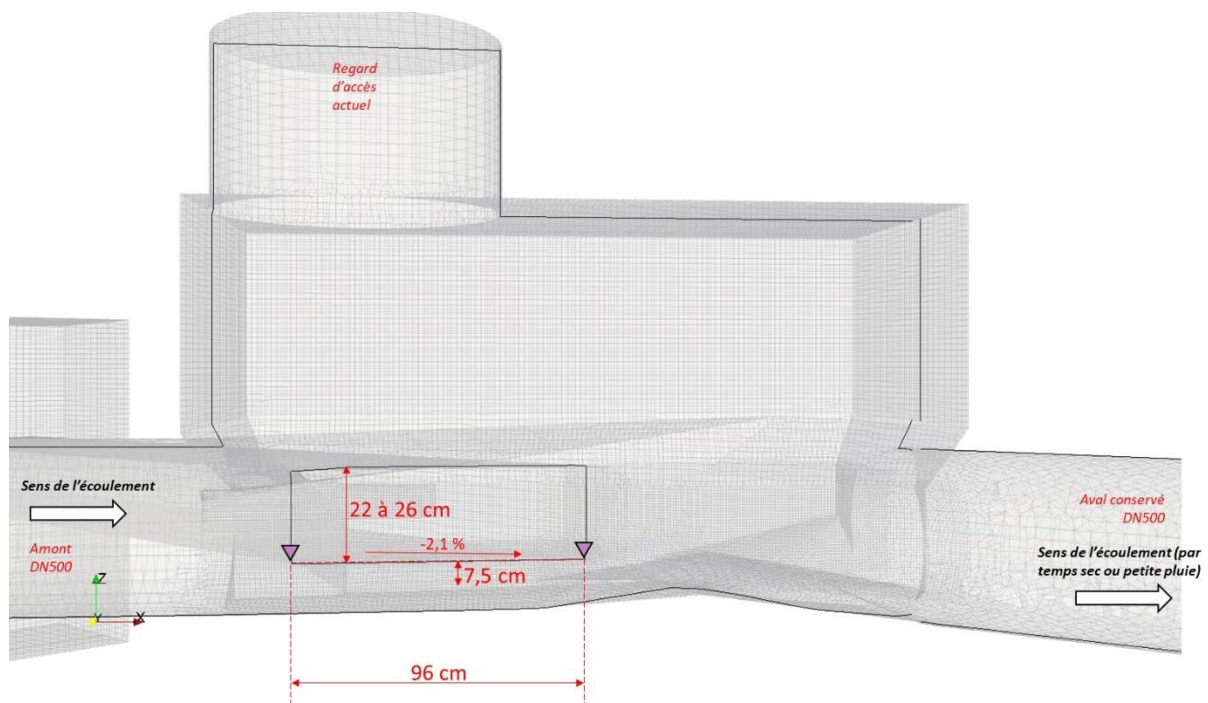


Figure 2. Coupe longitudinale du réseau côté conservé.



Figure 3. Vue de la crête du DO16 Degombert (Source : 3D EAU).

En cas de surverse, les effluents déversés sont acheminés via un dalot rectangulaire de 800 mm de largeur et de 300 mm de hauteur (cf. Figure 4). Ce dernier achemine sur une distance d'environ 4,73 mètres le débit déversé vers la Savoureuse.



Figure 4. Vue de l'intérieur de l'aval du collecteur aval déversé depuis le rejet du DO16 Degombert (Source : 3D EAU).

La Savoureuse constitue l'exutoire de l'ouvrage. Au droit du point de rejet, on note la présence d'un clapet anti-retour à battant dont l'axe de rotation est vertical. Il n'y a pas de regard d'accès au clapet comme illustré par la Figure 5. Comme illustré sur cette figure, ce clapet ne présente pas de système permettant sa fermeture s'il n'est sollicité par aucun écoulement ; sans sollicitation particulière, il reste donc dans la position dans laquelle il se trouve.



Figure 5. Vue du clapet anti-retour du DO16 Degombert (Source : 3D EAU).

Enfin, le Grand Belfort a communiqué à 3D EAU la configuration géométrique du déversoir présentée par la Figure 6.

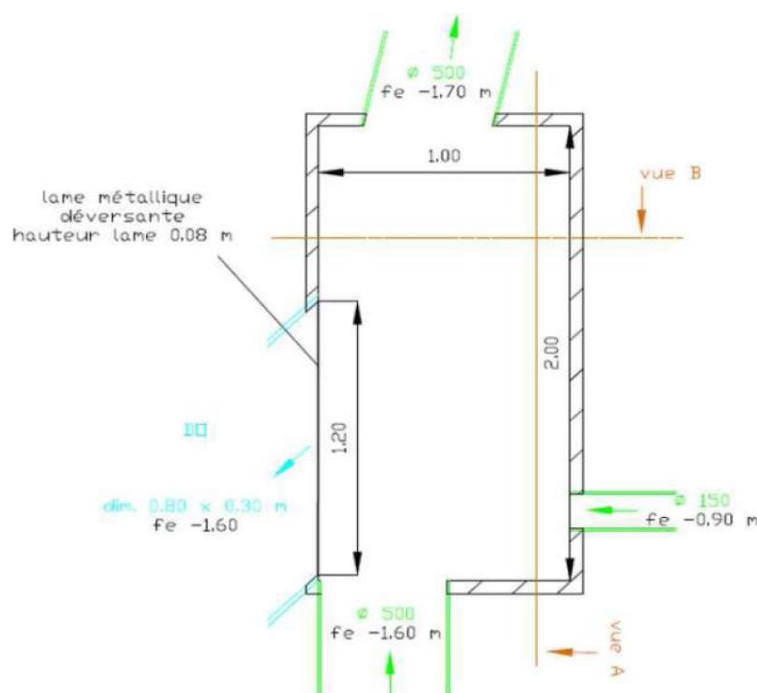


Figure 6. Schéma de principe du DO16 Degombert : vue en plan (Source : Le Grand Belfort).

La visite sur site du 19/05/2020 a permis de confirmer la présence d'un dispositif de mesure au droit de l'ouvrage. En effet, l'ouvrage comporte une sonde de hauteur permettant la mesure du niveau d'eau dans la chambre du DO en amont de la crête.

Quatre vidéos, accessibles via les liens suivants présentent l'ouvrage dans son environnement hydraulique : [présentation générale](#), [présentation générale 2](#), [conduite de décharge](#), [rejet du déversoir](#).

2.3. Environnement hydraulique

2.3.1. Profils en long et type d'écoulement dans chaque canalisation

Le calcul des pentes locales est réalisé d'après les plans transmis à 3D EAU. Les pentes de chaque collecteur sont indiquées en pourcentage dans le Tableau 1. Elles ont été mesurées sur la longueur relevée par les mesures soit quelques mètres à environ 30 mètres pour la conduite amont.

Tableau 1 : Résultats du calcul des pentes des collecteurs et de la cunette du DO.

Conduite	Section	Hauteur (m)	Largeur (m)	Diamètre (m)	i (%)
Entrée Principale	Circulaire	-	-	0.500	0.52%
Aval conservé	Circulaire	-	-	0.500	0.03%
Aval déversé	Rectangulaire	0.300	0.800	-	1.89%
Cunette DO (côté conservé)	-	-	-	0.500	1.50%

Les pentes de la conduite amont et aval conservé sont faibles d'après les relevés. Le radier de la chambre du DO présente une pente forte dans le sens de la longueur de la crête. La pente de la conduite de décharge correspond à une forte pente hydraulique propice à un écoulement torrentiel dans le collecteur, contrairement aux collecteurs amont et aval conservé présentant des pentes faibles favorables à un écoulement de type fluvial.

Remarque : Malgré le passage d'une pente forte (radier de la chambre) à une pente faible (conduite aval conservé), le risque d'apparition d'un ressaut hydraulique est faible. En effet, le déversement de l'ouvrage se produit majoritairement lorsque le collecteur aval conservé fonctionne en sens inverse (mise en charge par l'aval) ce qui engendre une forte influence aval dans la chambre et est favorable à un régime hydraulique franchement fluvial en cas de déversement.

2.3.2. Gamme de débits

Le Grand Belfort a communiqué à 3D EAU les débits associés à des pluies de périodes de retour 1 mois, 5 ans, 10 ans, 20 ans et 30 ans. Ces valeurs sont issues de la modélisation hydraulique 1D des réseaux de Belfort, réalisée par NALDEO dans le cadre du Schéma Directeur Eaux Pluviales (2015-2019). Le Tableau 2 récapitule les débits maximaux dans les conduites pour le DO16 Degombert (les valeurs transmises à 3D EAU apparaissent en rouge dans le tableau).

Au préalable, il est important de noter les éléments suivants :

- En réalité, le déversement se produit par l'apport de débit provenant du collecteur DN500 aval conservé (mise en charge par l'aval). Celui-ci joue un rôle de « trop plein »

pour le réseau se situant plus à l'aval, au niveau de l'avenue Maréchal Foch. Le déversement s'opère ainsi par la remontée d'une mise en charge jusqu'au déversoir. Ce fonctionnement hydraulique particulier justifie des valeurs négatives de débits aval conservé dans le Tableau 2. Ces valeurs correspondent à la somme des débits se rejoignant au nœud du réseau situé à l'extrémité aval de la rue Degombert. Plus exactement, les valeurs de débits aval conservé sont déterminées en faisant la différence entre le débit s'écoulant dans le tronçon *link_1611* et celui s'écoulant dans le tronçon *link_2794* d'après la nomenclature du modèle 1D.

- 3D EAU ne dispose pas de la totalité de la chroniques de résultats 1D pour la pluie 30 ans. Cela explique entre autre que le débit aval conservé pour cette période de retour est inférieur (en valeur absolue) à celui de la pluie 20 ans.

Tableau 2 : Débits maximaux simulés pour le DO16 Degombert.

Période de retour	1 mois	5 ans	10 ans	20 ans	30 ans
Q_{amont} (m ³ /s)	0.002	0.006	0.008	0.009	0.010
$Q_{\text{aval_conservé}}$ (m ³ /s)	-0.099	-0.299	-0.335	-0.360	-0.353
$Q_{\text{aval_déversé}}$ (m ³ /s)	0.89	3.43	3.78	4.32	4.64
$Q_{\text{amont}} / Q_{\text{déversé}}$	0.2%	0.2%	0.2%	0.2%	0.2%
$Q_{\text{aval_conservé}} / Q_{\text{déversé}}$	11%	9%	9%	8%	8%

D'après le Tableau 2, on note que :

- Des déversements sont déjà constatés à partir d'une pluie d'une période de retour d'un mois,
- Pour une pluie de période de retour 1 mois, le débit déversé est déjà important, de l'ordre de 0,9 m³/s. Ce débit atteint environ 3,4 m³/s pour la pluie 5 ans et est compris entre 3,8 et 4,6 m³/s pour des pluies de période de retour 10 à 30 ans.
- Les débits déversés indiqués correspondent aux résultats bruts du modèle 1D. Les valeurs indiquées sont probablement surestimées par le modèle 1D dans le calcul de la loi de déversement. En effet, à titre d'exemple, pour la pluie 5 ans, le débit de 3,43 m³/s indiqué correspondrait à une hauteur de lame déversante théorique de l'ordre de 1,55 m (valeur estimée à partir d'une loi de seuil rectangulaire empirique). Or la distance entre la crête et la voute de la chambre est de 97 cm.
- Le collecteur amont DN500 collecte un bassin versant très petit. Les débits apportés par ce tronçon sont de l'ordre de quelques litres par seconde pour les différentes pluies modélisées. Au maximum, l'apport est de 10 L/s pour la pluie 30 ans.
- Ainsi, le déversoir surverse à partir d'un débit de l'ordre de 0,10 m³/s provenant de l'aval conservé.

Remarque : Le fonctionnement en sens inverse de la conduite aval conservé du DO Degombert est validé par le Grand Belfort au stade de l'analyse hydraulique.

2.3.3. Lames et débits déversés

L'ouvrage étant équipé en mesure de hauteur d'eau en situation actuelle au droit de la crête déversante, la gamme des débits par-dessus le seuil est estimée à partir de ces mesures. Les mesures ont été transmises par le Grand Belfort à 3D EAU sur une période allant du 01/01/2019 au 02/02/2020.

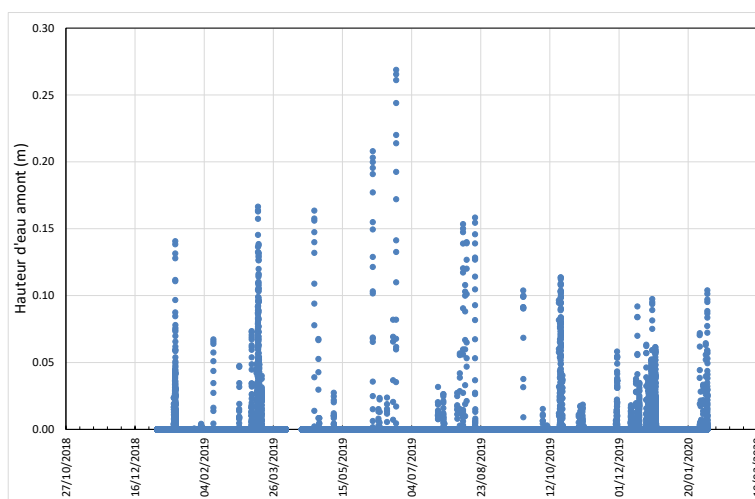


Figure 7. Evolution de la hauteur d'eau dans la chambre du DO16 Degombert entre le 01/01/2019 au 02/02/2020 (Source : Le Grand Belfort).

On note que la hauteur d'eau dans la chambre du DO est régulièrement égale à zéro. Des pics de hauteurs sont relevés, avec des valeurs maximales proches de la mise en charge de la conduite déversée (30 cm). Les hauteurs d'eau mesurées sont traduites en hauteurs de lame déversante. Pour ce faire, à chaque valeur on retranche la hauteur de pelle amont (distance entre le radier de la chambre en amont de la crête et le niveau de la crête), soit 7,5 cm. Puis une relation empirique de seuil rectangulaire frontal sans contraction latérale (loi de Kindsvater et Carter) est utilisée en première approche pour estimer les débits rencontrés au droit du seuil. La formule de Kindsvater et Carter est donnée ci-dessous :

$$Q = \mu C_v L h^{3/2} \sqrt{2g}$$

Avec Q (m^3/s), le débit déversé, μ (sans unité), un coefficient de débit (environ 0,40), C_v (sans unité), un coefficient lié à la vitesse d'approche (égal ici à 1), L (m), la largeur du seuil, h (m), la hauteur de lame déversante, et g (m/s^2), l'accélération de pesanteur.

Remarque : Une loi hauteur-débit de seuil rectangulaire frontal n'est probablement pas bien adaptée pour ce seuil de déversement. Toutefois, son utilisation permet en première approche de disposer d'ordres de grandeur des débits déversés.

L'évolution du débit déversé dans le temps est fournie par la Figure 8. La courbe bleue représente le débit calculé à partir des mesures de hauteur en appliquant la relation de Kindsvater et Carter exposée précédemment. On constate que le débit déversé peut varier entre 0 et 0,15 m³/s pour une lame déversante maximale de 19 cm. Au vu des débits obtenus par les simulations 1D (cf. Tableau 2), les déversements observés sur la période de mesure correspondent à des pluies de période de retour inférieures à 1 mois.

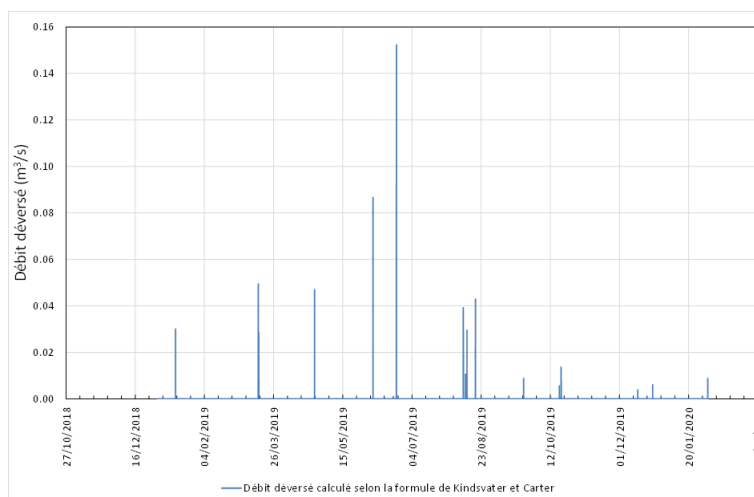


Figure 8. Evolution du débit déversé du DO16 Degombert entre le 01/01/2019 au 02/02/2020.

Les débits déversés sont convertis en volume afin de visualiser la contribution de chaque lame déversante en termes de volume déversé par rapport au volume total déversé sur la période de mesure. La Figure 9 présente les résultats. La contribution au volume déversé total est relativement homogène sur la gamme de hauteurs de lame déversante. Les lames comprises entre 0 et 5 cm représentent environ 20 % du volume déversé total. Les lames déversantes intermédiaires (entre 3 et 9 cm), contribuent à elles seules à 56 % du volume total déversé.

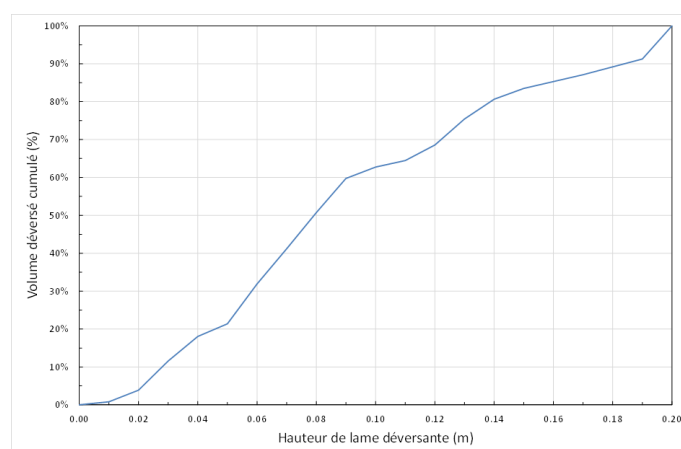


Figure 9. Evolution du volume déversé cumulé en fonction de la hauteur de lame déversante dans le DO16 Degombert.

Le Tableau 3 propose une synthèse de l'analyse des mesures.

Tableau 3 : Synthèse de l'analyse des mesures.

Période	01/01/2019 au 02/02/2020
Mesures hauteur chambre DO	0 à 0,27 m
Hauteurs de lame déversante	0 à 0,19 m
Débits déversés estimés à partir de la relation de Kindsvater et Carter	0 à 0,15 m ³ /s
Volume total déversé, estimé à partir des débits issus de la relation de Kindsvater et Carter	1032 m ³

Remarque : L'évaluation des lames déversantes à partir de la relation empirique de Kindsvater et Carter ne permet pas de garantir ici les ordres de grandeurs des hauteurs attendues. Les simulations 3D permettront de décrire avec précision la relation entre lame et débit déversé.

2.3.4. Influence du milieu naturel sur les déversements

La Savoureuse constitue l'exutoire de la conduite de décharge. 3D EAU a pu collecter auprès du Grand Belfort les cotes des crues de la Savoureuse. Une synthèse est proposée par le Tableau 4.

Sachant que le rejet du DO Degombert se situe entre la passerelle des Arts et le seuil Denfert, et en retenant comme hypothèse des plus hautes eaux le Q10 de la Savoureuse, on peut s'attendre à un niveau maximal du milieu naturel à 356,73 m NGF (voir encadré rouge sur le Tableau 4). Les plans transmis à 3D EAU par le Grand Belfort indiquent que la cote altimétrique du terrain naturel au droit du DO est de 357,23 m NGF et que le radier dans l'ouvrage se situe à 355,21 m NGF. Par ailleurs, les « fiches ouvrages » transmises à 3D EAU indiquent une valeur de hauteur de pelle de 10 cm pour le seuil. On peut en déduire une altitude du seuil à 355,31 m NGF.

Tableau 4 : Cotes pour différentes crues de la Savoureuse (Source : étude EGIS).

Type d'ouvrage	Dénomination	Altitude crête des seuils (m NGF)	Altitude échanture (m NGF)	Cote haute des tabliers (m NGF)	Localisation	Cote d'eau (m NGF)					Tirant d'air sous tablier - crue 1990 (m)	Vitesse d'écoulements (m/s)				
						Etiage	Module	Q2	Q10	Crue 1990		Etiage	Module	Q2	Q10	Crue 1990
Pont	Pont du magasin			359.26	Amont	356.75	357.08	358.07	358.59	359.58	-0.91	0.10	0.71	1.92	2.33	2.71
				-	Aval	356.75	357.06	357.85	358.33	359.23		0.14	1.19	2.13	2.46	2.77
Pont	Pont Clémenceau			358.93	Amont	356.57	356.88	357.74	358.22	359.18	-0.25	0.34	0.93	1.80	2.10	2.34
				-	Aval	356.56	356.87	357.66	358.17	359.09		0.08	0.37	1.67	1.91	2.13
Seuil	Seuil des Lettres	356.53	356.43	-	Amont	356.54	356.62	357.17	357.68	358.74		0.18	0.46	1.59	1.98	2.26
				358.55	Amont	355.89	356.12	357.17	357.68	358.74	-0.19	0.07	0.33	1.60	1.99	2.27
Pont	Passerelle des Lettres			-	Aval	355.89	356.12	357.20	357.72	358.77		0.09	0.33	1.17	1.56	1.91
				358.52	Amont	355.89	356.04	357.08	357.59	358.67	-0.15	0.50	1.03	1.42	1.82	2.10
Pont	Pont Carnot			-	Aval	355.89	356.04	357.08	357.58	358.62		0.04	0.25	1.15	1.51	1.81
				355.89	Amont	355.89	356.02	357.02	357.48	358.53		0.08	0.36	1.38	1.83	2.12
Seuil	Seuil des Arts	355.94	355.84	-	Aval	354.68	355.01	356.30	357.11	358.16		0.20	0.65	1.16	1.43	1.68
				356.56	Amont	354.66	354.95	356.36	357.08	358.34	-1.78	0.24	0.83	1.33	1.55	1.76
Pont	Passerelle des Arts			-	Aval	354.60	354.94	356.28	356.93	357.91		0.42	0.84	1.42	1.67	2.00
				354.57	Amont	354.57	354.87	356.14	356.73	357.64		0.08	0.46	1.85	2.31	2.83
Seuil	Seuil Denfert-Rochereau	354.76	354.56	-	Aval	354.10	354.65	355.85	356.48	357.35		0.08	0.63	1.75	2.16	2.68
				357.98	Amont	354.10	354.66	355.89	356.52	357.43	0.55	0.19	0.64	1.45	1.85	2.34
Pont	Pont Denfert-Rochereau			-	Aval	354.10	354.65	355.86	356.49	357.38		0.08	0.63	1.50	1.89	2.38
				357.02	Amont	353.89	354.63	355.82	356.42	357.77	-0.25	0.20	0.66	1.44	1.93	2.54
Pont	Passerelle Gambetta			-	Aval	353.89	354.63	355.81	356.41	357.25		0.10	0.44	1.44	1.94	2.55
				352.88	Amont	353.89	354.60	355.05	355.63	356.46		0.16	0.91	2.71	3.20	3.80
Seuil	Seuil Gambetta	354.57	353.72	-	Aval	352.88	353.59	354.60	355.21	355.97		0.09	0.33	1.37	1.84	2.41
				353.17	Amont	351.83	352.06	353.25	353.94	354.87		0.55	1.86	1.61	1.93	2.36
Pont	Pont Richelieu			355.59	Amont	351.83	352.13	353.31	354.00	354.94	0.65	0.06	0.73	1.09	1.44	1.90
				-	Aval	351.81	352.00	353.01	353.68	354.58		0.35	1.19	1.77	2.09	2.53
Pont	Pont du Général De Gaulle			353.68	Amont	350.39	350.86	352.64	353.29	354.13	-0.44	0.16	0.75	1.80	2.35	3.03
				-	Aval	350.39	350.84	352.53	353.13	353.89		0.32	0.86	1.82	2.43	3.17

359.58 Pont en charge

1.85 Très forte vitesse
1.07 Forte vitesse

Dès lors, la cote maximale de la Savoureuse au droit du seuil Denfert (point le plus proche du rejet du DO Degombert) à 356,73 m NGF correspond à un niveau d'eau 1,42 m plus haut que le seuil du DO16 Degombert. Pour un tel niveau de crue du milieu naturel et compte-tenu de la faible longueur de la conduite de décharge (environ 4,5 m), on peut s'attendre à un réseau complètement en charge avec une très faible différence de niveau d'eau entre le réseau et la Savoureuse, voire un plan d'eau. 3D EAU propose alors de tester au maximum un niveau d'influence aval de 54 cm au-dessus du seuil pour la modélisation hydraulique 3D avec influence aval du milieu naturel.

Remarque : Les cotes altimétriques du DO Degombert ainsi que l'hypothèse d'une influence aval maximale de 54 cm au-dessus du seuil correspondant au Q2 de la Savoureuse ont été validées avec le Grand Belfort au préalable des modélisations 3D.

2.3.5. Impact du clapet anti-retour sur l'écoulement

Comme mentionné précédemment, le site est équipé d'un clapet anti-retour qui le protège des intrusions d'eau provenant de la Savoureuse. La visite du site a permis de constater que le clapet opposait une très faible résistance à l'ouverture. Par ailleurs le battant du clapet ne revenait pas dans sa position initiale (100 % fermée) en cas de manipulation (cf. vidéo accessible dans le paragraphe 2.2).

En conclusion, les observations sur site nous amènent à penser que le clapet n'opposera pas une forte résistance à l'écoulement provenant de l'amont. Il ne sera pas limitant vis-à-vis des déversements.

3. DIAGNOSTIC DU FONCTIONNEMENT HYDRAULIQUE

L'analyse hydraulique est menée selon le document technique suivant : Vazquez J, Dufresne M, Isenmann G (2016). Diagnostic pour l'aide à l'instrumentation des déversoirs d'orage. ENGEEES-ICube. Le logigramme utilisé pour cette analyse est reproduit ci-dessous par la Figure 10.

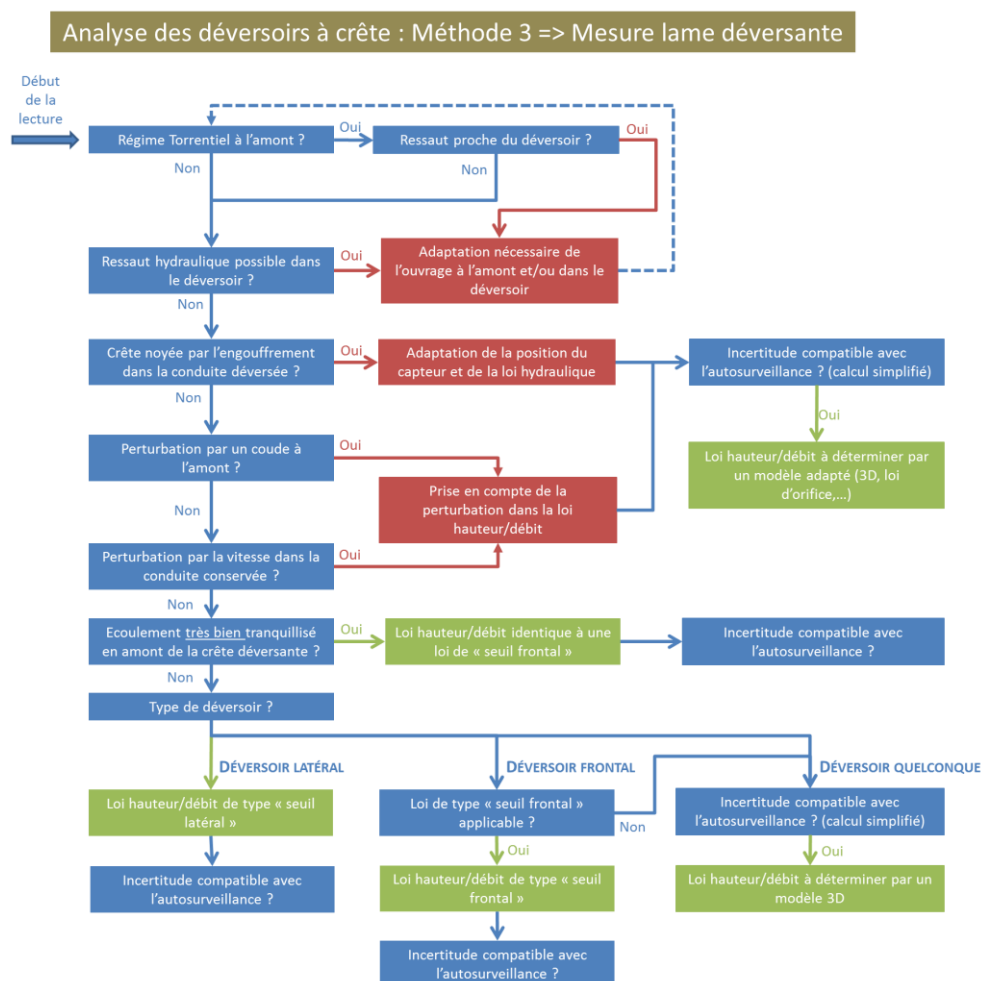


Figure 10. Logigramme d'analyse d'un déversoir d'orage en vue de son instrumentation en hauteur d'eau.

3.1. Régime d'écoulement amont

La pente de la conduite amont mais aussi de la conduite aval conservé fonctionnant en contresens sont faibles. Dès lors, un régime d'écoulement fluvial est attendu.

3.2. Risque de ressaut hydraulique lié à l'arrivée dans l'ouvrage

Aucun élément n'est susceptible de provoquer un ressaut hydraulique dans l'ouvrage (absence d'élargissement de la section de passage au niveau de l'arrivée dans le déversoir).

3.3. Risque d'engorgement du seuil par l'aval déversé

La pente de la conduite de décharge est de 1,9 %. D'après l'analyse hydraulique présentée par la Figure 11, sa capacité d'évacuation est de l'ordre de 90 L/s avant d'influencer le déversement (hypothèse d'une hauteur d'eau de 7,5 cm à l'amont du dalot rectangulaire, correspondant à la hauteur de pelle aval du déversoir).

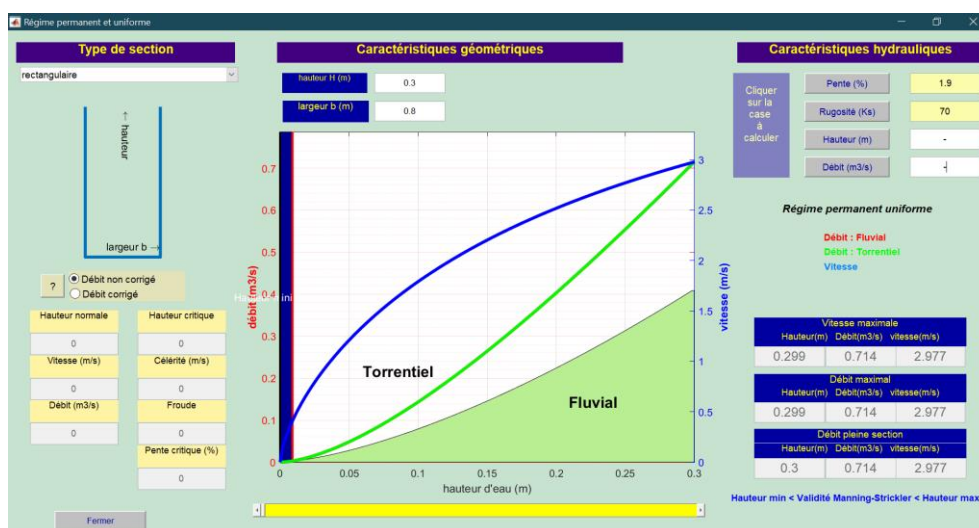


Figure 11. Détermination du régime d'écoulement et du débit capable de la conduite aval déversée.

D'après le calcul théorique des débits déversés à partir de la relation de Kindsvater et Carter (cf. paragraphe 2.3.3), les déversements sont au maximum de 0,15 m³/s pour une hauteur de lame déversante de l'ordre d'environ 19 cm. Cela laisse à penser que la conduite de décharge devrait influencer le déversement par-dessus le seuil. Par ailleurs, ce risque ne peut être totalement exclu compte-tenu des débits déversés obtenus par les simulations 1D (cf. Tableau 2) qui peuvent être très nettement supérieurs à 0,15 m³/s à partir d'une pluie de période de retour 1 mois.

Par ailleurs, l'engorgement du seuil peut être également favorisé compte-tenu du rétrécissement de la section de passage au droit de la crête.

Ainsi, le risque d'engorgement du seuil par l'aval déversé est qualifié ici de fort.

3.4. Perturbation par un obstacle

Aucun coude ni élément de ce type n'est situé à proximité en amont du déversoir d'orage.

3.5. Perturbation par la vitesse d'engouffrement à l'aval

La conduite aval conservé correspondant en fait à une entrée, ce critère est sans objet ici.

3.6. Ecoulement très bien tranquillisé ?

Au vu de la configuration de l'ouvrage (présence de maçonnerie au droit de la sortie du collecteur conservé), on peut s'attendre à une surface libre très peu plane en cas de déversement. Cette configuration ne favorise pas un écoulement très bien tranquillisé.

3.7. Incertitudes compatibles avec l'autosurveillance

L'analyse, menée précédemment sur base des données de hauteur collectées par la sonde actuellement en place à l'amont du seuil, permet d'affirmer que les lames déversantes contribuant majoritairement au volume déversé sont suffisamment importantes pour que la mesure soit précise.

3.8. Synthèse de l'analyse préalable

Tableau 5 : Bilan de l'analyse hydraulique du déversoir d'orage.

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

Au vu de l'analyse hydraulique, il ressort que les conditions de fonctionnement hydraulique au droit du déversoir sont favorables à une mesure fiable de hauteur d'eau et à une conversion de la hauteur en débit. Néanmoins, certains éléments complexifient l'obtention de la relation hauteur – débit : risque d'influence aval de l'aval conservé ou de la conduite de décharge ou du milieu naturel sur le seuil, perturbation de la surface libre par la complexité de la géométrie du radier de la chambre et hétérogénéité de la hauteur du seuil selon la largeur.

Un aménagement de la crête semble pertinent dans la mesure où la hauteur du seuil n'est pas uniforme selon la largeur d'après les relevés de terrain.

3.9. Aménagement préconisé du seuil du déversoir d'orage

L'aménagement préconisé a pour objectif de disposer d'une crête régulière et horizontale sur toute sa longueur de déversement afin de s'affranchir de l'hétérogénéité de la hauteur de pelle amont qui ne permet pas de garantir une limite de déversement précise (augmentation des incertitudes de mesure notamment pour les faibles lames déversantes).

L'aménagement conseillé du déversoir est le suivant :

- D'après les relevés de terrain effectués par 3D EAU, en situation actuelle, un écart de 2 cm est constaté entre le point le plus bas de la crête et le point le plus haut (cf. courbe rouge sur la Figure 12).

- ⦿ L'arrête supérieure de la lame inox, constituant le haut de la crête du déversoir, est modifiée afin de garantir une horizontalité selon la largeur de la crête.
- ⦿ La hauteur de pelle amont doit être identique à gauche, au centre et à droite du seuil.
- ⦿ Le niveau du seuil doit être mis à l'horizontale (courbe violette sur la Figure 12) de telle sorte que la hauteur du seuil par rapport au radier de la chambre (courbe bleue sur la Figure 12) en amont immédiat soit de 7,5 cm.

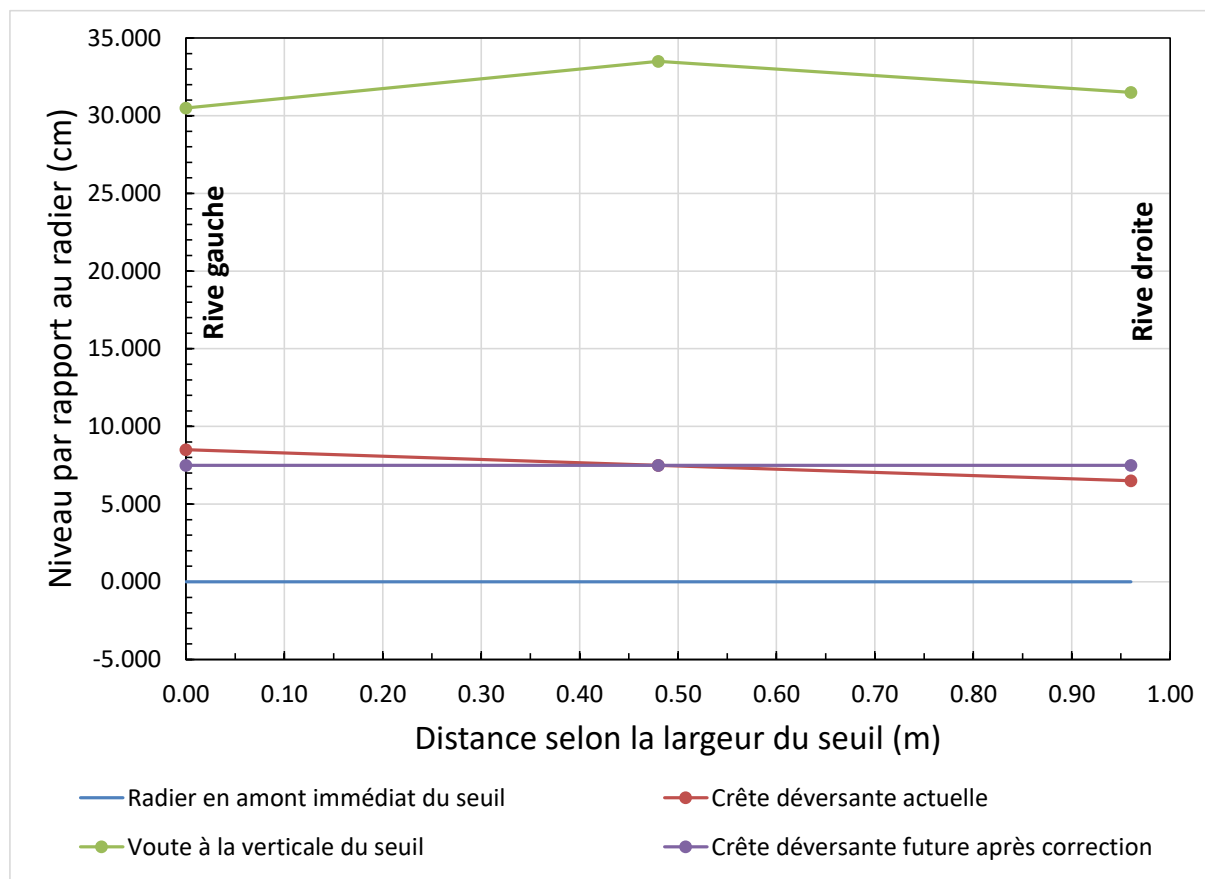


Figure 12. Evolution du niveau de la crête selon la largeur du seuil en situation actuelle (courbe rouge) et après aménagements (courbe violette).

Remarque importante : La modélisation hydraulique 3D est mise en œuvre dans la suite de l'étude en tenant compte de la modification préconisée de la crête (crête horizontale avec une hauteur de pelle amont constante selon la largeur de 7,5 cm).

3.10. Méthodologie pour fiabiliser la mesure de débit

Compte-tenu du fonctionnement du système, nous préconisons la modélisation numérique du déversoir en 3D afin d'y reconstituer l'écoulement hydraulique et d'établir la relation d'étalonnage pour relier la hauteur d'eau au débit.

4. MODELISATION HYDRAULIQUE 3D

L'analyse hydraulique précédente a présenté les caractéristiques géométriques de l'ouvrage d'après les données collectées. Ainsi le DO16 Degombert est modélisé en considérant les dimensions présentées précédemment et la correction de la crête du seuil (cf. paragraphe 3.9).

4.1. Construction du modèle 3D

La géométrie exacte du DO16 Degombert est reproduite numériquement dans le modèle (cf. Figure 13) en intégrant la chambre de déversement dans son ensemble et une partie des conduites amont et aval. En vert sont représentées les surfaces d'injection des effluents. La surface rouge correspond à la surface de sortie de l'écoulement. Les surfaces grises en transparence représentent les parois de l'ouvrage. Enfin, les surfaces jaunes correspondent aux plafonds du modèle où est maintenue une pression atmosphérique.

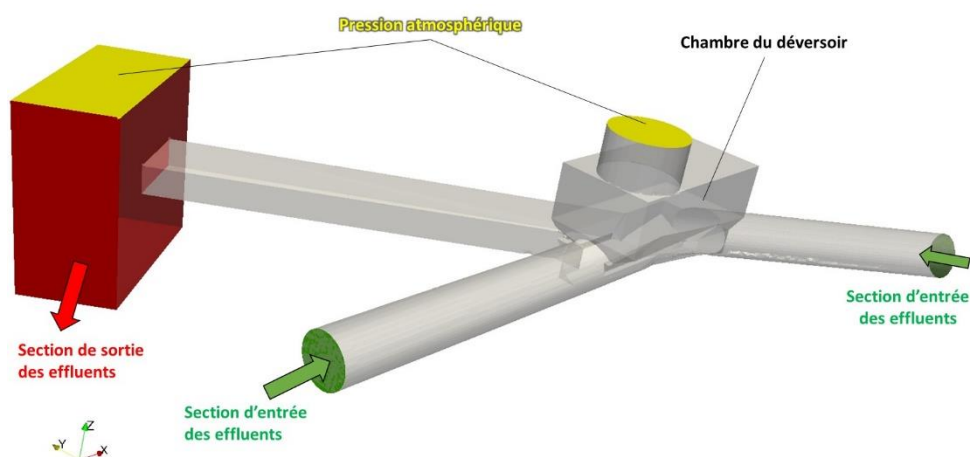


Figure 13. Vue de la géométrie du modèle.

4.2. Maillage de la géométrie

Suite à la construction de la géométrie, le modèle est maillé en cellules élémentaires de calcul. Cette étape est déterminante pour la réussite des calculs, il s'agit de discrétiser la géométrie en un grand nombre de cellules de calcul au sein desquelles les équations de la mécanique des fluides seront résolues. Notre solution logicielle permet de mailler la géométrie créée et met à disposition plusieurs méthodes et types de maillage (pavé, tétraèdre...).

Les maillages utilisés pour cette étude comprennent entre 1 332 000 et 3 487 000 cellules. La taille des mailles est choisie de façon à garantir un résultat précis. Des cellules de 3,1 cm de côté sont générées sur l'ensemble de la géométrie. Un raffinement spécifique est réalisé dans la chambre du déversoir afin de minimiser l'incertitude numérique (incertitude liée au maillage). Des cellules de 1,6 cm de côté sont créées pour ce raffinement. Par ailleurs un traitement supplémentaire est effectué dans le maillage au niveau de la zone en amont

immédiat de la crête déversante afin de capturer les courbures de la surface libre. Pour ce faire, des cellules allant de 0,4 cm à 0,8 cm selon les scénarios modélisés sont utilisées. Le maillage est illustré par les Figure 14 et Figure 15.

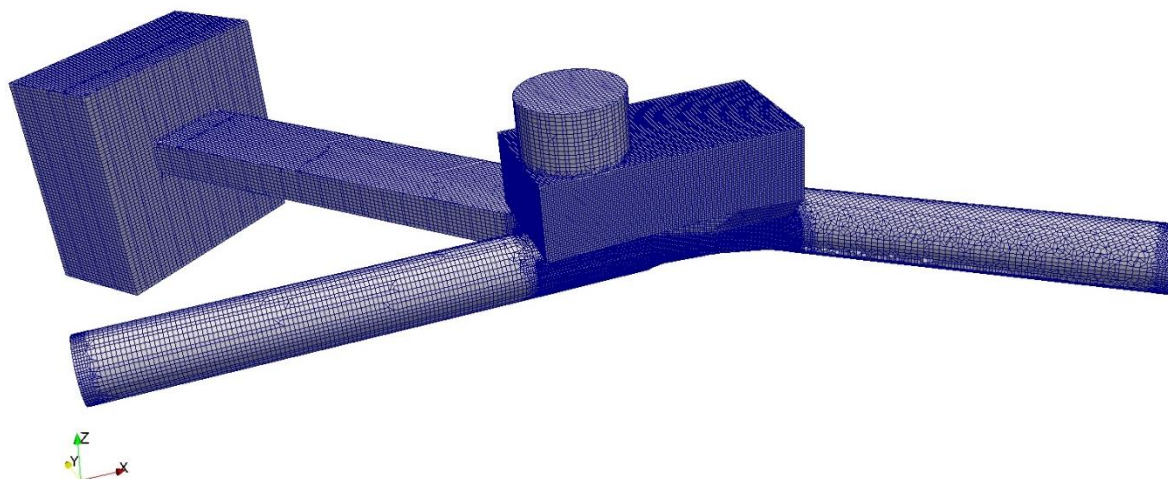


Figure 14. Maillage utilisé pour les simulations numériques 3D : vue globale de l'ouvrage.

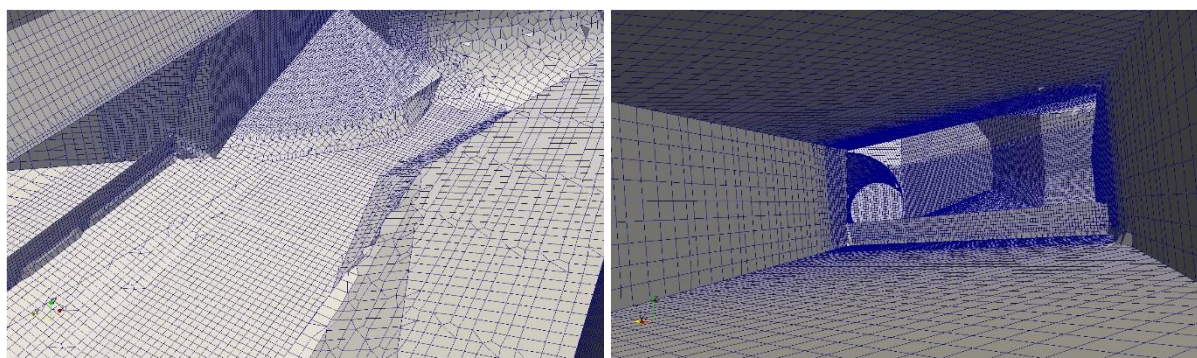


Figure 15. Maillage utilisé pour les simulations numériques 3D : vue intérieure de l'ouvrage depuis l'entrée amont (image de gauche) et vue intérieure de l'ouvrage depuis la conduite aval déversé (image de droite).

4.3. Paramètre du modèle

Les conditions aux limites sont définies de la façon suivante : vitesse d'eau en entrée afin de reproduire le débit amont souhaité, vitesse d'eau en sortie afin de reproduire le débit aval conservé souhaité (ici les valeurs de débit seront négatives du fait du fonctionnement en sens inverse du réseau de la rue Degombert), pression atmosphérique sur le toit du domaine, et condition « mur » sur les parois de l'ouvrage avec des lois de paroi standard. Une hauteur d'eau a été imposée à l'aval déversé afin de représenter l'influence du milieu naturel. Dans le cas contraire, la sortie est laissée libre compte-tenu de la forte pente de la conduite de décharge. Le modèle Volume of Fluid est sélectionné pour reproduire la surface libre. Quant à l'impact de la turbulence sur l'écoulement, elle est modélisée au moyen du modèle k- ω SST. Il n'y a aucun paramètre de calage dans cette démarche.

4.4. Liste des simulations effectuées

Pour le cas du DO Degombert, un total de 12 simulations est mené (cf. Tableau 6) en faisant varier les conditions d'alimentation en débit du déversoir. Chaque simulation correspond à une hypothèse de débit déversé et de niveau d'influence aval.

Tableau 6 : Liste des simulations effectuées.

Simulation	Description	Aval déversé	Amont	Aval conservé
Nom	Phase	Hauteur de la Savoureuse p/r au seuil (m)	Débit entrée (m³/s)	Débit aval conservé (m³/s)
Sim1	Autosurveillance sans influence aval de la Savoureuse	-	0.002	-0.100
Sim2		-	0.006	-0.495
Sim3		-	0.001	-0.039
Sim4		-	0.013	-0.620
Sim5		-	0.015	-0.750
Sim6		-	0.004	-0.200
Sim7		-	0.006	-0.300
Sim8	Autosurveillance avec influence aval de la Savoureuse	0.15	0.002	-0.100
Sim9		0.15	0.006	-0.300
Sim10		0.30	0.006	-0.300
Sim11		0.30	0.002	-0.100
Sim12		0.54	0.006	-0.300

- Les simulations Sim1 à Sim7 correspondent à un mode de fonctionnement correspondant à un niveau bas de la Savoureuse. Pour chacune de ces simulations, la condition aux limites aval correspond à une sortie libre (cas d'un débit correspondant à une pente forte).
- Les simulations Sim8 à Sim12 représentent un mode de fonctionnement avec influence aval potentielle de la Savoureuse. Sachant que l'altitude du seuil est de 355,31 m NGF, 3 niveaux différents d'influence aval sont testés : 355,46 m NGF, 355,61 m NGF et 355,85 m NGF (respectivement des niveaux de la Savoureuse supérieurs de 15 cm, 30 cm et 54 cm par rapport au niveau du seuil).



Les hypothèses de débit testées dans les simulations tiennent compte des différents scénarios d'alimentation hydraulique du déversoir. Les différentes configurations hydrauliques testées permettent d'attendre un débit déversé variant entre 0,040 m³/s et 0,765 m³/s. Par ailleurs, l'ouvrage est modélisé en considérant deux modes de fonctionnement hydraulique : avec et sans influence aval de la Savoureuse.

5. RESULTATS ET ANALYSE DES SIMULATIONS 3D

5.1. Convergence des calculs

Pour assurer la bonne convergence des calculs, le bilan de masse, qui est la différence entre la quantité d'eau à l'entrée et à la sortie de l'ouvrage modélisé, doit converger vers zéro et être le plus stable possible. Toutes les simulations pour cet ouvrage ont un bilan de masse largement inférieur à 5 %, ce qui garantit une bonne convergence des calculs. Cette démarche de validation de la convergence est menée pour l'ensemble des simulations.

5.2. Visualisation de la surface libre

La visualisation de la surface libre permet de décrire l'écoulement dans l'ouvrage. Les résultats sont présentés avec une palette de couleur représentative de la hauteur de lame déversante. Cela signifie que le zéro de l'échelle utilisée correspond à l'altitude du seuil du déversoir. Les hauteurs de lame déversante sont exprimées en mètres. Sur chaque figure, l'écoulement s'effectue de la droite vers la gauche pour le collecteur DN500 amont et de la gauche vers la droite pour le collecteur DN500 aval conservé. Les traits noirs sur la surface libre correspondent à des courbes de niveau dont le pas d'espace vertical est de 1 cm. A noter que les parois de l'ouvrage sont représentées en transparence pour des raisons de lisibilité.

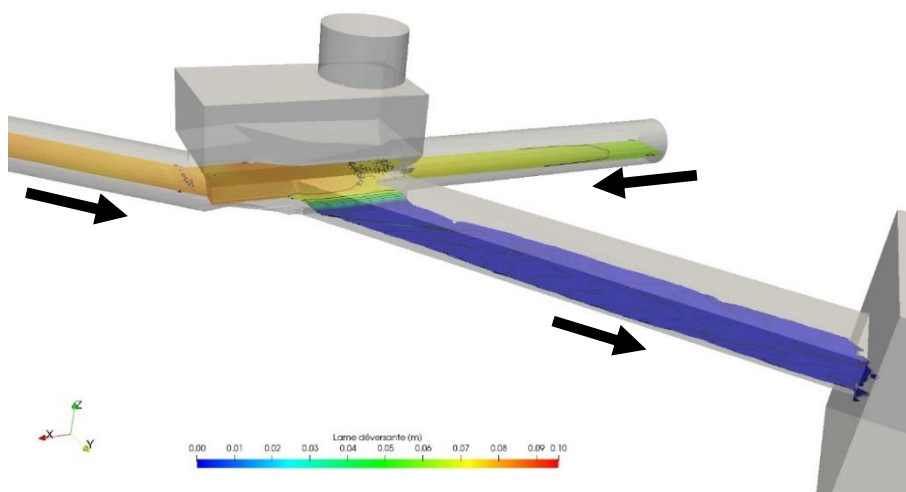


Figure 16. Résultats 3D : surface libre pour un débit déversé de 0,040 m³/s (Sim3).

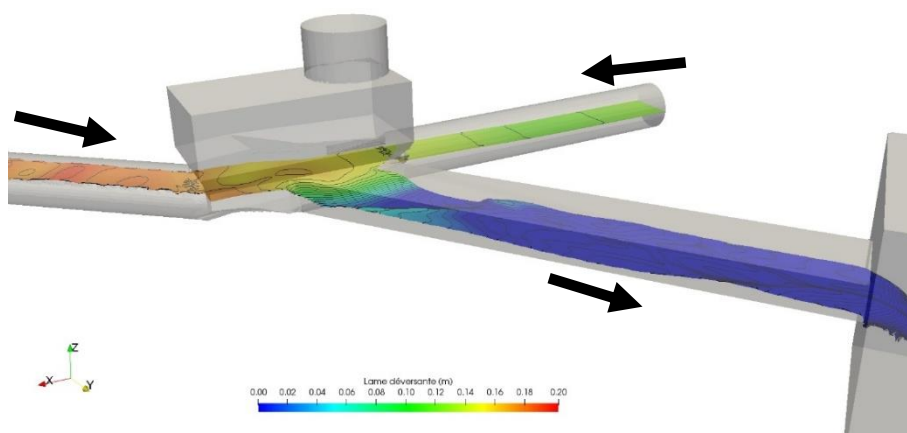


Figure 17. Résultats 3D : surface libre pour un débit déversé de 0,102 m³/s (Sim1).

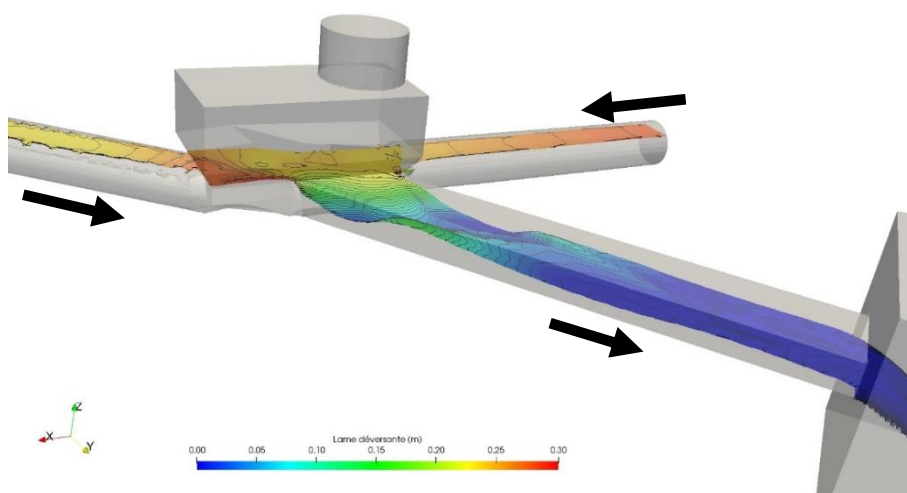


Figure 18. Résultats 3D : surface libre pour un débit déversé de 0,204 m³/s (Sim6).

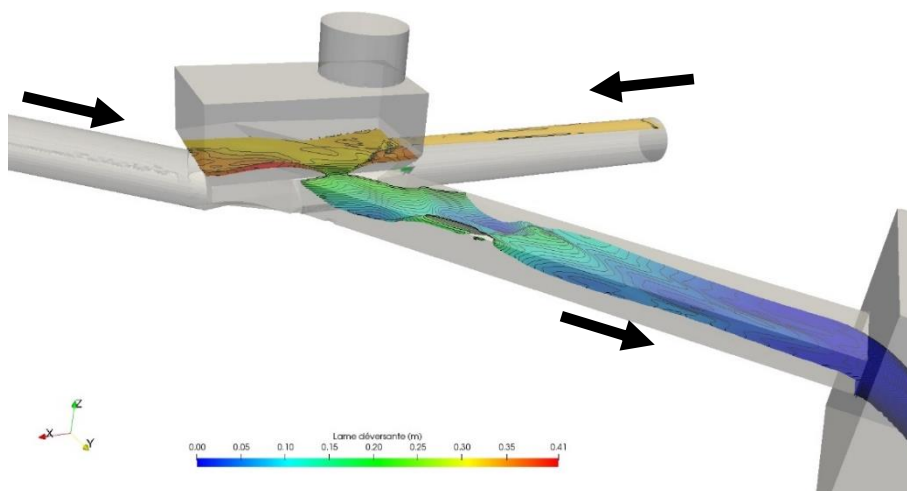


Figure 19. Résultats 3D : surface libre pour un débit déversé de 0,306 m³/s (Sim7).

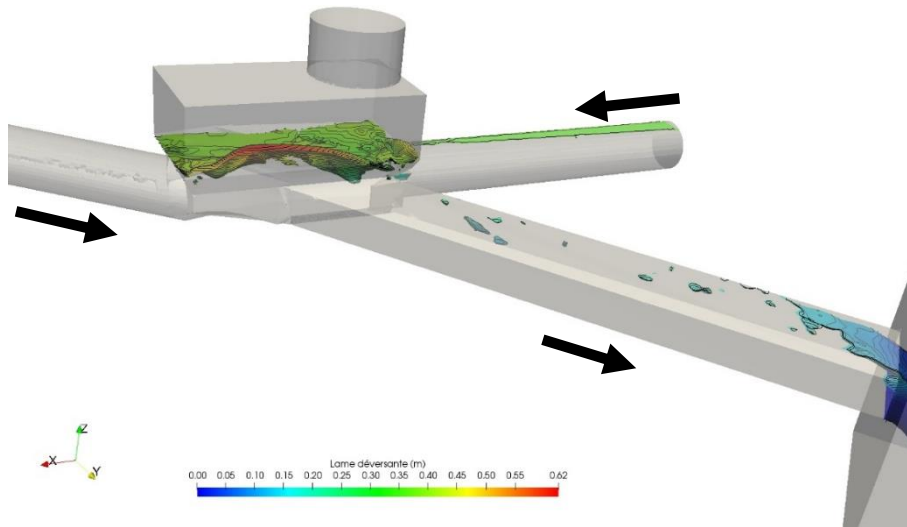


Figure 20. Résultats 3D : surface libre pour un débit déversé de 0,501 m³/s (Sim2).

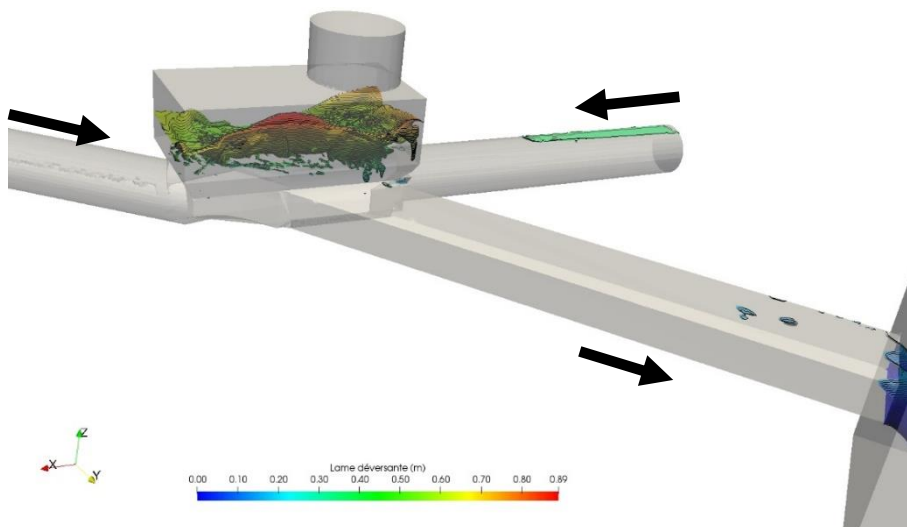


Figure 21. Résultats 3D : surface libre pour un débit déversé de 0,633 m³/s (Sim4).

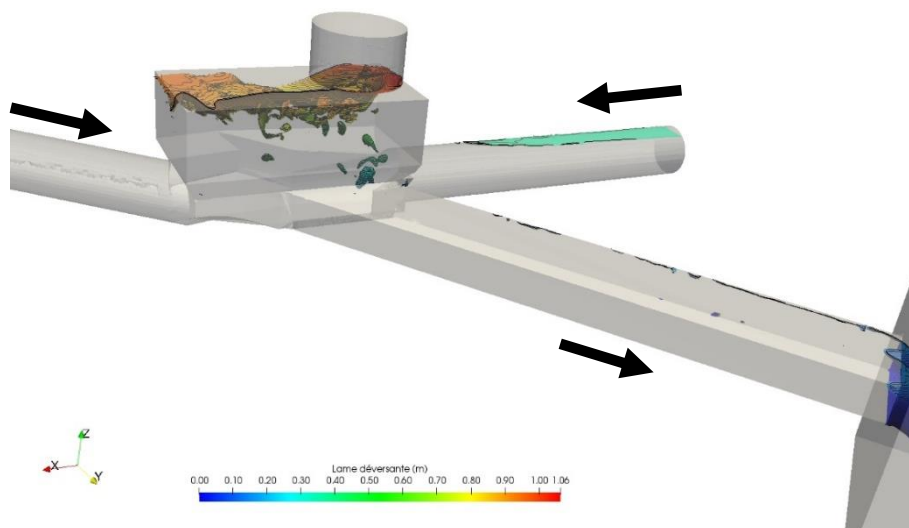


Figure 22. Résultats 3D : surface libre pour un débit déversé de $0,765 \text{ m}^3/\text{s}$ (Sim5).

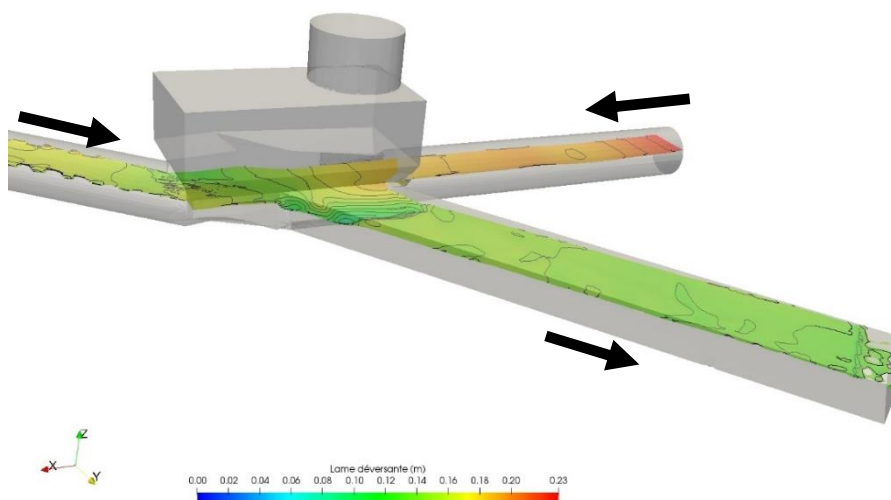


Figure 23. Résultats 3D : surface libre pour un débit déversé de $0,102 \text{ m}^3/\text{s}$ et un niveau de la Savoureuse supérieur de 15 cm par rapport à la crête déversante (Sim8).

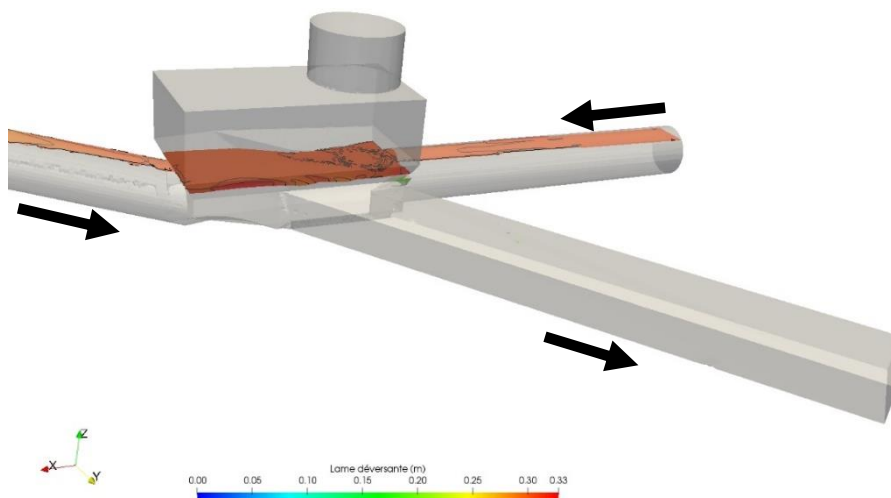


Figure 24. Résultats 3D : surface libre pour un débit déversé de $0,102 \text{ m}^3/\text{s}$ et un niveau de la Savoureuse supérieur de 30 cm par rapport à la crête déversante (Sim11).

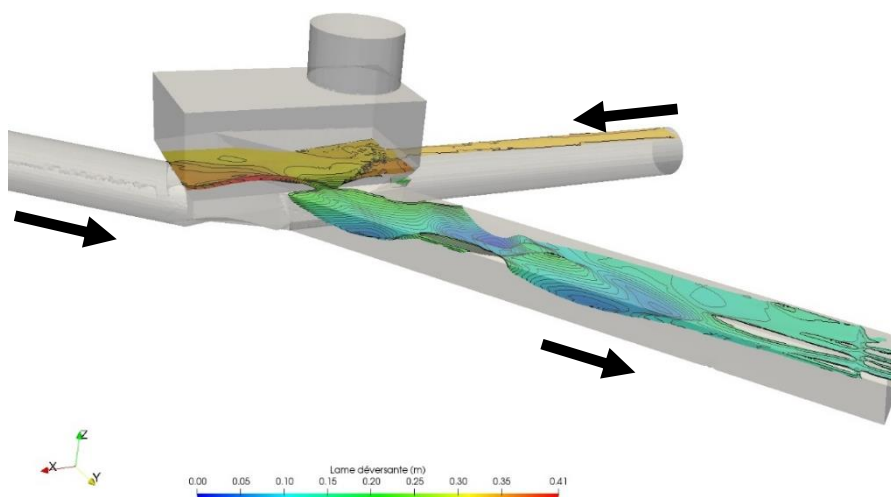


Figure 25. Résultats 3D : surface libre pour un débit déversé de $0,306 \text{ m}^3/\text{s}$ et un niveau de la Savoureuse supérieur de 15 cm par rapport à la crête déversante (Sim9).

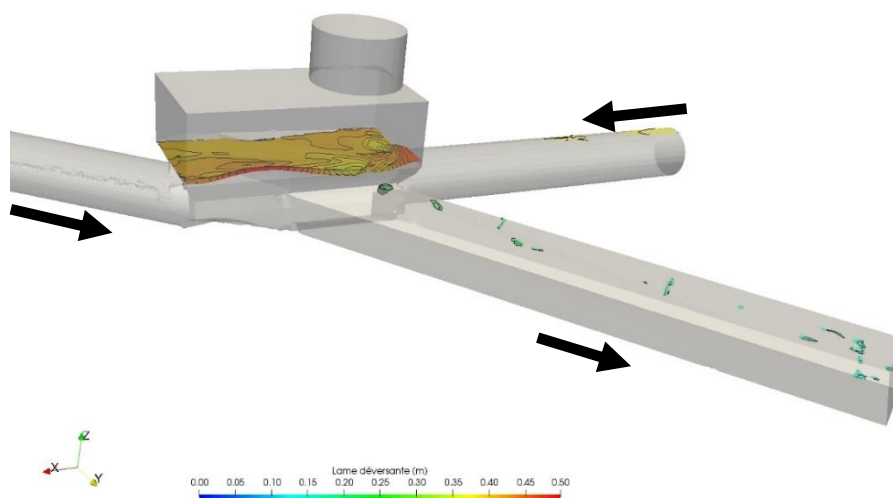


Figure 26. Résultats 3D : surface libre pour un débit déversé de $0,306 \text{ m}^3/\text{s}$ et un niveau de la Savoureuse supérieur de 30 cm par rapport à la crête déversante (Sim10).

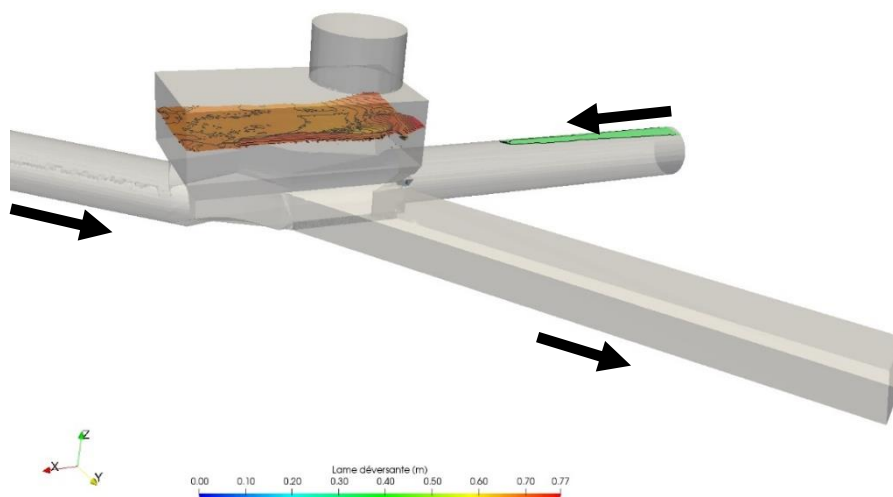


Figure 27. Résultats 3D : surface libre pour un débit déversé de $0,306 \text{ m}^3/\text{s}$ et un niveau de la Savoureuse supérieur de 54 cm par rapport à la crête déversante (Sim12).

5.3. Lames déversantes et débits

Pour chaque simulation effectuée, les résultats suivants sont extraits (Tableau 7) :

- Le débit déversé ;
- La hauteur de lame déversante à l'amont du seuil (h_1), correspondant au niveau d'eau dans la chambre ;
- La hauteur de lame déversante à l'aval du seuil (h_2), correspondant au niveau d'eau entre l'aval du seuil et le début de la conduite de décharge (cette hauteur est utile à l'analyse hydraulique, elle ne correspond cependant pas à un emplacement qui doit être mesuré) ;

- La hauteur de la Savoureuse (h_3).

Tableau 7 : Résultats 3D : hauteurs de lame déversante et débits rejetés.

Simulation	Description	Conditions aux limites			Résultats 3D			
Nom	Phase	Hauteur de la Savoureuse p/r au seuil (m)	Débit entrée amont (m^3/s)	Débit aval conservé (m^3/s)	Débit aval déversé (m^3/s)	Lame déversante amont seuil h_1 (m)	Lame déversante aval seuil h_2 (m)	Hauteur milieu naturel h_3 (m)
Sim1	Autosurveillance sans influence aval de la Savoureuse	-	0.002	-0.100	0.102	0.147	0.051	-
Sim2		-	0.006	-0.495	0.501	0.378	0.225	-
Sim3		-	0.001	-0.039	0.040	0.076	-0.034	-
Sim4		-	0.013	-0.620	0.633	0.508	0.228	-
Sim5		-	0.015	-0.750	0.765	0.969	0.234	-
Sim6		-	0.004	-0.200	0.204	0.237	0.169	-
Sim7		-	0.006	-0.300	0.306	0.318	0.237	-
Sim8	Autosurveillance avec influence aval de la Savoureuse	0.15	0.002	-0.100	0.102	0.173	0.124	0.150
Sim9		0.15	0.006	-0.300	0.306	0.319	0.237	0.150
Sim10		0.30	0.006	-0.300	0.306	0.395	0.235	0.300
Sim11		0.30	0.002	-0.100	0.102	0.305	0.237	0.300
Sim12		0.54	0.006	-0.300	0.306	0.661	0.237	0.540

Les hauteurs sont exprimées en mètre et en lame déversante, c'est-à-dire que le niveau de référence correspond à l'altitude la crête du déversoir. En effet, la relation hauteur-débit que l'on souhaite établir fait intervenir le tirant d'eau au-dessus du niveau du déversoir et non la hauteur d'eau totale à l'amont. Les débits sont exprimés en mètres cube par seconde et sont extraits à l'issue des simulations (convergence des calculs atteinte).

La Figure 28 propose une représentation graphique des résultats obtenus. L'évolution du débit déversé est tracée en fonction de la hauteur de lame déversante amont (h_1). Pour des débits déversés compris entre $0,040 m^3/s$ et $0,765 m^3/s$, les hauteurs de lame déversante amont (h_1) varient entre 7,6 cm et 96,9 cm.

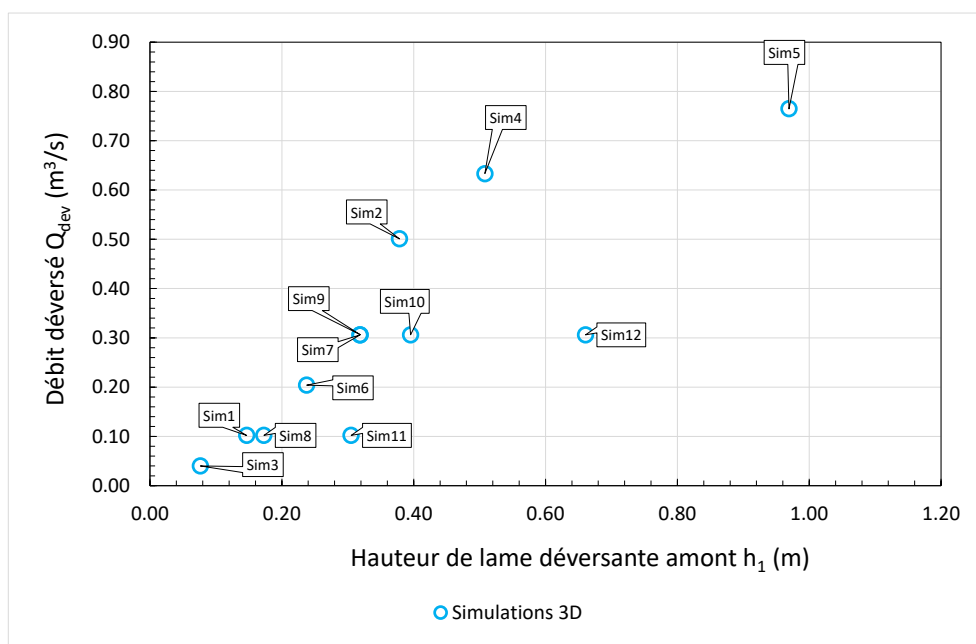


Figure 28. Résultats 3D : évolution du débit déversé en fonction de la hauteur de lame déversante à l'amont du seuil h_1 .

5.4. Analyse phénoménologique

Cette partie propose une analyse phénoménologique du fonctionnement hydraulique de l'ouvrage selon les différents scénarios testés numériquement. Cette analyse doit mener à l'identification des modes de fonctionnement du déversoir ; lesquels serviront de base à l'élaboration des relations d'étalonnage pour l'autosurveillance.

5.4.1. Comportement hydraulique dans le déversoir

Comme anticipé avec l'analyse hydraulique, on peut constater sur les illustrations de la Figure 16 à la Figure 27 qu'un régime d'écoulement fluvial parvient à s'imposer dans l'ouvrage. On le constate par exemple au niveau du seuil qui provoque une élévation locale du niveau d'eau, élévation qui se répercute vers l'amont du réseau. L'écoulement est donc fluvial dans le déversoir. Ceci se traduit, pour les débits faibles à moyens, par des surfaces libres présentant peu de perturbations du niveau d'eau comme nous le verrons ci-après.

Par ailleurs, les résultats mettent en évidence une relation univoque entre le débit déversé et la hauteur de lame déversante. En effet, il existe une seule valeur de lame déversante pour un débit rejeté. Il y a donc une relation bijective entre le débit et la hauteur de lame déversante. Cette bijectivité est observée pour toutes les simulations où la Savoureuse est basse (Sim1 à Sim7). Toutefois, on dénote deux modes de fonctionnement hydrauliques pour le seuil qui peut être dénoyé ou noyé par l'engouffrement de la conduite de décharge au droit du seuil (hauteur de la conduite de décharge inférieure à la hauteur totale de la chambre du déversoir).

A titre d'exemple, la Figure 29 présente un cas où le seuil est dénoyé. Le niveau d'eau en amont immédiat du seuil est indépendant du niveau à l'aval. En effet, le niveau à l'amont de la conduite de décharge demeure sous le niveau de crête.

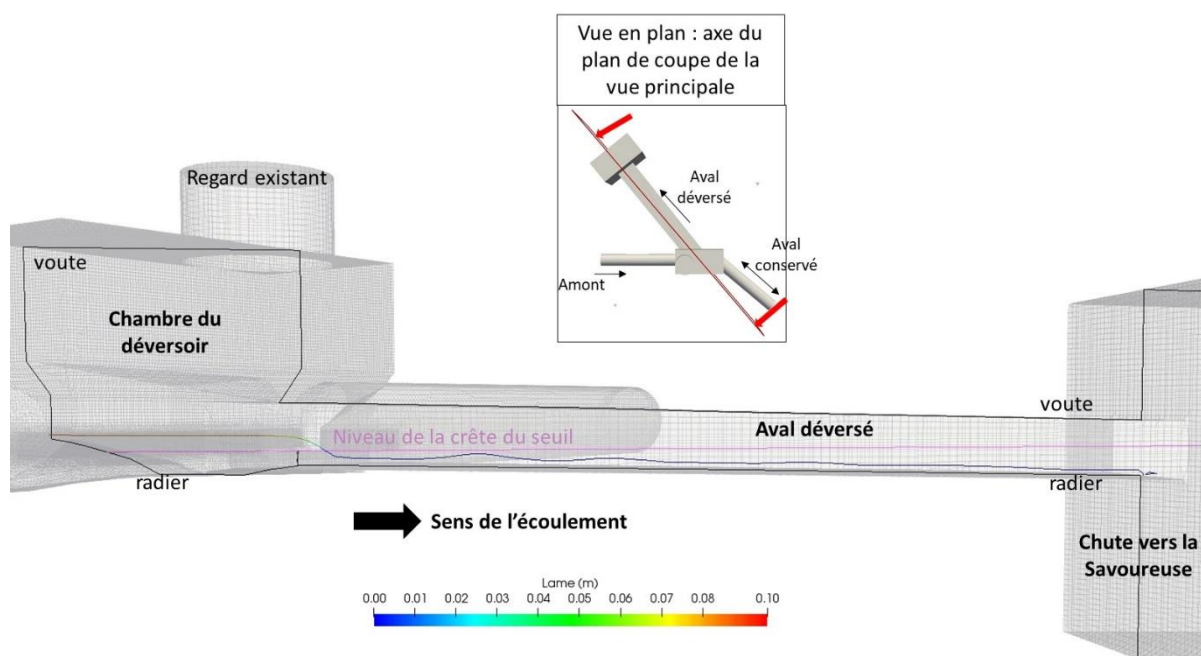


Figure 29. Résultats 3D : coupe transversale de la surface libre pour un débit déversé de $0,040 \text{ m}^3/\text{s}$ (Sim3).

A l'inverse, la Figure 30 illustre un fonctionnement noyé du seuil. Le niveau d'eau aval influence le niveau d'eau amont. La surface libre à l'aval immédiat du seuil est supérieure au niveau de la crête, traduisant l'envoie du seuil par la conduite de décharge.

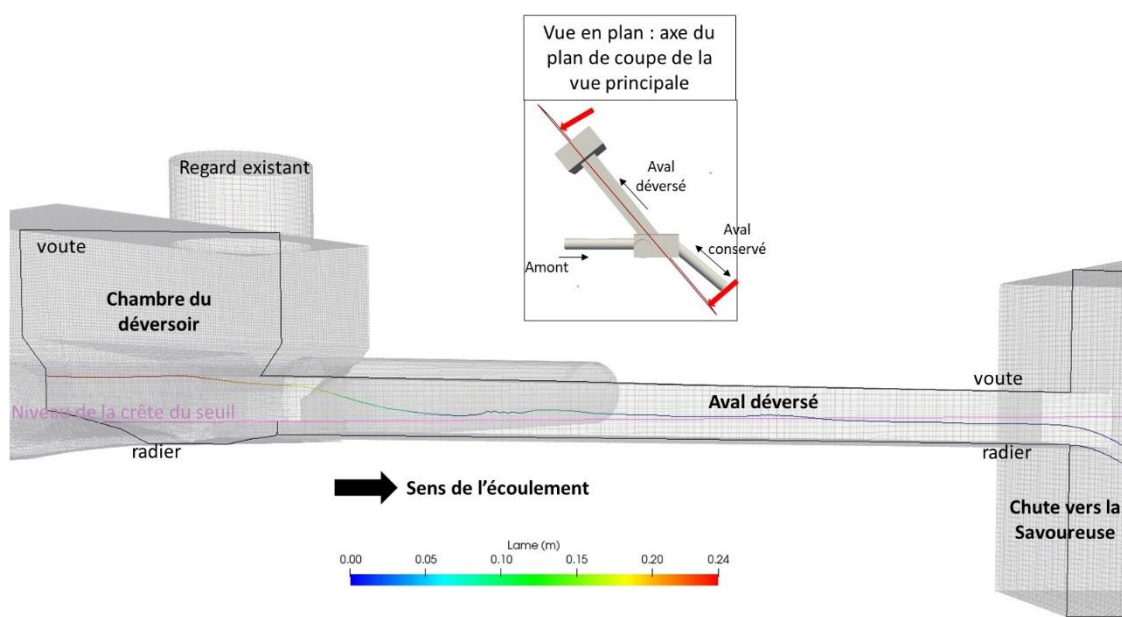


Figure 30. Résultats 3D : coupe transversale de la surface libre pour un débit déversé de $0,204 \text{ m}^3/\text{s}$ (Sim6).

5.4.2. Influence aval

Cinq simulations sont menées en considérant un niveau aval haut. Le Tableau 6 au paragraphe 4.4 propose un récapitulatif des influences aval testés dans les simulations 3D. Trois influences aval sont testées correspondant à des niveaux du milieu naturel supérieurs de 15 cm, 30 cm et 54 cm par rapport à la cote altimétrique du seuil du déversoir. La Figure 31 rappelle les résultats 3D obtenus. Les cercles bleus correspondent à des simulations sans influence aval et les carrés oranges indiquent les résultats où un niveau haut a été imposé à l'aval déversé. La courbe noire fournit une tendance quant à la relation entre la hauteur et le débit déversé dans le cas où il n'y a pas d'influence aval.

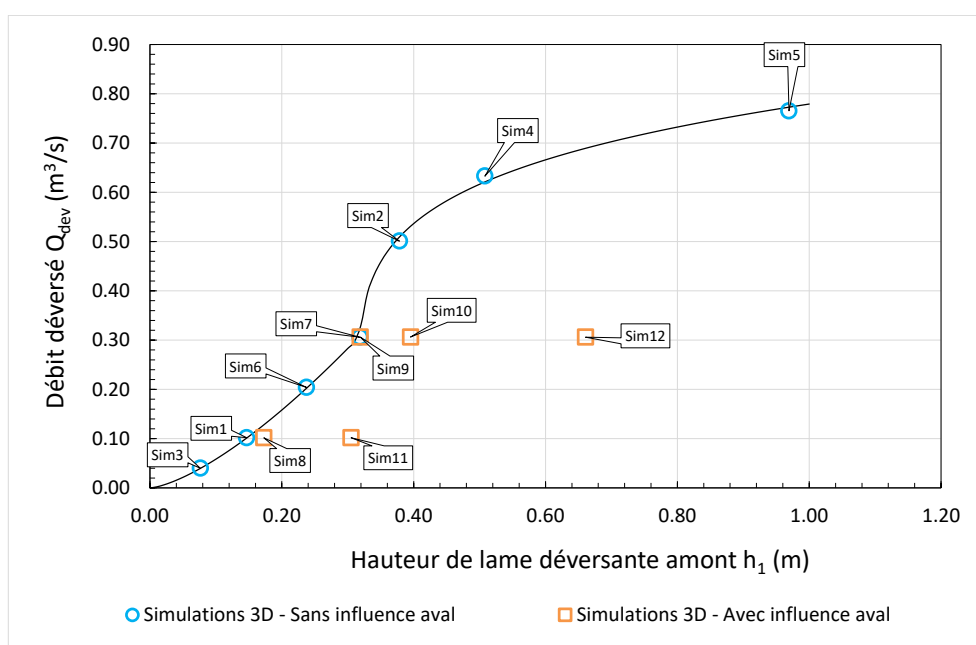


Figure 31. Résultats 3D : évolution du débit déversé en fonction de la hauteur de lame déversante à l'amont du seuil h_1 – Présentation des résultats selon le scénario hydraulique modélisé.

Malgré un niveau haut de la Savoureuse (15 cm) dans le calcul 3D, la simulation Sim9 est très proche des résultats obtenus sans niveau d'eau imposé à l'aval (faibles écarts avec la courbe noire). A ce stade de l'analyse, cela nous amène à penser que l'écoulement au droit du système « seuil + conduite de décharge » s'effectue quand même de façon dénoyé vis-à-vis du milieu naturel malgré une Savoureuse haute. Cette simulation permet de quantifier le niveau d'eau aval à partir duquel ce dernier devient impactant sur l'évaluation du débit.

La Sim10 s'écarte des résultats obtenus sans niveau d'eau imposé à l'aval (écart plus important avec la courbe noire). Avec un très haut niveau de la Savoureuse (30 cm plus haut que le niveau de la crête déversante), la hauteur de lame déversante est de 39,5 cm pour un débit déversé de 0,306 m^3/s . Ce résultat peut être comparé à la Sim7 (Savoureuse très basse) qui correspond au même débit déversé. Pour la Sim7, la lame déversante est de 31,8 cm. L'augmentation de la

lame déversante (Sim10 > Sim7) pour un même débit déversé valide l'impact de l'influence aval de la Savoureuse sur l'écoulement au droit du seuil. Ce dernier s'effectue dès lors de façon noyée par rapport au milieu naturel.

Le même constat peut être établi pour :

- Les Sim8 et Sim11 en comparaison de la Sim1 : avec un niveau haut de la Savoureuse (respectivement 15 cm et 30 cm plus haut que le niveau de la crête déversante), les hauteurs de lame déversante sont respectivement de 17,3 cm et 30,5 cm pour un débit déversé de 0,102 m³/s, soit 2,6 cm et 15,8 cm plus haut que le cas avec un niveau très bas du milieu naturel (Sim1) ;
- La Sim12 en comparaison de la Sim7 : une augmentation de lame déversante de 34,2 cm est relevée du fait du niveau haut de la Savoureuse à l'aval du système (54 cm plus haut que le niveau de la crête déversante pour la Sim12).

Ainsi, la Savoureuse est le point de contrôle hydraulique de l'écoulement pour les simulations Sim8 à Sim12 à l'exception de la Sim9.

5.5. Conclusions des résultats de simulations

D'après les résultats de simulations, deux types d'écoulement sont possibles dans l'ouvrage :

- **Cas sans influence aval** : ce cas se présente lorsque le déversement s'effectue avec un niveau d'eau de la Savoureuse qui ne correspond pas à une crue. Le débit n'est dans ce cas pas impacté par le niveau de la Savoureuse et il peut être évalué avec un capteur de niveau situé dans l'ouvrage.
- **Cas avec influence aval** : ce cas est observé quand le déversoir surverse et que le niveau de la Savoureuse est supérieur de 15 cm par rapport au niveau du seuil et que les débits sont faibles. L'écoulement est alors noyé du fait de l'influence aval.



Avec un régime d'écoulement fluvial, la possibilité d'une influence du milieu naturel sur les déversements et un fonctionnement en sens opposé du réseau aval conservé, ce déversoir présente un fonctionnement hydraulique complexe. Une solution d'instrumentation avec deux capteurs est proposée par la suite.

6. ELABORATION DE L'AUTOSURVEILLANCE

6.1. Présentation de la solution de mesure

A l'issue du diagnostic hydraulique et de l'analyse des résultats de simulations, 3D EAU préconise la solution de mesure suivante :

- **Cas sans influence aval** : l'information de débit est portée par le niveau d'eau dans le déversoir, un seul capteur suffit.
- **Cas avec influence aval** : un second capteur est nécessaire pour tenir compte de l'élévation de la ligne d'eau du fait du fort niveau aval.

6.2. Position des capteurs de mesure de hauteur d'eau

Au regard de l'unicité des surfaces libres et de leur stabilité dans le temps et dans l'espace, les préconisations suivantes sont proposées pour l'installation des futurs capteurs de mesure en amont (dans la chambre du déversoir) et en aval (au droit du rejet dans la Savoureuse). Les capteurs auront pour objectif de mesurer la hauteur de lame déversante à l'amont du déversoir et la hauteur aval au droit du rejet de la Savoureuse.

6.2.1. Capteur amont

En situation actuelle, le site est déjà équipé d'une sonde de mesure du niveau d'eau de type US dans la chambre du déversoir (cf. Figure 32). **3D EAU recommande de conserver cette sonde pour la mesure de la hauteur de lame déversante en amont de la crête.** La relation hauteur-débit élaborée par la suite et présentée dans le chapitre suivant est élaborée pour l'emplacement actuel de la sonde car le niveau d'eau n'est pas uniforme dans l'ouvrage lors d'un déversement.



Figure 32. Capteur de niveau d'eau actuel situé dans la chambre DO16 Degombert en amont de la crête déversante (Source : 3D EAU).

La Figure 33 rappelle la position actuelle de la sonde dans la chambre du déversoir.

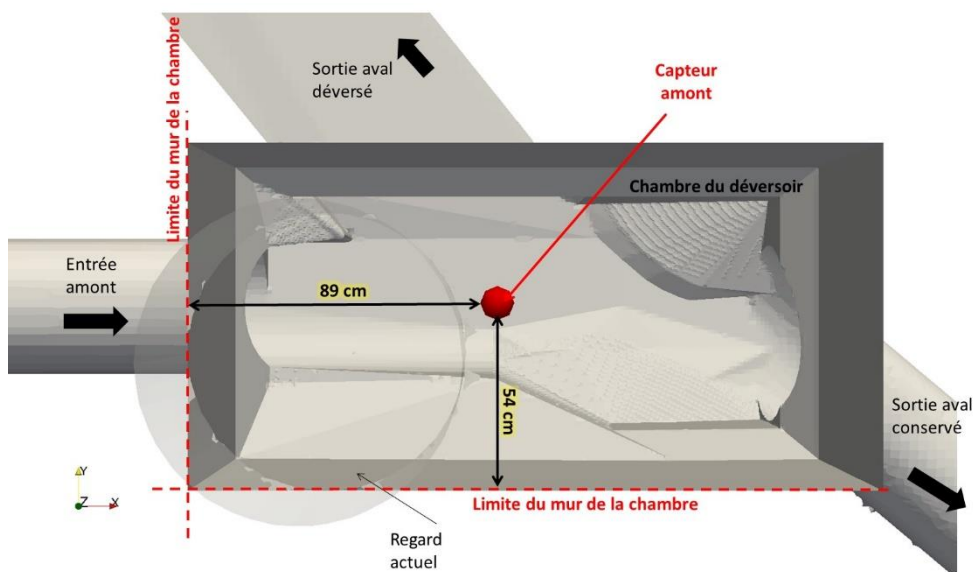


Figure 33. Localisation actuelle du capteur amont de hauteur d'eau.

Le zéro du capteur devra être corrigé par rapport au zéro actuellement renseigné dans l'instrumentation. En effet, 3D EAU recommande que l'horizontalité de la crête soit corrigée de telle sorte que le niveau de la crête soit uniforme sur toute la largeur du seuil (cf. Figure 34).

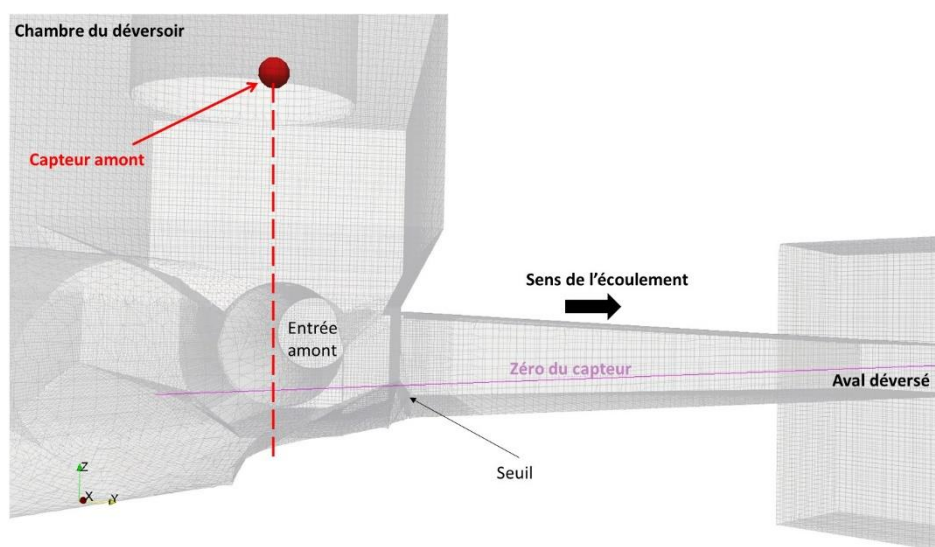


Figure 34. Définition du zéro du capteur de hauteur d'eau.

6.2.2. Capteur aval

3D EAU préconise d'installer le capteur aval de hauteur d'eau à l'aval du rejet dans la Savoureuse tel que défini par la Figure 35. Le zéro du capteur est identique au zéro du capteur amont (cf. paragraphe 6.2.1), c'est-à-dire le niveau de la crête du déversoir.

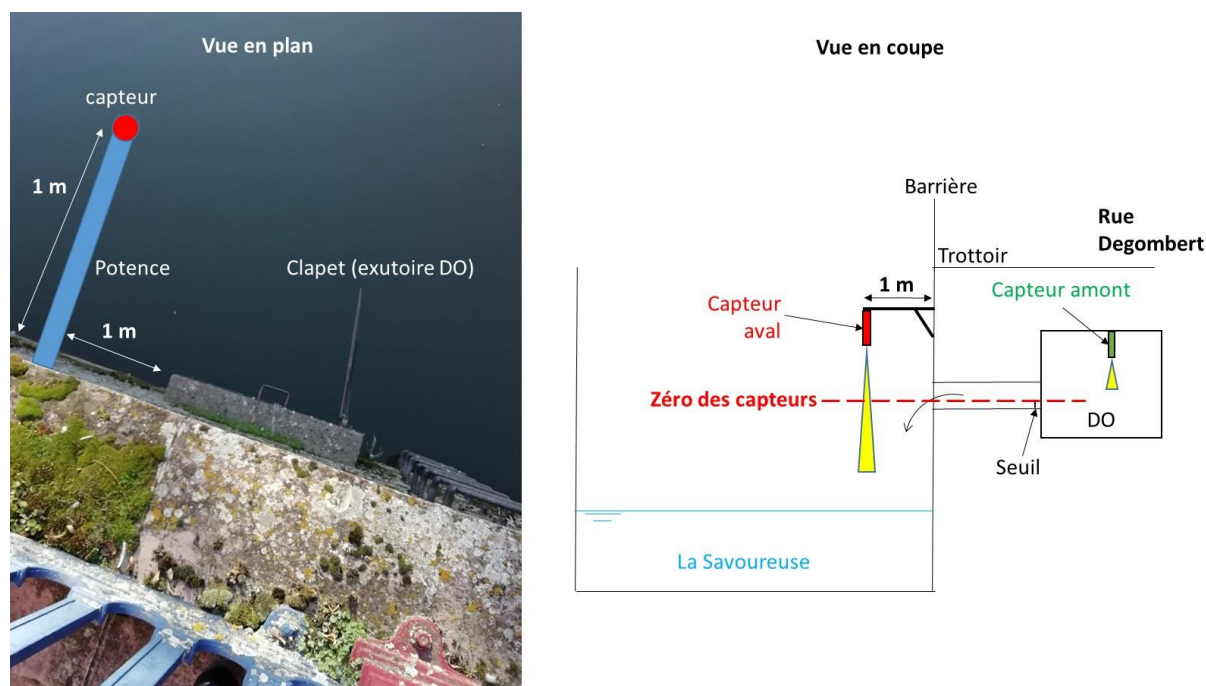


Figure 35. Localisation préconisée du capteur aval de hauteur d'eau et définition du zéro des capteurs de hauteur d'eau.

L'installation de ce futur capteur est associée aux préconisations suivantes :

- Le capteur pourra être fixé au bout d'une potence ou d'un bras articulé à une distance d'au moins 1,00 m du mur de la berge et à au moins 1,00 m de la sortie du clapet pour éviter d'éventuelles perturbations locales de la surface libre en cas de rejet. La distance de 1 m par rapport à la berge pourra être réduite à 50 cm voire moins si la proximité de la paroi ne perturbe pas la mesure du niveau d'eau.
- 3D EAU recommande que le capteur soit placé le plus haut possible, d'une part, pour éviter que le capteur ne soit dans l'eau en cas de crue de la Savoureuse, et d'autre part, pour disposer d'une plage de mesure du niveau de la Savoureuse la plus grande possible.

Remarque : L'emplacement préconisé pour le capteur aval est adapté au contexte de l'ouvrage et aux contraintes du site. En effet, l'installation d'un capteur au niveau du pont Denfert n'est pas envisageable compte-tenu de la présence d'un seuil dans la Savoureuse qui constitue une rupture hydraulique. Par ailleurs, installer le capteur dans un carottage au-dessus de la conduite de décharge risque de conduire à très faibles différences de niveau d'eau entre les deux mesures (niveau DO - niveau aval) ce qui nuirait à une mesure fiable du débit déversé.

6.3. Validation de la position du capteur amont

La position de la sonde doit répondre à plusieurs critères :

- **Unicité de la hauteur d'eau pour un débit donné.** Les surfaces libres pour différents débits ne doivent pas se couper.
- **Stabilité spatiale de la mesure.** La surface libre doit être suffisamment plane pour que la lecture de la hauteur d'eau dans le cône de mesure du capteur soit identique.
- **Stabilité temporelle de la mesure.** La variation de hauteur d'eau au niveau du point de mesure doit être faible au cours du temps, idéalement négligeable par rapport à l'incertitude de mesure du capteur.

6.3.1. Unicité

La première étape consiste à vérifier que l'emplacement du capteur permet de distinguer une variation de débit pour une variation de hauteur d'eau significative. Le Tableau 7 montre que les hauteurs de lame déversante sont bien distinctes, sans influence aval : une hauteur d'eau correspond bien à un seul débit déversé.

6.3.2. Stabilité dans l'espace

Les simulations ont permis de vérifier que l'écoulement est relativement stable au niveau de l'emplacement du futur capteur. Les résultats 3D indiquent que les variations spatiales de la hauteur d'eau au sein du cône de mesure de la sonde à son emplacement futur sont inférieures à 2 cm à l'exception des Sim4 et Sim5. L'emplacement du futur capteur vérifie donc bien la stabilité dans l'espace.

6.3.3. Stabilité dans le temps

La dernière étape de validation de l'emplacement du capteur consiste à vérifier l'invariabilité dans le temps de la surface libre où mesure le capteur. L'étude est réalisée sur 30 secondes (pour des simulations sur 150 s en moyenne). Pour les simulations, la variation temporelle est inférieure à 2 cm à l'exception des Sim4 et Sim5. Ceci n'est pas négligeable mais est suffisamment faible pour considérer que l'emplacement vérifie donc bien la stabilité dans le temps.

6.3.4. Conclusion sur la position de la future sonde

La position de la future sonde à l'amont du seuil est validée.

6.4. Elaboration de la loi d'étalonnage

6.4.1. Prérequis importants sur l'application de la loi d'étalonnage

Les relations d'étalonnage du DO16 Degombert sont élaborées à partir d'une configuration d'ouvrage correspondant à la situation actuelle en tenant compte des singularités existantes

au sein de l'ouvrage (cf. paragraphe 2) et la correction de l'horizontalité de la crête (cf. paragraphe 3.9).

La validité des relations d'étalonnage ne pourra être vérifiée et les lois ne pourront plus être utilisées en cas :

- D'absence de correction de l'horizontalité de la crête tel que préconisé au paragraphe 3.9 ;
- De modifications du génie civil de l'ouvrage ;
- De modification de l'allure de la crête déversante (installation d'une rehausse, modification de la hauteur de la crête ou de son épaisseur, etc.) à l'exception de la correction de l'horizontalité préconisée ;
- De modification de la position de plus de 5 cm de la sonde de mesure amont ;
- De l'augmentation de la plage de débit de fonctionnement du seuil dont les relations d'étalonnage, proposées par la suite, sont calibrées sur la base des modélisations 3D jusqu'à un débit rejeté maximal 0,765 m³/s ;
- De niveau de la Savoureuse supérieur de plus de 54 cm par rapport à la cote altimétrique du seuil soit une cote de crue du milieu naturel supérieure à 355,85 m NGF. La forme de la relation proposée en régime noyé par la Savoureuse permet cependant, à défaut d'une évaluation précise du débit, d'en fournir une estimation approximative.

6.4.2. Sans influence aval

Une relation hauteur-débit peut être établie pour décrire le fonctionnement du déversoir sans influence aval de la Savoureuse. Pour ce faire, les résultats des simulations avec un niveau de Savoureuse bas sont employés (Sim1 à Sim7) pour établir la courbe d'étalonnage. La courbe d'étalonnage, présentée par la Figure 36, est ajustée sur la base des résultats 3D. Son expression est donnée par la relation suivante :

- Si $0 < h_{\text{amont}} \leq 0,318 \text{ m}$:

$$Q = 1,5958 \times h_{\text{amont}}^{1,4362}$$

- Si $h_{\text{amont}} > 0,318 \text{ m}$:

$$Q = 0,8337 \times (h_{\text{amont}} - 0,3142)^{0,1795}$$

Avec Q (m³/s), le débit déversé, et h_{amont} (m), la hauteur de lame déversante à l'amont du seuil (le zéro est fait par rapport à la cote du seuil de déversement).

Remarque : L'Annexe 1 : Loi hauteur-débit fournit un tableau de correspondance entre la hauteur de lame déversante amont et le débit déversé avec un pas de 1 cm.

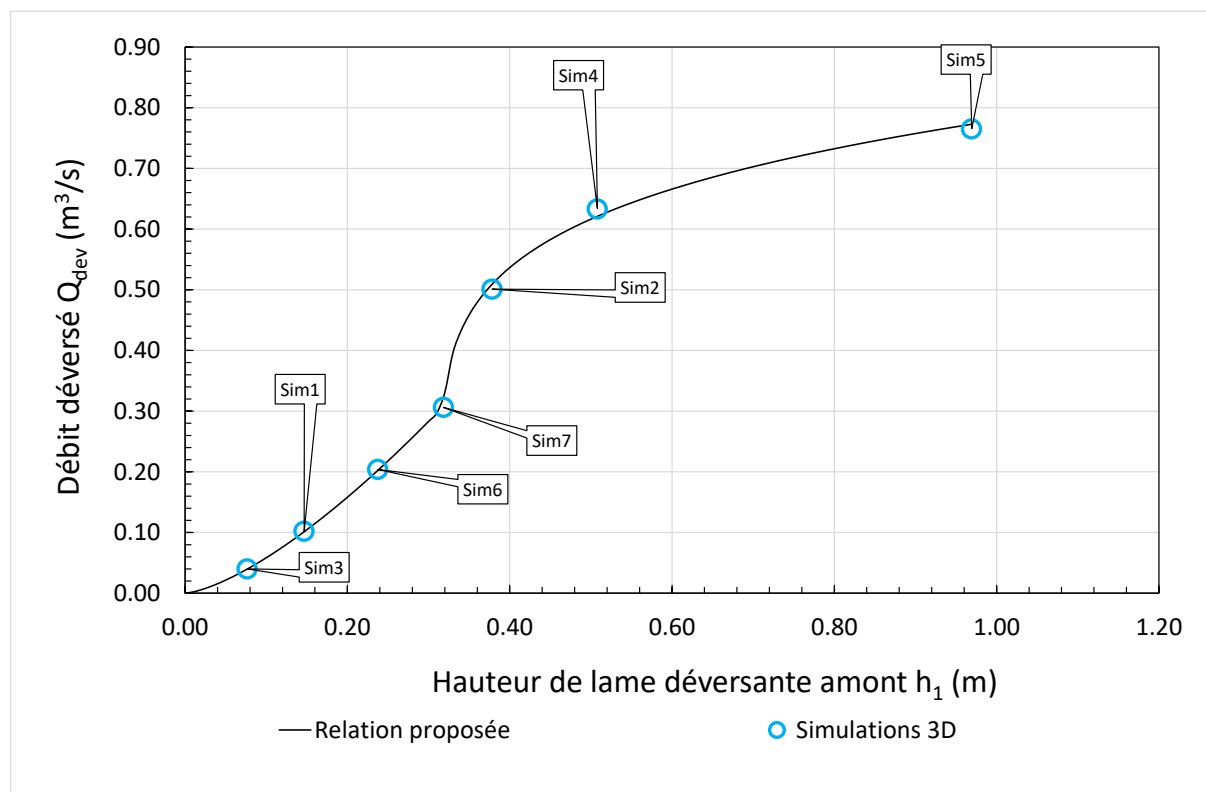


Figure 36. Relation hauteur-débit sans influence aval.

Remarque importante :

La relation hauteur-débit proposée pour un mode de fonctionnement sans influence aval est calibrée jusqu'à une hauteur de lame déversante d'environ 97 cm. Elle peut être utilisée en estimation au-delà (jusqu'à une hauteur correspondante à la valeur maximale mesurable par le capteur de niveau d'eau amont actuel).

Par ailleurs, le point d'intersection entre les deux lois ($h = 0,318$ m) est déterminé par extrapolation de chacune des lois sur la plage entière de débit. Cette méthode a été appliquée car les simulations effectuées ne conduisent pas à une représentation du débit précis où la conduite de décharge au droit du seuil passe en charge.

Dès lors, le suivi à 12 mois du site, une fois équipé en instrumentation, permettra de quantifier l'occurrence des hauteurs de lame déversante rencontrées en cas de déversement :

- notamment les valeurs maximales. La gamme de validité de la loi h - Q proposée pourra être ainsi validée (les lames déversantes maximales ne dépassent pas 97 cm) ou modifiée si besoin (les lames déversantes maximales peuvent dépasser 97 cm).

- notamment vis-à-vis de la transition entre les deux lois ($h = 0,318$ m). Le point de transition pourra être ainsi validé (les lames déversantes sont distribuées de façon uniforme sur toute la plage de mesure) ou modifié si besoin à l'aide d'une simulation 3D complémentaire (les lames déversantes sont fréquemment comprise entre 0,25 m et 0,35 m).

6.4.3. Avec influence aval

Dans un second temps, une relation est établie pour un mode de fonctionnement avec influence aval. Pour ce faire, les résultats des simulations Sim8 à Sim12 sont employés pour établir la relation d'étalonnage. La relation h-Q pour ce mode de fonctionnement fait intervenir la loi sans influence aval qui est corrigée par un coefficient d'ennoiement K. Ce coefficient caractérise le degré d'ennoiement du seuil et par conséquent l'influence aval. Il est fonction de la hauteur de lame déversante aval (h_{aval} soit la hauteur d'eau à l'aval du système « seuil + conduite de décharge » correspondant à la hauteur de la Savoureuse). La forme générique de la relation en fonctionnement avec influence aval est :

$$Q_{\text{noyé}} = Q_{\text{dénoyé}} \times K$$

Avec : $Q_{\text{dénoyé}} = f(h_{\text{amont}})$: relation établie au paragraphe 6.4.2

$K = f\left(\frac{h_{\text{aval}}}{h_{\text{amont}}}\right)$: relation à déterminer

La relation entre le coefficient K et le rapport $h_{\text{aval}}/h_{\text{amont}}$ est établie de la façon suivante :

- Pour les simulations Sim8 à Sim12, le débit théorique dénoyé est évalué d'après la relation sans influence aval établie précédemment à partir de la valeur de lame déversante en amont du seuil fournie par le calcul 3D. On détermine le débit théorique en supposant que l'influence aval ne provoque pas de diminution du débit déversé.
- Le coefficient d'ennoiement K est calculé : il correspond au rapport entre le débit déversé noyé (débit simulé) et le débit théorique dénoyé (calculé à l'étape précédente).

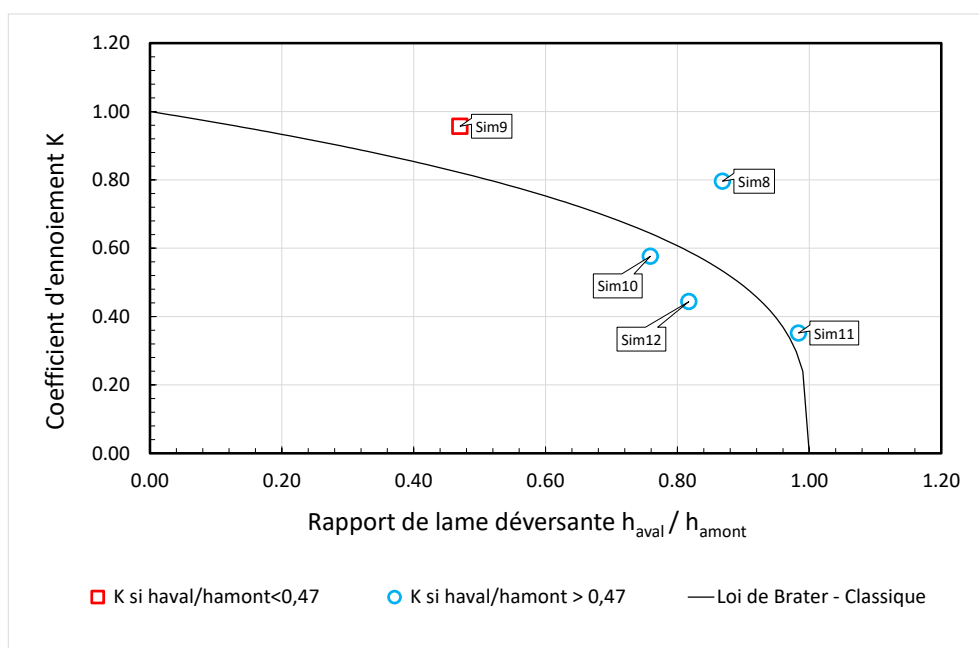
$$K = f\left(\frac{h_{\text{aval}}}{h_{\text{amont}}}\right) = \frac{Q_{\text{noyé}}}{Q_{\text{dénoyé théorique}} = f(h_{\text{amont}})}$$

A titre d'exemple, pour la simulation Sim11, une hauteur de lame déversante de 30,5 cm conduirait à un débit déversé sans influence aval de 0,290 m³/s (cf. Tableau 8). Ainsi le coefficient K pour cette simulation est égal à 0,352 soit le rapport entre le débit 3D avec influence aval (0,102 m³/s) et sans influence aval (0,290 m³/s).

Tableau 8 : Résultats 3D : calcul du coefficient d'ennoiement K.

Simulations 3D					
Simulation	Débit noyé Q_{dev} (m³/s)	Lame déversante amont h_{amont} (m)	Hauteur aval h_{aval} (m)	Débit dénoué théorique (m³/s)	Coefficient K
Sim8	0.102	0.173	0.150	0.128	0.796
Sim9	0.306	0.319	0.150	0.320	0.957
Sim10	0.306	0.395	0.300	0.531	0.576
Sim11	0.102	0.305	0.300	0.290	0.352
Sim12	0.306	0.661	0.540	0.689	0.444

Afin d'établir une relation entre le rapport h_{aval}/h_{amont} et le coefficient d'ennoiement, les résultats ci-dessus sont représentés graphiquement par la Figure 37. Les calculs ont mis en évidence que la hauteur de lame déversante amont h_1 était impactée par le milieu naturel haut pour les simulations Sim8 à Sim12 à l'exception de la Sim9, indiquée sur la Figure 37 en rouge à titre indicatif mais pas employée pour l'étalonnage.


Figure 37. Relation entre le rapport h_{aval}/h_{amont} et le coefficient d'ennoiement K.

Dans un premier temps, une relation similaire à celle employée pour le DO15 Théâtre (loi de Brater & King) est testée pour relier le rapport h_{aval}/h_{amont} et le coefficient d'ennoiement K (voir formule ci-dessous).

$$K = \left[1 - \left(\frac{h_{aval}}{h_{amont}} \right)^a \right]^b$$

Cette loi est représentée par la courbe noire sur la Figure 37. Les coefficients a et b sont ajustés afin de minimiser les écarts avec les résultats de simulations (cercles bleus). Toutefois, il

subsiste des écarts importants entre la relation de Brater et les résultats après ajustement. Celle-ci n'est donc pas retenue pour caractériser l'enneigement dans sa forme générique, à savoir avec des valeurs de a et b constantes quel que soit le niveau du milieu naturel. Dès lors, un second ajustement est réalisé en fixant la valeur du coefficient a et en faisant varier la valeur du coefficient b en fonction du niveau du milieu naturel. Les résultats obtenus sont présentés par la Figure 38.

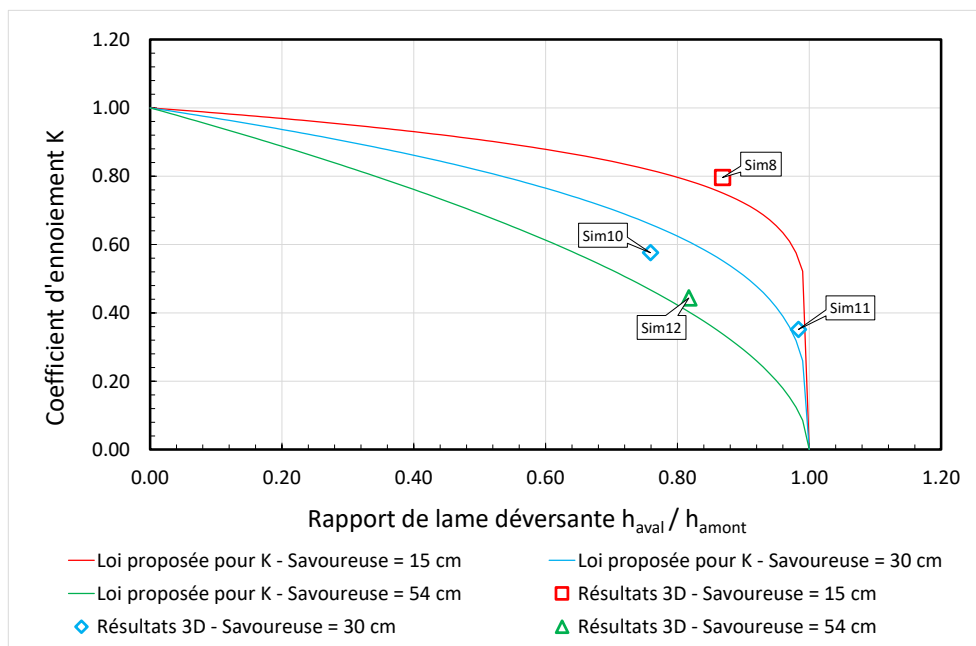


Figure 38. Relation proposée entre le rapport h_{aval}/h_{amont} et le coefficient d'enneigement K .

Remarque : Le domaine de validité de la relation $K=f(h_{aval}/h_{amont})$ proposée pour un mode de fonctionnement avec influence aval s'étend jusqu'à une hauteur de lame déversante aval de 54 cm (niveau de la Savoureuse atteignant une cote de 355,85 m NGF). Au-delà, la relation obtenue pour une hauteur aval de 54 cm peut être utilisée pour obtenir une estimation approximative du débit.

Dès lors, une relation mathématique peut être établie pour relier le rapport h_{aval}/h_{amont} au coefficient d'enneigement (courbes tracées sur la Figure 38). Son expression est donnée par la relation suivante :

$$K = \left(1 - \frac{h_{aval}}{h_{amont}}\right)^b$$

$$b = 1,0079 \times h_{aval} - 0,0100$$

Avec K , le coefficient d'ennoiement, h_{amont} (m) et h_{aval} (m), respectivement la hauteur de lame déversante amont et aval (le zéro est fait par rapport à la cote du seuil de déversement). K varie entre 1 (pas d'influence aval) et 0 (influence aval complète, plus aucun débit ne circule).

Remarque : L'Annexe 2 : Valeurs du coefficient d'ennoiement K fournit un tableau de correspondance entre le rapport $h_{\text{aval}}/h_{\text{amont}}$ et le coefficient d'ennoiement selon différents niveaux de la Savoureuse à l'aval du système (h_{aval}).

6.4.4. Logigramme de fonctionnement

Le calcul du débit déversé $Q_{\text{déversé}}$ (m^3/s) est récapitulé par la Figure 39, selon la gamme de lame déversante mesurée en amont du seuil h_{amont} (m) et celle mesurée en aval avant le rejet dans la Savoureuse h_{aval} (m).

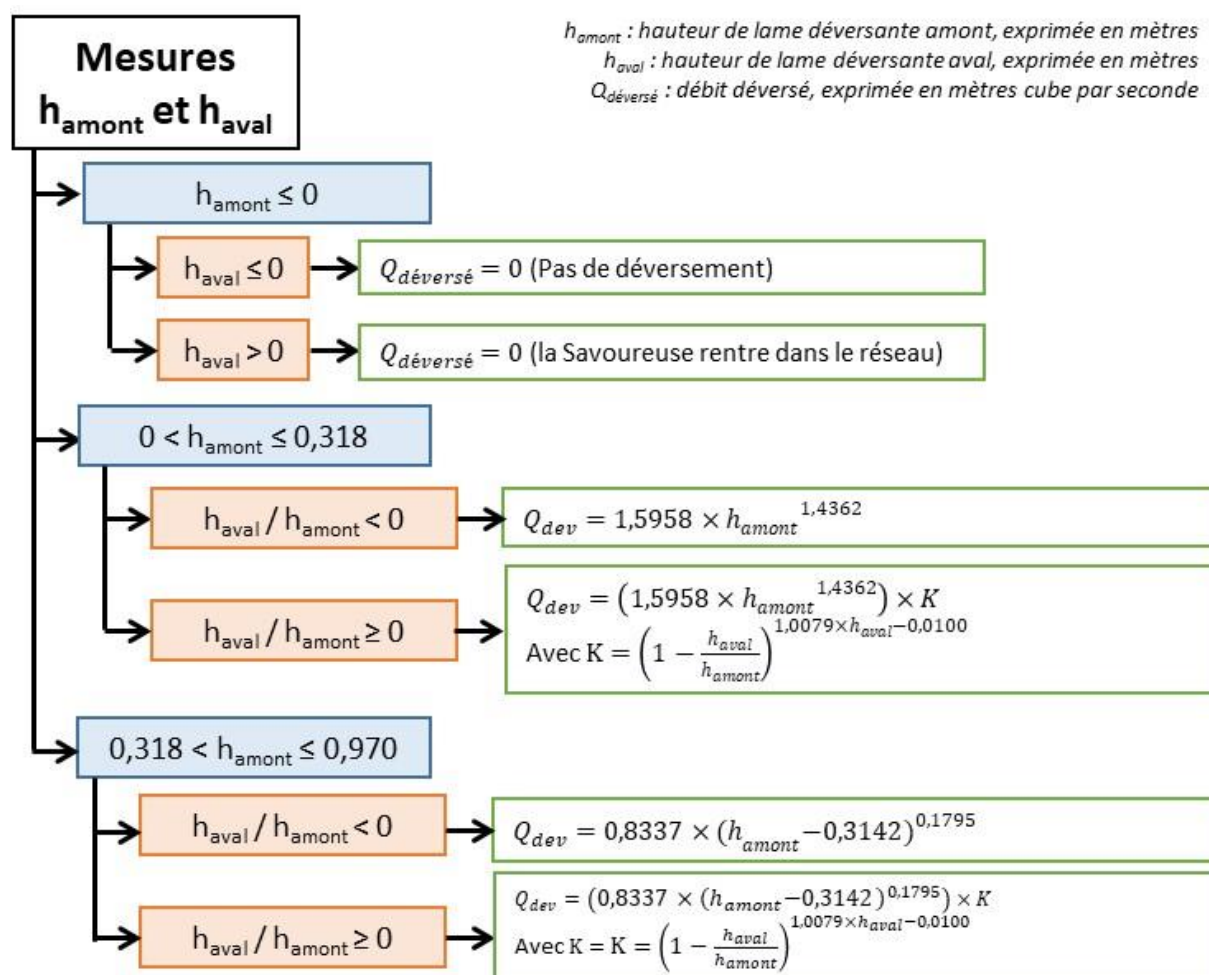


Figure 39. Logigramme de détermination du débit déversé.

6.5. Procédure de contrôle

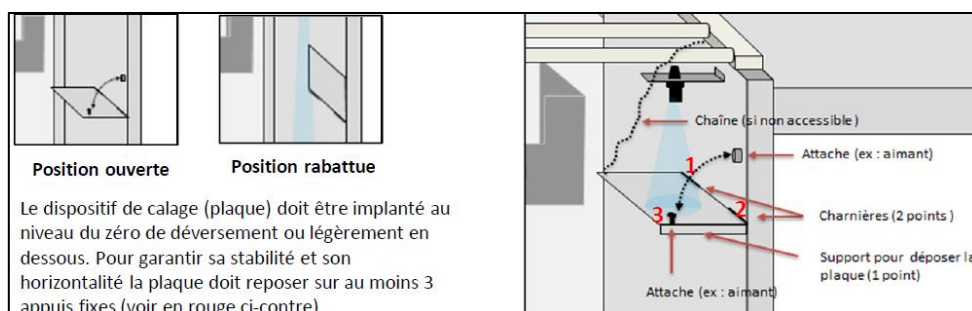
Pour participer à la fiabilité des dispositifs d'autosurveillance à mettre en œuvre, 3D EAU formule des préconisations à destination de l'installateur concernant le contrôle des mesures. Ces préconisations sont d'autant plus importantes que c'est la mesure de lame déversante qui participe en général principalement à l'incertitude d'un dispositif d'autosurveillance composé d'une mesure de hauteur d'eau. Un protocole de contrôle, au sens du Guide Pratique 2015 de l'agence de l'eau LOIRE-BRETAGNE sur la mise en œuvre de l'autosurveillance des systèmes d'assainissement des collectivités et des industries (Équipement et contrôle), est indispensable pour vérifier la mesure. Ce contrôle s'étend du capteur à l'export en format SANDRE, en passant par le rapatriement des données.

Deux types de contrôle sont à envisager :

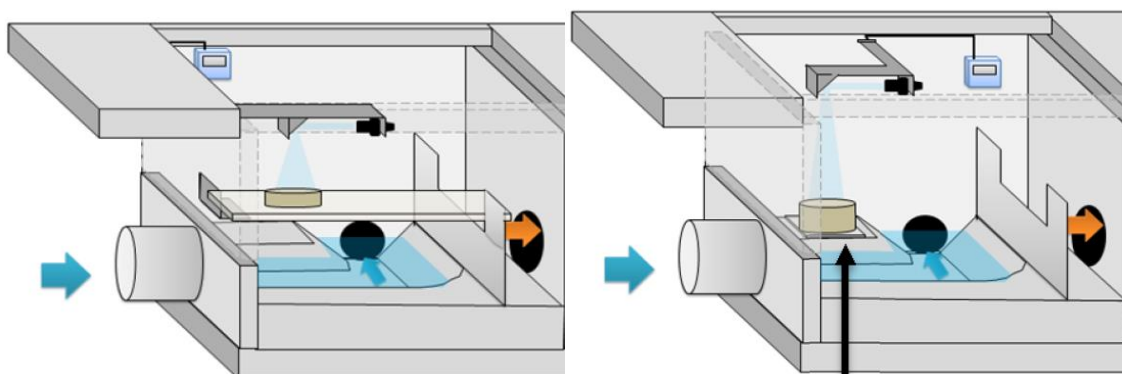
- un contrôle simplifié tous les 4 mois : lecture d'une valeur connue du capteur
- un contrôle annuel plus poussé : vérification du zéro du capteur et d'une ou 2 hauteurs supplémentaires dans la gamme de la lame déversante.

L'étalonnage du capteur pourra être effectué à l'aide de différents dispositifs, fixes ou amovibles, parmi lesquels on peut citer (illustrations issues principalement du Guide de l'AELB) :

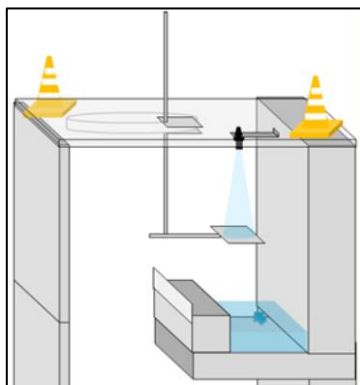
- La mise en place d'une plaque mobile sous le capteur, située à la même altitude que le seuil de déversement.



- La mise en place de cales (à niveau) dans l'ouvrage pour déposer une plaque à une hauteur donnée, de préférence à la même altitude que le seuil de déversement.

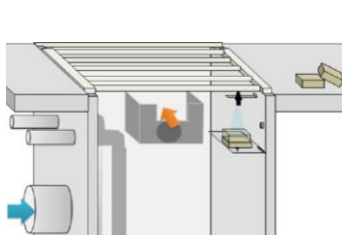


- L'utilisation d'une perche graduée avec un niveau à bulle et une plaque coulissante, manipulable depuis la surface,



Remarque : Les dispositifs fixes ne doivent pas être sujets à un encrassement important notamment lié à la présence de flottants. En ce qui concerne les dispositifs mobiles, des précautions doivent être prises pour s'assurer de l'horizontalité et de la hauteur de la cible.

Cette liste de solutions n'est pas exhaustive, le choix du dispositif de contrôle à mettre en œuvre est laissé à l'initiative du poseur sous réserve de validation par le Maître d'ouvrage. Dans le cas où un dispositif de contrôle fixe est mis en œuvre, plusieurs hauteurs pourront être simulées à l'aide de cales étalonnées, de préférence de faible masse, comme cela est illustré ci-dessous.



Par ailleurs, si des dispositifs de contrôle fixes sont retenus, ces derniers doivent être disposés de façon à ne pas perturber l'écoulement au droit de l'ouvrage instrumenté (seuil, trop-plein), au risque de retenir et/ou piéger des flottants dans la zone de mesure.

Ces bonnes pratiques sont formulées par 3D EAU sur la base des préconisations de l'Agence de l'Eau Loire-Bretagne pour permettre leur prise en compte par le poseur qui sera tenu de proposer un dispositif de contrôle adapté au site lors de l'installation des capteurs. Suite à l'installation de ce dispositif, le gestionnaire du réseau sera tenu de réaliser un contrôle initial de l'étalonnage des capteurs puis de mener un contrôle annuel (par lui-même ou via un prestataire extérieur). Ci-dessous quelques exemples de réalisation.

	
Dispositif fixe	Dispositif avec cales fixes et plaque mobile
	
Utilisation d'une perche graduée avec un niveau à bulle	Dispositif fixe mobile manœuvrable depuis l'extérieur

6.6. Quantification de l'incertitude globale sur la détermination du débit

3D EAU a mis en place une méthodologie pour évaluer l'incertitude sur les résultats des débits déversés. Cette démarche est conforme aux recommandations de la norme ISO IEC 98-3. L'incertitude est calculée pour un intervalle de confiance de 95 %, c'est-à-dire qu'il y a 95 % de chance que la valeur réelle du débit soit comprise dans cet intervalle. Les différentes sources d'incertitude sur la nouvelle relation hauteur-débit proposée sont les suivantes :

- **L'incertitude de mesure de la hauteur** : elle consiste en l'erreur du capteur et de la détermination du génie civil. On considère 1 cm d'incertitude. Cette incertitude est donc principalement impactante pour les débits générés par les faibles hauteurs.
- **L'incertitude numérique liée au maillage** du domaine de calcul : évaluée ici à 5 %.
- **L'incertitude de la formule mathématique reliant la hauteur au débit (incertitude liée à la régression)** : celle-ci provient de l'interpolation des résultats par la relation $Q=f(h)$. Les résultats 3D sont en effet distribués autour de la courbe d'étalonnage. Cette incertitude de calcul dépend donc du débit. Elle a été évaluée à 1,9 % pour la relation dénoyée.

Sous l'hypothèse que ces incertitudes sont indépendantes les unes des autres, il est possible de les combiner pour évaluer l'incertitude globale en calculant la racine carrée de la somme des carrés.

Les incertitudes de la relation h-Q sont présentées par la Figure 40. Pour des débits déversés comprises entre 0 et 0,77 m³/s (limite d'application de la loi), les incertitudes sont calculées en considérant les éléments exposés ci-dessus.

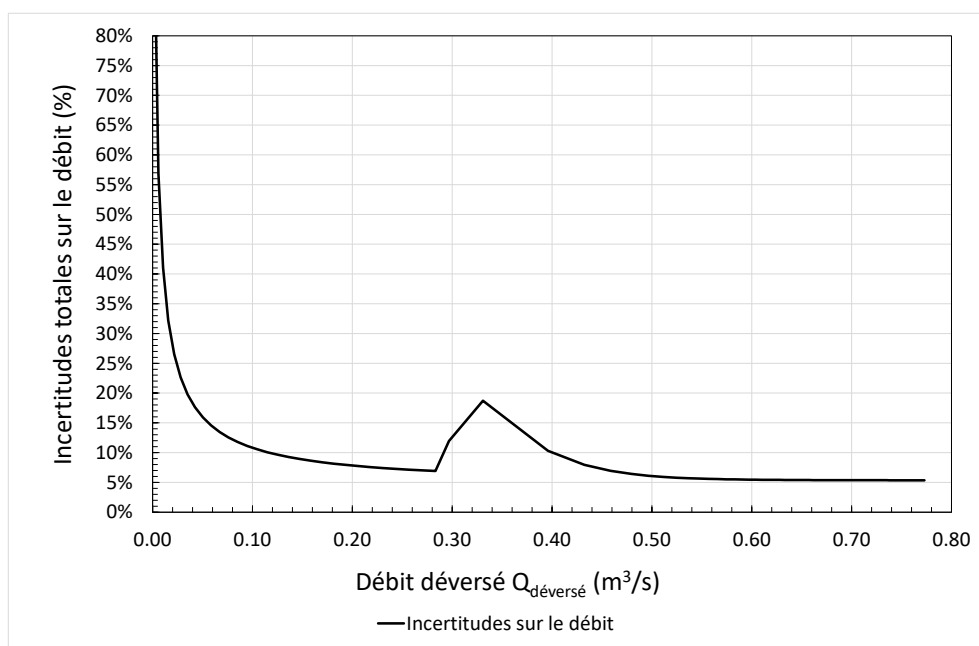


Figure 40. Incertitudes globales sur le débit en fonction du débit mesuré.

L'incertitude sur le débit passe sous 20 % à partir d'un débit de 0,035 m³/s. Compte-tenu du fonctionnement hydraulique de l'ouvrage, les incertitudes sur le débit pourront être plus importantes pour des faibles lames déversantes (inférieures à 5 cm).

7. CONCLUSION

Le fonctionnement hydraulique du DO16 Degombert du réseau d'assainissement du Grand Belfort a été étudié, ce qui a permis la préconisation d'un dispositif de mesure adapté aux spécificités du site. L'ouvrage a été reproduit et modélisé numériquement en 3D pour les différentes configurations de son fonctionnement hydraulique. Au total, 7 débits déversés, représentatifs de la plage de fonctionnement de l'ouvrage, ont été simulés ainsi qu'un fonctionnement hydraulique avec et sans influence aval de la Savoureuse.

Les résultats des calculs numériques ont permis de :

- Confirmer le comportement complexe de l'écoulement dans l'ouvrage,
- Proposer une solution de mesure des débits en instrumentant le déversoir avec 2 capteurs de hauteur d'eau,
- Valider l'emplacement du capteur de hauteur d'eau dans la chambre du déversoir et déterminer la position du capteur de hauteur d'eau au niveau du milieu naturel, pour garantir un site de mesure fiable,
- Déterminer les incertitudes totales sur la mesure de débit.

Pour permettre une meilleure autosurveillance, 3D EAU préconise la conservation de la sonde actuellement en place dans la chambre du DO16 Degombert et l'installation d'une nouvelle sonde de mesure de hauteur d'eau au droit de la Savoureuse. Les préconisations techniques en termes d'instrumentation du déversoir avec des capteurs de hauteur d'eau ont été spécifiées dans les chapitres 6.1 et 6.2.

Les relations hauteur-débit associées aux positions des capteurs ont été définies par des formules dans le chapitre 6.4. Les limites d'application de ces lois ont été précisées au paragraphe 6.4.1.

Enfin, ces relations s'accompagnent d'une évaluation de l'incertitude associée, présentée au paragraphe 6.6.



En conclusion, notre méthodologie permet d'élaborer un système de mesure fiable à partir de 2 capteurs de hauteur d'eau, et dont la méthode de calcul du débit déversé est précise et facile à implémenter dans des automates d'autosurveillance. L'application des relations hauteur-débit fournies est valide pour le DO16 Degombert seulement si les emplacements préconisés des 2 capteurs sont respectés et que l'aménagement de la crête est réalisé (cf. paragraphe 3.9).

8. REFERENCES

Dufresne M, Vazquez J (2013). Head-discharge relationship of Venturi flumes: from long to short throats. *Journal of Hydraulic Research* 51(4):465-468.

Dufresne M, Vazquez J (2014). *Mesure du débit d'un écoulement à surface libre par un canal Venturi*. Guide technique ENGEES/ICube, document accessible sur le site <http://hydraulique-des-reseaux.engees.eu/home/documents-techniques>

ISO (2013). *Flow measurement structures – Rectangular, trapezoidal and U-shaped flumes*. International Standard Association, ISO 4359:2013.

M. Dufresne, J. Vazquez, M. Fischer et J. Wertel, 2015, *Mesure du débit par les canaux Venturi présentant des non-conformités : faut-il les détruire et les reconstruire ? Discharge measurement using non-compliant Venturi flumes: shall we destroy and rebuild?*, Techniques Sciences et Méthodes, Numéro 11, p.35-46.

ANNEXE 1 : LOI HAUTEUR-DEBIT

$h_{\text{amont}} \text{ (m)}$	$Q_{\text{déversé}} \text{ (m}^3\text{/s)}$	$Q_{\text{déversé}} \text{ (m}^3\text{/h)}$
0.00	0.000	0.0
0.01	0.002	7.7
0.02	0.006	20.9
0.03	0.010	37.3
0.04	0.016	56.4
0.05	0.022	77.8
0.06	0.028	101.0
0.07	0.035	126.1
0.08	0.042	152.7
0.09	0.050	180.9
0.10	0.058	210.4
0.11	0.067	241.3
0.12	0.076	273.4
0.13	0.085	306.7
0.14	0.095	341.2
0.15	0.105	376.7
0.16	0.115	413.3
0.17	0.125	450.9
0.18	0.136	489.5
0.19	0.147	529.0
0.20	0.158	569.4
0.21	0.170	610.7
0.22	0.181	652.9
0.23	0.193	696.0
0.24	0.206	739.8
0.25	0.218	784.5
0.26	0.231	830.0
0.27	0.243	876.2
0.28	0.256	923.2
0.29	0.270	970.9
0.30	0.283	1019.3
0.31	0.297	1068.5
0.32	0.331	1190.8
0.33	0.396	1425.5
0.34	0.432	1556.7
0.35	0.459	1651.0
0.36	0.479	1725.6
0.37	0.497	1787.9
0.38	0.512	1841.6
0.39	0.525	1888.9
0.40	0.537	1931.4
0.41	0.547	1970.0
0.42	0.557	2005.4
0.43	0.566	2038.2
0.44	0.575	2068.7
0.45	0.583	2097.3
0.46	0.590	2124.3
0.47	0.597	2149.7
0.48	0.604	2173.8
0.49	0.610	2196.8
0.50	0.616	2218.7

$h_{\text{amont}} \text{ (m)}$	$Q_{\text{déversé}} \text{ (m}^3\text{/s)}$	$Q_{\text{déversé}} \text{ (m}^3\text{/h)}$
0.51	0.622	2239.7
0.52	0.628	2259.8
0.53	0.633	2279.2
0.54	0.638	2297.8
0.55	0.643	2315.7
0.56	0.648	2333.0
0.57	0.653	2349.8
0.58	0.657	2366.0
0.59	0.662	2381.8
0.60	0.666	2397.0
0.61	0.670	2411.9
0.62	0.674	2426.3
0.63	0.678	2440.4
0.64	0.682	2454.1
0.65	0.685	2467.4
0.66	0.689	2480.5
0.67	0.693	2493.2
0.68	0.696	2505.6
0.69	0.699	2517.8
0.70	0.703	2529.7
0.71	0.706	2541.3
0.72	0.709	2552.7
0.73	0.712	2563.9
0.74	0.715	2574.9
0.75	0.718	2585.6
0.76	0.721	2596.2
0.77	0.724	2606.5
0.78	0.727	2616.7
0.79	0.730	2626.7
0.80	0.732	2636.5
0.81	0.735	2646.2
0.82	0.738	2655.7
0.83	0.740	2665.0
0.84	0.743	2674.2
0.85	0.745	2683.3
0.86	0.748	2692.2
0.87	0.750	2701.0
0.88	0.753	2709.7
0.89	0.755	2718.2
0.90	0.757	2726.6
0.91	0.760	2734.9
0.92	0.762	2743.1
0.93	0.764	2751.2
0.94	0.766	2759.1
0.95	0.769	2767.0
0.96	0.771	2774.8
0.97	0.773	2782.4

ANNEXE 2 : VALEURS DU COEFFICIENT D'ENNOIEMENT K

$h_{\text{aval}}/h_{\text{amont}}$	$h_{\text{aval}} \text{ (m)}$					
	0.00	0.10	0.20	0.30	0.40	0.50
0.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
0.01	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	0.99
0.02	1.00	1.00	1.00	0.99	0.99	0.99
0.03	1.00	1.00	0.99	0.99	0.99	0.98
0.04	1.00	1.00	0.99	0.99	0.98	0.98
0.05	1.00	1.00	0.99	0.99	0.98	0.97
0.06	1.00	0.99	0.99	0.98	0.98	0.97
0.07	1.00	0.99	0.99	0.98	0.97	0.96
0.08	1.00	0.99	0.98	0.98	0.97	0.95
0.09	1.00	0.99	0.98	0.97	0.96	0.95
0.10	1.00	0.99	0.98	0.97	0.96	0.94
0.11	1.00	0.99	0.98	0.97	0.96	0.93
0.12	1.00	0.99	0.98	0.96	0.95	0.93
0.13	1.00	0.99	0.97	0.96	0.95	0.92
0.14	1.00	0.99	0.97	0.96	0.94	0.91
0.15	1.00	0.99	0.97	0.95	0.94	0.91
0.16	1.00	0.98	0.97	0.95	0.93	0.90
0.17	1.00	0.98	0.96	0.95	0.93	0.90
0.18	1.00	0.98	0.96	0.94	0.92	0.89
0.19	1.00	0.98	0.96	0.94	0.92	0.88
0.20	1.00	0.98	0.96	0.94	0.92	0.88
0.21	1.00	0.98	0.96	0.93	0.91	0.87
0.22	1.00	0.98	0.95	0.93	0.91	0.86
0.23	1.00	0.98	0.95	0.93	0.90	0.86
0.24	1.00	0.98	0.95	0.92	0.90	0.85
0.25	1.00	0.97	0.95	0.92	0.89	0.84
0.26	1.00	0.97	0.94	0.92	0.89	0.84
0.27	1.00	0.97	0.94	0.91	0.88	0.83
0.28	1.00	0.97	0.94	0.91	0.88	0.82
0.29	1.00	0.97	0.94	0.90	0.87	0.82
0.30	1.00	0.97	0.93	0.90	0.87	0.81
0.31	1.00	0.97	0.93	0.90	0.86	0.80
0.32	1.00	0.97	0.93	0.89	0.86	0.80
0.33	1.00	0.96	0.93	0.89	0.85	0.79
0.34	1.00	0.96	0.92	0.89	0.85	0.78
0.35	1.00	0.96	0.92	0.88	0.84	0.77
0.36	1.00	0.96	0.92	0.88	0.84	0.77
0.37	1.00	0.96	0.92	0.87	0.83	0.76
0.38	1.00	0.96	0.91	0.87	0.83	0.75
0.39	1.00	0.96	0.91	0.87	0.82	0.75
0.40	1.01	0.95	0.91	0.86	0.82	0.74
0.41	1.01	0.95	0.90	0.86	0.81	0.73
0.42	1.01	0.95	0.90	0.85	0.81	0.72
0.43	1.01	0.95	0.90	0.85	0.80	0.72
0.44	1.01	0.95	0.89	0.84	0.80	0.71
0.45	1.01	0.95	0.89	0.84	0.79	0.70
0.46	1.01	0.95	0.89	0.84	0.78	0.69
0.47	1.01	0.94	0.89	0.83	0.78	0.69
0.48	1.01	0.94	0.88	0.83	0.77	0.68
0.49	1.01	0.94	0.88	0.82	0.77	0.67
0.50	1.01	0.94	0.88	0.82	0.76	0.66
0.51	1.01	0.94	0.87	0.81	0.76	0.65
0.52	1.01	0.94	0.87	0.81	0.75	0.65
0.53	1.01	0.93	0.87	0.80	0.74	0.64
0.54	1.01	0.93	0.86	0.80	0.74	0.63
0.55	1.01	0.93	0.86	0.79	0.73	0.62
0.56	1.01	0.93	0.85	0.79	0.72	0.61
0.57	1.01	0.93	0.85	0.78	0.72	0.61
0.58	1.01	0.92	0.85	0.78	0.71	0.60
0.59	1.01	0.92	0.84	0.77	0.70	0.59
0.60	1.01	0.92	0.84	0.76	0.70	0.58
0.61	1.01	0.92	0.83	0.76	0.69	0.57
0.62	1.01	0.92	0.83	0.75	0.68	0.56
0.63	1.01	0.91	0.83	0.75	0.68	0.55
0.64	1.01	0.91	0.82	0.74	0.67	0.54
0.65	1.01	0.91	0.82	0.74	0.66	0.54
0.66	1.01	0.91	0.81	0.73	0.65	0.53
0.67	1.01	0.90	0.81	0.72	0.65	0.52
0.68	1.01	0.90	0.80	0.72	0.64	0.51
0.69	1.01	0.90	0.80	0.71	0.63	0.50
0.70	1.01	0.90	0.79	0.70	0.62	0.49
0.71	1.01	0.89	0.79	0.70	0.61	0.48
0.72	1.01	0.89	0.78	0.69	0.61	0.47
0.73	1.01	0.89	0.78	0.68	0.60	0.46
0.74	1.01	0.88	0.77	0.67	0.59	0.45
0.75	1.01	0.88	0.77	0.67	0.58	0.44
0.76	1.01	0.88	0.76	0.66	0.57	0.43
0.77	1.01	0.88	0.75	0.65	0.56	0.42
0.78	1.02	0.87	0.75	0.64	0.55	0.41
0.79	1.02	0.87	0.74	0.63	0.54	0.40
0.80	1.02	0.86	0.73	0.62	0.53	0.38
0.81	1.02	0.86	0.73	0.62	0.52	0.37
0.82	1.02	0.86	0.72	0.61	0.51	0.36
0.83	1.02	0.85	0.71	0.60	0.50	0.35
0.84	1.02	0.85	0.70	0.59	0.49	0.34
0.85	1.02	0.84	0.70	0.57	0.47	0.32
0.86	1.02	0.84	0.69	0.56	0.46	0.31
0.87	1.02	0.83	0.68	0.55	0.45	0.30
0.88	1.02	0.82	0.67	0.54	0.43	0.28
0.89	1.02	0.82	0.66	0.52	0.42	0.27
0.90	1.02	0.81	0.64	0.51	0.40	0.25
0.91	1.02	0.80	0.63	0.49	0.39	0.24
0.92	1.03	0.80	0.62	0.48	0.37	0.22
0.93	1.03	0.79	0.60	0.46	0.35	0.21
0.94	1.03	0.77	0.58	0.44	0.33	0.19
0.95	1.03	0.76	0.56	0.42	0.31	0.17
0.96	1.03	0.75	0.54	0.39	0.28	0.15
0.97	1.04	0.73	0.51	0.36	0.25	0.12
0.98	1.04	0.70	0.47	0.32	0.21	0.10
0.99	1.05	0.66	0.41	0.26	0.16	0.06