



3D EAU

3D EAU

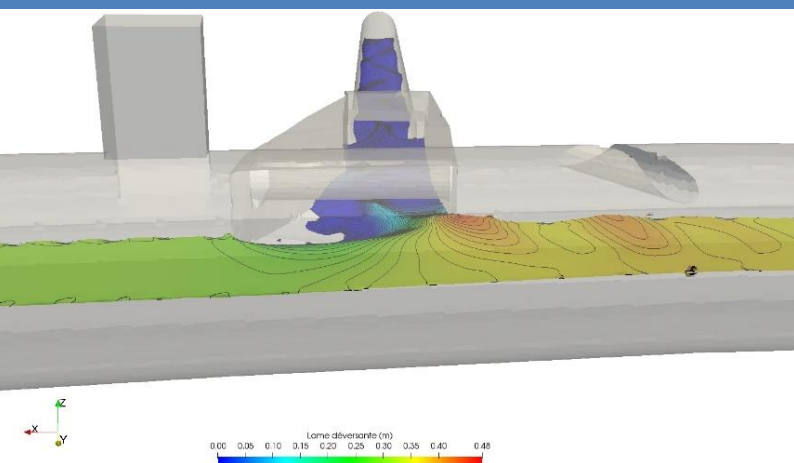
21 rue Jacobi-Netter 67000 Strasbourg

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 DO15 THEATRE



Etude effectuée par 3D EAU pour :



Remise du rapport le 10/11/2020

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>	10
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	16
3.1. REGIME D'ECOULEMENT AMONT	16
3.2. RISQUE DE RESSAUT HYDRAULIQUE LIE A L'ARRIVEE DANS L'OUVRAGE	16
3.3. RISQUE D'ENNOIEMENT DU SEUIL PAR L'AVAL DEVERSE	17
3.4. PERTURBATION PAR UN OBSTACLE.....	17
3.5. PERTURBATION PAR LA VITESSE D'ENGOUFFREMENT A L'AVAL.....	18
3.6. ECOULEMENT TRES BIEN TRANQUILLISE ?	18
3.7. INCERTITUDES COMPATIBLES AVEC L'AUTOSURVEILLANCE.....	18
3.8. SYNTHESE DE L'ANALYSE PREALABLE	18
3.9. METHODOLOGIE POUR FIABILISER LA MESURE DE DEBIT	19
4. MODELISATION HYDRAULIQUE 3D	20
4.1. CONSTRUCTION DU MODELE 3D	20
4.2. MAILLAGE DE LA GEOMETRIE	20
4.3. PARAMETRE DU MODELE.....	22
4.4. LISTE DES SIMULATIONS EFFECTUEES.....	22
5. RESULTATS ET ANALYSE DES SIMULATIONS 3D	24
5.1. CONVERGENCE DES CALCULS	24
5.2. VISUALISATION DE LA SURFACE LIBRE	24
5.3. LAMES DEVERSANTES ET DEBITS	30
5.4. ANALYSE PHENOMENOLOGIQUE	32
5.4.1. <i>Comportement hydraulique dans le déversoir</i>	32
5.4.2. <i>Influence aval</i>	34
5.5. CONCLUSIONS DES RESULTATS DE SIMULATIONS.....	35
6. ELABORATION DE L'AUTOSURVEILLANCE	36
6.1. PRESENTATION DE LA SOLUTION DE MESURE	36

6.2.	CONTRAINTES D'ENVIRONNEMENT ET SPECIFICITES DU SITE EN VUE DE L'INSTRUMENTATION ET DE L'ACCES A L'OUVRAGE	36
6.3.	SOLUTIONS PROPOSEES POUR REpondre A L'OBJECTIF D'INSTRUMENTATION ET D'ACCES A L'OUVRAGE	40
6.4.	POSITION DES CAPTEURS DE MESURE DE HAUTEUR D'EAU	44
6.4.1.	<i>Capteur amont</i>	45
6.4.2.	<i>Capteur aval</i>	46
6.5.	VALIDATION DE LA POSITION DES NOUVEAUX CAPTEURS	47
6.5.1.	<i>Unicité</i>	47
6.5.2.	<i>Stabilité dans l'espace</i>	47
6.5.3.	<i>Stabilité dans le temps</i>	47
6.5.4.	<i>Conclusion sur la position de la future sonde</i>	48
6.6.	ELABORATION DE LA LOI D'ETALONNAGE	48
6.6.1.	<i>Prérequis importants sur l'application de la loi d'étalonnage</i>	48
6.6.2.	<i>Sans influence aval</i>	48
6.6.3.	<i>Avec influence aval</i>	50
6.6.4.	<i>Logigramme de fonctionnement</i>	52
6.7.	PROCEDURE DE CONTROLE	53
6.8.	QUANTIFICATION DE L'INCERTITUDE GLOBALE SUR LA DETERMINATION DU DEBIT	56
7.	CONCLUSION	58
8.	REFERENCES	59
	ANNEXE 1 : LOI HAUTEUR-DEBIT SANS INFLUENCE AVAL	60
	ANNEXE 2 : CALCUL DU COEFFICIENT D'ENNOIEMENT	61

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 DO15 Théâtre 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 DO15 Théâtre, 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 à l'aide d'un tachéomètre laser en 3D 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 (conduites traversant l'ouvrage, réduction de la section de passage, etc.).

2.2. Présentation de l'ouvrage étudié

Le DO15 Théâtre est un déversoir d'orage latéral à crête basse sans entonnement. L'ouvrage présente un seul apport d'effluents. L'entrée correspond à un collecteur ovoïde T200/143, dont l'axe d'écoulement est parallèle par rapport à la crête. La conduite aval conservé est un collecteur ovoïde T200/143. Son axe d'écoulement est identique à l'entrée principale.

A noter la présence quelques mètres en amont du DO de deux arrivées secondaires de deux collecteurs circulaires : le premier (dans le sens de l'écoulement) en DN300, le second en DN600. Ce dernier était complètement obstrué le jour de la visite sur site. Ces deux apports ne seront pas pris en compte dans la suite de l'analyse compte tenu du fait qu'ils représentent des volumes minoritaires par rapport à l'arrivée principale ovoïde.

La crête du déversoir présente forme rectiligne d'une longueur de 2,06 m et d'une épaisseur de 15 cm (cf. Figure 3). Elle est en bon état mais elle n'est pas horizontale sur toute la largeur. On relève une pente de -3,6 % selon l'axe d'écoulement « entrée principale → aval conservé ». La hauteur de pelle à l'amont est de 79 cm (différence entre le radier du collecteur ovoïde côté conservé et le niveau moyen de la crête) et à l'aval de 48 cm (différence entre le niveau moyen de la crête et le fil d'eau du radier de la conduite aval déversé DN1000 à son amont). Enfin, la distance verticale entre la crête et la voute de l'ouvrage est d'environ 1,10 m.

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

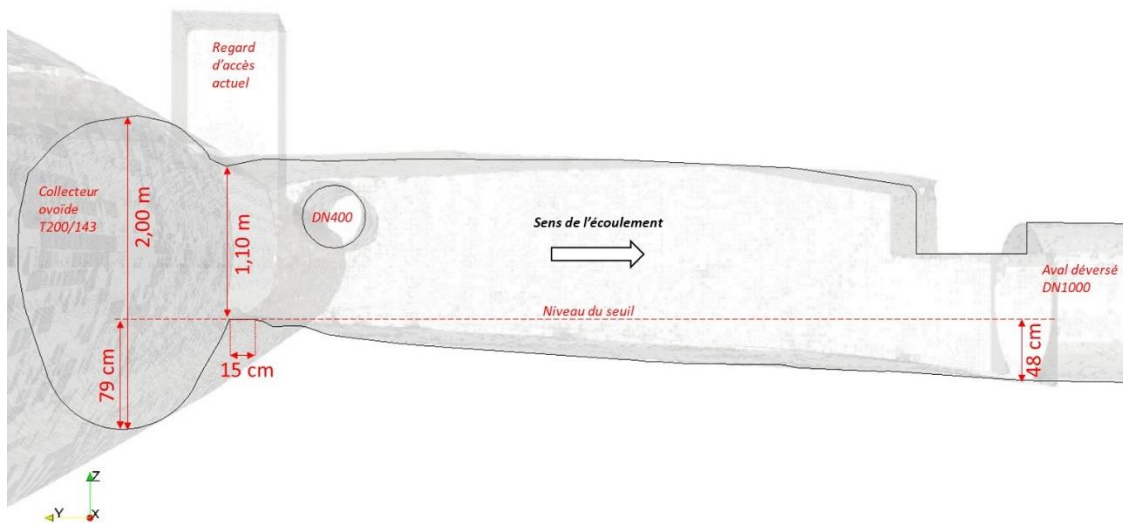


Figure 1. Coupe transversale du réseau côté déversé.

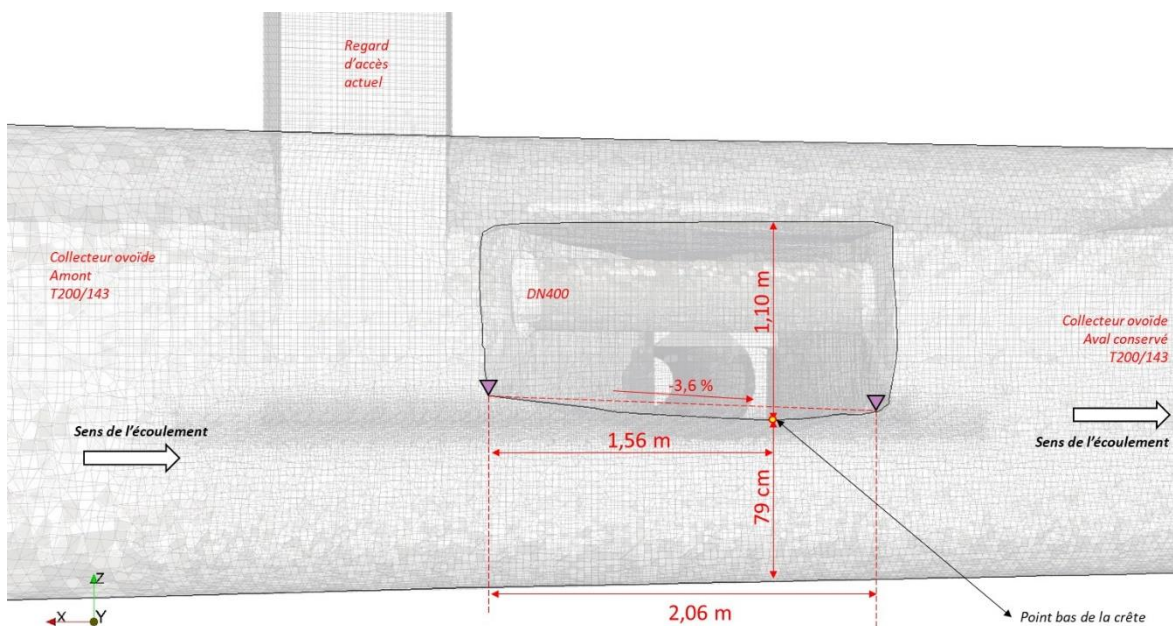


Figure 2. Coupe longitudinale du réseau côté conservé.

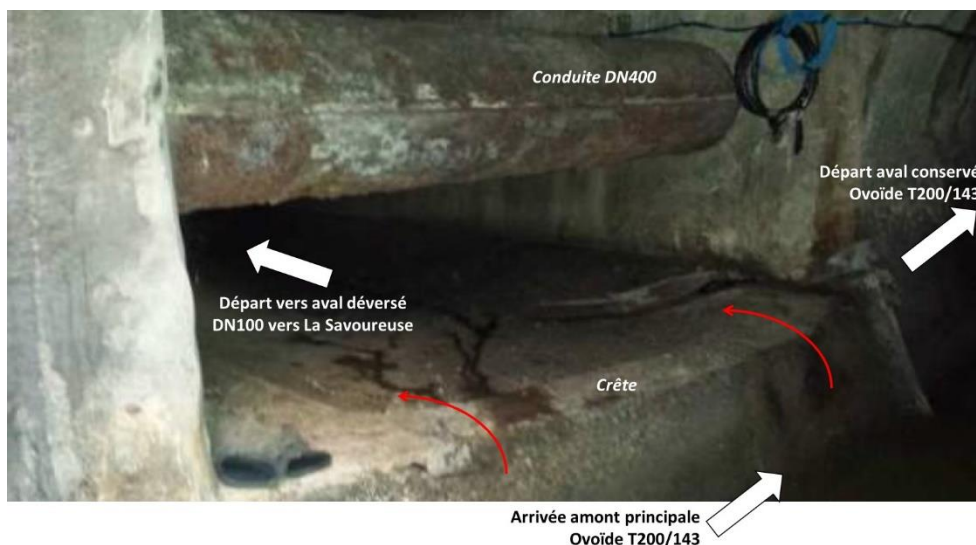


Figure 3. Vue de la crête du DO15 Théâtre (Source : Le Grand Belfort).

En cas de surverse, les effluents déversés sont acheminés via un coursier en forme de toboggan (section convergente vers l'aval), sur une distance d'environ 4,93 m, vers un collecteur circulaire DN1000 (cf. Figure 4). Ce dernier achemine sur une distance d'environ 80 mètres le débit déversé vers la Savoureuse.



Figure 4. Vue de l'intérieur de l'amont du collecteur aval déversé depuis la chambre du DO15 Théâtre (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. Le regard d'accès au clapet présente des échelons en mauvais état (absence d'échelons sur une partie de la hauteur du regard d'accès). Par ailleurs, on note que l'arrivée du collecteur de décharge s'effectue via un coude vers la gauche dans le regard de l'exutoire (angle non mesuré sur site) comme illustré par la Figure 5.



Figure 5. Vue de l'intérieur du regard en amont du clapet (image de gauche) et du clapet anti-retour (image de droite) du DO15 Théâtre (Source : 3D EAU).

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

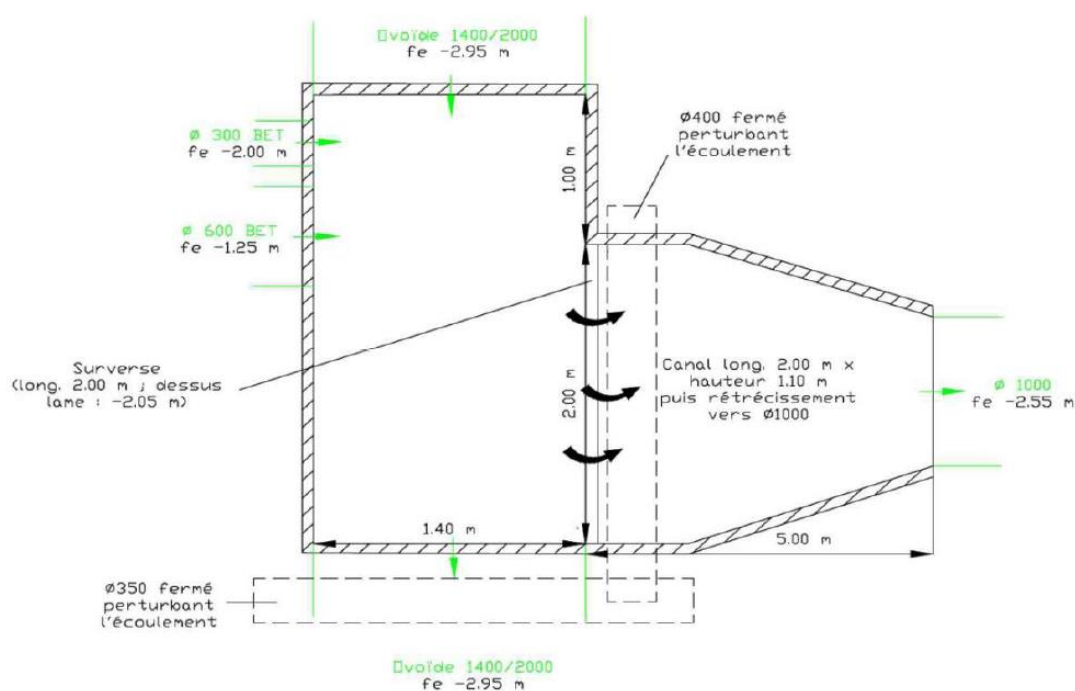


Figure 6. Schéma de principe du DO15 Théâtre : vue en plan (Source : Le Grand Belfort).

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 deux sondes hauteur/vitesse permettant d'une part la mesure du débit aval conservé, et d'autre part la mesure du débit aval déversé.

Cinq vidéos, accessibles via les liens suivants présentent l'ouvrage dans son environnement hydraulique : [présentation générale](#), [rejet du déversoir](#), [vue d'ensemble extérieure](#), [vue d'ensemble extérieure 2](#), [faisabilité implantation regard d'accès](#).

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 relevés effectués par 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 au tachéomètre laser soit quelques mètres à environ dix mètres.

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	Ovoïde	2.00	1.43	-	0.10%
Aval conservé	Ovoïde	2.00	1.43	-	0.56%
Aval déversé	Circulaire	-	-	1.0	1.64%
Cunette DO (côté conservé)	-	2.00	1.43	-	-0.24%

Les pentes de la conduite amont ovoïde et aval conservé sont faibles d'après les relevés. Le radier du collecteur ovoïde présente une légère contre-pente dans le sens de la longueur de la crête. Cette valeur est cependant approximative compte-tenu de la présence de dépôts au fond du collecteur au droit de la crête, ce qui peut perturber la mesure géométrique. 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 favorables à un écoulement de type fluvial.

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 DO15 Théâtre (les valeurs transmises à 3D EAU apparaissent en rouge dans le tableau). En intégrant les débits sur le temps de simulations, les volumes simulés sont également quantifiés (Tableau 3).

Tableau 2 : Débits maximaux simulés pour le DO15 Théâtre.

Période de retour	1 mois	5 ans	10 ans	20 ans	30 ans
Q_{amont} (m ³ /s)	2.29	3.92	4.03	4.11	4.15
$Q_{\text{aval conservé}}$ (m ³ /s)	1.83	2.48	2.53	2.58	2.59
$Q_{\text{aval conservé}} / Q_{\text{amont}}$	80%	63%	63%	63%	62%
$Q_{\text{aval déversé}}$ (m ³ /s)	0.46	2.73	3.07	3.32	3.44
$Q_{\text{aval déversé}} / Q_{\text{amont}}$	20%	70%	76%	81%	83%

Tableau 3 : Volumes cumulés simulés pour le DO15 Théâtre.

Période de retour	1 mois	5 ans	10 ans	20 ans	30 ans
$V_{\text{amont}} \text{ (m}^3\text{)}$	11 771	24 093	26 611	28 837	5 644
$V_{\text{aval_conservé}} \text{ (m}^3\text{)}$	10 752	17 886	18 810	19 497	2 416
$V_{\text{aval_conservé}} / V_{\text{amont}}$	91%	74%	71%	68%	43%
$V_{\text{aval_déversé}} \text{ (m}^3\text{)}$	1 016	6 226	7 802	9 358	3 051
$V_{\text{aval_déversé}} / V_{\text{amont}}$	9%	26%	29%	32%	54%

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 0,5 m³/s. Ce débit atteint environ 2,7 m³/s pour la pluie 5 ans et est compris entre 3,0 et 3,5 m³/s pour des pluies de période de retour 10 à 30 ans.
- Cela signifie que le déversoir surverse à partir d'un débit amont de l'ordre de 2 m³/s.
- A noter que le débit aval conservé représente 80 % du débit amont total lorsque l'ouvrage déverse pour une pluie de période de retour 1 mois. Cette valeur est plus faible pour des pluies de périodes de retour plus importantes (environ 63 %).

2.3.3. Lames et débits déversés

L'ouvrage n'étant pas 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 des hauteurs d'eau mesurées dans le collecteur aval conservé (sonde placée quelques mètres en aval du seuil). Les mesures ont été transmises par le Grand Belfort à 3D EAU sur une période allant du 01/01/2019 au 06/02/2020.

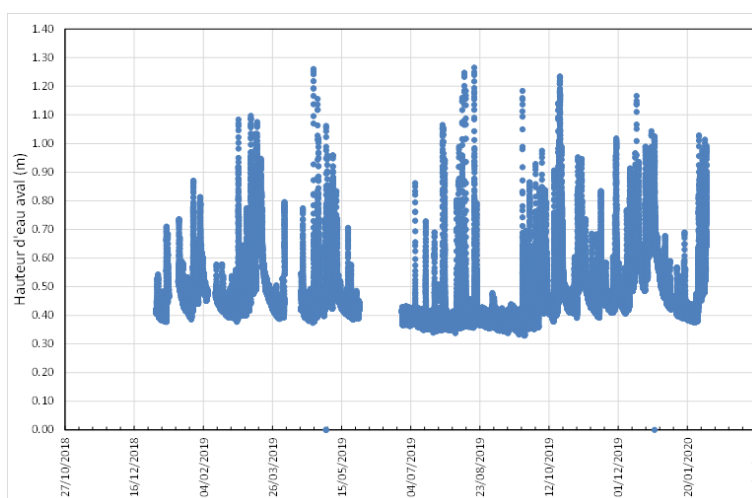


Figure 7. Evolution de la hauteur d'eau dans le collecteur aval conservé du DO15 Théâtre entre le 01/01/2019 au 06/02/2020 (Source : Le Grand Belfort).

On note qu'en moyenne la hauteur d'eau dans le collecteur aval conservé est de l'ordre de 45 cm. Des pics de hauteurs sont relevés sans toutefois provoquer de mise en charge car les valeurs demeurent inférieures à la hauteur de la voute de l'ovoïde (2 m). Les hauteurs d'eau mesurées à l'aval sont traduites en hauteurs de lame déversante. Pour ce faire, à chaque valeur on retranche la hauteur de pelle amont (distance entre le radier du collecteur ovoïde et la crête), soit 79 cm. Puis une relation empirique de seuil rectangulaire frontal sans contraction latérale (loi de Kindsvater et Carter) est utilisée en première approche pour estimer approximativement le débit déversé théorique attendu 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. A titre comparatif est représentée sur cette même figure par les croix rouges l'évolution du débit mesuré par la sonde en place dans la conduite de décharge (sonde placée quelques mètres en aval de l'engouffrement du DN1000). On constate que le débit déversé peut théoriquement varier entre 0 et $1,25 \text{ m}^3/\text{s}$ pour une lame déversante maximale de 48 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 maximales comprises entre 1 mois et 5 ans.

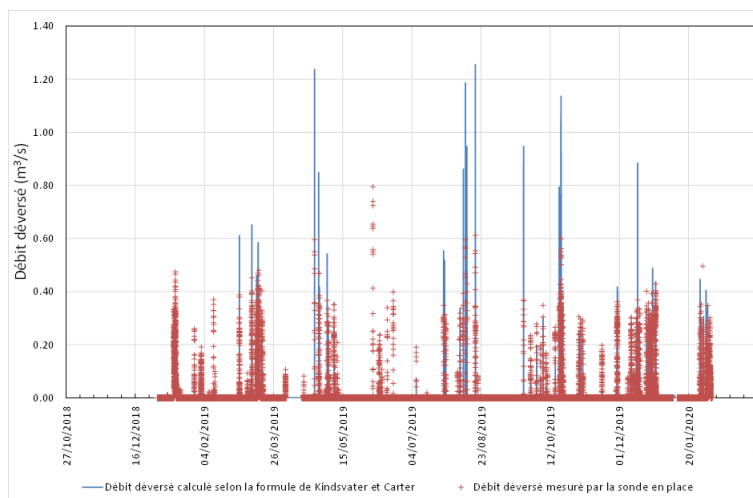


Figure 8. Evolution du débit déversé du DO15 Théâtre entre le 01/01/2019 au 06/02/2020.

Remarque : Les débits déversés mesurés par la sonde Doppler sont affichés à titre indicatif et ne sont pas utilisés davantage dans l'analyse. La sonde étant placée quelques mètres en aval de l'engouffrement du DN1000, on s'attend à ce que la surface libre ainsi que la distribution de la vitesse soient perturbées au droit de la mesure. Par ailleurs, les mesures effectuées par la sonde indiquent régulièrement des hauteurs d'eau inférieures à 10 cm. Ces éléments ne sont pas favorables à une mesure fiable du débit par une sonde hauteur/vitesse (ISO 15769).

Les débits déversés sont convertis en volume. Cela permet de visualiser la contribution de chaque hauteur de lame déversante en termes de volume déversé par rapport au volume total déversé sur la période de mesure. La Figure 9 présente les résultats obtenus. On constate que la contribution au volume déversé total est relativement homogène sur la gamme de hauteurs de lame déversante. La contribution la plus forte est apportée par des lames de 14 cm (4,7 %). On note que les lames comprises entre 0 et 5 cm représentent seulement 4 % du volume déversé total. Les lames déversantes intermédiaires, comprises entre 8 cm et 22 cm, contribuent à elles seules à 50 % du volume total déversé.

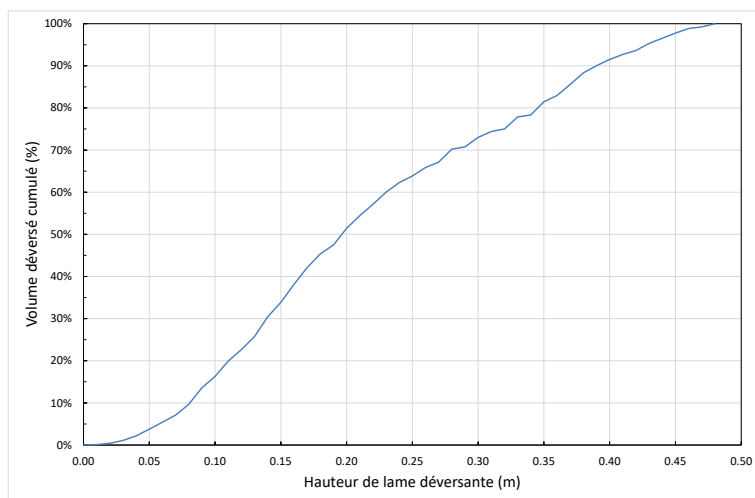


Figure 9. Evolution du volume déversé cumulé en fonction de la hauteur de lame déversante dans le DO15 Théâtre.

Le Tableau 4 propose une synthèse de l'analyse des mesures.

Tableau 4 : Synthèse de l'analyse des mesures.

Période	01/01/2019 au 06/02/2020
Mesures hauteur collecteur aval conservé	0 à 1,27 m
Hauteurs de lame déversantes	0 à 0,48 m
Débites déversés estimés à partir de la relation de Kindsvater et Carter	0 à 1,25 m ³ /s
Volume total déversé, estimé à partir des débits issus de la relation de Kindsvater et Carter	97 121 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 5.

Sachant que le rejet du DO Théâtre 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 357,08 m NGF (voir encadré rouge sur le Tableau 5).

Tableau 5 : Cotes pour différentes crues de la Savoureuse (Source : étude EGIS).

Type d'ouvrage	Dénomination	Altitude crête des seuils (m NGF)	Altitude échancrure (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				Amont	359.26	356.75	357.08	358.07	358.59	0.31	0.10	0.71	1.92	2.33	2.71
					Aval	-	356.75	357.06	357.85	358.33		0.14	1.10	2.13	2.46	2.77
Pont	Pont Clémenceau				Amont	358.93	356.57	356.88	357.74	358.22	-0.25	0.34	0.93	1.80	2.10	2.34
					Aval	-	356.56	356.87	357.66	358.17		0.08	0.37	1.67	1.91	2.13
Seuil	Seuil des Lettres	356.53	356.43		Amont	358.55	356.54	356.62	357.17	357.68		0.18	0.46	1.59	1.98	2.26
					Aval	-	355.89	356.12	357.17	357.68	-0.19	0.07	0.33	1.60	1.99	2.27
Pont	Passerelle des Lettres				Amont	358.52	355.89	356.12	357.20	357.72		0.09	0.33	1.17	1.56	1.91
					Aval	-	355.89	356.04	357.08	357.59	-0.15	0.50	1.03	1.42	1.82	2.10
Pont	Pont Carnot				Amont	358.52	355.89	356.04	357.08	357.59		0.04	0.25	1.15	1.51	1.81
					Aval	-	355.89	356.02	357.02	357.48		0.08	0.36	1.38	1.83	2.12
Seuil	Seuil des Arts	355.94	355.84		Amont	358.52	355.89	356.02	357.02	357.48		0.20	0.65	1.16	1.43	1.68
					Aval	-	354.68	354.91	356.33	357.11	-1.78	0.24	0.83	1.33	1.55	1.76
Pont	Passerelle des Arts				Amont	356.56	354.66	354.95	356.36	357.08		0.42	0.84	1.42	1.67	2.00
					Aval	-	354.60	354.94	356.28	356.93		0.08	0.46	1.85	2.31	2.83
Seuil	Seuil Denfert-Rochereau	354.76	354.56		Amont	354.57	354.37	354.87	356.14	356.73		0.08	0.63	1.75	2.16	2.68
					Aval	-	354.10	354.65	355.85	356.48		0.19	0.64	1.45	1.85	2.34
Pont	Pont Denfert-Rochereau				Amont	357.98	354.10	354.66	355.89	356.52	0.55	0.08	0.63	1.50	1.89	2.38
					Aval	-	353.89	354.63	355.82	356.42	-0.25	0.20	0.66	1.44	1.93	2.54
Pont	Passerelle Gambetta				Amont	357.02	353.89	354.63	355.81	356.41		0.10	0.44	1.44	1.94	2.55
					Aval	-	352.89	353.60	355.05	355.63		0.16	0.91	2.71	3.20	3.80
Seuil	Seuil Gambetta	354.57	353.72		Amont	352.88	352.88	352.59	354.69	355.21		0.09	0.33	1.37	1.84	2.41
					Aval	-	351.83	352.06	353.25	353.94		0.55	1.86	1.61	1.93	2.36
Pont	Pont Richelieu				Amont	355.59	351.83	352.13	353.31	354.00	0.65	0.06	0.73	1.09	1.44	1.90
					Aval	-	351.81	352.00	353.01	353.68		0.35	1.19	1.77	2.09	2.53
Pont	Pont du Général De Gaulle				Amont	353.68	350.39	350.86	352.64	353.29	-0.44	0.16	0.75	1.80	2.35	3.03
					Aval	-	350.39	350.84	352.53	353.13		0.32	0.86	1.82	2.43	3.17

359.58 Pont en charge

1.85 Très forte vitesse
1.07 Forte vitesse

Les plans transmis à 3D EAU par le Grand Belfort indiquent que la cote altimétrique de la crête du DO Théâtre se situe à l'altitude 356,62 m NGF. Dès lors, la cote maximale de la Savoureuse à 357,08 m NGF correspond à un niveau d'eau 46 cm plus haut que le seuil du DO15 Théâtre.

3D EAU propose ainsi de tester au maximum un niveau d'influence aval de 46 cm au-dessus du seuil pour la modélisation hydraulique 3D avec influence aval du milieu naturel.

Remarque : La cote altimétrique du seuil du DO Théâtre ainsi que l'hypothèse d'une influence aval maximale de 46 cm au-dessus du seuil correspondant au Q10 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. Ce clapet peut opposer une résistance à l'écoulement qui a été mesurée pour plusieurs angles d'ouverture afin de la prendre en compte dans l'analyse et si nécessaire dans l'établissement de l'autosurveillance.

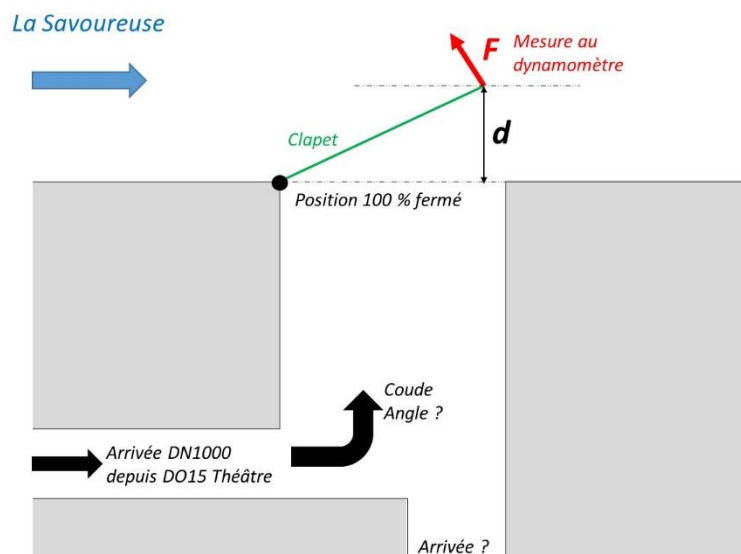


Figure 10. Vue en plan de l'écoulement au niveau du clapet : principe de mesure de la résistance du clapet.

Les mesures sont synthétisées dans le Tableau 6.

Tableau 6 : Mesures de la résistance du clapet pour plusieurs angles d'ouverture.

Distance d (cm)	Force F (kg)
5	3,1
5	2,5
10	3,0
10	2,8
15	2,8
20	2,4
30	2,8
40	3,2

Les mesures indiquent une résistance à l'ouverture relativement constante du clapet de l'ordre de 2,8 kg. Cet ordre de grandeur signifie que le clapet est très léger et facile à ouvrir. **En conclusion, les mesures 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 11.

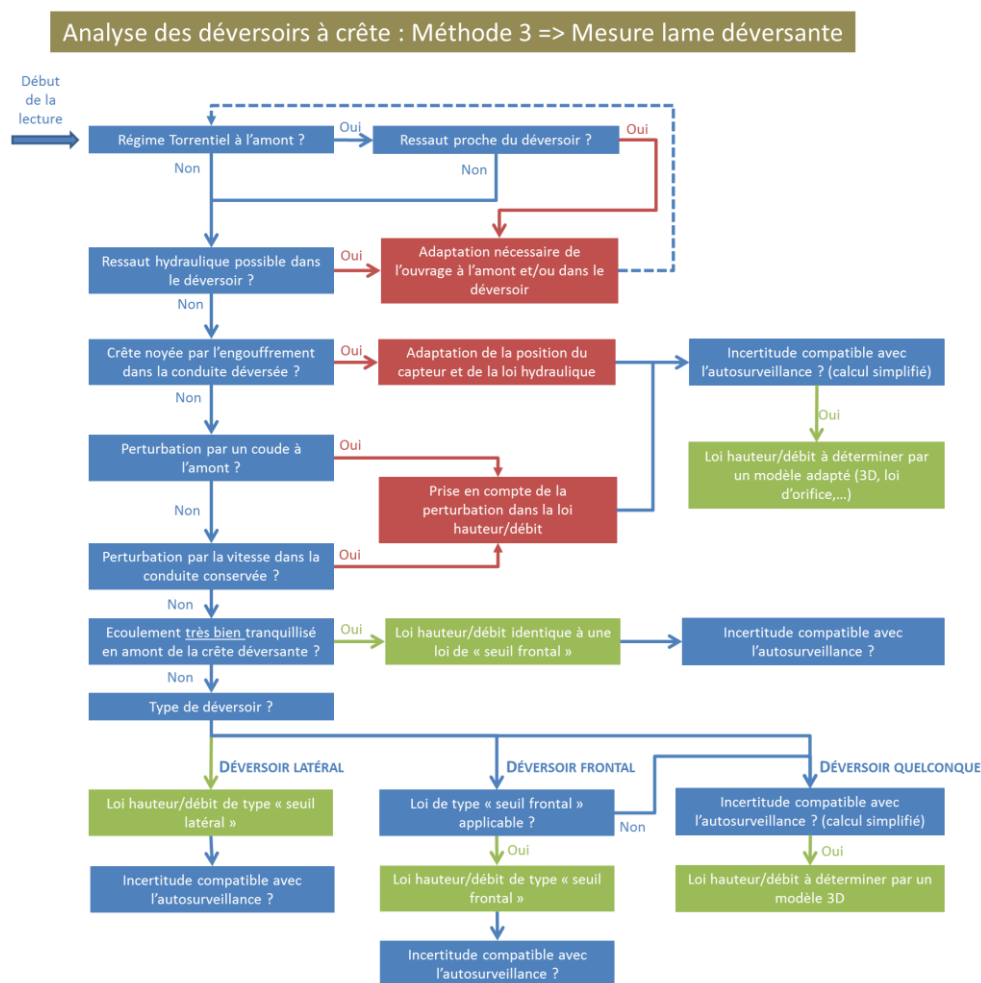


Figure 11. Logigramme d'analyse d'un déversoir d'orage en vue de son instrumentation en hauteur d'eau.

3.1. Régime d'écoulement amont

La pente de la conduite amont est faible. 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'envolement du seuil par l'aval déversé

La pente de la conduite de décharge est de 1,64 %. D'après l'analyse hydraulique présentée par la Figure 12, sa capacité d'évacuation est de l'ordre de 1,3 m³/s avant d'influencer le déversement (hypothèse d'une hauteur d'eau de 48 cm à l'amont du collecteur DN1000, correspondant à la hauteur de pelle aval du déversoir).

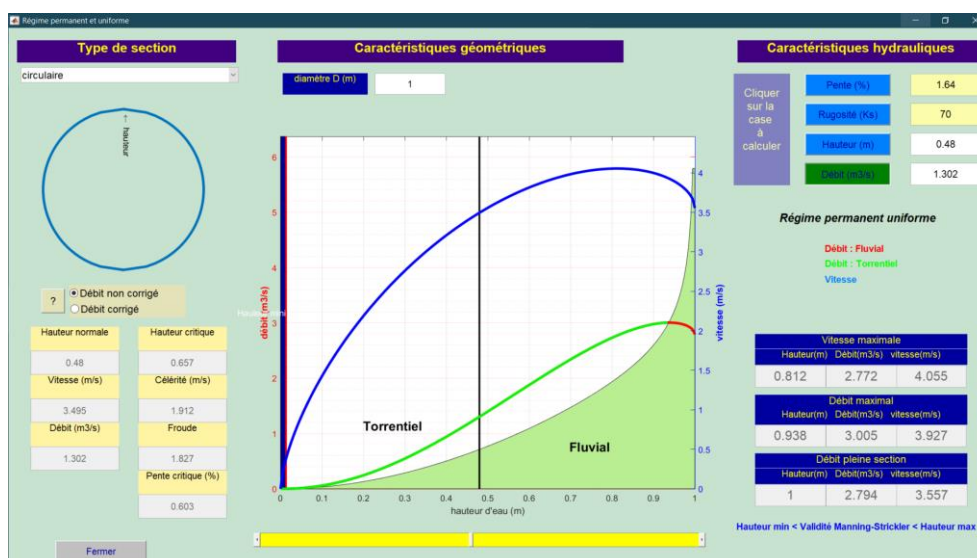


Figure 12. Détermination du régime d'écoulement et du débit capable de la conduite aval déversée.

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 1,25 m³/s pour une hauteur de lame déversante de l'ordre d'environ 48 cm. Cela laisse à penser que la conduite de décharge ne devrait pas influencer le déversement par-dessus le seuil. Or 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 1,25 m³/s à partir d'une pluie de période de retour 5 ans.

Par ailleurs, l'envolement du seuil peut être également favorisé compte-tenu du rétrécissement de la section de passage à l'entrée du DN1000 en aval du seuil.

Ainsi, le risque d'envolement 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. On note toutefois le passage en encorbellement de la conduite en DN400 au-dessus du seuil dans l'ouvrage. Cette dernière réduit la hauteur de passage de l'eau à la verticale du seuil. Cela est susceptible de perturber fortement la mesure notamment pour les débits déversés conduisant à des hauteurs de lame déversantes importantes.

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

Le Grand Belfort a transmis à 3D EAU les mesures de vitesse réalisées au début du collecteur aval conservé sur la même période de mesure que précédemment (cf. paragraphe 2.3.3). Les mesures indiquent qu'en cas de déversement les vitesses peuvent nettement dépasser 0,5 m/s comme indiqué par la Figure 13. On relève par ailleurs des vitesses maximales supérieures à 1 m/s. Cette gamme de vitesse est susceptible de perturber la mesure.

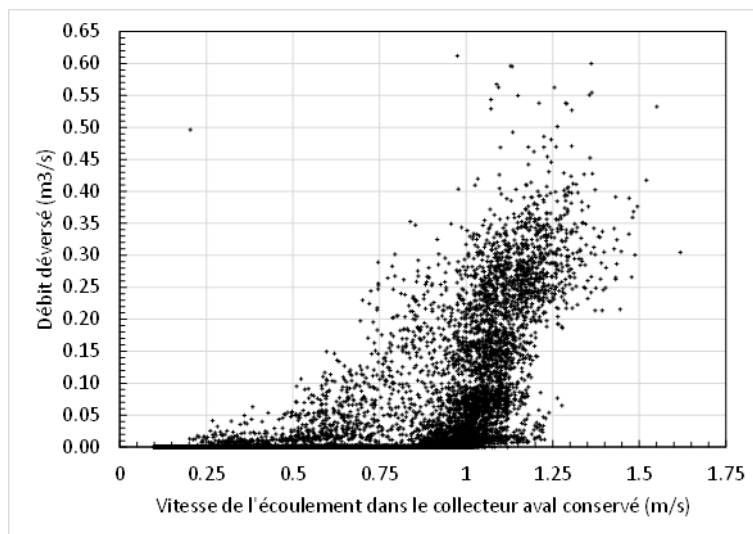


Figure 13. Evolution du débit déversé en fonction de la vitesse de l'écoulement.

3.6. Ecoulement très bien tranquillisé ?

Au vu de la configuration de l'ouvrage (présence d'un DN400 encombrant la fenêtre du DO), 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 hauteur – vitesse collectées par le capteur Doppler situé dans le temps sec permettent 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 7 : 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 ?	OUI
Critère 5	Perturbation par la vitesse dans la conduite conservée ?	OUI
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'engouffrement ou du milieu naturel sur le seuil, perturbation de la surface libre par le DN400 suspendu au-dessus de la crête, propice à une accélération de l'écoulement pour les forts débits déversés (réduction de la section de passage selon la hauteur).

3.9. 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 DO15 Théâtre est modélisé en considérant les dimensions présentées précédemment.

4.1. Construction du modèle 3D

La géométrie exacte du DO15 Théâtre est reproduite numériquement dans le modèle (cf. Figure 14) en intégrant la chambre de déversement dans son ensemble et une partie des conduites amont et aval. En vert est représentée la surface d'injection des effluents. Les surfaces rouges correspondent aux surfaces de sortie de l'écoulement. Les surfaces grises en transparence représentent les parois de l'ouvrage. Enfin, la surface jaune correspond au plafond du modèle où est maintenue une pression atmosphérique.

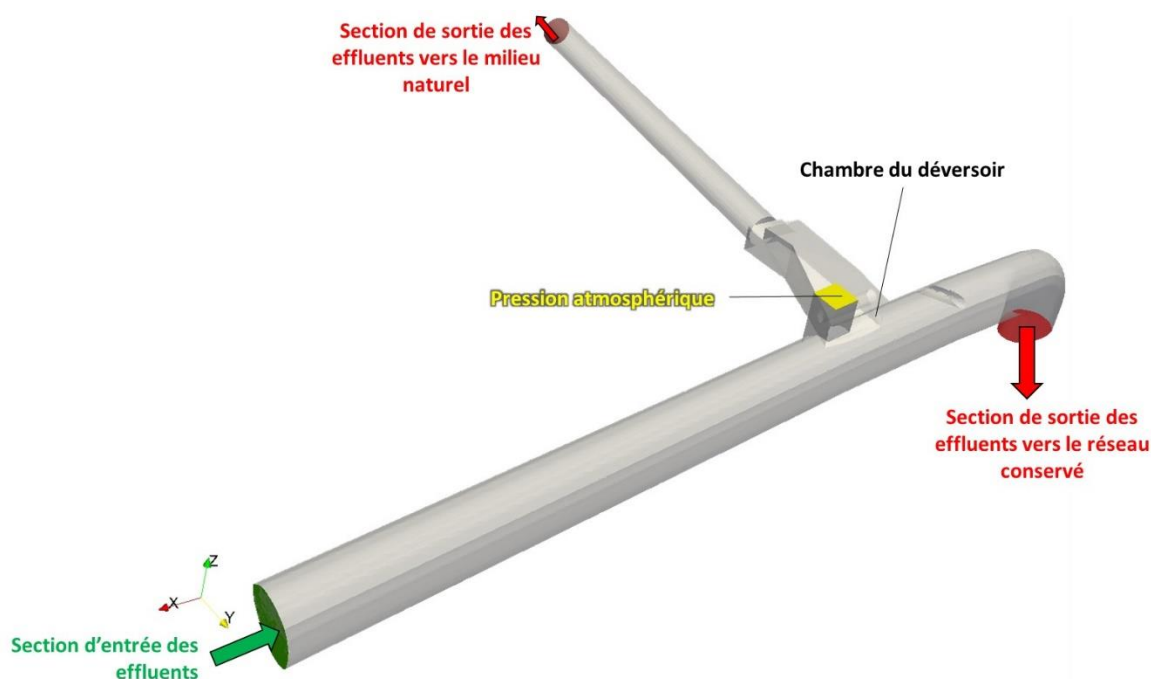


Figure 14. Vue de la géométrie du modèle.

Remarque : La sortie aval conservé du modèle 3D présente un coude, ce qui ne correspond pas à la configuration réelle de l'ouvrage. Le coude est un artifice de calcul permettant de correctement renseigner la condition limite aval réseau.

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 881 000 et 3 600 000 cellules. La taille des mailles est choisie de façon à garantir un résultat précis. Des cellules de 6,3 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 3,1 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 1,6 cm selon les scénarios modélisés sont utilisées. Le maillage est illustré par les Figure 15 et Figure 16.

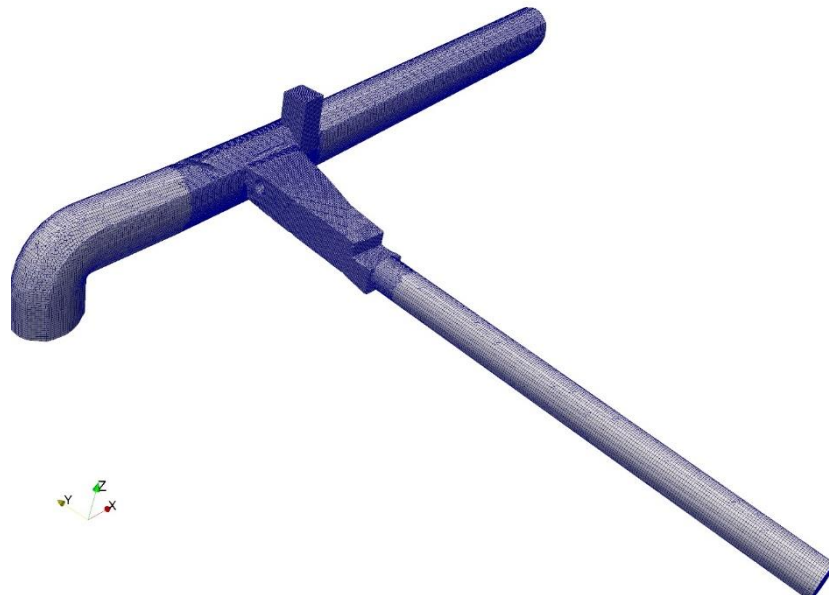


Figure 15. Maillage utilisé pour les simulations numériques 3D : vue globale de l'ouvrage.

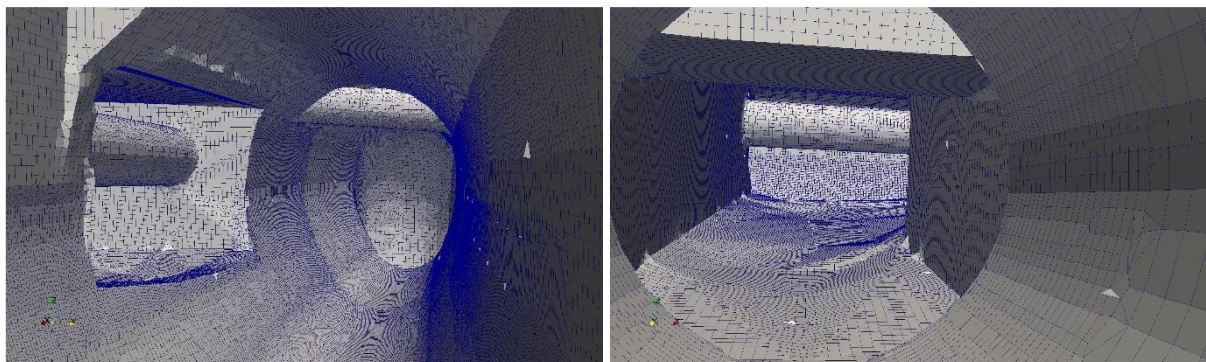


Figure 16. Maillage utilisé pour les simulations numériques 3D : vue intérieure de l'ouvrage depuis l'entrée amont (image de gauche) et vue intérieure de l'ouvrage depuis la conduite aval déversé (image de droite).

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, 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 est imposée à l'aval déversé afin de représenter l'influence du milieu naturel. Dans le cas d'un scénario sans influence aval, 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 Théâtre, un total de 12 simulations est mené (cf. Tableau 8) 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 8 : 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	-	0.650	0.600
Sim2		-	0.950	0.750
Sim3		-	5.600	2.500
Sim4		-	1.660	1.200
Sim5		-	3.300	2.100
Sim6		-	2.800	2.000
Sim7		-	4.550	2.400
Sim8	Autosurveillance avec influence aval de la Savoureuse	0.46	1.660	1.200
Sim9		0.30	0.950	0.750
Sim10		0.30	1.660	1.200
Sim11		0.15	1.660	1.200
Sim12		0.15	0.950	0.750

- Les simulations Sim1 à Sim7 correspondent à un mode de fonctionnement correspondant à un niveau de la Savoureuse bas. 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 356,62 m NGF,

3 niveaux différents d'influence aval sont testés : 356,77 m NGF, 356,92 m NGF et 357,08 m NGF (respectivement des niveaux de la Savoureuse supérieurs de 15 cm, 30 cm et 46 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 0,050 m³/s et 3,100 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 à son point le plus bas. Les hauteurs de lame déversante sont exprimées en mètres. Sur chaque figure, l'écoulement s'effectue de la gauche vers la droite. 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.

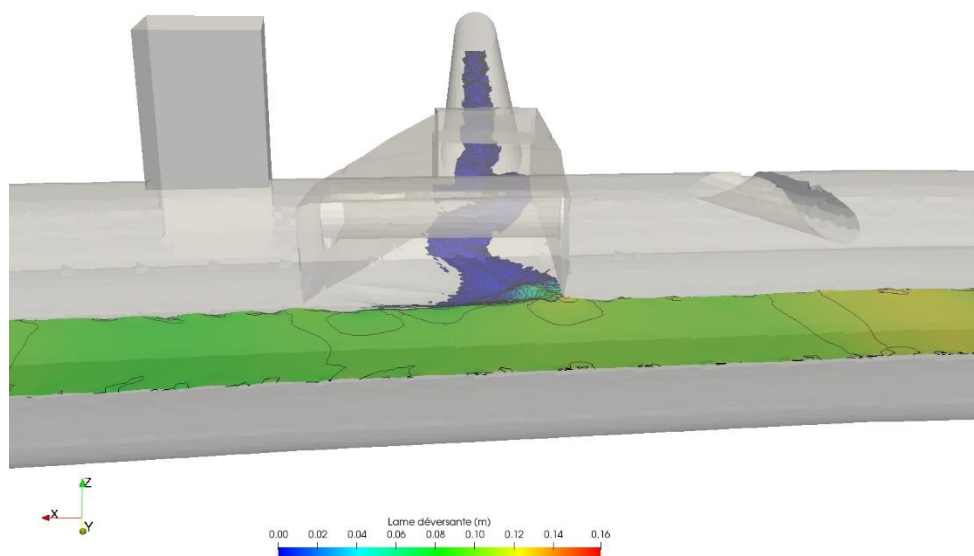


Figure 17. Résultats 3D : surface libre pour un débit déversé de 0,05 m³/s (Sim1).

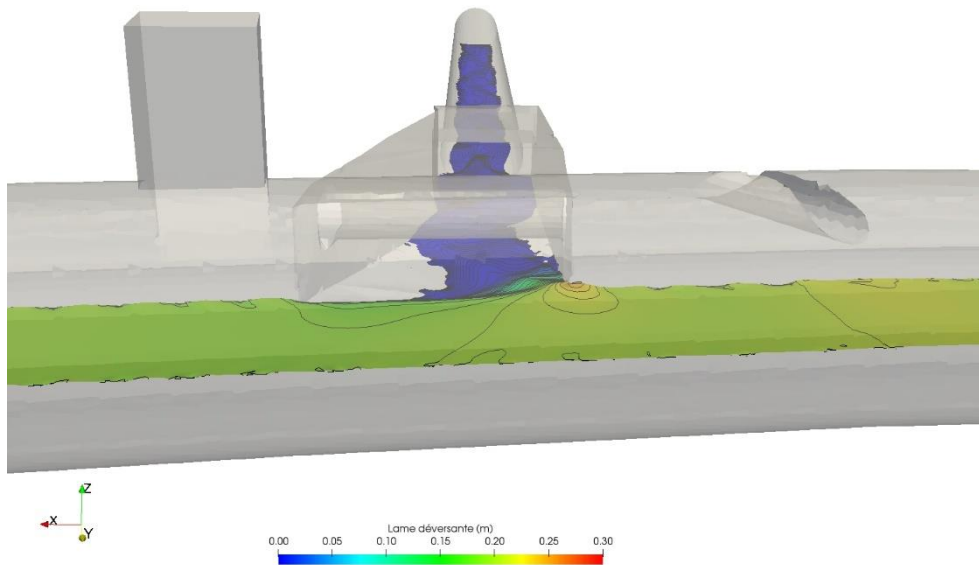


Figure 18. Résultats 3D : surface libre pour un débit déversé de 0,20 m³/s (Sim2).

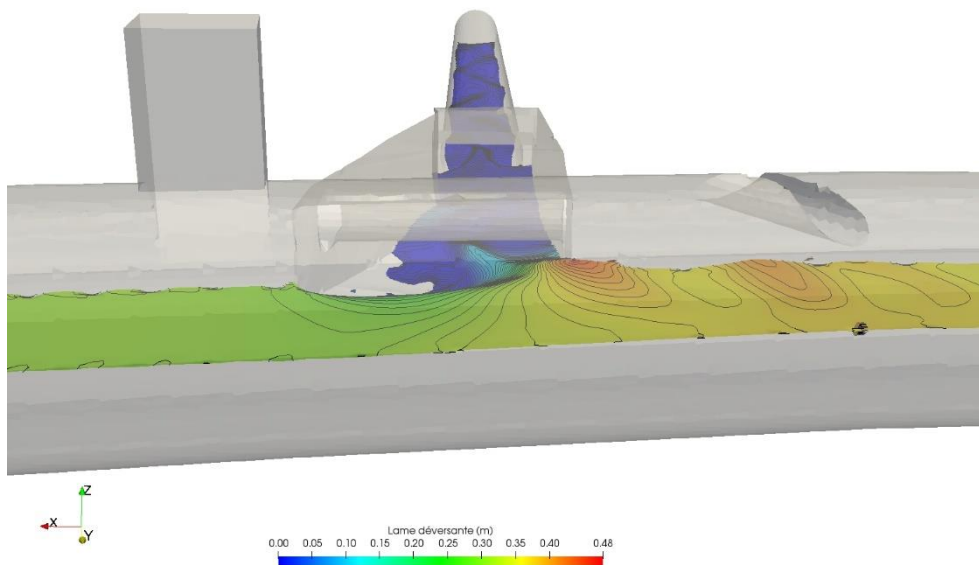


Figure 19. Résultats 3D : surface libre pour un débit déversé de 0,46 m³/s (Sim4).

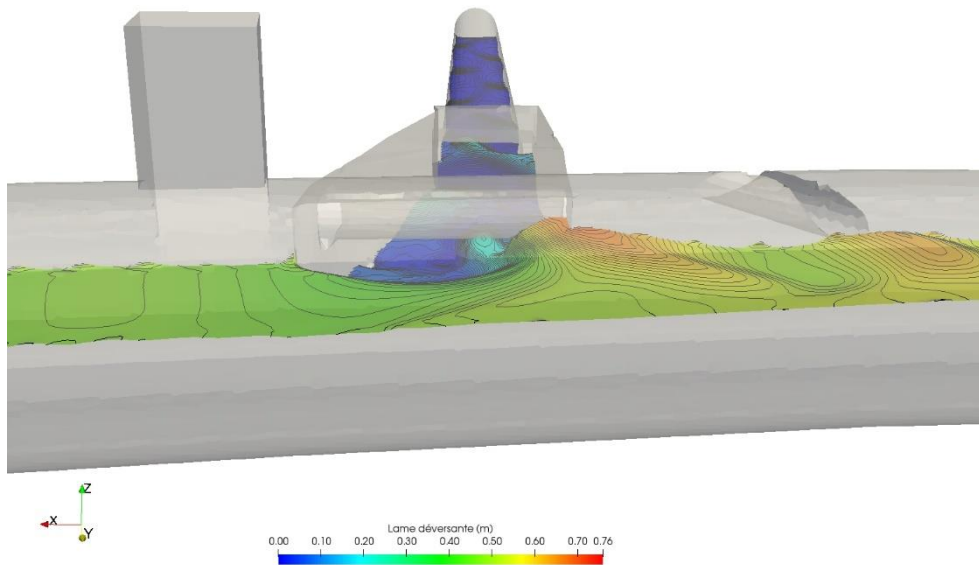


Figure 20. Résultats 3D : surface libre pour un débit déversé de 0,80 m³/s (Sim6).

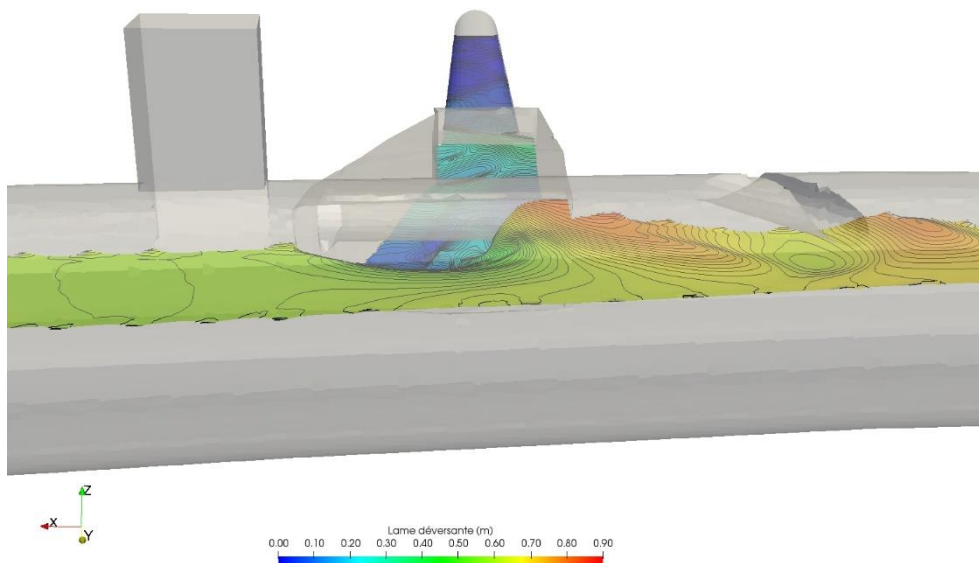


Figure 21. Résultats 3D : surface libre pour un débit déversé de 1,20 m³/s (Sim5).

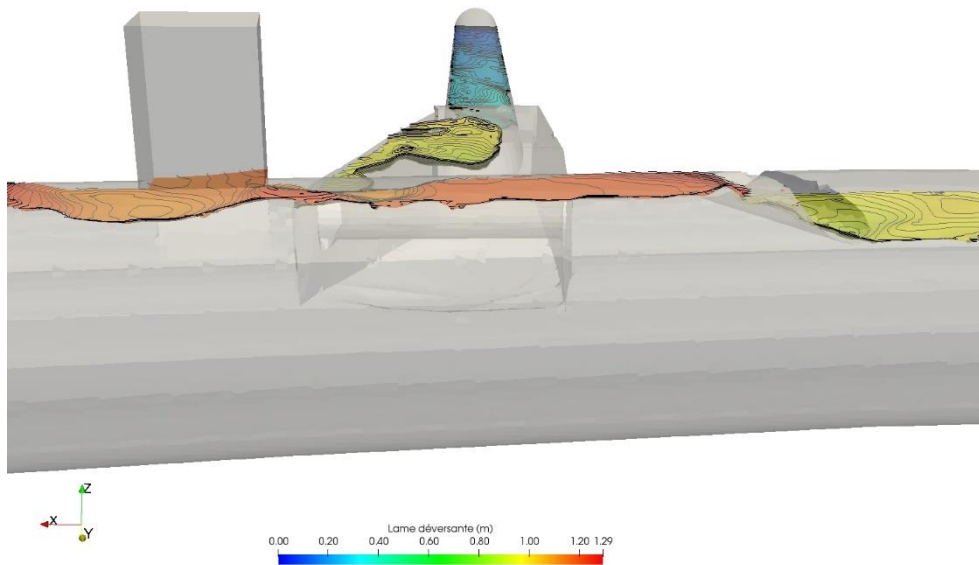


Figure 22. Résultats 3D : surface libre pour un débit déversé de 2,15 m³/s (Sim7).

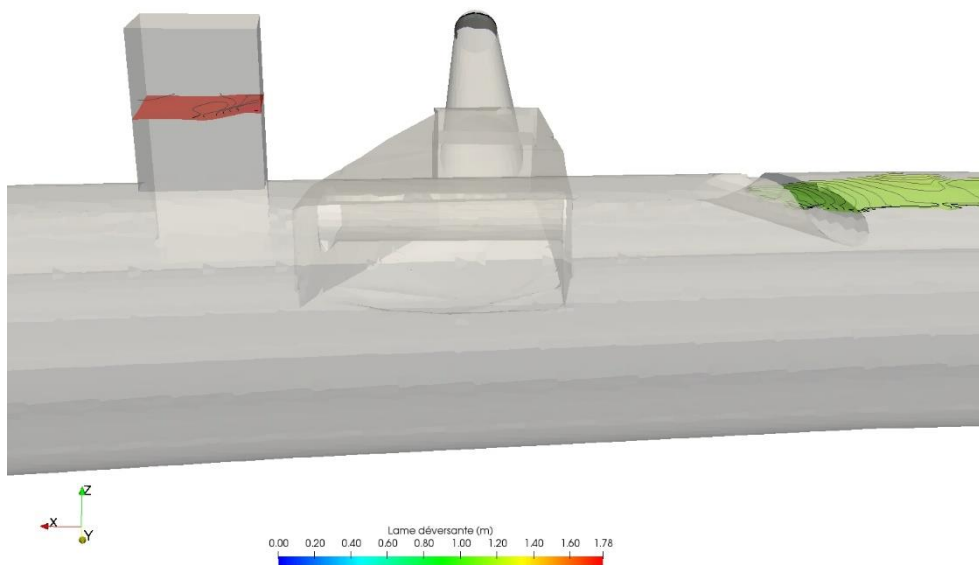


Figure 23. Résultats 3D : surface libre pour un débit déversé de 3,10 m³/s (Sim3).

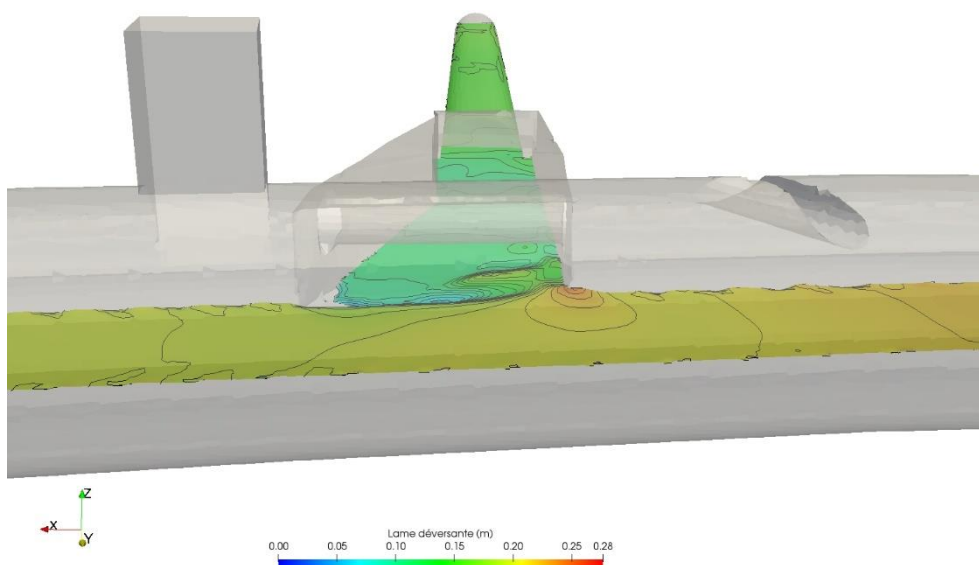


Figure 24. Résultats 3D : surface libre pour un débit déversé de $0,20 \text{ m}^3/\text{s}$ et un niveau de la Savoureuse supérieur de 15 cm par rapport à la crête déversante (Sim12).

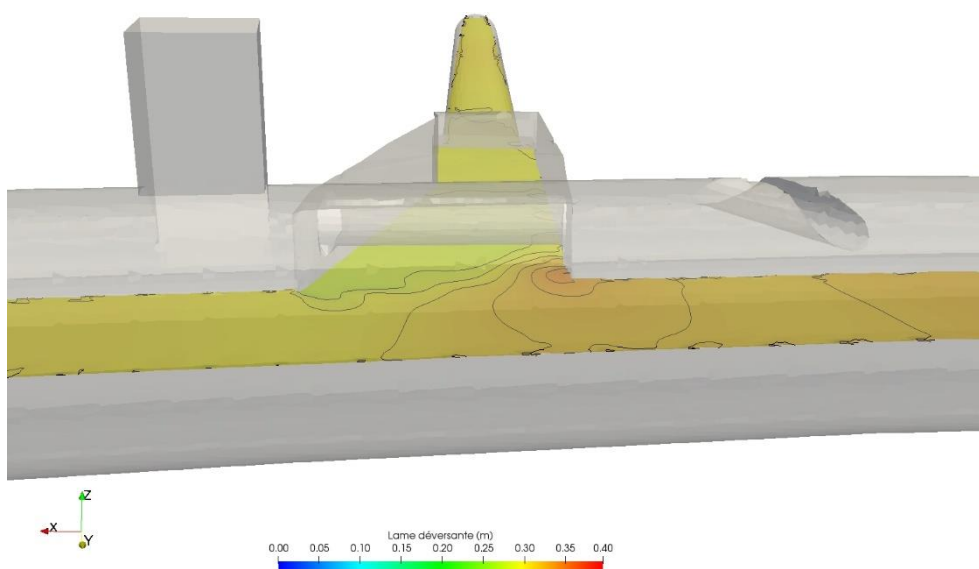


Figure 25. Résultats 3D : surface libre pour un débit déversé de $0,20 \text{ m}^3/\text{s}$ et un niveau de la Savoureuse supérieur de 30 cm par rapport à la crête déversante (Sim9).

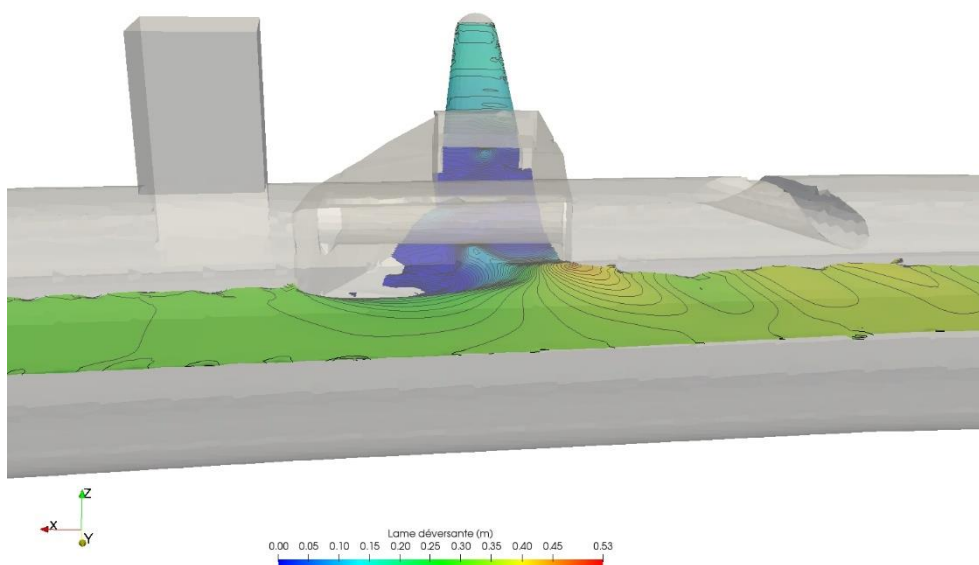


Figure 26. Résultats 3D : surface libre pour un débit déversé de $0,46 \text{ m}^3/\text{s}$ et un niveau de la Savoureuse supérieur de 15 cm par rapport à la crête déversante (Sim11).

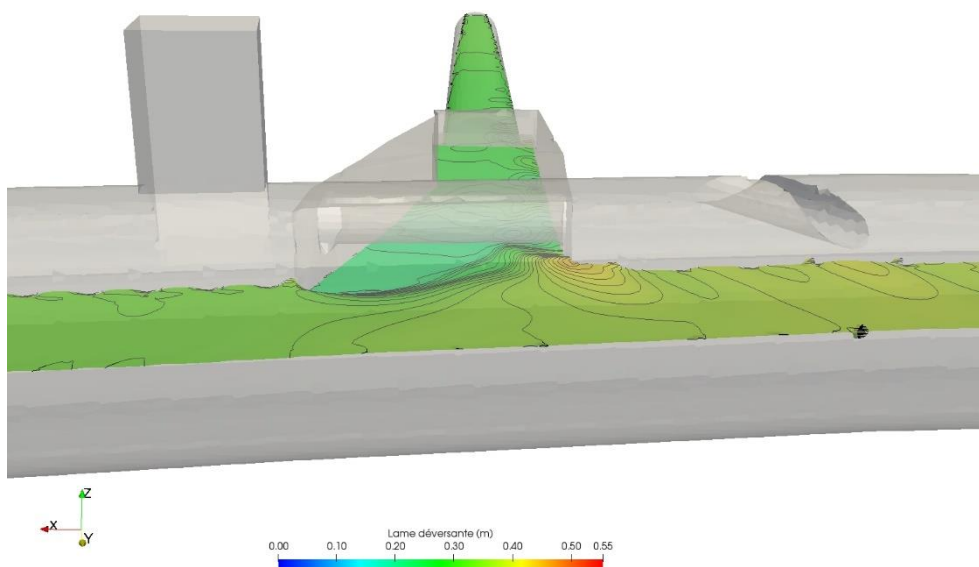


Figure 27. Résultats 3D : surface libre pour un débit déversé de $0,46 \text{ m}^3/\text{s}$ et un niveau de la Savoureuse supérieur de 30 cm par rapport à la crête déversante (Sim10).

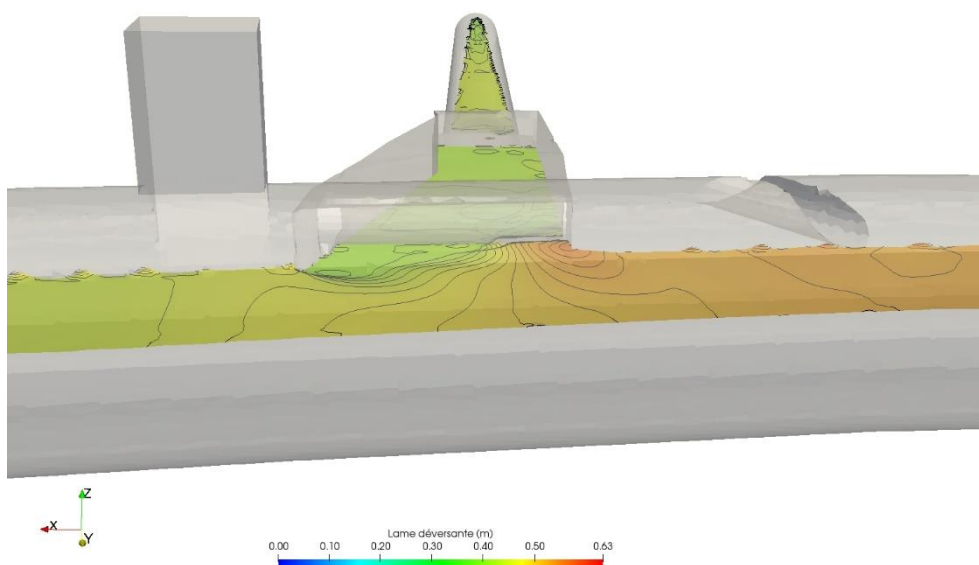


Figure 28. Résultats 3D : surface libre pour un débit déversé de $0,46 \text{ m}^3/\text{s}$ et un niveau de la Savoureuse supérieur de 46 cm par rapport à la crête déversante (Sim8).

5.3. Lames déversantes et débits

Pour chaque simulation effectuée, les résultats suivants sont extraits (Tableau 9) :

- 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 du DN1000 (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 9 : 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 (m³/s)	Débit aval conservé (m³/s)	Débit aval déversé (m³/s)	Lame déversante amont seuil h1 (m)	Lame déversante aval seuil h2 (m)	Hauteur milieu naturel h3 (m)
Sim1	Autosurveillance sans influence aval de la Savoureuse	-	0.650	0.600	0.050	0.096	-0.268	-
Sim2		-	0.950	0.750	0.200	0.184	-0.171	-
Sim3		-	5.600	2.500	3.100	1.729	0.959	-
Sim4		-	1.660	1.200	0.460	0.301	-0.042	-
Sim5		-	3.300	2.100	1.200	0.564	0.227	-
Sim6		-	2.800	2.000	0.800	0.453	0.017	-
Sim7		-	4.550	2.400	2.150	1.122	0.959	-
Sim8	Autosurveillance avec influence aval de la Savoureuse	0.46	1.660	1.200	0.460	0.472	0.416	0.460
Sim9		0.30	0.950	0.750	0.200	0.298	0.289	0.300
Sim10		0.30	1.660	1.200	0.460	0.322	0.257	0.300
Sim11		0.15	1.660	1.200	0.460	0.298	-0.024	0.150
Sim12		0.15	0.950	0.750	0.200	0.196	0.102	0.150

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 à son point le plus bas. 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 29 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 0,05 m³/s et 3,1 m³/s, les hauteurs de lame déversante amont (h_1) varient entre 9,6 cm et 1,73 m.

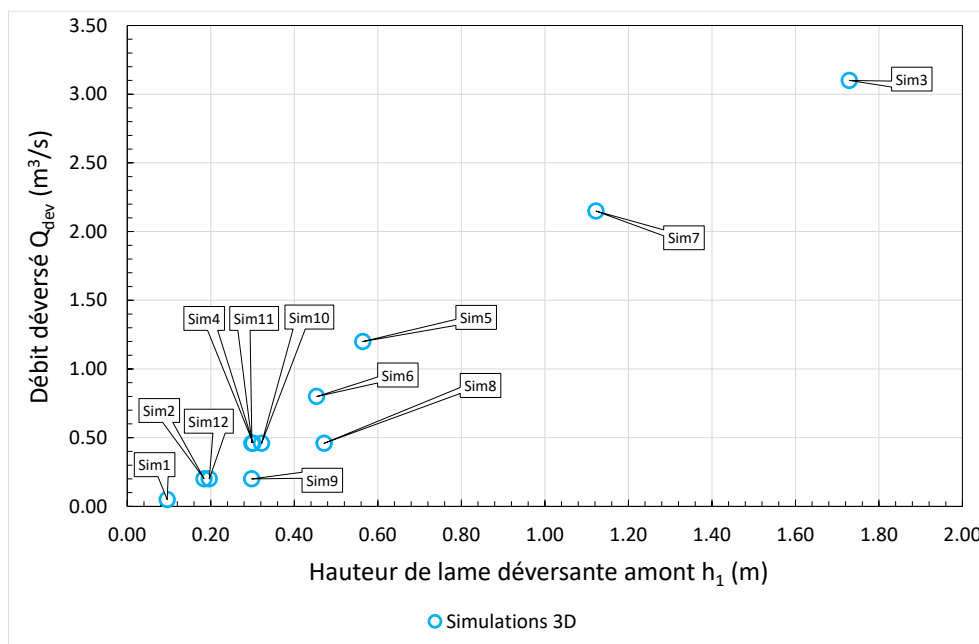


Figure 29. Résultats 3D : évolution du débit déversé en fonction de la hauteur de lame déversante à l'amont du seuil h_1 .

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 17 à la Figure 28 qu'un régime d'écoulement franchement 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 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 unicité 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, pour ces simulations, on dénote deux modes de fonctionnement hydrauliques pour le seuil qui peut être dénoyé ou noyé par l'engouffrement de la conduite de décharge en sortie de la chambre.

A titre d'exemple, la Figure 30 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 l'engouffrement du DN1000 et dans la conduite de décharge demeure sous le niveau de crête.

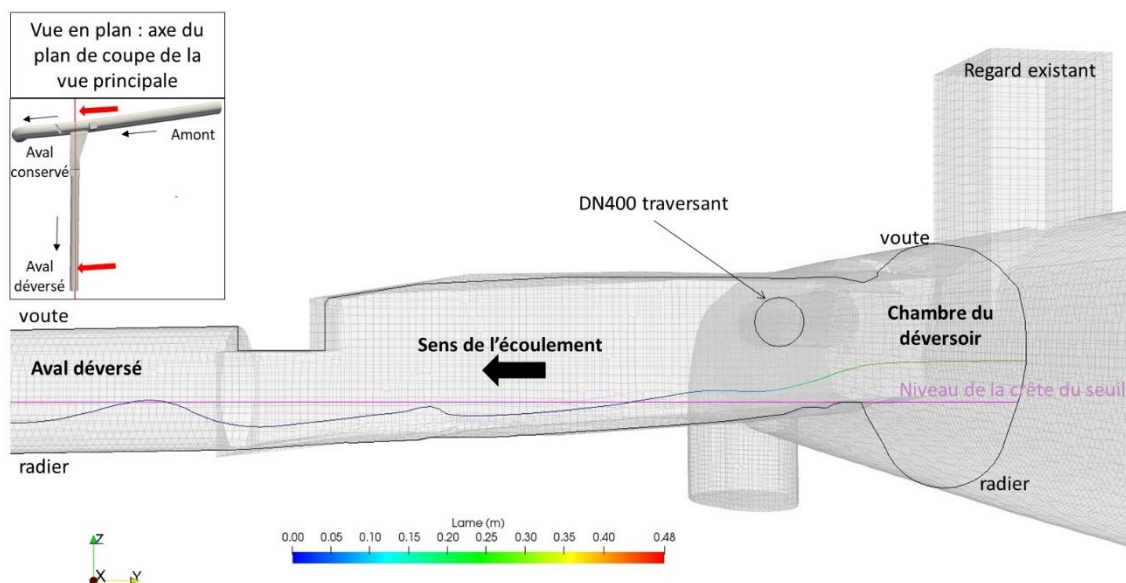


Figure 30. Résultats 3D : coupe transversale de la surface libre pour un débit déversé de $0,46 \text{ m}^3/\text{s}$ (Sim4).

A l'inverse, la Figure 31 illustre un fonctionnement noyé du seuil. Le niveau d'eau aval influence le niveau d'eau amont. La surface libre à l'amont de l'engouffrement est supérieure au niveau de la crête, traduisant l'engouffrement du seuil par l'engouffrement.

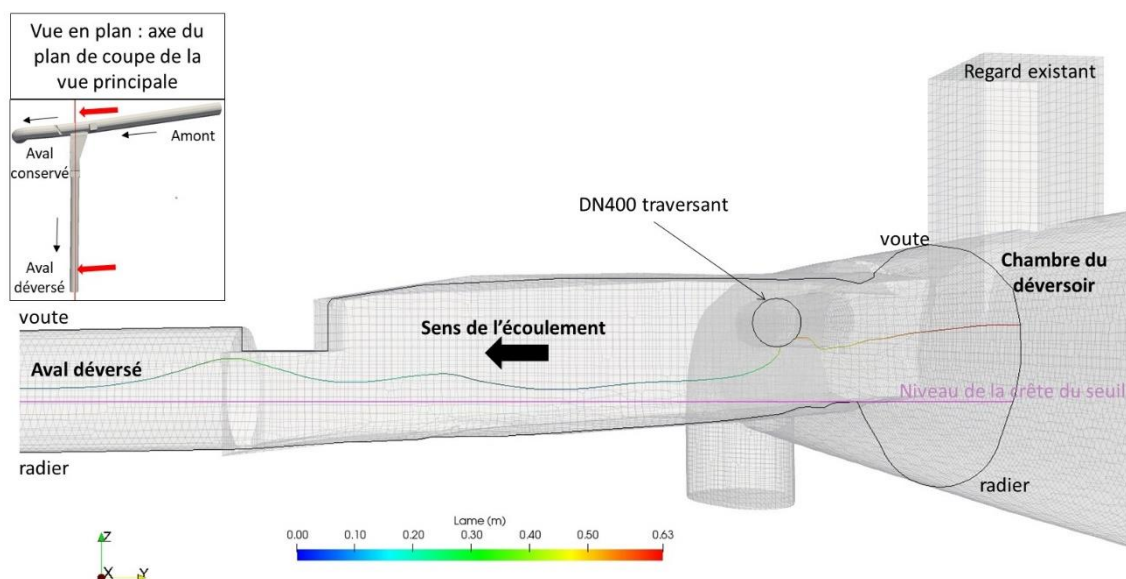


Figure 31. Résultats 3D : coupe transversale de la surface libre pour un débit déversé de $0,602 \text{ m}^3/\text{s}$ (Sim5).

Enfin, les simulations Sim1 à Sim7 (niveau de Savoureuse bas) ont mis en avant le fait que le niveau d'eau à l'amont immédiat de l'engouffrement de la conduite de décharge n'était pas impacté par le niveau d'eau dans la conduite de décharge ; l'engouffrement dans la décharge reste donc bien dénoyé.

5.4.2. Influence aval

Cinq simulations sont menées en considérant un niveau aval haut. Le Tableau 8 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 46 cm par rapport à la cote altimétrique du seuil du déversoir.

La Figure 32 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.

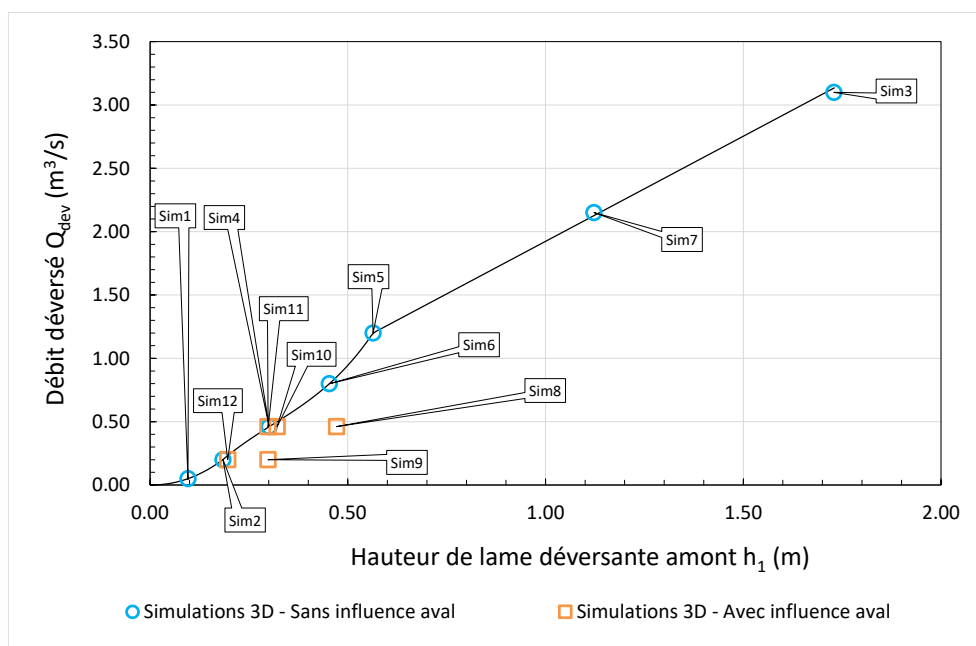


Figure 32. Résultats 3D : évolution du débit déversé en fonction de la hauteur de lame déversante à l'amont du seuil h_1 – Présentation des résultats selon le scénario hydraulique modélisé.

Malgré un niveau de la Savoureuse haut (15 cm et 30 cm) dans le calcul 3D, les simulations Sim10 à Sim12 sont très proches 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 + engouffrement s'effectue quand même de façon dénoyée vis-à-vis du milieu naturel malgré une Savoureuse haute. Ces trois simulations permettent de quantifier le niveau d'eau aval à partir duquel ce dernier devient impactant sur l'évaluation du débit.

La simulation Sim8 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 (46 cm plus haut que le niveau de la crête déversante), la hauteur de lame déversante est de 47,2 cm pour un débit déversé de 0,46 m³/s. Ce résultat peut être comparé à la Sim4 (Savoireuse très basse) qui correspond au même débit déversé. Pour la Sim4, la lame déversante est de 30,1 cm. L'augmentation de la lame déversante (Sim8 > Sim4) 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 la Sim9 en comparaison avec la Sim2. 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 29,8 cm pour un débit déversé de 0,20 m³/s, soit 11,4 cm plus haut que le cas avec un niveau très bas du milieu naturel (Sim2).

Ainsi, dans le cas des simulations Sim8 et Sim9, la Savoureuse est le point de contrôle hydraulique de l'écoulement.

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 30 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 et la possibilité d'une influence du milieu naturel sur les déversements, 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. Contraintes d'environnement et spécificités du site en vue de l'instrumentation et de l'accès à l'ouvrage

La visite de terrain du 19/05/2020 a permis de relever les contraintes d'environnement autour de l'ouvrage pouvant limiter la position des futurs capteurs de niveau d'eau et l'accès à l'ouvrage. A ce jour, l'accès dans la chambre principale du déversoir s'effectue via un tampon situé au centre de la voirie du Faubourg de Montbéliard comme illustré par la Figure 33. Le Grand Belfort a indiqué à 3D EAU que la création d'un nouveau regard est envisagée afin de garantir de meilleures conditions d'accès à l'ouvrage.



Figure 33. Accès actuel à la chambre du déversoir du DO15 Théâtre – Faubourg de Montbéliard.

Par ailleurs, la visite a permis de constater le passage de nombreux réseaux secs sous voirie et sous le trottoir à proximité de la chambre du DO, notamment le passage du réseau télécom à l'extrémité de la partie convergente en aval du seuil, comme illustré par les Figure 34 et Figure 45. Plus précisément, le réseau télécom se situe au niveau du trottoir.

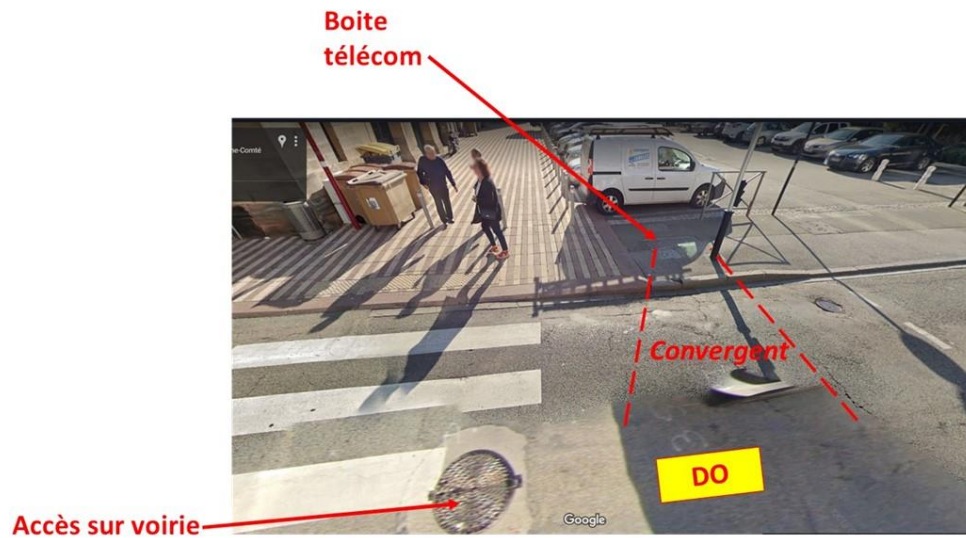


Figure 34. Accès actuel à la chambre du DO15 Théâtre – Faubourg de Montbéliard.

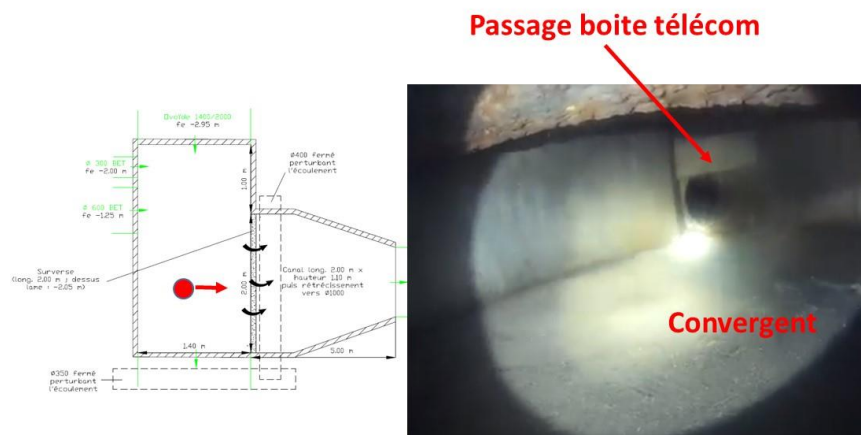


Figure 35. Localisation du passage du réseau télécom dans la chambre du DO15 Théâtre.

Les DT collectées auprès du Grand Belfort mettent en évidence également la présence des réseaux BT et HTA (cf. Figure 36) au niveau du trottoir et d'un réseau gaz en bordure de voirie.

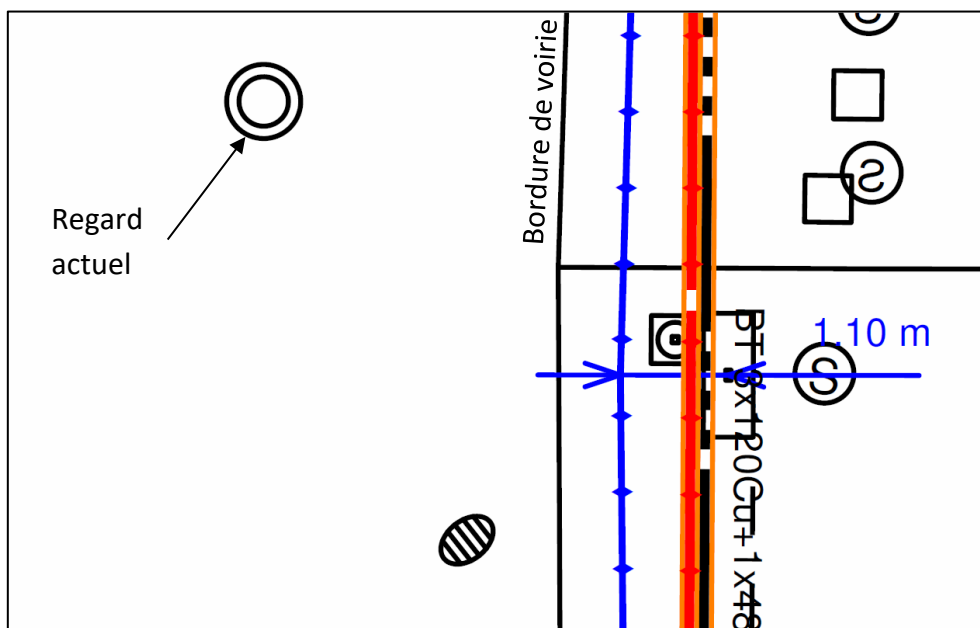


Figure 36. Extrait de la DT ENEDIS : passage des réseaux BT (en bleu) et HTA (en rouge) sur le trottoir à proximité de l'ouvrage.

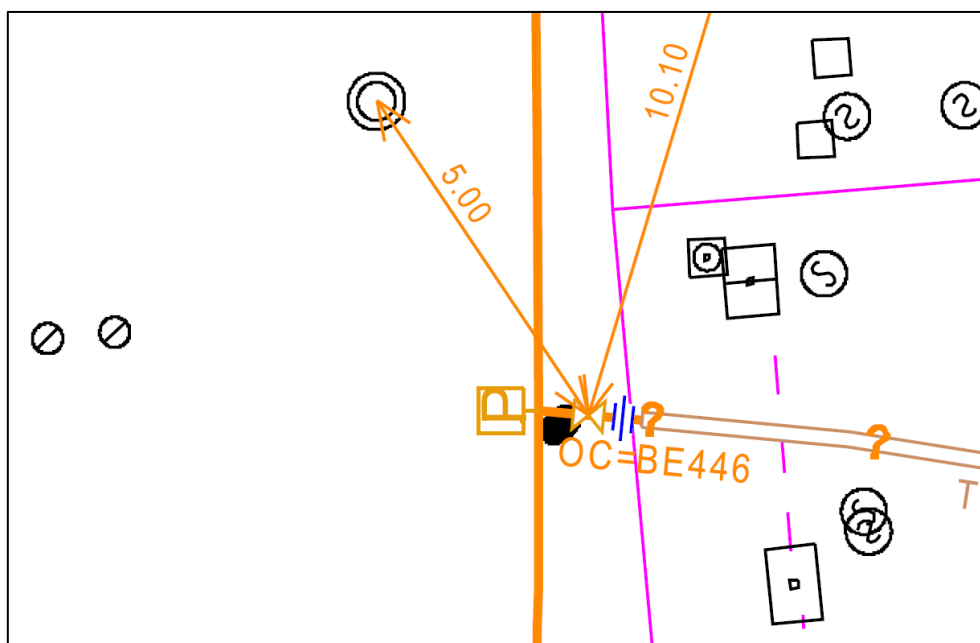


Figure 37. Extrait de la DT GRDF : passage d'un réseau gaz (en orange) sous la voirie à proximité de l'ouvrage.

Remarque : Les contraintes sous voirie et trottoir liées à la présence de nombreux réseaux remettent en cause à ce stade de l'étude la possibilité de créer un nouveau regard permettant de faciliter l'accès dans la chambre du déversoir d'orage.

Au niveau du rejet dans la Savoureuse, les visites de terrain ont mis en évidence que les échelons permettant la descente dans le regard situé à l'amont immédiat du clapet étaient dégradés (cf. Figure 38). Par ailleurs, la configuration géométrique du regard est peu propice à des conditions d'écoulement hydrauliques favorables à une mesure du niveau d'eau avec des incertitudes réduites. En effet, l'arrivée des effluents dans le regard s'effectue avec un coude, ce qui peut engendrer de fortes perturbations de la surface libre.



Figure 38. Vue de l'intérieur du regard en amont du clapet avant rejet dans la Savoureuse.

Enfin, la visite sur site (inspections des tampons sur le parking du théâtre) et l'analyse des plans transmis à 3D EAU (cf. Figure 39) indiquent l'absence de tout regard le long du collecteur DN1000, entre la chambre du déversoir et le rejet de la Savoureuse (à l'exception du regard présenté par la Figure 38).

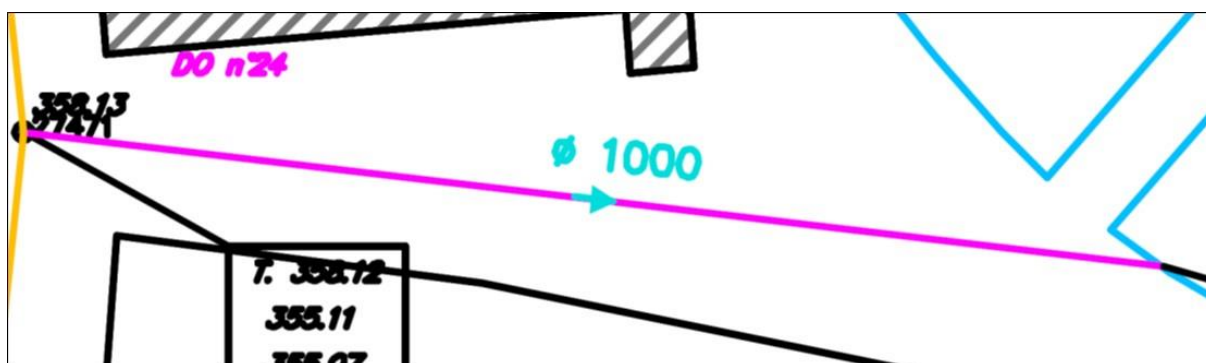


Figure 39. Vue en plan du réseau d'assainissement à l'aval du DO15 Théâtre (Source : Le Grand Belfort).

Ainsi, les contraintes d'environnement du site peuvent être répertoriées selon deux aspects :

● **Aspect géométrique de l'ouvrage :**

- Proximité de la voirie au-dessus de la chambre du déversoir,
- Encombrement sur le trottoir (plaques, feu tricolore),
- Passage de réseaux à proximité du déversoir (gaz, HTA, BT),
- Absence de regard entre la chambre et le rejet le long du DN1000,

● **Aspect lié au fonctionnement hydraulique :**

- Faible différence de niveau du radier entre le seuil et le début du DN1000, rendant la mesure d'une influence aval difficile si le capteur de mesure est placé en amont de l'engouffrement du DN1000,
- L'engouffrement pouvant être point de contrôle hydraulique (ennoisement du seuil en amont), sans influence aval de la Savoureuse, la mise en place d'un capteur en amont de l'engouffrement ne permettrait pas de mesurer correctement l'influence aval de la Savoureuse. Il y a un risque de mauvaise comptabilisation des débits qui noient le seuil sans noyer l'engouffrement.
- Risque de perturbations de la surface libre dans le regard situé en amont du clapet à l'exutoire.

6.3. Solutions proposées pour répondre à l'objectif d'instrumentation et d'accès à l'ouvrage

Au regard des éléments exposés au paragraphe suivant, 3D EAU propose la création de deux nouveaux regards pour le DO15 Théâtre :

- Le premier regard (Reg. N°1) sera situé en bordure de voirie le long du trottoir du Faubourg de Montbéliard. Ainsi, l'accès à la chambre ne se fera plus par le regard actuel situé au milieu de la voirie mais de façon déportée avec un empiètement uniquement sur la voie de circulation la plus à droite. Ainsi, ce nouveau regard permettra la descente dans la chambre du DO côté déversé sachant que l'accès vers la partie conservée est possible via l'espace laissé sous le DN400 traversant la chambre au droit de la crête (hauteur de l'ordre de 50 cm entre le radier et le bas de la conduite DN400).

Remarque importante :	Après échanges avec le Grand Belfort à l'issue de la présente étude (novembre 2020), la création du regard n°1 n'est pas recommandée suite à l'identification d'un nombre trop importants de contraintes d'environnement à proximité de l'ouvrage (passage de nombreux réseaux ; gaz notamment).
------------------------------	---

- Le capteur de mesure du niveau d'eau en amont du seuil sera positionné sous le tampon du regard actuel (au milieu de la voirie du Faubourg de Montbéliard) afin de maximiser la plage de hauteur de lame déversante, toutefois sa pose et sa maintenance pourront être assurées via le nouveau regard N°1.
- Le second regard (Reg N°2) sera situé à l'aval de l'engouffrement du DN1000 sur le collecteur de décharge à une distance de 40 m par rapport au début de la conduite, avec une tolérance de $\pm 2,0$ m. Une telle distance permet la création du regard sur le parking du théâtre hors de toute place de stationnement existante.
- Le capteur de mesure du niveau d'eau en aval du seuil sera positionné sous le tampon du nouveau regard Reg. N°2.

La Figure 40 propose une vue aérienne globale de l'emplacement des deux nouveaux regards proposés pour le DO15 Théâtre. Le réseau d'assainissement existant apparaît également sur la figure en transparence. La Figure 41 présente une vue rapprochée de la position envisagée en bordure de voirie du nouveau regard d'accès (regard n°1).

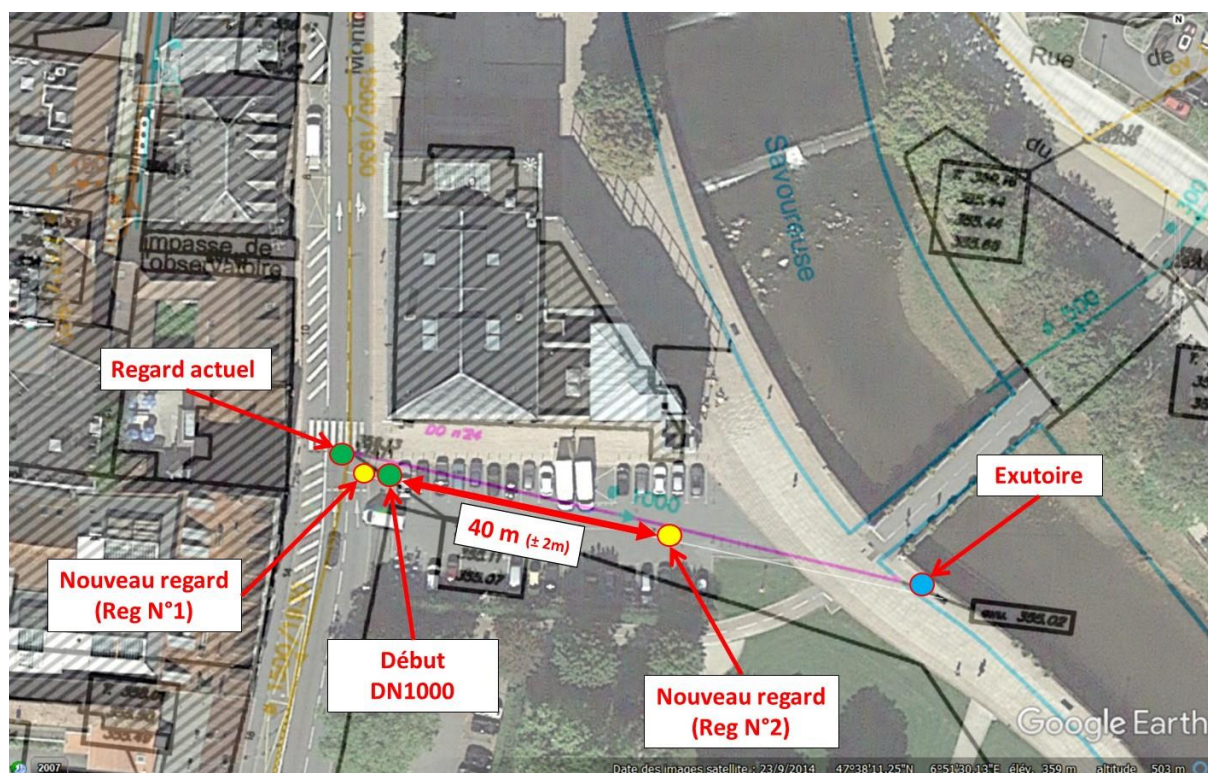


Figure 40. Propositions d'emplacements des nouveaux regards du DO15 Théâtre.

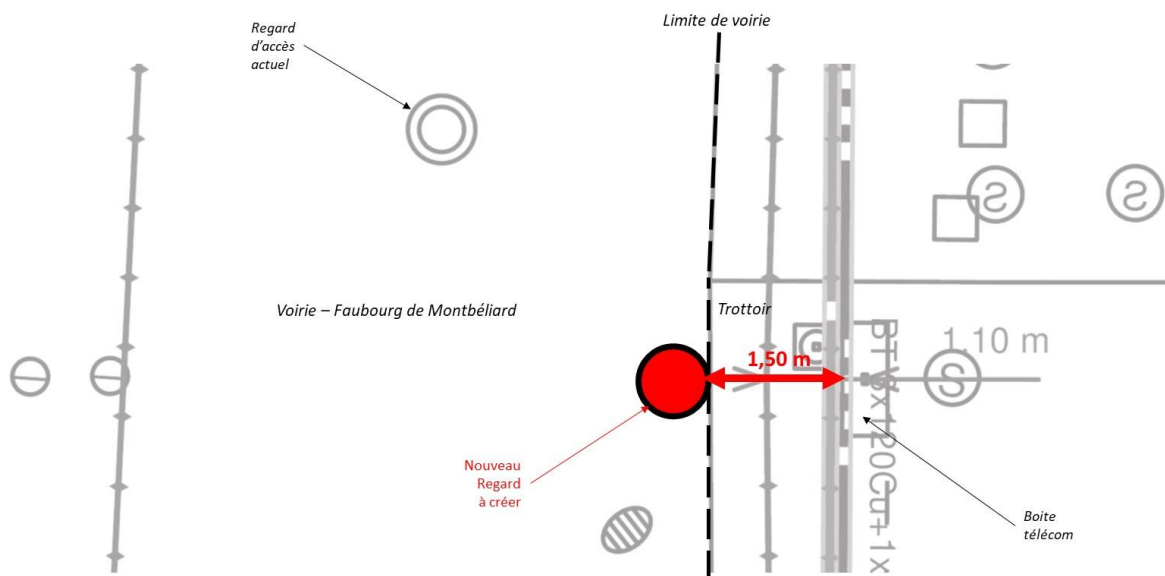


Figure 41. Propositions d'emplacements du nouveau regard n°1 (regard d'accès) du DO15 Théâtre.

La Figure 42 présente un schéma de principe de l'emplacement des nouveaux regards avec la localisation des capteurs de niveaux d'eau.

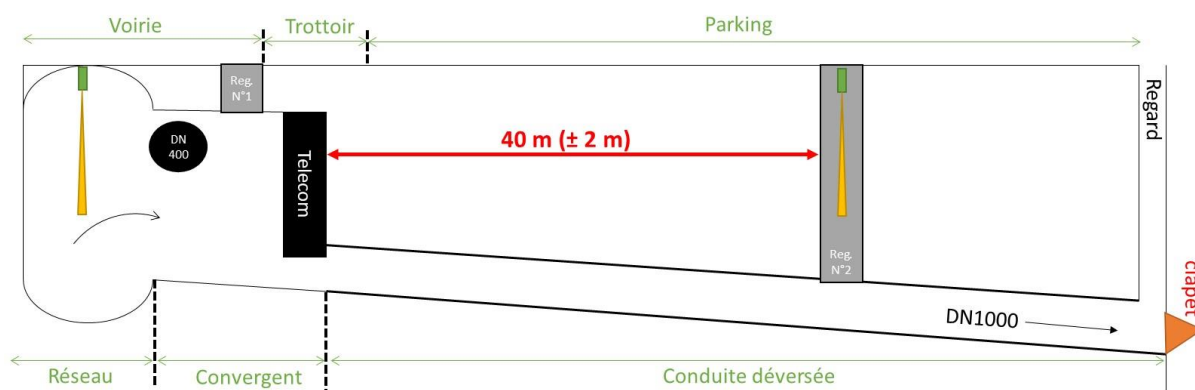


Figure 42. Schéma de principe de l'emplacement des nouveaux regards du DO15 Théâtre avec localisation des capteurs de mesure de niveaux d'eau – Vue longitudinale de la conduite de décharge.

Les Figure 43 et Figure 44 propose des coupes transversales de l'ouvrage où apparaît l'emplacement recommandé pour la création du nouveau regard n°1, entre le seuil du déversoir et le début du DN1000. Le nouveau regard devra être situé à 1,50 m en amont de la boîte de passage des réseaux sec (réseau télécom) située sur le trottoir (Figure 43). Par ailleurs, le regard sera situé de telle sorte que celui-ci soit aligné selon la verticale avec la paroi en rive droite de la chambre du DO (cf. Figure 44).

Remarque importante :

Lors de la visite 19/05/2020, 3D EAU a relevé uniquement la géométrie intérieure de la chambre du DO. Les mesures effectuées sont rappelées en couleur noire sur les Figure 43 et Figure 44. 3D EAU n'a pas effectué de relevés au niveau de la voirie. Dès lors, les cotations affichées en couleur rouge sont estimées à partir des plans fournis à 3D EAU. (plans, DT/DICT, etc.).

A l'issue de la présente étude, 3D EAU recommande la réalisation d'investigations complémentaires avant les travaux de création des regards afin de valider l'emplacement définitif de ces derniers.

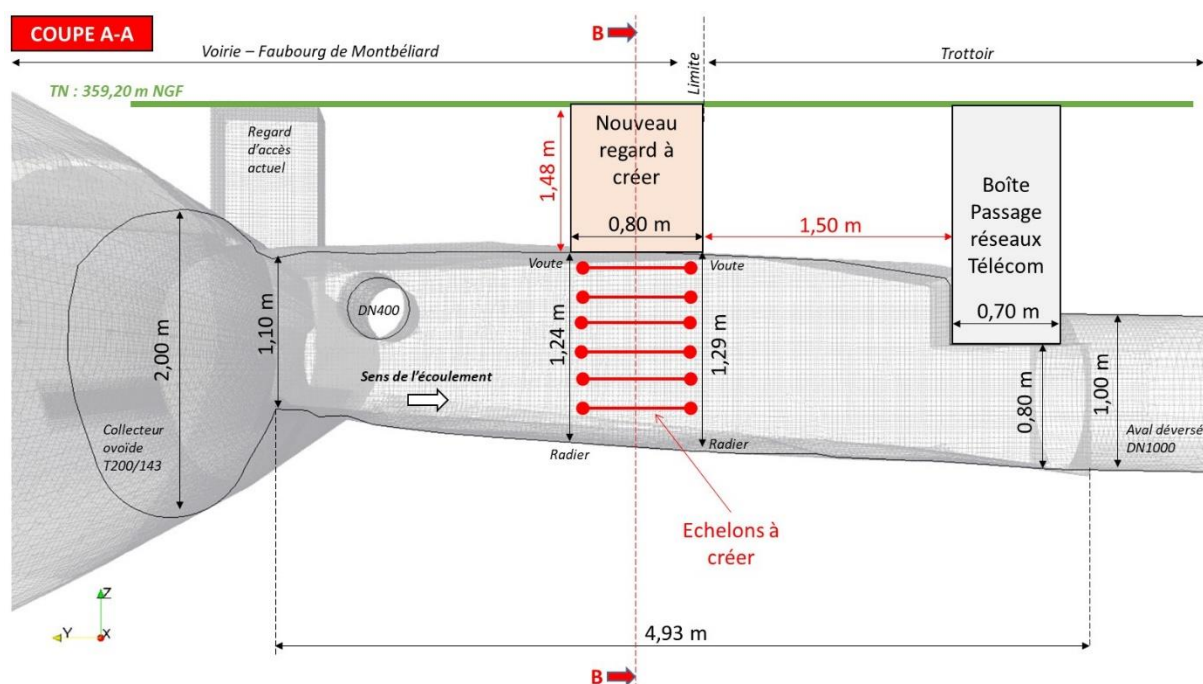


Figure 43. Emplacement du regard n°1 – Coupe transversale de la chambre du déversoir selon l'axe d'écoulement de la conduite de décharge (Coupe A-A).

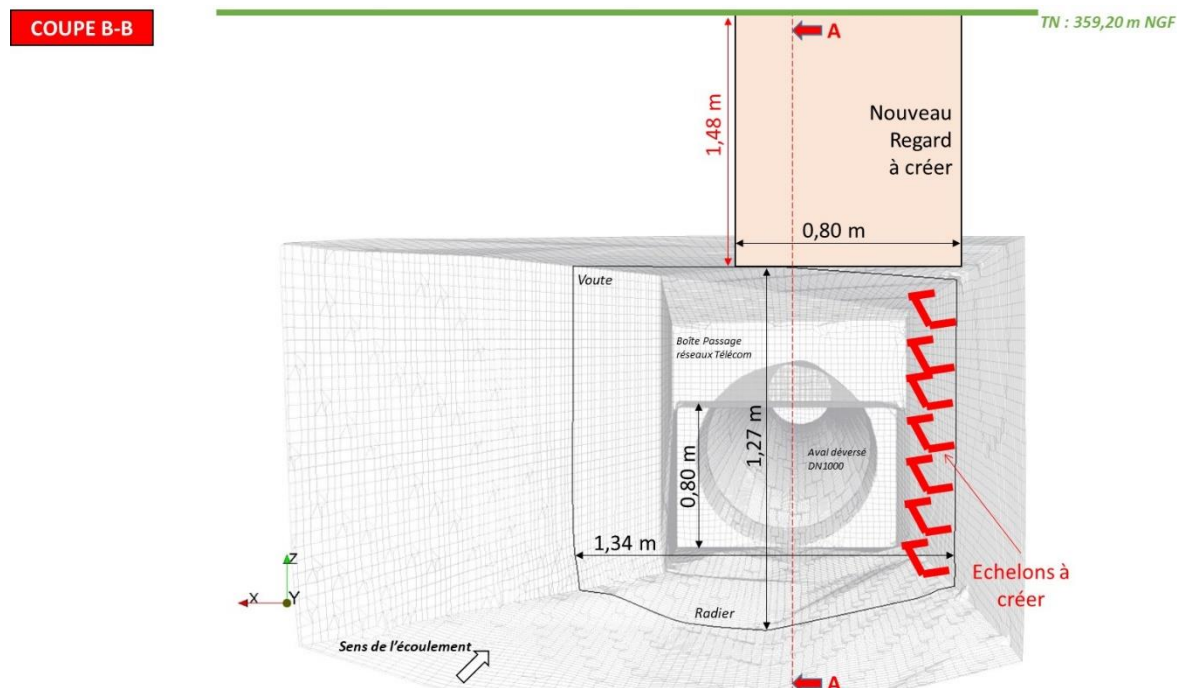


Figure 44. Emplacement du regard n°1 – Coupe transversale de la chambre du déversoir selon l'axe d'écoulement du collecteur ovoïde T200/143 (Coupe B-B).

Le coût estimatif des travaux liés à la mise en œuvre de deux nouveaux regards est présenté par le Tableau 10.

Tableau 10 : Estimation des coûts liés à la mise en œuvre des nouveaux regards sur le site du DO15 Théâtre.

Catégorie	Détails	Coût (€ H.T.)
Etude	Coût étude (visite, investigations, étude structure)	8 520.00 €
Travaux	Installation, sécurité de chantier, déviation	8 850.00 €
	Pose des deux regards	8 400.00 €
	Voirie et Réseaux Divers	2 400.00 €
		19 650.00 €
	TOTAL	28 170.00 €

6.4. 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 (entre la chambre du déversoir et le 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 en amont du rejet dans la Savoureuse.

6.4.1. Capteur amont

Le niveau d'eau n'est pas uniforme dans l'ouvrage lors d'un déversement. Dès lors, la relation hauteur-débit élaborée par la suite et présentée dans le chapitre suivant est élaborée pour les emplacements donnés.

3D EAU préconise d'installer le capteur à 0,36 m du seuil et à 0,59 m de l'extrémité amont de la crête déversante de telle sorte que le capteur soit situé dans la cheminée verticale du regard d'accès actuel (cf. Figure 45). La distance de 0,59 m est comptabilisée à partir de l'extrémité amont du seuil dans le sens de l'écoulement. La distance de 0,59 m ne devra pas être réduite, sans quoi le capteur risque de mesurer une zone où la surface libre ne serait pas plane, mais elle pourra être augmentée avec une tolérance maximale de 5 cm. La distance de 0,36 m pourra être augmentée ou réduite avec une tolérance maximale de 5 cm également mais ne devra pas être réduite davantage afin de s'affranchir des effets de bords de l'ouvrage sur l'écoulement. Ainsi, la position du capteur devra être strictement respectée afin de minimiser les incertitudes d'utilisation de la relation hauteur-débit.

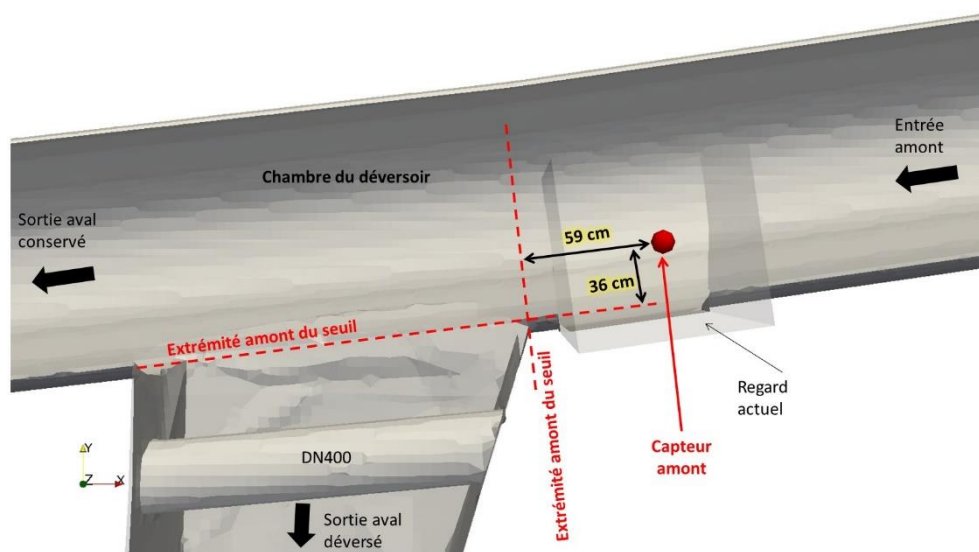


Figure 45. Localisation préconisée du capteur amont de hauteur d'eau.

Le zéro du capteur devra être effectué en considérant le point le plus bas de la crête du déversoir (cf. Figure 46). D'après les relevés géométriques effectués, ce point bas se situe à 1,56 m du début de la crête dans le sens de l'écoulement, sachant que la longueur totale de la crête a été mesurée à 2,06 m (cf. Figure 47).

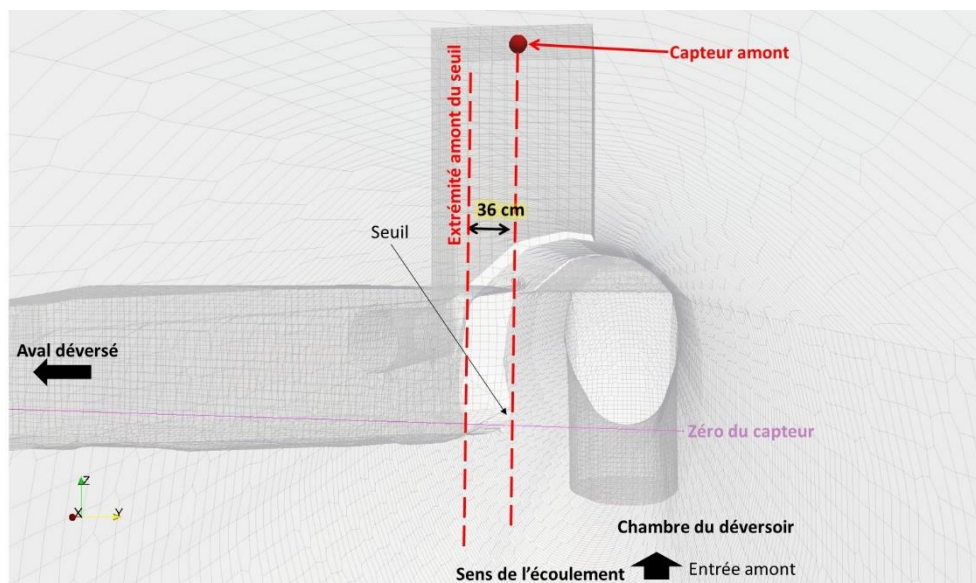


Figure 46. Définition du zéro du capteur amont de hauteur d'eau.

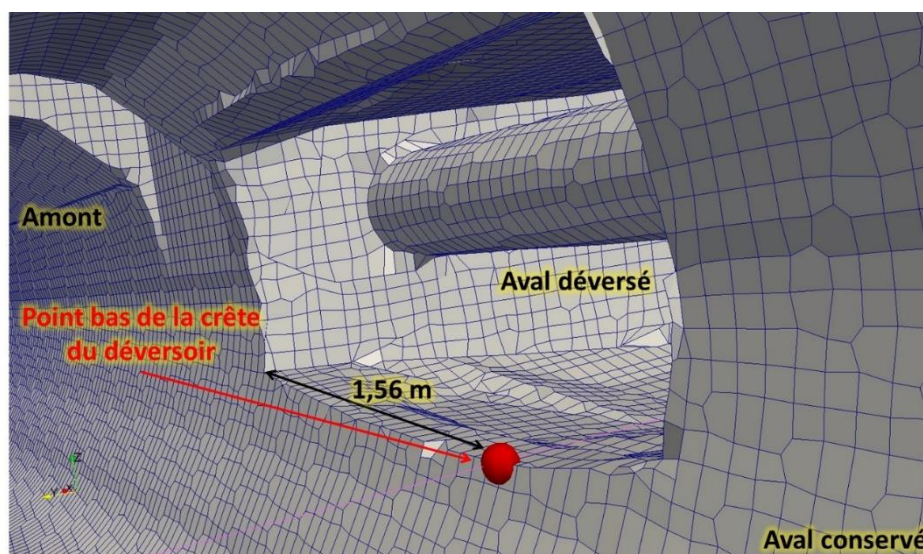


Figure 47. Définition du zéro du capteur amont de hauteur d'eau.

6.4.2. Capteur aval

3D EAU préconise d'installer le capteur aval de hauteur d'eau à l'amont du rejet vers la Savoureuse à l'emplacement prévu pour le nouveau regard Reg. N°2 tel que défini au paragraphe 6.3. Le zéro du capteur est identique au zéro du capteur amont (cf. paragraphe 6.4.1), c'est-à-dire le seuil du déversoir à son point le plus bas.

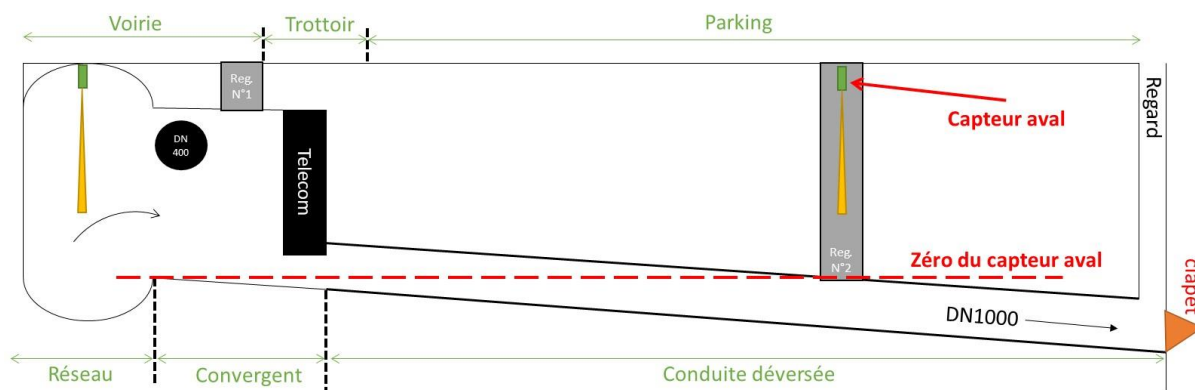


Figure 48. Position et définition du zéro du capteur aval de hauteur d'eau.

6.5. Validation de la position des nouveaux capteurs

Pour valider la position des sondes à installer, leurs positions doivent 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.

6.5.1. 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 9 montre que les hauteurs de lame déversante sont bien distinctes, sans influence aval : une hauteur d'eau correspond bien à un seul débit déversé.

6.5.2. 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. L'emplacement du futur capteur vérifie donc bien la stabilité dans l'espace.

6.5.3. 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. Ceci n'est pas négligeable mais est suffisamment faible pour considérer que l'emplacement vérifie donc bien la stabilité dans le temps.

6.5.4. Conclusion sur la position de la future sonde

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

6.6. Elaboration de la loi d'étalonnage

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

Les relations d'étalonnage du DO15 Théâtre 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 notamment la présence du DN400 traversant au-dessus du seuil (cf. paragraphe 2).

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

- De modifications du génie civil de l'ouvrage à l'exception de la pose des deux nouveaux regards recommandés au paragraphe 6.3 ;
- De la suppression de la conduite DN400 traversant l'ouvrage au-dessus du seuil ;
- De modification de l'allure de la crête déversante (installation d'une rehausse ou d'une lame droite) par rapport à la situation actuelle modélisée ;
- De la 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 de 3,135 m³/s ;
- De niveau de la Savoureuse supérieur de plus de 46 cm par rapport à la cote altimétrique du seuil soit une cote de crue du milieu naturel supérieure à 357,08 m NGF ;

6.6.2. 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 49, est ajustée sur la base des résultats 3D. Son expression est donnée par la relation suivante :

- Si $0 < h_{\text{amont}} \leq 0,184$ m :

$$Q = 7,2563 \times h_{\text{amont}}^{2,1223}$$

- Si $0,184 < h_{\text{amont}} \leq 0,564$ m :

$$Q = 13,7958 \times h_{\text{amont}}^3 - 12,9091 \times h_{\text{amont}}^2 + 6,0020 \times h_{\text{amont}} - 0,5536$$

- Si $h_{\text{amont}} > 0,564$ m :

$$Q = 1,6595 \times h_{\text{amont}} + 0,2641$$

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 sans influence aval fournit un tableau de correspondance entre la hauteur de lame déversante amont et le débit déversé avec un pas de 1 cm.

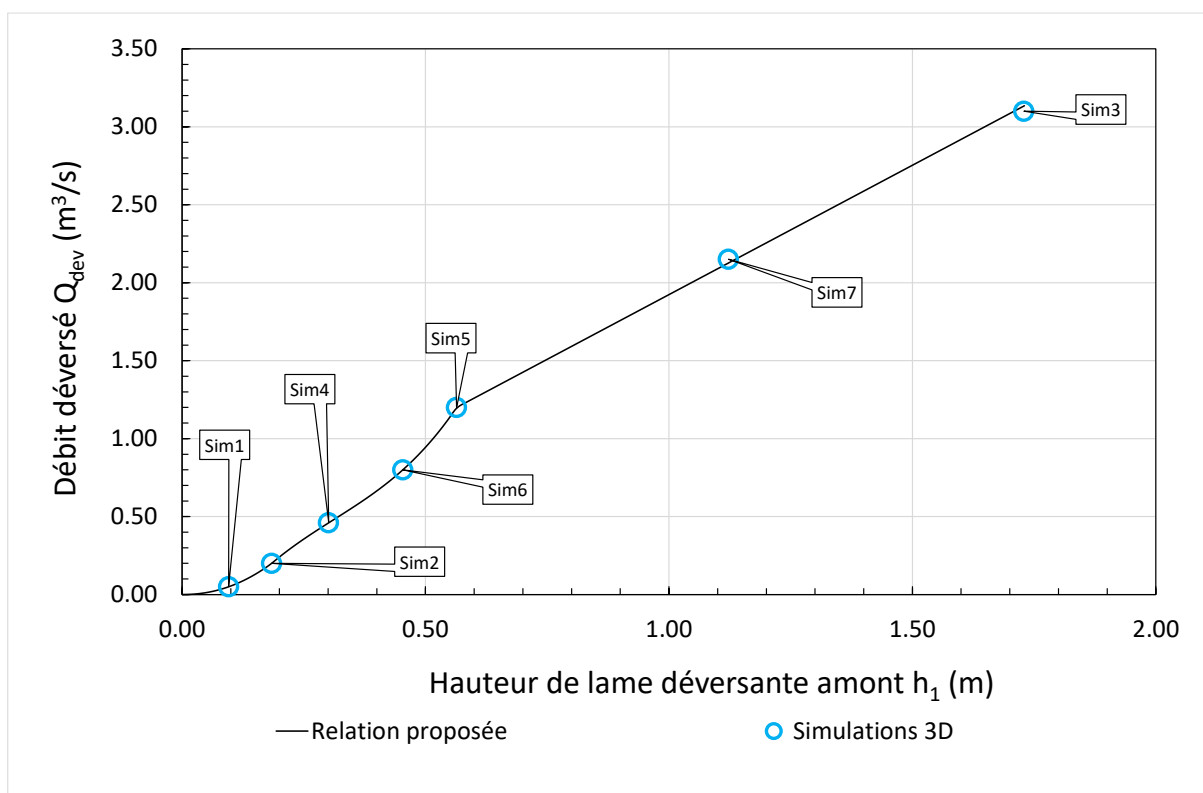


Figure 49. Relation hauteur-débit sans influence aval.

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 1,73 m. Elle peut être utilisée en estimation au-delà (jusqu'à une hauteur correspondant à la valeur maximale mesurable par le futur capteur de niveau d'eau amont).

Par ailleurs, les deux points d'intersection entre les trois lois ($h = 0,184$ m et $h = 0,564$ m) sont déterminés 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 l'engouffrement devient le point de contrôle de l'écoulement en lieu et place du seuil notamment.

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 1,73 m) ou modifiée si besoin (les lames déversantes maximales peuvent dépasser 1,73 m).
- notamment vis-à-vis de la transition entre les deux lois ($h = 0,184$ m et $h = 0,564$ m). Les points de transition pourront être ainsi validés (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 0,10 m et 0,20 m ou entre 0,50 et 0,60 m).

6.6.3. 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'enneolement K . Ce coefficient caractérise le degré d'enneolement du seuil et par conséquent l'influence aval. Il est fonction de la hauteur de lame déversante aval (h_{aval}). La forme générique de la relation en fonctionnement avec influence aval est :

$$Q_{noyé} = Q_{dénoyé} \times K$$

Avec : $Q_{dénoyé} = f(h_{amont})$: relation établie au paragraphe 6.6.1

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

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

1. 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.

2. 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).

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

A titre d'exemple, pour la simulation Sim8, une hauteur de lame déversante de 0,472 m conduirait à un débit déversé sans influence aval de 0,853 m³/s (cf. Tableau 11). Ainsi le coefficient K pour cette simulation est égal à 0,539 soit le rapport entre le débit 3D avec influence aval (0,460 m³/s) et sans influence aval (0,853 m³/s).

Tableau 11 : Résultats 3D : calcul du coefficient d'ennoiement K.

Simulations 3D					
Simulation	Débit noyé Q _{dev} (m ³ /s)	Lame deversante amont h _{amont} (m)	Hauteur aval h _{aval} (m)	Débit dénoyé théorique (m ³ /s)	Coefficient K
Sim8	0.460	0.472	0.460	0.853	0.539
Sim9	0.200	0.298	0.300	0.454	0.440
Sim10	0.460	0.322	0.300	0.500	0.920
Sim11	0.460	0.298	0.150	0.455	1.012
Sim12	0.200	0.196	0.150	0.232	0.862

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 50. Les calculs 3D ont mis en évidence que la hauteur de lame déversante amont h_1 n'était pas impactée par le milieu naturel haut pour les simulations Sim10 à Sim12 au contraire des simulations Sim8 et Sim9. La relation pour K est donc ajustée pour les simulations Sim8 à Sim10 (cercles bleus). Les simulations Sim11 et Sim12 sont représentées à titre indicatif mais ne sont pas employées pour l'étalonnage.

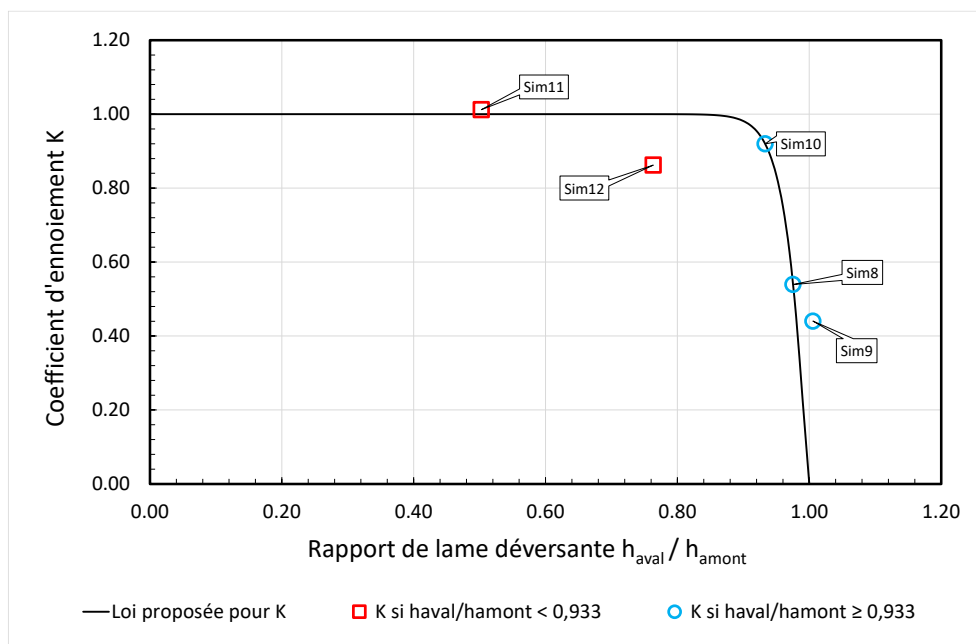


Figure 50. Relation entre le rapport h_{aval}/h_{amont} et le coefficient d'envolement K .

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 46 cm (niveau de la Savoureuse atteignant une cote de 357,08 m NGF).

Dès lors, une relation mathématique peut être établie pour relier le rapport h_{aval}/h_{amont} au coefficient d'envolement (courbe noire sur la Figure 50). Son expression est donnée par la relation suivante :

$$K = \left[1 - \left(\frac{h_{aval}}{h_{amont}} \right)^{40,793} \right]^{1,370}$$

Avec K , le coefficient d'envolement, 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 : *Calcul du coefficient d'envolement* fournit un tableau de correspondance entre le rapport h_{aval}/h_{amont} et le coefficient d'envolement.

6.6.4. Logigramme de fonctionnement

Le calcul du débit déversé $Q_{déversé}$ (m^3/s) est récapitulé par la Figure 51, 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).

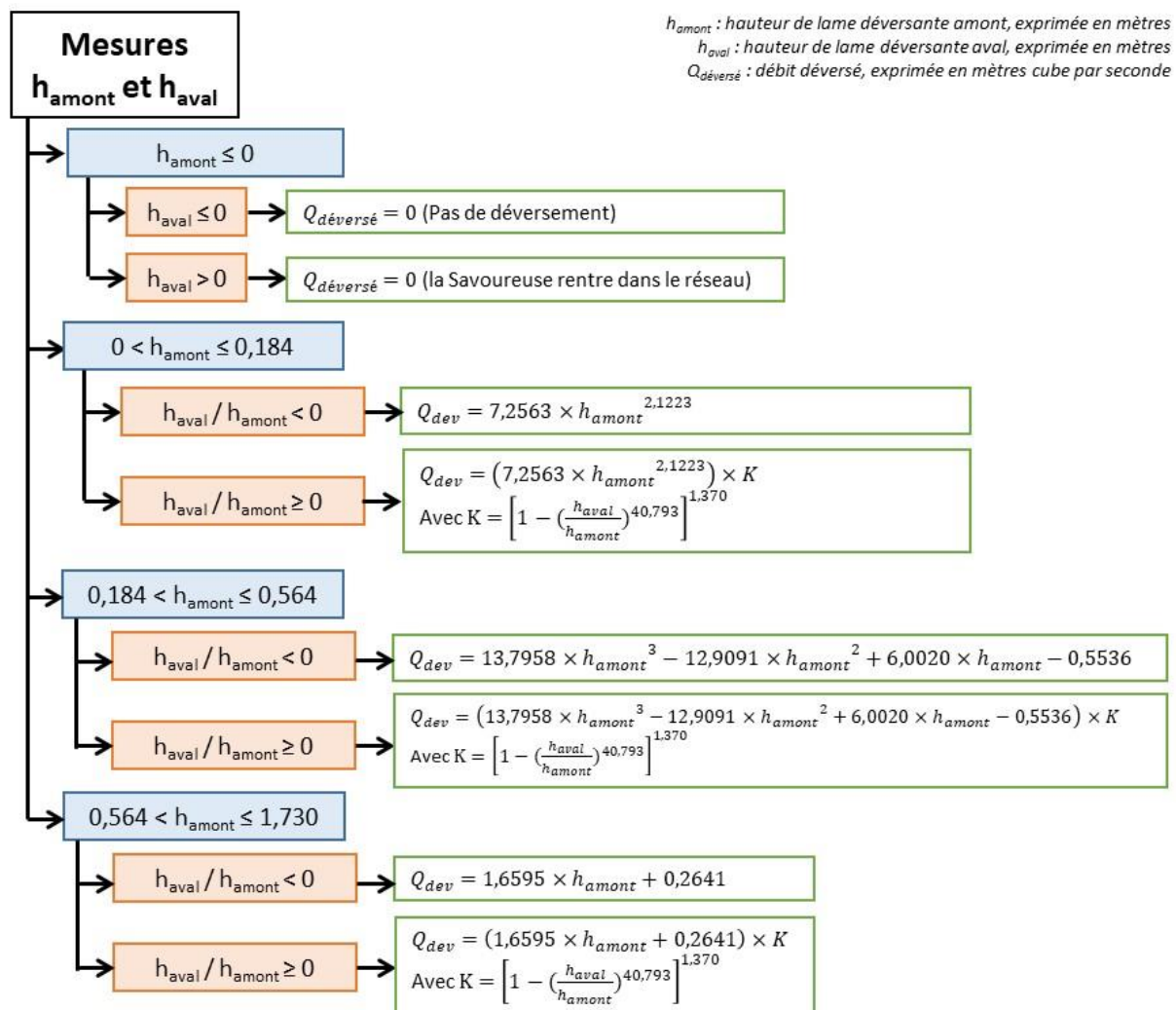


Figure 51. Logigramme de détermination du débit déversé.

6.7. 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.

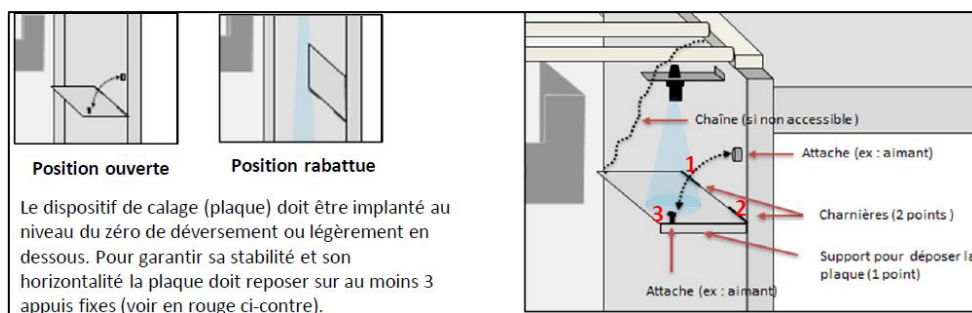
Deux types de contrôle sont à envisager :

- un contrôle simplifié tous les 4 mois : lecture d'une valeur connue du capteur

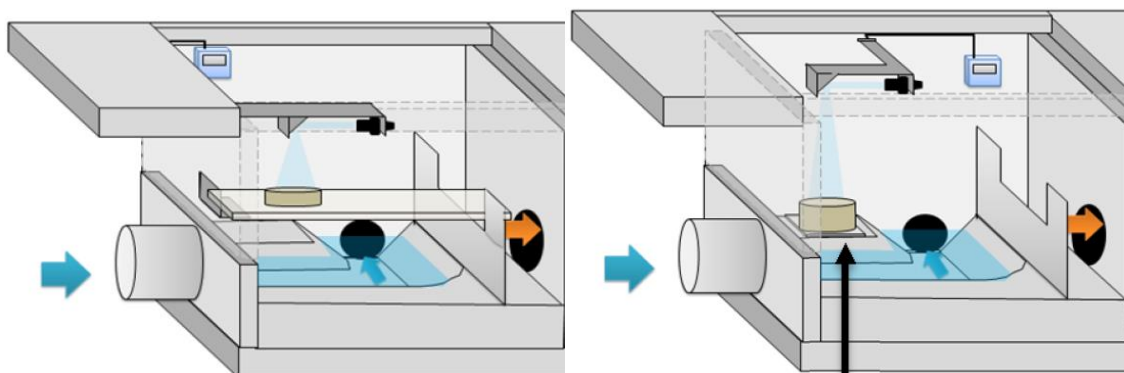
- un contrôle annuel plus poussé : vérification du zéro du capteur et d'une ou 2 hauteurs supplémentaires dans la gamme de la lame déversante.

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) :

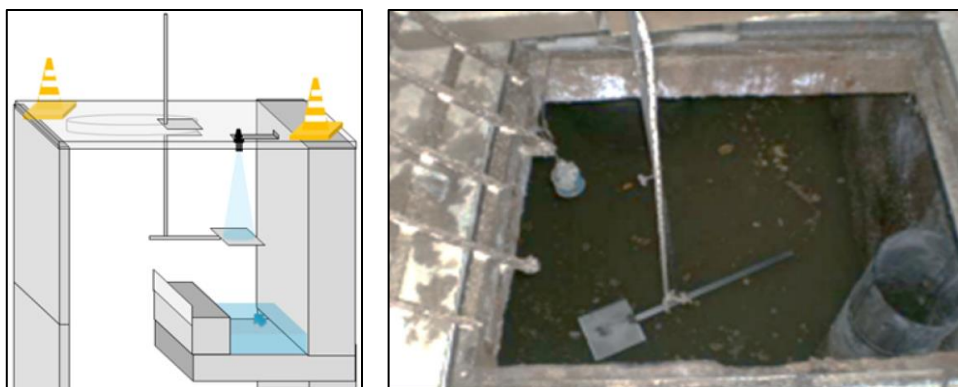
- La mise en place d'une plaque mobile sous le capteur, située à la même altitude que le seuil de déversement.



- 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.

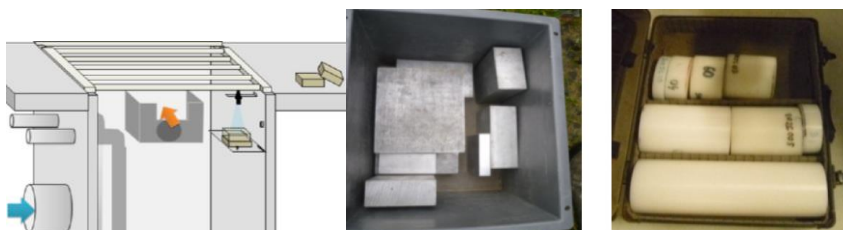


- L'utilisation d'une perche graduée avec un niveau à bulle et une plaque coulissante, manipulable depuis la surface,



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

6.8. 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 1,1 %.

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 52. Pour des débits déversés comprises entre 0 et 3,135 m³/s (limite d'application de la loi), les incertitudes sont calculées en considérant les éléments exposés ci-dessus.

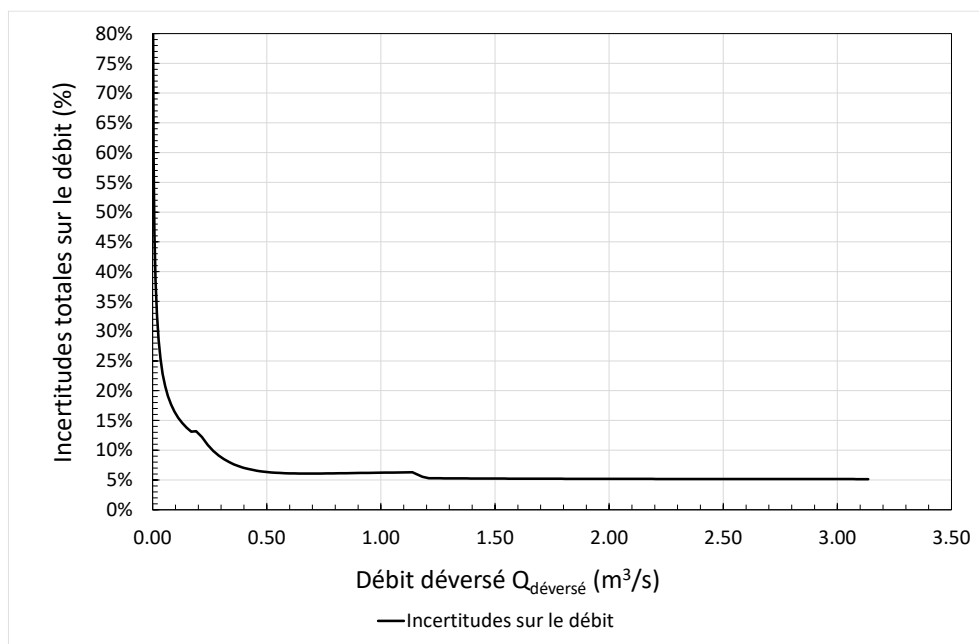


Figure 52. Incertitudes globales sur le débit en fonction du débit mesuré.

L'incertitude sur le débit passe sous 20 % à partir d'un débit de 0,07 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 DO15 Théâtre 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,
- Déterminer l'emplacement des capteurs de hauteur d'eau dans la chambre du déversoir et en amont du rejet vers la Savoureuse pour garantir un site de mesure fiable,
- Déterminer les incertitudes totales sur la mesure de débit.

Pour permettre une meilleure autosurveillance, 3D EAU préconise l'installation de deux nouvelles sondes de mesure de hauteur d'eau. Les préconisations techniques en termes d'instrumentation du déversoir avec des capteurs de hauteur d'eau ont été spécifiées dans les chapitres 6.1 à 6.4.

Les relations hauteur-débit associées aux positions des capteurs ont été définies par des formules dans le chapitre 6.6. Les limites d'application de ces lois ont été précisées au paragraphe 6.6.1.

Enfin, ces relations s'accompagnent d'une évaluation de l'incertitude associée, présentée au paragraphe 6.8.



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 DO15 Théâtre seulement si les emplacements préconisés des 2 capteurs sont respectés.

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 SANS INFLUENCE AVAL

h _{amont} (m)	Q _{déversé} (m³/s)	Q _{déversé} (m³/h)
0.00	0.000	0.0
0.01	0.000	1.5
0.02	0.002	6.5
0.03	0.004	15.3
0.04	0.008	28.2
0.05	0.013	45.3
0.06	0.019	66.7
0.07	0.026	92.5
0.08	0.034	122.8
0.09	0.044	157.6
0.10	0.055	197.1
0.11	0.067	241.3
0.12	0.081	290.2
0.13	0.096	344.0
0.14	0.112	402.6
0.15	0.129	466.1
0.16	0.148	534.5
0.17	0.169	607.9
0.18	0.191	686.3
0.19	0.215	775.5
0.20	0.241	867.0
0.21	0.265	955.2
0.22	0.289	1040.3
0.23	0.312	1122.7
0.24	0.334	1202.6
0.25	0.356	1280.4
0.26	0.377	1356.4
0.27	0.397	1430.8
0.28	0.418	1503.9
0.29	0.438	1576.2
0.30	0.458	1647.7
0.31	0.477	1718.9
0.32	0.497	1790.1
0.33	0.517	1861.5
0.34	0.537	1933.4
0.35	0.557	2006.1
0.36	0.578	2080.0
0.37	0.599	2155.4
0.38	0.620	2232.4
0.39	0.642	2311.5
0.40	0.665	2392.9
0.41	0.688	2477.0
0.42	0.712	2564.0
0.43	0.737	2654.1
0.44	0.763	2747.9
0.45	0.790	2845.4
0.46	0.819	2947.0
0.47	0.848	3053.1
0.48	0.879	3163.8
0.49	0.911	3279.6
0.50	0.945	3400.7
0.51	0.980	3527.4
0.52	1.017	3659.9
0.53	1.055	3798.7
0.54	1.096	3944.0
0.55	1.138	4096.1
0.56	1.182	4255.3
0.57	1.210	4356.2
0.58	1.227	4416.0
0.59	1.243	4475.7
0.60	1.260	4535.4
0.61	1.276	4595.2
0.62	1.293	4654.9
0.63	1.310	4714.7
0.64	1.326	4774.4
0.65	1.343	4834.2
0.66	1.359	4893.9
0.67	1.376	4953.7
0.68	1.393	5013.4
0.69	1.409	5073.1
0.70	1.426	5132.9
0.71	1.442	5192.6
0.72	1.459	5252.4
0.73	1.476	5312.1
0.74	1.492	5371.9
0.75	1.509	5431.6
0.76	1.525	5491.3
0.77	1.542	5551.1
0.78	1.559	5610.8
0.79	1.575	5670.6
0.80	1.592	5730.3
0.81	1.608	5790.1
0.82	1.625	5849.8
0.83	1.642	5909.5
0.84	1.658	5969.3
0.85	1.675	6029.0
0.86	1.691	6088.8
0.87	1.708	6148.5

h _{amont} (m)	Q _{déversé} (m³/s)	Q _{déversé} (m³/h)
0.88	1.725	6208.3
0.89	1.741	6268.0
0.90	1.758	6327.8
0.91	1.774	6387.5
0.92	1.791	6447.2
0.93	1.807	6507.0
0.94	1.824	6566.7
0.95	1.841	6626.5
0.96	1.857	6686.2
0.97	1.874	6746.0
0.98	1.890	6805.7
0.99	1.907	6865.4
1.00	1.924	6925.2
1.01	1.940	6984.9
1.02	1.957	7044.7
1.03	1.973	7104.4
1.04	1.990	7164.2
1.05	2.007	7223.9
1.06	2.023	7283.7
1.07	2.040	7343.4
1.08	2.056	7403.1
1.09	2.073	7462.9
1.10	2.090	7522.6
1.11	2.106	7582.4
1.12	2.123	7642.1
1.13	2.139	7701.9
1.14	2.156	7761.6
1.15	2.173	7821.3
1.16	2.189	7881.1
1.17	2.206	7940.8
1.18	2.222	8000.6
1.19	2.239	8060.3
1.20	2.256	8120.1
1.21	2.272	8179.8
1.22	2.289	8239.5
1.23	2.305	8299.3
1.24	2.322	8359.0
1.25	2.339	8418.8
1.26	2.355	8478.5
1.27	2.372	8538.3
1.28	2.388	8598.0
1.29	2.405	8657.8
1.30	2.422	8717.5
1.31	2.438	8777.2
1.32	2.455	8837.0
1.33	2.471	8896.7
1.34	2.488	8956.5
1.35	2.505	9016.2
1.36	2.521	9076.0
1.37	2.538	9135.7
1.38	2.554	9195.4
1.39	2.571	9255.2
1.40	2.587	9314.9
1.41	2.604	9374.7
1.42	2.621	9434.4
1.43	2.637	9494.2
1.44	2.654	9553.9
1.45	2.670	9613.6
1.46	2.687	9673.4
1.47	2.704	9733.1
1.48	2.720	9792.9
1.49	2.737	9852.6
1.50	2.753	9912.4
1.51	2.770	9972.1
1.52	2.787	10031.9
1.53	2.803	10091.6
1.54	2.820	10151.3
1.55	2.836	10211.1
1.56	2.853	10270.8
1.57	2.870	10330.6
1.58	2.886	10390.3
1.59	2.903	10450.1
1.60	2.919	10509.8
1.61	2.936	10569.5
1.62	2.953	10629.3
1.63	2.969	10689.0
1.64	2.986	10748.8
1.65	3.002	10808.5
1.66	3.019	10868.3
1.67	3.036	10928.0
1.68	3.052	10987.7
1.69	3.069	11047.5
1.70	3.085	11107.2
1.71	3.102	11167.0
1.72	3.119	11226.7
1.73	3.135	11286.5

ANNEXE 2 : CALCUL DU COEFFICIENT D'ENNOIEMENT

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