Le tarage numérique d'une relation hauteur(s)-débit : éléments de méthodologie et exemples d'application

S. ISEL[1], J. VAZQUEZ[2], M. FISCHER[2], J. WERTEL[1], C. JOANNIS[3], G. LIPEME KOUYI[4], M. CHOPIN[5], A. LABROUSSE[6], D. SCHEFFER[7], M. THIÉRIOT[8], M. DUFRESNE[2]

Mots-clés : débit, hauteur d'eau, mécanique des fluides numérique, tarage
Keywords: discharge, water depth, computational fluid dynamics, calibration

Introduction

La réglementation sur l'autosurveillance impose aux exploitants de réseaux d'assainissement une mesure des débits rejetés au milieu récepteur par les déversoirs d'orage et autres ouvrages de déversement (trop-plein…) dont la charge polluante est supérieure à 600 kg de demande biochimique en oxygène (DBO_5) par jour. Plusieurs méthodes d'instrumentation existent pour la mise en place de cette auto-surveillance, parmi lesquelles la mise en place de capteurs hauteur-vitesse dans la canalisation de décharge (ou éventuellement dans la canalisation d'entrée et la canalisation de sortie vers la station d'épuration, puis de procéder par différence). Si cette méthode est opérationnelle et permet d'accéder au débit avec une précision de l'ordre de 10 % lorsque les recommandations de la norme ISO 15769 sont suivies, elle présente cependant l'inconvénient de nécessiter l'emploi de capteurs immergés dans l'écoulement, ce qui peut occasionner des coûts de maintenance importants liés à l'encrassement des capteurs.

Une alternative est de tirer profit du fait qu'un déversoir d'orage, comme un seuil ou un canal Venturi, est un ouvrage hydraulique permettant de créer une transition du régime fluvial (en amont de la crête déversante) au régime torrentiel (en aval). Ce comportement hydraulique permet de garantir qu'il existe une relation entre la hauteur de lame déversante et le débit déversé. Il reste à identifier cette relation dans le contexte d'ouvrages de déversement de formes très diverses et ne répondant à aucune norme.

Le tarage numérique apparaît comme une solution permettant d'établir la relation hauteur-débit au niveau d'un ouvrage de déversement pour répondre à cette problématique. Cet article se propose de définir la notion de tarage numérique, puis de fournir des éléments de méthodologie (le minimum nécessaire pour un tarage numérique de qualité) avant de présenter trois exemples d'application où cette méthode a été mise en œuvre pour établir la relation hauteur-débit au niveau de points de rejet vers le milieu récepteur.

[1] 3D EAU – 4, rue Boussingault – 67000 Strasbourg.
Courriels : sandra.isel@3deau.fr, jonathan.wertel@3deau.fr
[2] ICube (ENGEES, École nationale du génie de l'eau et de l'environnement de Strasbourg –Université de Strasbourg – CNRS – INSA de Strasbourg) – 2, rue Boussingault – 67000 Strasbourg.
Courriels : jose.vazquez@engees.unistra.fr, martin.fischer@engees.unistra.fr, matthieu.dufresne@3deau.fr
[3] Ifsttar – Institut français des sciences et technologies des transports, de l'aménagement et des réseaux – Laboratoire Eau et Environnement – Centre de Nantes – Route de Bouaye –44344 Bouguenais.
Courriel : claude.joannis@ifsttar.fr
[4] Laboratoire DEEP, Université de Lyon – INSA Lyon – 34, avenue des Arts – 69621 Villeurbanne. Courriel : gislain.lipeme-kouyi@insa-lyon.fr
[5] Communauté d'agglomération Vichy Val d'Allier – 9, place Charles-de-Gaulle – 03209 Vichy. Courriel : m.chopin@vichy-valallier.fr
[6] Larbre Ingénierie – 47, rue du Montais – 03100 Montluçon.
Courriel : arnaud.labrousse@larbre-ingenierie.fr
[7] Agglomération montargoise et rives du Loing – 1, rue du Faubourg-de-la-Chaussée – 45203 Montargis.
Courriel : damien.scheffer@agglo-montargoise.fr
[8] Syndicat des eaux et de l'assainissement Alsace-Moselle (SDEA) – Espace européen de l'entreprise – 1, rue de Rome – 67013 Schiltigheim.
Courriel : marc.thieriot@sdea.fr

1. Définition du tarage numérique

Une courbe de tarage établit une relation entre des valeurs de hauteur d'eau mesurées et les valeurs correspondantes d'un débit, obtenues par une méthode de mesure de référence, en général par exploration du champ de vitesse. Dans le cas d'un tarage numérique, les débits et les hauteurs ne sont pas issus d'observations : ce sont des valeurs fixées en entrée ou obtenues en sortie d'un modèle numérique.

Ce modèle doit reproduire les écoulements (forme et position de la surface libre, champ de vitesse) pour un site donné et pour différents contextes hydrauliques (correspondant à différents jeux de conditions aux limites). En assainissement, il s'agira souvent de reproduire le fonctionnement d'un déversoir d'orage, qui peut être complexe (géométriquement et/ou hydrauliquement), pour évaluer des débits déversés à partir d'une ou plusieurs mesures de hauteur d'eau. Il faudra alors mettre en œuvre un modèle 3D. En canalisation, un modèle 1D permet d'établir une relation entre hauteurs d'eau à l'amont et à l'aval d'un tronçon et le débit transité. Le tarage numérique peut aussi être utilisé pour caractériser des dispositifs « préétalonnés » (tels que des canaux Venturi, par exemple) conçus pour que leur fonction d'étalonnage soit indépendante du site.

Le tarage numérique se substitue à l'utilisation d'une mesure physique de référence du débit à mesurer (par exemple le débit déversé) pour étalonner la relation entre hauteur(s) d'eau mesurée(s) et débit. En revanche, il ne se substitue pas à l'étalonnage physique des capteurs de hauteur d'eau.

Les résultats des simulations permettent de produire des courbes, des tables ou des fonctions de tarage, avec indication des incertitudes correspondantes. Ces incertitudes intègrent :

– les incertitudes de la modélisation numérique ;
– l'influence des variations de conditions aux limites (en général l'influence de hauteurs aval) pour une même valeur du débit à mesurer ;
– l'impact d'erreurs de mesure propres aux capteurs de hauteur d'eau.

Les hauteurs d'eau dont la mesure est simulée peuvent être définies *a priori* ou être identifiées à partir d'une analyse préalable des résultats de simulation : on choisira alors des emplacements où les hauteurs doivent être mesurées pour minimiser l'impact des variations de conditions aux limites sur l'évaluation du débit.

Le tarage numérique est une déclinaison particulière du concept plus général d'étalonnage numérique, qui peut, par exemple, être mis en œuvre pour établir une relation entre la vitesse moyenne et la vitesse mesurée par un capteur à partir de simulations numériques réalisées pour différentes combinaisons de hauteur d'eau et de débit.

2. Éléments de méthodologie

2.1. Préambule

Après cette définition de la notion de tarage numérique, cette partie se donne comme objectif de présenter les éléments méthodologiques permettant de s'assurer que le tarage numérique permettra d'établir de façon précise la relation hauteur-débit au niveau de l'ouvrage de déversement. Le logigramme de la *figure 1* présente les étapes méthodologiques à suivre. Si ce logigramme est spécifique à un tarage numérique par mécanique des fluides numérique 3D, il demeurerait inchangé dans les grandes lignes dans le cas d'un tarage numérique qui serait effectué à partir d'un modèle 1D dans le cas d'un collecteur ou encore d'un déversoir latéral [ISEL, 2014].

2.2. Recueil d'informations

En amont du tarage numérique, mais également en amont de n'importe quelle autre méthode d'instrumentation d'un déversoir d'orage, une phase de collecte d'informations est indispensable pour bénéficier des éléments géométriques (forme de l'ouvrage, dimensions même approximatives à ce stade) et des éléments hydrauliques (gamme de débits de sollicitation, influences aval éventuelles…) qui permettront l'analyse hydraulique de l'ouvrage. La gamme de débits à mesurer est souvent une information négligée. Elle est pourtant capitale pour s'assurer que l'instrumentation sera adaptée à l'autosurveillance du déversoir, mais doit pour cela être traduite en vitesse (voir le § 2.3., « analyse hydraulique »), ce qui nécessite une connaissance de la gamme des hauteurs. C'est également une condition

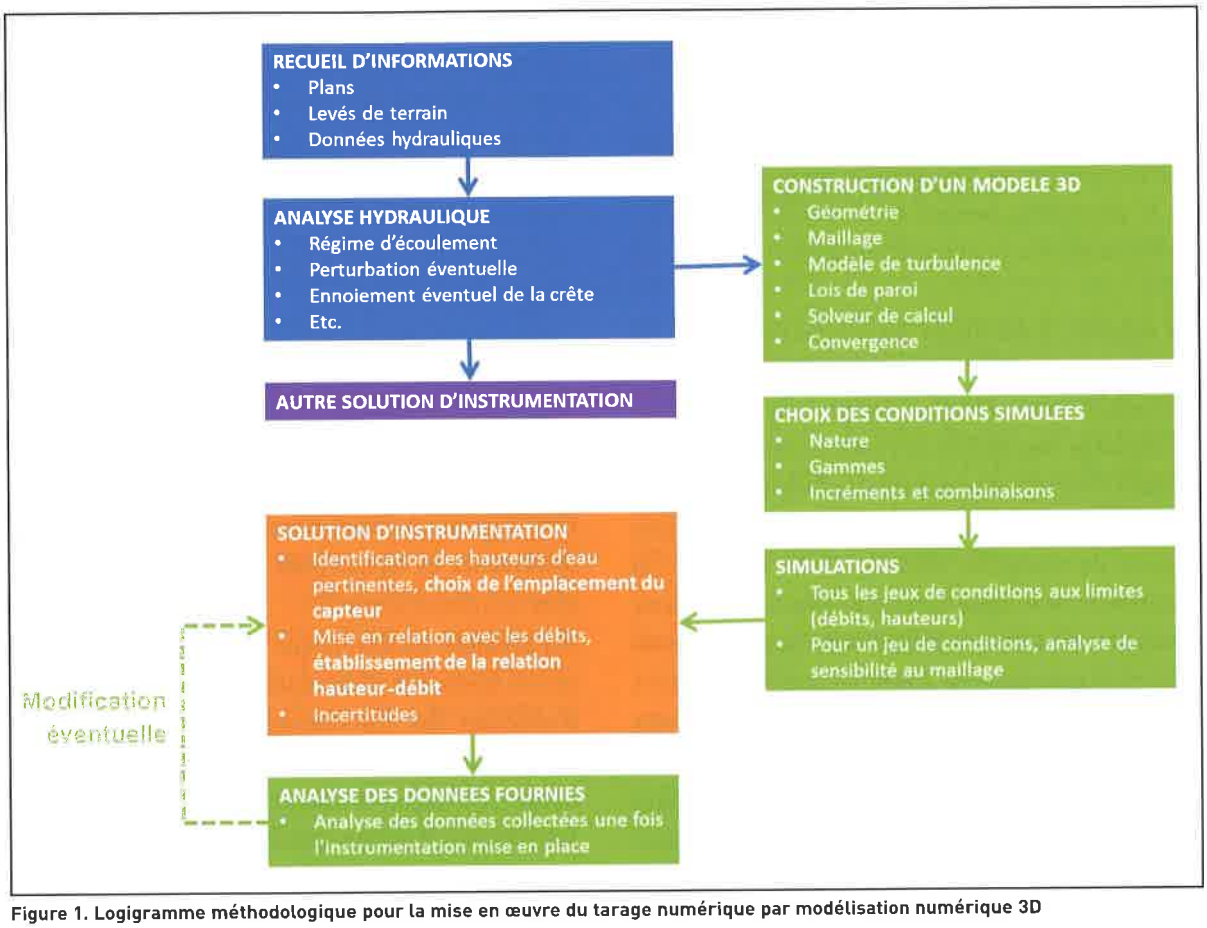


Figure 1. Logigramme méthodologique pour la mise en œuvre du tarage numérique par modélisation numérique 3D

aux limites essentielle pour conduire des simulations hydrauliques. Un modèle de réseau, lorsqu'il existe, ou éventuellement un petit calcul hydrologique à partir des caractéristiques du bassin versant drainé, peut permettre d'évaluer un ordre de grandeur de cette gamme de débits en fonction d'informations pluviométriques.

2.3. Analyse hydraulique

Aucune méthode d'instrumentation (y compris les méthodes basées sur une ou des mesures hauteur-vitesse) ne peut être mise en œuvre sans analyse hydraulique préalable, qui permet de déterminer les régimes d'écoulement, les influences aval éventuelles, les gammes des vitesses associées aux différents débits. Ainsi, l'instrumentation d'une lame déversante et l'utilisation d'une relation hauteur-débit nécessitent une analyse préalable permettant de s'assurer que les conditions sont propices à cette méthode de mesure du débit déversé : absence de ressaut hydraulique à proximité de la crête, pas de fonctionnement de la crête déversante en régime noyé… Dans certains cas, cette analyse hydraulique pourra même permettre de garantir une relation hauteur-débit simple sans recours à un tarage numérique. Le guide technique « Diagnostic pour l'aide à l'instrumentation des déversoirs d'orage » listé dans les références de cet article détaille les outils permettant d'effectuer cette analyse [VAZQUEZ *et al.*, 2016].

2.4. Construction d'un modèle 3D

Dans le cas où l'analyse hydraulique conduit, d'une part, à la possibilité d'instrumenter la crête déversante avec une mesure de niveau et de déterminer le débit au moyen d'une relation hauteur-débit et, d'autre part, à la nécessité de recourir à un modèle numérique 3D pour parvenir à cette relation, l'étape suivante consiste à construire le modèle 3D.

La construction de la géométrie de l'ouvrage requiert une connaissance très précise de l'ouvrage qui passe par un levé précis sur site. Pour cela, un tachéomètre Laser ou un scan 3D peuvent être utilisés afin de

relever la position de tous les éléments hydrauliquement importants avec une précision inférieure à 1 cm. En l'absence de levé géométrique précis (cas d'un ouvrage inaccessible, par exemple pour des raisons de sécurité), l'incertitude sur la connaissance de la géométrie pourra avoir des conséquences significatives sur la précision de la relation hauteur-débit.

Par ailleurs, la définition des limites du modèle 3D n'est pas anodine et doit tenir compte de l'analyse hydraulique préalable. Par exemple, une canalisation de décharge susceptible de passer en charge et donc de noyer la crête déversante aux forts débits devra être représentée dans son intégralité afin d'intégrer la perte de charge au modèle 3D. En revanche, si l'analyse hydraulique permet de garantir que cette canalisation ne pourra jamais noyer la crête, il n'est même pas nécessaire de l'intégrer dans le modèle.

Une fois la géométrie construite, celle-ci devra être discrétisée en éléments élémentaires de calcul au sein desquels les équations de la mécanique des fluides seront résolues. Ces « mailles » doivent être suffisamment petites pour que les résultats issus du modèle soient indépendants du « maillage » ; c'est ce que l'on appelle l'insensibilité au maillage. Seule une analyse de sensibilité au maillage (c'est-à-dire le même calcul avec deux maillages de taille différente) permet de garantir que la sensibilité au maillage a un impact insignifiant sur le résultat.

La construction du modèle 3D comprend aussi son paramétrage : la définition d'un modèle de turbulence adapté à la reproduction de la surface libre, l'utilisation de lois de paroi sur les murs de l'ouvrage, le choix du solveur de calcul (privilégier un solveur transitoire plutôt qu'un solveur permanent pour évaluer les fluctuations du niveau d'eau et identifier un éventuel écoulement instable) ou encore le choix d'un critère de convergence (s'assurer que les résultats qui seront issus du modèle 3D, à savoir le débit et la hauteur, sont stables dans le temps).

2.5. Choix des conditions simulées

Le choix des conditions simulées est l'étape permettant de garantir que le tarage numérique prendra en compte toutes les conditions hydrauliques de fonctionnement possible de l'ouvrage (débits, influence aval éventuelle…). Ces conditions hydrauliques devront être renseignées aux frontières de la géométrie de l'ouvrage – canalisation amont, canalisation de décharge, canalisation de transfert vers la station d'épuration (STEP) – afin de représenter l'impact de l'environnement hydraulique sur l'ouvrage. Elles doivent être renseignées concernant trois aspects :

– leur nature : est-ce une condition de vitesse, une condition de hauteur d'eau, les deux (dépend du régime d'écoulement et de la limite traitée) ?

– leur gamme établie en phase d'analyse hydraulique ;

– leur incrément, c'est-à-dire le choix des valeurs dans la gamme de variations : il faut ici prendre soin de densifier les valeurs pour les débits contribuant le plus au volume annuel.

Par exemple, s'il s'avère que la crête déversante n'est jamais noyée par la conduite déversée, il est inutile d'effectuer des simulations de niveaux aval qui aboutiraient à noyer la crête déversante pour certains débits. De façon similaire, si la forte pente de la conduite d'entrée impose un régime de type torrentiel, il est inutile (et cela conduirait à des résultats probablement faux) d'imposer un écoulement de type fluvial en entrée du modèle.

Cette étape de choix des conditions simulées est l'étape clé dans le tarage numérique d'une relation hauteur-débit.

2.6. Simulations

Une fois les conditions à simuler choisies, il faut lancer les calculs (une dizaine, une vingtaine… selon la complexité du fonctionnement hydraulique du déversoir). La convergence de chaque simulation doit être vérifiée avant d'extraire le moindre résultat. Pour cela, la solution la plus simple et la plus pragmatique est de vérifier que les résultats sont stables dans le temps (débit, hauteur à l'endroit pressenti pour l'instrumentation).

Ainsi qu'expliqué précédemment, un calcul doit être lancé deux fois avec des maillages différents afin d'évaluer la sensibilité du modèle au maillage. Si la sensibilité du résultat au maillage est jugée trop importante (supérieure à quelques pour cent), alors le maillage doit être affiné afin de pouvoir disposer d'un résultat plus précis.

2.7. Solution d'instrumentation

Une fois les simulations effectuées, convergées, les résultats peuvent être extraits et traités dans le but de définir la solution d'autosurveillance. Celle-ci requiert trois étapes :

• **le choix de l'emplacement du ou des capteurs** : celui-ci se fonde sur l'analyse des résultats de surface libre pour l'ensemble des simulations effectuées ; la zone doit être la plus plane possible, stable dans le temps et être facilement accessible pour la pose et l'entretien du matériel ;

• **l'établissement de la relation hauteur-débit** : une fois l'emplacement choisi, un tableau à deux colonnes (hauteur au niveau du capteur, débit déversé) peut être établi ; celui-ci peut également être exprimé sous la forme d'une équation selon les pratiques de l'exploitant de l'ouvrage. Le zéro doit être précisé, notamment dans le cas d'une crête déversante ne présentant pas un niveau constant ;

• **l'évaluation de l'incertitude sur le débit** : celle-ci tient compte (par ordre d'importance) de l'incertitude de mesure (précision de la mesure de niveau et précision sur le zéro) et de l'incertitude du modèle numérique (en général de l'ordre de quelques pour cent). L'incertitude globale sur le débit dépend des sites, du débit… Lorsque le site est propice à une mesure de qualité, l'incertitude est généralement comprise dans la fourchette 10 – 20 % (parfois moins – de l'ordre de 5 % – lorsque les conditions sont très favorables).

2.8. Analyse des données fournies

Une fois la solution d'instrumentation définie et celle-ci mise en place dans l'ouvrage, une analyse des données collectées après quelques mois de fonctionnement permet de vérifier que l'autosurveillance qui a été mise en place est de qualité (vérification des déversements, calcul des débits, vérification avec la connaissance du réseau, diagnostic d'une éventuelle erreur de zéro…). Dans le cas d'un ouvrage pour lequel la connaissance hydraulique était très pauvre, cette phase postmodélisation peut permettre de vérifier les hypothèses effectuées et, éventuellement, d'ajuster la relation hauteur-débit dans le cas où certaines hypothèses seraient mal adaptées (par exemple, dans le cas où le débit maximum aurait été mal évalué).

3. Exemples

3.1. Déversoir Sichon à Vichy

Le déversoir Sichon, situé sur le territoire de la communauté d'agglomération de Vichy Val d'Allier, est un ouvrage faisant transiter en temps sec une charge d'environ 1 400 kg de DBO_5/jour. L'objectif pour Vichy Val d'Allier est de disposer d'un système d'autosurveillance du débit déversé qui soit fiable et facile à entretenir. Vichy Val d'Allier souhaite ainsi déterminer le débit déversé à partir d'une ou plusieurs mesures de niveau d'eau.

L'ouvrage, illustré sur les *figures* 2 et 3, est non standard. Il présente en effet une crête déversante en partie frontale et en partie latérale (angle de 120° entre les deux), deux entrées (ovoïdes 1 700 mm) dont la confluence se situe environ 6,5 m en amont de la crête déversante, une sortie vers la STEP (ovoïde 1 700 mm) et une sortie vers le milieu (conduite circulaire 1 200 mm). L'ouvrage présente en outre plusieurs autres particularités : la présence d'une margelle de 0,70 m de haut sur la droite de l'ouvrage, la présence de deux obstacles (une conduite d'eau potable de diamètre 250 mm provenant de l'entrée 2 et longeant ensuite la chambre de déversement pour passer au-dessus de la crête, une conduite PVC de diamètre 187 mm à l'aval de la crête et traversant transversalement la partie déversée). Une canalisa-

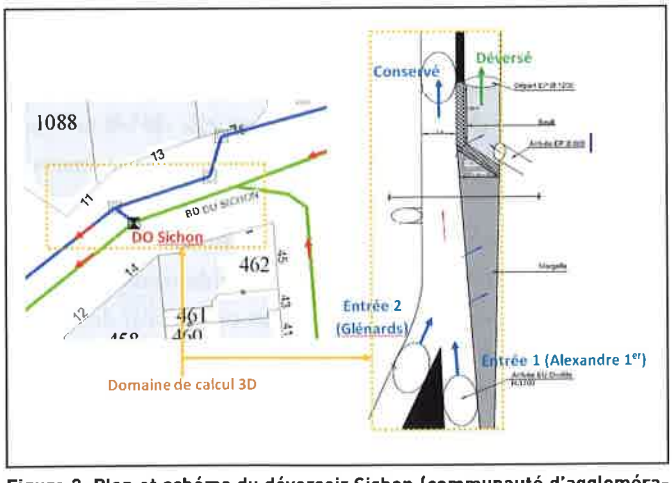


Figure 2. Plan et schéma du déversoir Sichon (communauté d'agglomération de Vichy Val d'Allier). En pointillé les limites du modèle 3D

Figure 3. Photographies du déversoir Sichon (communauté d'agglomération de Vichy Val d'Allier) : vue des entrées (à gauche), vue de la crête et des obstacles (à droite)

tion de diamètre 600 mm apporte enfin un débit d'eaux pluviales strictes à l'aval de la crête déversante. Malgré la pente hydrauliquement forte d'une des deux entrées (1,0 % pour l'une, 0,3 % pour l'autre), un calcul préalable a permis de montrer que la crête de ce déversoir est suffisamment haute pour imposer un régime de type fluvial dans l'ouvrage, ce qui permet de garantir que son instrumentation à partir de mesures de niveau d'eau est tout à fait pertinente. Remarquons simplement qu'un ressaut hydraulique prendra place dans la conduite d'entrée présentant une pente de 1,0 %. La gamme de débits possibles au niveau des entrées a été évaluée grâce au modèle PCSWMM du réseau de Vichy Val d'Allier (modèle réalisé par Egis Eau). Ce modèle permet notamment d'évaluer la pluie mensuelle au niveau des entrées de ce déversoir à environ 1,8 m^3/s.

Concernant la sortie vers la STEP, celle-ci présente une pente hydrauliquement faible, propice à l'apparition d'un régime fluvial et est donc potentiellement sujette à des influences aval. Le modèle PCSWMM du réseau permet de dégager les ordres de grandeur suivants sur ce que le réseau peut accepter à l'aval en matière de débit. La pluie mensuelle de 1,8 m^3/s est, d'après le modèle PCSWMM, intégralement conservée dans le réseau (pas de déversement). Pour une pluie décennale, 3 m^3/s parviennent au maximum à s'engouffrer dans la canalisation de transfert vers la STEP. Ces valeurs constituent cependant des maximums et il est tout à fait possible que le débit conservé soit bien plus faible du fait d'un engorgement du réseau conservé. La condition limite aval vers la STEP du modèle 3D du déversoir Sichon doit donc intégrer cette variabilité.

Concernant la canalisation de décharge, celle-ci présente aussi une pente très faible. En cas de forte influence aval (possible notamment au niveau de la jonction avec la canalisation de décharge du déversoir Lac d'Allier situé plus en aval) ou encore en cas de très fort débit déversé, la crête déversante sera noyée. Dans ce cas, une seconde mesure de niveau d'eau (à l'aval de la crête) sera nécessaire pour évaluer le débit. Un calcul de ligne d'eau dans la conduite de décharge a permis d'évaluer à environ 0,6 m^3/s le débit au-delà duquel la crête sera noyée par l'aval du simple fait de la limite de capacité de cette canalisation. Cet ordre de grandeur va permettre de définir la condition limite du débit aval déversé de façon pertinente. Dans le cas d'un débit déversé supérieur à 0,6 m^3/s, il faudra ainsi systématiquement imposer un niveau d'eau pour simuler l'influence aval.

Sur la base de cette analyse hydraulique de l'ouvrage et de son environnement, une liste de 22 simulations 3D à effectuer pour représenter le comportement hydraulique de l'ouvrage a été établie en accord avec la communauté d'agglomération de Vichy Val d'Allier. Rappelons que ces simulations 3D doivent représenter les phénomènes suivants :

– la variabilité des débits d'entrée ;
– la variabilité de l'état d'engorgement de la canalisation de transfert vers la STEP ;
– la possible influence aval de la canalisation de décharge.

Une fois les simulations effectuées et vérifiées (convergence, indépendance au maillage), les résultats obtenus ont été analysés dans l'objectif d'identifier les

zones propices à l'instrumentation. Pour cela, deux conditions sont requises :

1°) Que la zone soit bien tranquillisée : surface libre plane et stable dans le temps.

2°) Qu'il existe un lien bijectif entre le niveau d'eau mesuré et le débit déversé.

La *figure 4* présente un exemple de résultat obtenu dans le cas d'un écoulement dénoyé au niveau de la crête déversante (pas d'influence aval). Cette figure montre qu'à l'exception de quelques zones où le niveau d'eau présente des variations importantes sur une faible distance, la quasi-totalité de l'ouvrage présente un niveau d'eau propice à une mesure de qualité au sens de la première condition. L'emplacement retenu est situé dans le regard d'accès à l'ouvrage qui, en plus de présenter une surface libre très plane particulièrement propice à l'instrumentation, est la zone la plus facile d'accès et donc la plus intéressante pour une maintenance simple.

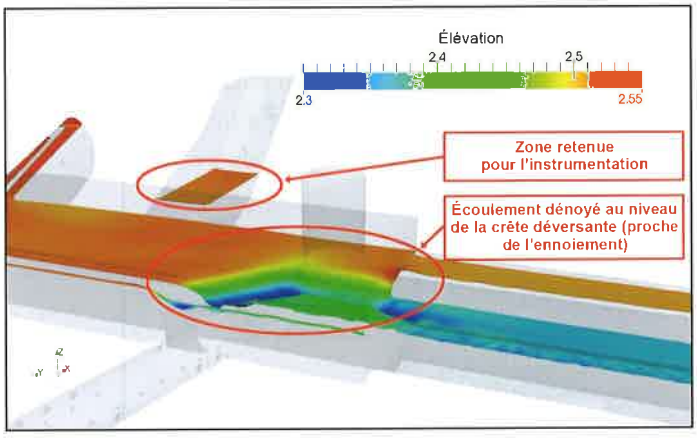


Figure 4. Exemple de résultat de simulation du déversoir Sichon (le débit déversé est de 0,50 m³/s, aucune influence aval n'est présente dans la canalisation de décharge)

Il reste à vérifier la seconde condition, à savoir qu'il existe un lien bijectif entre le niveau d'eau à l'emplacement retenu et le débit déversé. Pour cela, il faut comparer les niveaux d'eau au niveau de la zone pressentie et vérifier qu'ils restent constants lorsque le débit déversé demeure inchangé, mais que les conditions amont/aval vers la STEP changent (par exemple, dans le cas d'un engorgement du réseau vers la STEP). Pour illustrer ce second critère, considérons l'ensemble des sept simulations effectuées pour un débit déversé de 0,50 m³/s et présentées dans le *tableau I*.

La comparaison des résultats obtenus pour les simulations 1 et 2 montre que malgré des conditions aux limites très différentes (un débit conservé de 1 800 L/s pour la simulation 1 et de seulement 1 000 L/s pour la simulation 2), la hauteur de lame déversante au niveau de l'emplacement choisi demeure quasiment inchangée : 0,211 m contre 0,201 m, soit 1 cm de différence (soit approximativement l'incertitude de mesure). La comparaison des simulations 3 et 4 montre que la lame déversante n'est pas non plus sensible à la répartition du débit entre les deux entrées. La zone retenue est donc parfaitement adaptée à une détermination du débit déversé par l'intermédiaire d'une mesure du niveau d'eau.

Un autre enseignement du *tableau I* est l'évaluation de l'influence aval à partir de laquelle la crête déversante est noyée. On constate ainsi dans ce tableau que

Simulation	*Q* entrée 1 (L/s)	*Q* entrée 2 (L/s)	*Q* conservé (L/s)	*Q* déversé (L/s)	h_1 (m)	h_2 (m)
1	1 300	1 000	1 800	500	0,211	–0,084
2	1 000	500	1 000	500	0,201	–0,058
3	500	1 000	1 000	500	0,210	0,053
4	1 000	500	1 000	500	0,213	0,053
5	500	1 000	1 000	500	0,227	0,150
6	500	1 000	1 000	500	0,273	0,251
7	500	1 000	1 000	500	0,314	0,297

h1 est la hauteur de lame déversante au niveau du capteur situé en amont de la crête déversante (dans le regard d'accès) ; *h2*, la hauteur de lame déversante à l'aval de la crête déversante (lorsqu'elle est négative, cela signifie que le niveau d'eau aval est inférieur à la hauteur de crête).

Tableau I. Ensemble des simulations effectuées pour un débit déversé de 0,50 m³/s

jusqu'à une hauteur h_2 de 0,053 m (h_2 est mesurée dans la partie déversée en aval de la crête), la hauteur h_1 demeure inchangée alors qu'elle augmente de façon significative pour une hauteur h_2 supérieure à 0,150 m. Combiné aux résultats des autres simulations effectuées à proximité de la transition noyé/dénoyé, ce résultat permet de conclure que la crête déversante est noyée à partir d'un rapport h_2/h_1 de l'ordre de 30 %. En dessous, le débit déversé pourra être évalué à partir de la hauteur de lame déversante h_1 seule. Au-dessus, il faudra combiner h_1 et h_2 pour évaluer le débit.

Les relations hauteur-débit correspondant à ces conditions de fonctionnement ont alors été établies sur base de l'ensemble des simulations. Elles sont synthétisées dans les *équations 1* et *2 :*

- Si $\frac{h_2}{h_1} < 30\,\%$, alors $Q = 6{,}213 \times h_1^{1{,}623}$ *(équation 1)*

- Si $30\,\% < \frac{h_2}{h_1} < 100\,\%$, alors $Q =$

$$\left(1 - \left(\frac{h_2}{h_1}\right)^{1{,}212}\right)^{0{,}555} \times 6{,}213 \times h_1^{1{,}623} \quad \textit{(équation 2)}$$

L'analyse hydraulique précédente a mis en évidence le fait que le déversoir Sichon n'était pas standard et il est évident qu'aucune formule hauteur-débit n'existe dans la littérature pour un tel ouvrage. On peut cependant se poser la question de la plus-value de la démarche de modélisation numérique 3D mise en œuvre ici par rapport à des formules classiques de la littérature (lois de seuil de type frontal). La relation hauteur-débit obtenue en régime dénoyé a ainsi été comparée avec la relation hauteur-débit de la norme ISO 1438 sur les seuils frontaux. La *figure 5* illustre ainsi des erreurs commises entre 25 % aux débits déversés les plus importants et environ 50 % aux débits les plus faibles (*a priori* les plus importants à bien mesurer pour l'autosurveillance).

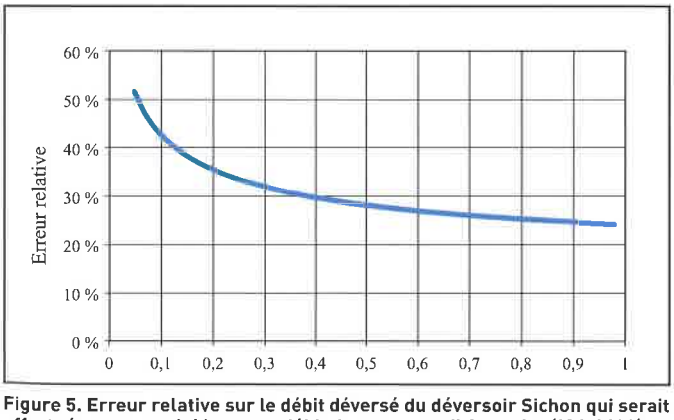


Figure 5. Erreur relative sur le débit déversé du déversoir Sichon qui serait effectuée avec une loi hauteur-débit de type « seuil frontal » (ISO 1438)

Ces différences significatives peuvent s'expliquer par le caractère non standard de l'ouvrage (qui n'entre pas du tout dans les conditions d'application de la norme ISO 1438), notamment le fait que le déversement est une combinaison entre une zone de déversement plutôt frontal (vecteurs vitesse quasiment perpendiculaires à la crête déversante) et une zone de déversement latéral, ainsi qu'illustré sur la *figure 6*.

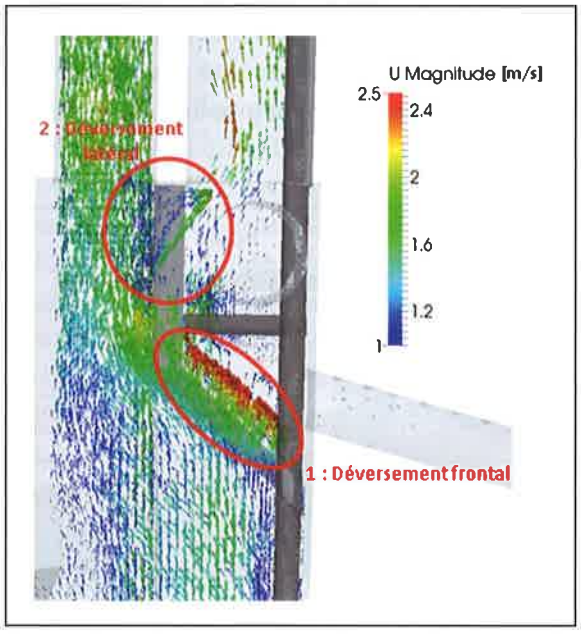


Figure 6. Vue de dessus du champ de vitesse au niveau de la crête déversante du déversoir Sichon

Cet exemple a également fait l'objet d'une analyse financière afin de comparer la solution proposée ici à la mise en place d'un débitmètre hauteur-vitesse dans la canalisation de décharge. En termes d'investissement, la différence est faible (de l'ordre de 10 à 20 % en faveur de la solution proposée ici), car les coûts de matériel (largement plus faibles pour des sondes de niveau aériennes et autonomes) sont contrebalancés par les coûts importants de la modélisation 3D. En termes de maintenance, la solution choisie par Vichy Val d'Allier est en revanche environ cinq fois moins coûteuse que la solution hauteur-vitesse. Globalement, sur une durée de 5 ans

représentant une durée de vie moyenne pour des capteurs en assainissement, le gain financier est d'environ 40 % en faveur de la solution présentée dans cet article.

3.2. Point A2 de la station de traitement des eaux usées de Montargis

Malgré sa simplicité géométrique, le point A2 de la station de traitement des eaux usées de l'agglomération montargoise et rives du Loing présente un caractère non standard. Ainsi qu'illustré sur la *figure 7*, ce seuil frontal présente en effet une distance d'approche extrêmement courte entre la conduite d'entrée en vert et le seuil déversant (les deux flèches roses illustrent le déversement). Cette distance d'approche est d'environ 1 mètre (flèche orange sur la *figure 7*) alors que la norme ISO 1438 recommande une distance d'au moins cinq fois la largeur, soit environ 5 mètres.

La mise en œuvre de la méthodologie décrite précédemment a permis d'établir une relation hauteur-débit valide malgré le caractère non standard de cet ouvrage. La position du capteur n'a pas été modifiée par rapport à l'instrumentation déjà en place au niveau de ce point.

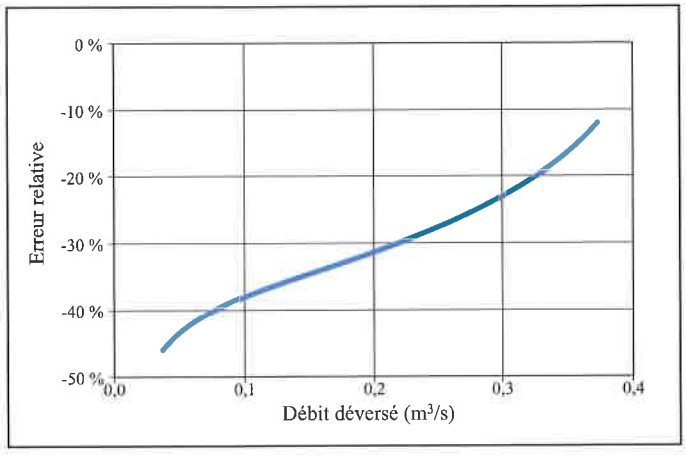
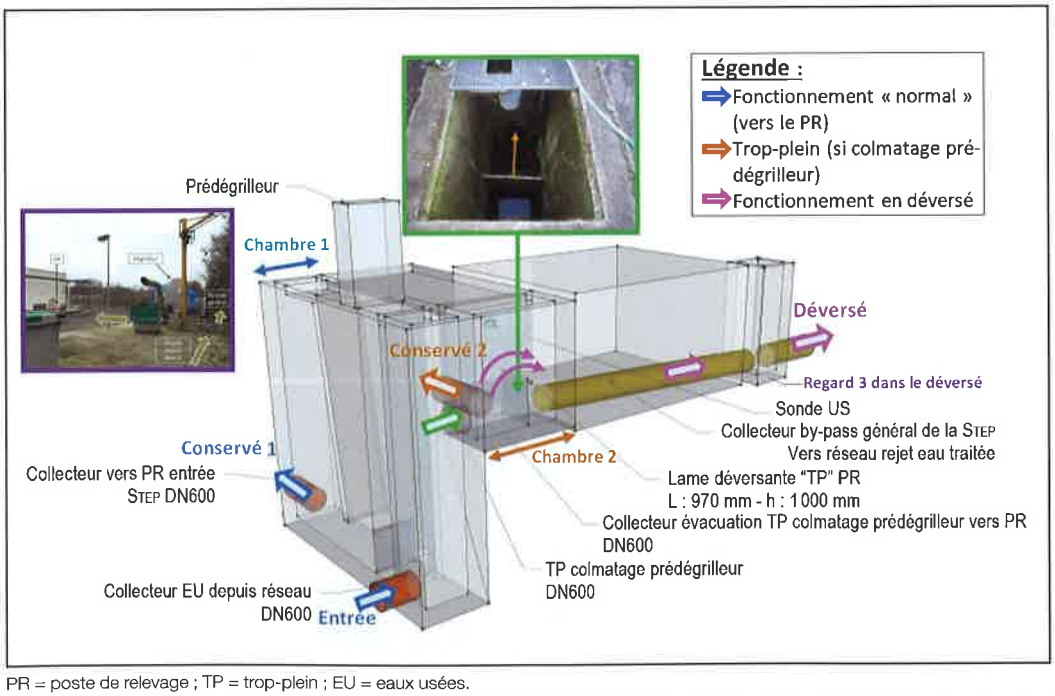


Figure 8. Erreur relative sur le débit déversé au point A2 de la station de traitement des eaux usées de l'agglomération montargoise et rives du Loing qui serait effectuée avec une loi hauteur-débit de type « seuil frontal » (ISO 1438)

$$Q = -8{,}581 \times h^3 + 4{,}730 \times h^2 + 0{,}531 \times h$$

Une comparaison de la loi établie par tarage numérique avec une loi hauteur-débit de type ISO 1438 aboutit à la *figure 8*. La loi issue de l'application de l'ISO 1438 sous-estime de façon systématique le débit déversé : entre 50 % aux petits débits et 10 % aux débits les plus forts. Malgré donc une géométrie extrêmement simple et surtout très proche de celle d'un « seuil classique », la relation hauteur-débit de ce point de déversement n'est absolument pas classique.



PR = poste de relevage ; TP = trop-plein ; EU = eaux usées.

Figure 7. Schéma du point A2 de la station de traitement des eaux usées de l'agglomération montargoise et rives du Loing

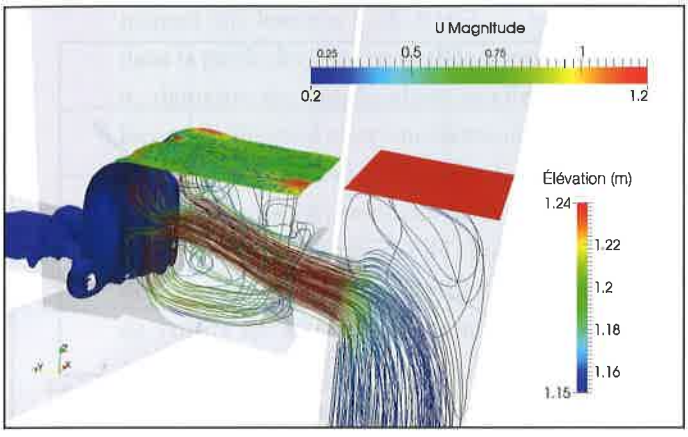


Figure 9. Lignes de courant au niveau du point A2 de la station de traitement des eaux usées de l'agglomération montargoise et rives du Loing

D'un point de vue phénoménologique, cet écart peut s'expliquer de la façon suivante. La très courte distance d'approche fait que l'énergie au niveau du point de mesure n'est pas seulement potentielle comme dans un seuil classique (la hauteur d'eau correspond à la quasi-totalité de la charge), mais aussi cinétique. Cela est bien illustré sur la *figure 9* où l'on voit les lignes de courant en provenance de la conduite DN600 d'entrée se briser sur la crête déversante. Cet effet de la vitesse n'aurait pas pu être prévu par le biais d'un coefficient de vitesse C_v qui prend en compte une vitesse uniforme non négligeable à l'approche du seuil (voir, par exemple, par les normes ISO 4359 ou encore ISO 4360). En effet, la *figure 9* montre bien que la vitesse à l'approche du seuil n'est absolument pas uniforme.

3.3. Déversoir de la rue du Lycée Altenstadt à Wissembourg

Le déversoir de la rue du Lycée Altenstadt est situé sur la commune de Wissembourg. Du fait de sa charge polluante supérieure à 600 kg de DBO_5 par jour, le Syndicat des eaux et de l'assainissement Alsace-Moselle (SDEA) a mis en place une mesure du débit déversé par cet ouvrage. Pour des raisons de maintenance, le SDEA a souhaité éviter les capteurs immergés et s'est tourné vers une relation hauteur-débit sur la crête déversante de l'ouvrage.

Les photographies de la *figure 10* illustrent le caractère très particulier de cet ouvrage. Ce dernier présente en effet trois entrées distinctes : deux entrées principales (diamètres 1 300 et 1 400 mm), une entrée secondaire de taille réduite (300 mm) arrivant dans l'ouvrage quasiment au niveau de la sortie vers la STEP. L'ouvrage présente une crête déversante de longueur environ 3,3 m et de hauteur comprise entre 0,44 et 0,46 m (la crête n'est pas complètement horizontale). Les canalisations d'entrée et de sortie présentent des pentes de l'ordre de 0,3 %, soit des pentes hydrauliquement faibles.

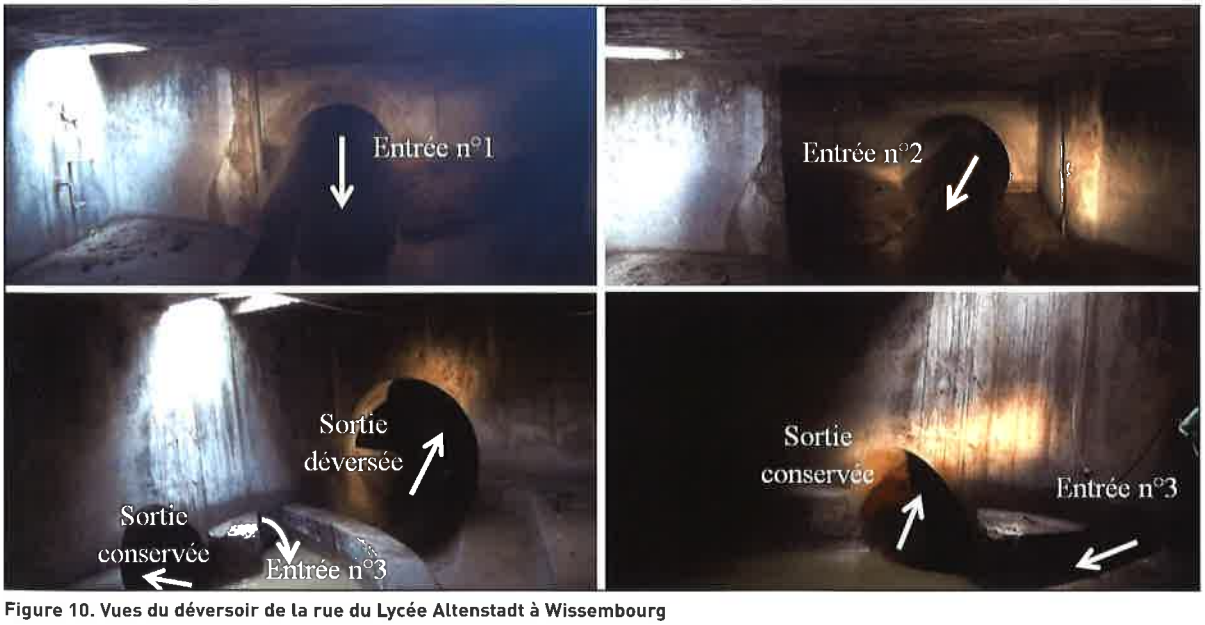


Figure 10. Vues du déversoir de la rue du Lycée Altenstadt à Wissembourg

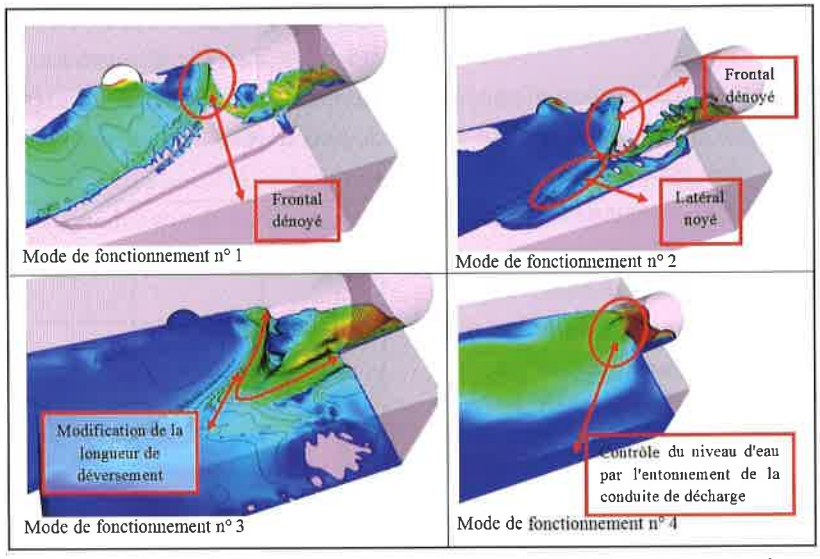


Figure 11. Illustrations des quatre modes de fonctionnement de l'ouvrage par quelques résultats de modélisation numérique 3D – la surface colorée correspond à la surface libre, les différentes couleurs représentent les différences de vitesse (du bleu au rouge pour les plus lentes aux plus rapides)

Selon le retour d'expérience du SDEA en charge de la gestion du réseau d'assainissement, aucune remontée du cours d'eau récepteur n'est possible dans ce déversoir.
La mise en œuvre pour ce déversoir de la méthodologie décrite précédemment a permis de déterminer :
– le comportement hydraulique de cet ouvrage complexe ;
– un emplacement de capteur de niveau permettant une mesure de qualité (surface libre plane et tranquillisée) ;
– la relation hauteur-débit correspond à l'emplacement préconisé pour le capteur.
Au-delà de sa complexité géométrique, ce déversoir présente une grande complexité hydraulique. En effet, les nombreuses entrées peuvent apporter des débits différents selon la sollicitation pluviométrique des bassins versants drainés. Par ailleurs, du fait de la pente faible de la canalisation de transfert vers la STEP, le débit s'y engouffrant est tributaire de l'état d'engorgement du réseau à l'aval (et pas seulement de la hauteur de crête de l'ouvrage). De ce fait, un total de 24 conditions hydrauliques a été simulé afin de balayer l'intégralité du fonctionnement hydraulique de ce déversoir.
La *figure 11* illustre, à travers les résultats de quatre simulations, les quatre modes de fonctionnement de cet ouvrage. Pour les débits déversés les plus faibles (mode de fonctionnement n° 1), l'ouvrage déverse exclusivement sur la partie de la crête la plus proche de la sortie de transfert et de l'entrée n° 3. Dans ce cas, le déversement est quasi frontal (par rapport aux entrées n° 1 et n° 2) et la crête est parfaitement dénoyée. Pour des débits déversés plus importants (mode de fonctionnement n° 2), le déversement gagne la totalité de la longueur de la crête. Cependant, si la crête est toujours dénoyée pour sa partie frontale, la partie de la crête située le plus en amont (partie latérale par rapport aux entrées n° 1 et n° 2) est quant à elle noyée de la très faible hauteur de chute dans cette zone de l'ouvrage. Pour des débits encore plus importants (mode de fonctionnement n° 3), la partie latérale de la crête est complètement noyée (aucune différence de niveau entre l'amont et l'aval de la crête dans cette zone). C'est en revanche la chute située un peu plus en aval dans la partie déversée et toujours la partie frontale de la crête qui font office de contrôle hydraulique du déversement. Aux débits les plus importants (mode de fonctionnement n° 4), l'engouffrement dans la canalisation de décharge provoque une telle augmentation de la hauteur d'eau dans l'ouvrage que l'intégralité de la crête est noyée. Ce n'est alors plus la crête déversante qui assure la relation hauteur-débit, c'est à présent l'engouffrement qui, en provoquant un passage en régime torrentiel à l'intérieur de la canalisation de décharge (effet Venturi), qui permet d'assurer qu'une

relation directe existe entre la hauteur et le débit déversé.

À la suite à l'analyse des 24 simulations effectuées, plusieurs zones propices à l'instrumentation ont été identifiées (la surface libre est tranquillisée sur la quasi-totalité de l'ouvrage en amont de la crête). La position reportée sur la *figure 12* a été préconisée en accord avec le SDEA. Cet emplacement permet de diagnostiquer une éventuelle panne ou une éventuelle dérive du capteur, car le capteur est situé au-dessus du flot de temps sec. La relation hauteur-débit suivante a ensuite été établie ; elle est intimement liée à l'emplacement choisi pour le capteur. Dans cette équation, h représente la hauteur de lame déversante faite par rapport au point indiqué sur la *figure 12*. Trois zones ont été différenciées de façon à éviter d'avoir une équation trop compliquée qui favoriserait les risques d'erreur de saisie :

- Si 0 m ≤ h ≤ 0,024 m, alors $Q = 226{,}97 \times h^{2{,}0797}$
- Si 0,024 m ≤ h ≤ 0,191 m, alors $Q = 11{,}907 \times h^2 + 0{,}2857 \times h + 0{,}0819$
- Si 0,191 m ≤ h ≤ 1,30 m, alors $Q = -0{,}7879 \times h^3 + 1{,}5038 \times h^2 + 2{,}4223 \times h + 0{,}0672$

De la même façon que pour les deux exemples de Vichy et de Montargis, nous nous sommes posé la question de la plus-value d'une modélisation numérique 3D par rapport à une relation hauteur-débit « classique » de type seuil frontal pour établir la relation hauteur-débit pour le déversoir de la rue du Lycée Altenstadt. La comparaison entre les deux approches est illustrée sur la *figure 13*. Il apparaît sur cette figure que l'erreur qui serait commise serait ici très importante (bien plus grande que pour les deux ouvrages précédents où elle était déjà notable) : inférieure à 50 % pour des débits inférieurs à environ 1,3 m³/s, l'erreur explose en effet au-delà pour atteindre environ 200 % en surestimation à un débit déversé de 4 m³/s.

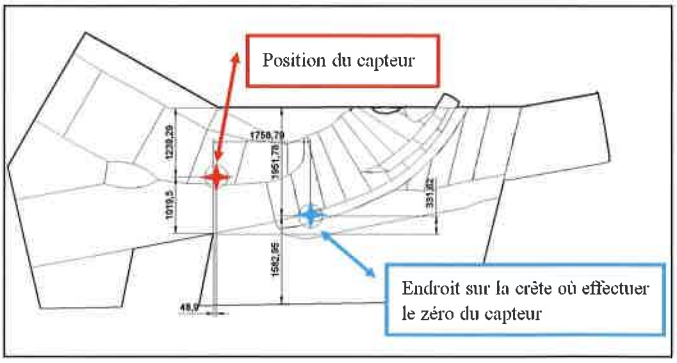


Figure 12. Positionnement préconisé pour le capteur de niveau et endroit sur la crête par rapport auquel effectuer le zéro du capteur de niveau

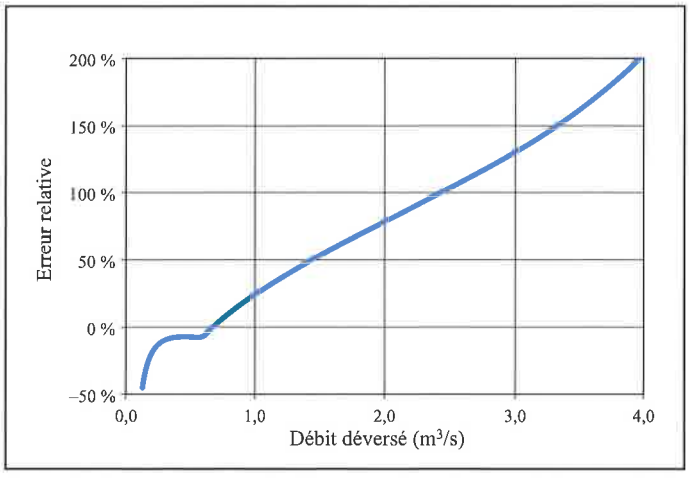


Figure 13. Erreur relative sur le débit déversé du déversoir de la rue du Lycée Altenstadt à Wissembourg qui serait effectuée avec une loi hauteur-débit de type « seuil frontal » (ISO 1438)

Conclusion

Dans une première partie, cet article a proposé une définition de la notion de tarage numérique et plus généralement de la notion d'étalonnage numérique. Le tarage numérique apparaît comme un outil adapté à l'établissement des relations hauteur-débit déversé au niveau des déversoirs d'orage et donc à la mise en place de l'autosurveillance.

La deuxième partie a fourni des éléments méthodologiques concernant les différentes étapes d'un processus de tarage numérique. Ces éléments peuvent être intégrés à un cahier des charges afin de garantir au pouvoir adjudicateur un tarage numérique de qualité.

Trois exemples d'application ont ensuite été présentés afin d'illustrer le tarage numérique d'une relation hauteur-débit au niveau d'un ouvrage de déversement : déversoir Sichon à Vichy, point A2 de la station de traitement des eaux usées de Montargis et déversoir de la rue du Lycée Altenstadt à Wissembourg. Ces exemples ont mis en évidence la nécessité d'effectuer en amont de la modélisation numérique une analyse hydraulique fine. Par ailleurs, ils ont montré que l'erreur qui serait effectuée si une relation hauteur-débit issue de la littérature était utilisée pouvait être

extrêmement importante (jusqu'à 200 % pour le troisième exemple). Des éléments financiers (investissement et maintenance) ont été présentés avec le premier des trois exemples, montrant un gain global d'environ 40 % par rapport à la mise en place d'un débitmètre hauteur-vitesse dans la canalisation de décharge.

Remerciements

Le projet Mentor a bénéficié du soutien financier de l'Agence nationale de la recherche, « Notification de décision d'aide n° ANR 11 ECOT 007 01 du 13 décembre 2011 ».

Bibliographie

ISEL S. (2014) : *Développement de méthodologies et d'outils numériques pour l'évaluation du débit en réseau hydraulique à surface libre* [thèse]. Université de Strasbourg.

ISO (2008) : *Hydrométrie – Mesure de débit dans les canaux découverts au moyen de déversoirs à paroi mince*. International Organization for Standardization, ISO 1438:2008.

ISO (2008) : *Hydrométrie – Mesure de débit des liquides dans les canaux découverts au moyen de déversoirs à profil triangulaire*. International Organization for Standardization, ISO 4360:2008.

ISO (2010) : *Hydrometry – Guidelines for the application of acoustic velocity meters using the Doppler and echo correlation methods*. International Organization for Standardization, ISO 15769:2010.

ISO (2013) : *Structures de mesure du débit – Canaux jaugeurs à col rectangulaire, à col trapézoïdal et à col en U*. International Organization for Standardization, ISO 4359:2013.

VAZQUEZ J., DUFRESNE M., FISCHER M., MANCEAU M., ISENMANN G., WERTEL J. (2016) : *Diagnostic pour l'aide à l'instrumentation des déversoirs d'orage*. Document librement téléchargeable sur le site hydraulique-des-reseaux.engees.eu

Résumé

S. ISEL, J. VAZQUEZ, M. FISCHER, J. WERTEL, C. JOANNIS, G. LIPEME KOUYI, M. CHOPIN, A. LABROUSSE, D. SCHEFFER, M. THIÉRIOT, M. DUFRESNE

Le tarage numérique d'une relation hauteur(s)-débit : éléments de méthodologie et exemples d'application

Cet article propose une définition de la notion de tarage numérique et plus généralement de la notion d'étalonnage numérique. Le tarage numérique permet l'établissement de relations hauteur-débit déversé au niveau des déversoirs d'orage et donc contribue à la mise en place de l'autosurveillance. Des éléments de méthodologie concernant les différentes étapes d'un processus de tarage numérique sont ensuite présentés ; ces éléments peuvent être intégrés à un cahier des charges afin de garantir au pouvoir adjudicateur un tarage numérique de qualité. Trois exemples d'application sont présentés afin d'illustrer la démarche. Ces exemples montrent que l'erreur qui serait effectuée si une relation hauteur-débit issue de la littérature était utilisée peut être extrêmement importante (jusqu'à 200 % pour le troisième exemple). Des éléments financiers (investissement et maintenance) sont enfin présentés.

Abstract

S. ISEL, J. VAZQUEZ, M. FISCHER, J. WERTEL, C. JOANNIS, G. LIPEME KOUYI, M. CHOPIN, A. LABROUSSE, D. SCHEFFER, M. THIÉRIOT, M. DUFRESNE

Numerical calibration of head-discharge relationship: methodology and on-site applications

This article defines the notion of numerical calibration. Numerical calibration allows the establishment of head-discharge relationships for combined sewer overflows. Elements of methodology for the different steps of a numerical calibration process are then presented; these elements can be defined as technical specifications in order to guarantee a good numerical calibration. Three examples of application are presented to illustrate the approach. These examples show that the error that would be made using head-discharge relationship taken from the literature can be highly important (up to 200% for the third example). Finally, financial elements (investment and maintenance) are presented.