

Évaluation du débit déversé par le trop-plein d'une station de pompage par la mesure de hauteurs d'eau

■ G. ISENMANN¹, S. BELLAHCEN¹, J. VAZQUEZ^{2,1}, M. DUFRESNE^{2,1}, C. JOANNIS³, R. MOSE^{2,1}

Mots-clés : mesure de débit, niveau d'eau, modélisation numérique, station de pompage

Keywords: discharge determination, water level, numerical simulation, pumping station

Introduction

La plupart des stations de pompage mises en place sur les réseaux d'assainissement desservent des réseaux séparatifs d'eaux usées. Elles sont généralement équipées d'un trop-plein permettant de faire face à une défaillance temporaire du système de pompage et ainsi d'éviter les débordements d'eaux usées sur la voirie et dans les habitations proches. L'activation de ces trop-pleins est *a priori* exceptionnelle et ne justifie pas une surveillance poussée : une simple détection est suffisante. Ces ouvrages ne sont d'ailleurs pas explicitement concernés par les textes réglementaires relatifs à l'autosurveillance (arrêté du 21 juillet 2015). Cependant, l'expérience montre que les trop-pleins peuvent générer des rejets fréquents, représentant à l'échelle de l'année des durées cumulées de plusieurs dizaines d'heures. L'activité de ces trop-pleins est liée non seulement à des problèmes de fonctionnement du système de pompage, mais aussi au dépassement de sa capacité par des débits trop importants d'eaux claires parasites. Le fonctionnement des trop-pleins sur des réseaux séparatifs s'apparente donc en pratique à celui des déversoirs d'orage en réseau unitaire, même si ce fonctionnement n'est pas conforme aux principes de conception des réseaux séparatifs. Il est alors logique d'envisager une surveillance et une quantification des rejets correspondant

à ces surverses de réseaux séparatifs d'eaux usées, d'autant plus qu'ils concernent souvent des milieux naturels sensibles comme les petites rivières urbaines ou le littoral. Cette surveillance permettra d'établir un diagnostic et de hiérarchiser les actions à entreprendre pour supprimer ces rejets anormaux. Les trop-pleins équipant les rares stations de pompage sur des réseaux unitaires sont quant à eux directement concernés par l'autosurveillance réglementaire, dès lors que les flux pompés ou déversés dépassent les seuils prescrits dans l'arrêté du 21 juillet 2015.

Les stations de pompage possèdent souvent un trop-plein dans la bache de reprise. Ce trop-plein est généralement constitué d'une conduite circulaire et peut donc être considéré comme un seuil circulaire à crête épaisse. Dans cette configuration, la solution la plus simple pour mesurer les débits rejetés par le trop-plein est d'installer un capteur de niveau d'eau dans la bache et d'établir une relation entre la hauteur d'eau au-dessus du radier de la conduite de surverse et le débit déversé.

Si la canalisation de décharge fonctionne en charge, ce qui nécessite un niveau d'eau dans la bache dépassant nettement sa génératrice supérieure, le débit est lié à la hauteur amont par une relation de type Bernoulli, en intégrant les pertes de charge linéaires et singulières (à l'entrée et à la sortie de la canalisation de décharge). Mais ce mode de fonctionnement n'est pas le plus courant. Lorsque l'écoulement dans la canalisation de décharge est à surface libre, on peut mettre en place un déversoir à l'amont immédiat de l'engouffrement dans la conduite de trop-plein (par exemple au moyen d'un caisson en encorbellement par rapport à la paroi de la bache). Ce

¹ ICube – 2, rue Boussingault – 67000 Strasbourg.
Courriel : gilles.isenmann@engees.eu

² École nationale du génie de l'eau et de l'environnement de Strasbourg (Enges) – 1, quai Koch – 67070 Strasbourg.

³ Institut français des sciences et technologies des transports, de l'aménagement et des réseaux (Ifsttar) – Route de Bouaye – CS4 – 44344 Bouguenais.

déversoir provoque un passage de l'écoulement en régime critique qui permet d'utiliser des relations classiques de déversoir en mince paroi [Streeter, 1966 ; Carlier, 1972 ; Geankoplis, 1983] pour déduire le débit d'une mesure de hauteur à l'amont.

En absence d'un tel équipement, on peut assimiler l'orifice prolongé par la canalisation de décharge à un déversoir circulaire à seuil épais. Mais très peu d'études ont été publiées sur ce type d'ouvrage. Bos [1989] suggère l'équation empirique $Q = C_d \cdot D^{2.5} \cdot g^{0.5} \cdot f(\theta)$ où D est le diamètre intérieur (m), C_d le coefficient de débit et $f(\theta)$ est un paramètre de forme de la section de contrôle dont la valeur peut être déduite des tables éditées par Bos [1985], connaissant le diamètre de l'orifice ainsi que la charge hydraulique à l'amont du seuil. Cependant, notre cas d'étude ne remplit pas exactement les conditions reproduites par Bos [1985] pour établir ses relations empiriques. Et surtout cette formulation suppose l'apparition d'un régime d'écoulement critique dans la canalisation de décharge. Cette situation ne peut pas être garantie dans toutes les configurations, notamment en cas de remontée du niveau du milieu récepteur. Cet article décrit une méthode de calcul permettant d'établir une relation, sous forme analytique ou tabulée, entre la hauteur d'eau au-dessus du radier du trop-plein et le débit déversé utilisable dans un contexte opérationnel. Une modélisation numérique 3D a été utilisée pour mener des simulations dans différentes configurations hydrauliques selon une méthodologie décrite en détail par Isenmann et coll. [2016]. Ces « expérimentations numériques » ont permis d'établir des lois d'orifice, exprimées par des formules génériques permettant de traiter l'ensemble des modes de fonctionnement du système (écoulements noyé, dénoyé, en charge) pour une gamme de diamètres allant de 200 à 600 mm. L'article montre également comment combiner ces lois d'orifice avec un calcul de ligne d'eau dans le collecteur de décharge pour certaines configurations qui nécessitent de compléter la mesure de la hauteur d'eau dans la bache par une mesure du niveau d'eau dans le milieu naturel ou à l'aval de la canalisation de décharge.

1. Fonctionnement hydraulique de l'orifice et de la canalisation

Dans le cas le plus général, un ouvrage de surverse est constitué par la succession de deux éléments hydrauliques :

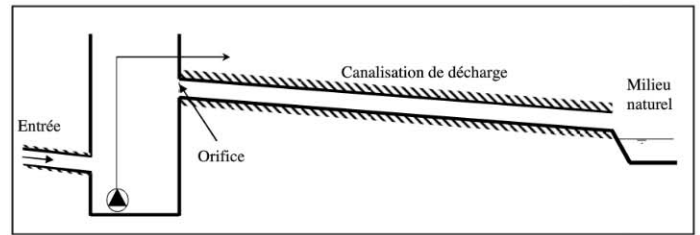


Figure 1. Profil en long d'un trop-plein de station de pompage

un orifice prolongé par un ajutage et une canalisation de décharge débouchant dans un milieu naturel. Le rôle de l'orifice est de permettre l'engouffrement de l'eau dans la canalisation. Cette dernière permet d'évacuer l'eau vers le milieu naturel (figure 1).

Le débit évacué pour une hauteur d'eau donnée dans la bache peut être contrôlé par l'orifice ou par la canalisation de décharge, voire par la conjugaison de leurs effets respectifs.

1.1. Étude de l'orifice

1.1.1. Modes de fonctionnement au niveau de l'orifice

À l'amont de l'orifice, la hauteur d'eau qui s'établit dans la bache pour évacuer un débit donné doit permettre de transformer la charge hydraulique, essentiellement représentée par l'énergie potentielle associée à la hauteur d'eau avec une vitesse quasi nulle, en une charge hydraulique dans la canalisation de décharge, plutôt dominée par l'énergie cinétique, associée à la vitesse de l'écoulement dans la conduite. De plus, la hauteur d'eau dans la bache doit également permettre de compenser les pertes de charge singulières au niveau de l'engouffrement dans la canalisation de décharge. On peut distinguer quatre modes de fonctionnement hydraulique au niveau de l'orifice (figure 2).

• Cas 1 : écoulement à surface libre avec un passage fluvial vers torrentiel

Les cas 1 et 1bis peuvent être considérés d'une manière similaire. L'écoulement change de régime entre la bache et la canalisation de trop-plein : il est fluvial à l'amont de l'orifice et torrentiel à l'aval, l'orifice est alors dit dénoyé : la ligne d'eau passe par la hauteur critique, ce qui garantit l'obtention d'une relation bijective entre la hauteur d'eau et le débit (l'écoulement peut repasser en régime fluvial plus à l'aval, avec formation d'un ressaut, mais celui-ci n'influence pas la hauteur amont).

RECRUTEZ

- Plus de 330 étudiants et apprentis formés par an, de bac +3 à bac +6
- 2600 diplômés

DÉVELOPPEZ VOS COMPÉTENCES

- Plus de 60 sessions de formation professionnelle
- Dispositif de VAE
- Mastères spécialisés

FAITES APPEL À NOTRE EXPERTISE

- 4 laboratoires de recherche



EAU & ENVIRONNEMENT

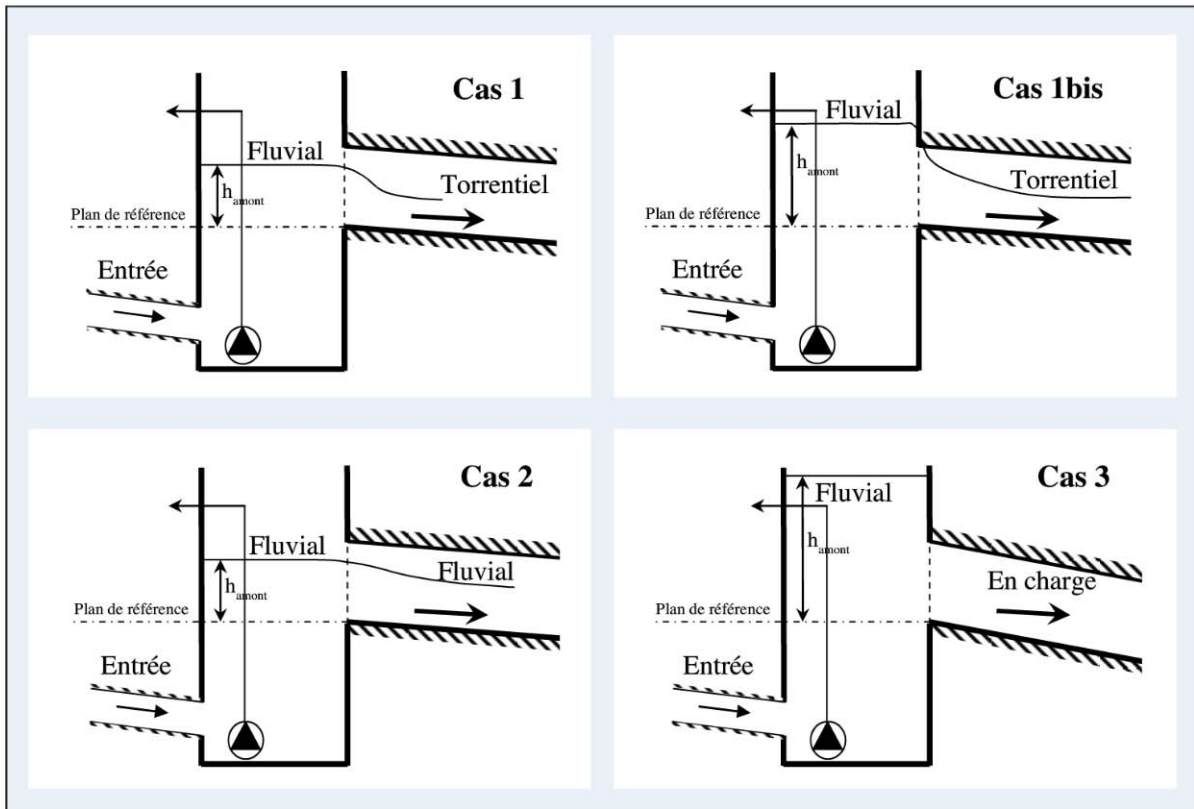
L'EXPERTISE D'UNE GRANDE ÉCOLE
POUR RESSOURCER VOS PROJETS



- ADDUCTION D'EAU POTABLE • QUALITÉ DES EAUX • GÉNIE CIVIL • AMÉNAGEMENT DU TERRITOIRE
- INGÉNIERIE DES MILIEUX NATURELS • GESTION DES DÉCHETS • ASSAINISSEMENT
- HYDRAULIQUE DES RÉSEAUX • GESTION DES SERVICES D'ENVIRONNEMENT

ENGEES - 1 quai Koch - BP 61039 - 67070 Strasbourg cedex

Tél: +33 (0)3 88 24 82 82 - Fax: +33 (0)3 88 37 04 97 / contact@engees.unistra.fr / <http://engees.unistra.fr>



Cas 1 : fonctionnement à surface libre au niveau de l'orifice et de la canalisation avec un passage fluvial vers torrentiel ; cas 1bis : fonctionnement en charge au niveau de l'orifice et à surface libre dans la canalisation avec un passage fluvial vers torrentiel ; cas 2 : fonctionnement à surface libre au niveau de l'orifice et de la canalisation avec un régime fluvial conservé ; cas 3 : fonctionnement en charge au niveau de l'orifice et de la canalisation.

Figure 2. Modes de fonctionnement pour l'orifice

Étant donné ce changement de régime, la détermination de la relation entre hauteur d'eau et débit n'est pas immédiate du fait de la contraction de veine liquide à l'aval direct de l'orifice (figure 3). La position précise de la section critique au sein de la contraction serait nécessaire (figure 4) pour pouvoir en déduire la vitesse et le débit, et remonter à la hauteur d'eau dans la bache via un calcul de ligne de charge (relation de Bernoulli), moyennant des hypothèses sur les pertes de charge. Le recours à une modélisation 3D pour reproduire le phénomène

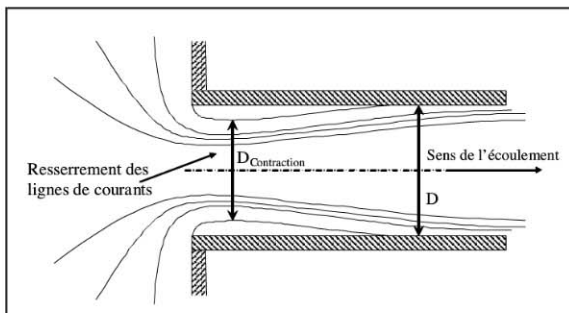


Figure 3. Contraction de la veine liquide au voisinage de la hauteur critique

de contraction et la transition entre le régime fluvial et le régime torrentiel est nécessaire pour localiser la section critique et identifier les pertes de charge pour finalement obtenir une relation mathématique entre la hauteur d'eau dans la bache et le débit dans la canalisation de décharge pour les diamètres classiquement rencontrés dans les trop-pleins.

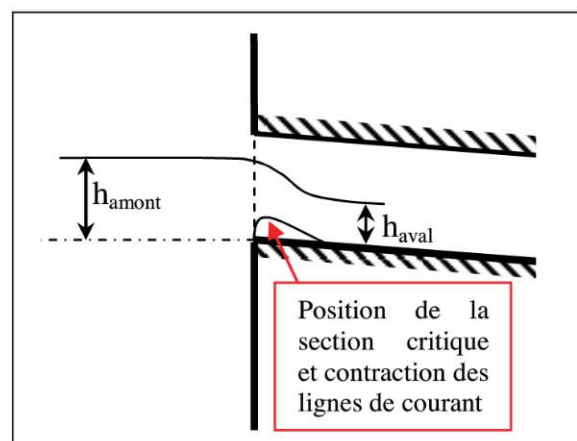


Figure 4. Position de la section critique

• Cas 2 : écoulement à surface libre avec conservation du régime fluvial

Dans le cas 2, l'écoulement ne change pas de régime entre la bêche et la canalisation de trop-plein : le régime d'écoulement reste fluvial. Le phénomène de contraction a toujours lieu, mais l'orifice est à présent noyé au sens défini pour le cas 1 : il n'y a pas de passage par la hauteur critique, et la hauteur d'eau à l'aval de la contraction joue un rôle non négligeable dans l'établissement de la loi hauteur-débit ; en effet, pour un débit donné, elle induit une hauteur d'eau dans la bêche plus importante que dans le cas précédent. Il est alors nécessaire de connaître les niveaux d'eau dans la bêche et à l'aval de la section contractée (par exemple, à partir d'une mesure de niveau d'eau réalisée directement dans le milieu naturel ou dans un regard de visite sur la canalisation de décharge).

• Cas 3 : écoulement en charge

Comme rappelé dans l'introduction, c'est le cas le plus simple à étudier à partir d'une étude hydraulique classique : la hauteur d'eau qui s'établit dans la bêche pour un débit donné dans la canalisation de trop-plein doit compenser les pertes de charge entre la bêche et la sortie de la canalisation de décharge.

Il peut apparaître dans deux contextes : de fortes pertes de charges linéaires non compensées par la pente, ou un niveau du milieu récepteur pouvant approcher, voire dépasser la cote de déversement. Dans tous les cas, ces pertes de charge sont une combinaison d'une perte de charge singulière au niveau de l'engouffrement et des pertes de charge linéaires dans la canalisation (ces dernières peuvent être négligeables si la canalisation de décharge est très courte (quelques mètres). Si l'écoulement n'est pas libre au niveau de l'extrémité aval de la

canalisation de décharge (exutoire partiellement ou totalement immergé, présence d'un clapet), il convient d'ajouter d'autres pertes de charge singulières, à la sortie de la canalisation dans le milieu naturel. Rappelons que cette configuration nécessite que la canalisation de décharge soit totalement remplie : il ne suffit pas que l'orifice de surverse soit immergé, car cette situation peut correspondre au cas 1bis, avec un écoulement à surface libre dans la canalisation de décharge.

1.1.2. Modélisation générique des lois d'orifice

• Configurations étudiées

Selon la configuration de la canalisation de décharge, un ou plusieurs modes de fonctionnement peuvent apparaître en fonction du débit déversé. La modélisation 3D a été utilisée pour une large gamme de configurations de l'orifice de trop-plein (*tableau I*).

Pour chaque cas étudié, la position de la surface libre est identifiée grâce à la simulation numérique 3D de l'écoulement (*figure 5*). Les résultats ont ensuite été synthétisés au moyen de formules simples, paramétrées par le diamètre de la canalisation de surverse, et fournissant des lois d'orifice adaptées au contexte particulier des surverses de stations de pompage.

• Loi pour un orifice dénoyé

Dans les cas 1 et 1bis, l'orifice est dénoyé. La connaissance du diamètre de l'orifice et de la hauteur d'eau dans la bêche suffit pour calculer le débit. La relation hauteur-débit est donnée par la formule suivante :

$$Q_{\text{dénoyé}} = \sqrt{gD^5} \times 0,716 \times 0,5^{(h_{\text{amont}}/D)} \times (h_{\text{amont}}/D)^{2,17} \quad [\text{équation 1}]$$

avec $Q_{\text{dénoyé}}$ le débit au travers de l'orifice (m^3/s), D le diamètre intérieur de la conduite (m), h_{amont} la hauteur

Dénoyé	Diamètre D de l'orifice (mm)	200	250	300	400	500	600	
	Plage de débits (L/s)	1-40	1-100	1-100	1-220	23-243	10-605	
	Nombre de simulations	5	7	7	8	4	5	
Noyé	Diamètre D de l'orifice (mm)	300				500		
	Débits (L/s)	5	10	25	50	23	60	84
	Plage d'engouffrement ($h_{\text{aval}}/h_{\text{amont}}$)	41 % - 97 %				58 % - 99 %		
	Nombre de simulations	3	4	3	2	4	4	3

Tableau I. Caractéristiques géométriques et hydrauliques des configurations étudiées

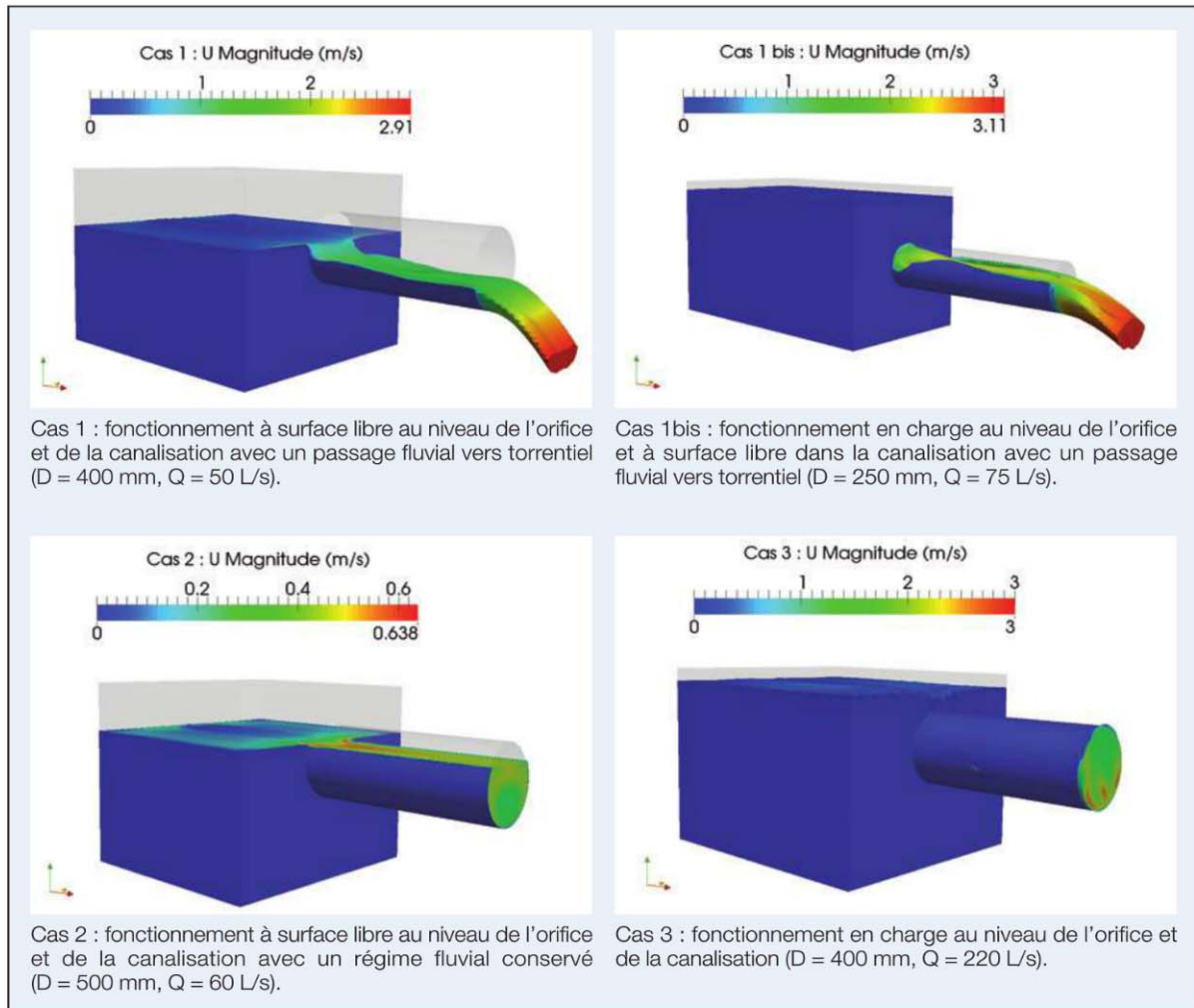


Figure 5. Position de la surface libre pour les différents cas étudiés (résultats de la modélisation 3D)

d'eau dans la bache (m) avec pour référence le radier de l'entrée de la canalisation de décharge (figure 4).

Cette relation est valable tant que la hauteur critique dans la veine contractée est inférieure au diamètre de la canalisation, soit : $Q_{\text{dénové}} \leq Q_{\text{dénové,max}}$. Or il a été montré que le débit maximal pour un écoulement dénové est $Q_{\text{dénové,max}} = \sqrt{g \times (0,864 \times D)^5}$.

La hauteur d'eau maximale à l'amont de l'orifice associée à ce débit maximal est donc $h_{\text{amont,dénové,max}} = 1,69 \cdot D$: l'écoulement dans la canalisation de décharge reste à surface libre, même si l'orifice est immergé sous une hauteur d'eau voisine de 0,7 fois son diamètre (au-dessus de la génératrice supérieure, soit 1,7 fois le diamètre par rapport au radier). Une deuxième condition doit être vérifiée afin de garantir un fonctionnement dénové à l'aval de l'orifice : il est nécessaire de s'assurer

que $h_{\text{aval}} \leq 0,73 \cdot h_{\text{amont}}$ où h_{aval} est la hauteur d'eau à l'aval immédiat de l'orifice par rapport au plan de référence (figure 4).

• Loi pour un orifice noyé

Dans le cas 2, l'écoulement reste à surface libre dans la canalisation de décharge, mais l'orifice fonctionne en mode noyé. La connaissance du diamètre de l'orifice et des hauteurs d'eau dans la bache et à l'aval de l'orifice permet de calculer le débit. La relation hauteurs-débit est donnée par la formule suivante :

$$Q_{\text{noyé}} = Q_{\text{dénové}} \times \left(1 - \left(\frac{h_{\text{aval}}}{h_{\text{amont}}} \right)^{15} \right) \quad [\text{équation 2}]$$

Avec $Q_{\text{dénové}}$ le débit au travers de l'orifice en régime dénové (m^3/s), h_{amont} la hauteur d'eau dans la bache (m) avec pour référence le radier de l'entrée de la canalisation de décharge, h_{aval} la hauteur d'eau à l'aval de

l'orifice (m) avec pour référence le radier de l'entrée de la canalisation de décharge (figure 4).

Afin de garantir un fonctionnement en noyé, il est nécessaire de vérifier : $h_{aval} \geq 0,73 \cdot h_{amont}$ et $h_{amont}/D < 1,69$.

Remarque : la hauteur h_{aval} intervenant ici est la hauteur à l'aval immédiat de la section contractée, soit 1 ou 2 m à l'aval de la sortie de la bache. Dans la mesure où cette hauteur n'est généralement pas mesurable sur site (pas de regard d'accès), il est nécessaire de faire le lien entre cette hauteur et la hauteur d'eau à un endroit facilement mesurable, par exemple la hauteur d'eau dans le milieu récepteur (voir la partie 2).

• Loi pour un orifice en charge

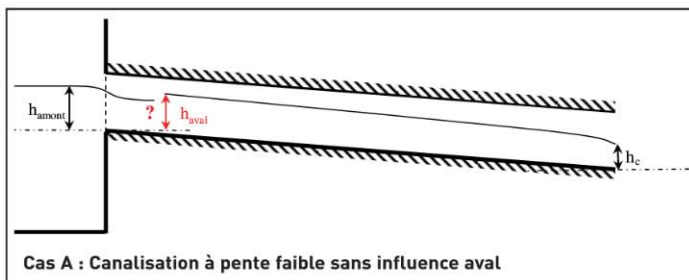
Dans le cas 3, la hauteur d'eau h_{amont} qui s'établit pour un débit donné doit compenser les pertes de charges entre la bache et la sortie de la canalisation de décharge. Dans la plupart des cas, ces pertes de charge se résument

à une perte de charge singulière au niveau de l'ajutage de sortie de la bache. Classiquement, la perte de charge singulière est évaluée (avec V pour la vitesse moyenne dans la section en m/s) à $0,5 \cdot V^2/(2 \cdot g)$ pour un raccordement de la canalisation de décharge sur la bache du type « ajutage sortant » ou « trou dans le mur » [IDELCIK et MEURY, 1986].

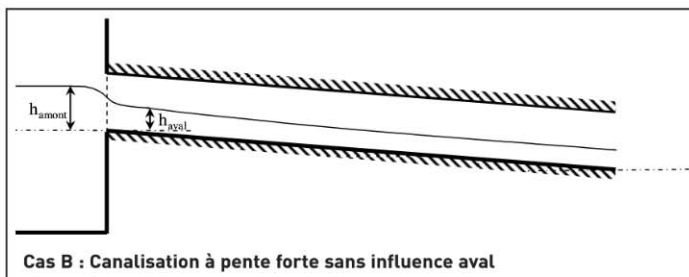
1.2. Modes de fonctionnement pour la canalisation de décharge

Pour établir une relation entre débits et hauteurs d'eau, il est nécessaire de combiner les lois d'orifice présentées ci-dessus avec un calcul classique de ligne d'eau dans la canalisation de décharge. On peut distinguer plusieurs modes de fonctionnement pour la conduite de trop-plein selon que celle-ci soit à pente faible ou à pente forte et en fonction d'une éventuelle influence aval du milieu récepteur. Les différents cas possibles sont présentés sur la figure 6. Sur cette figure, h_{EX} est la hauteur dans la section aval de la canalisation.

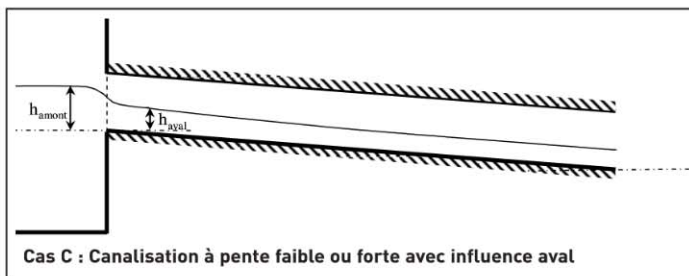
Remarque : une pente faible (respectivement forte) correspond à une hauteur normale supérieure (respectivement inférieure) à la hauteur critique [CARLIER, 1972]. En résumé, pour les cas A et C, le calcul de la ligne d'eau dans la canalisation de décharge est nécessaire afin de déterminer s'il y a influence de la canalisation ou du milieu naturel sur le débit évacué. La hauteur à l'aval immédiat de l'orifice h_{aval} est le critère différenciateur. Dans le cas d'une conduite à forte pente sans influence possible du milieu naturel, le débit évacué sera uniquement fonction de la hauteur dans la bache h_{amont} (orifice dénoyé).



Cas A : Canalisation à pente faible sans influence aval



Cas B : Canalisation à pente forte sans influence aval



Cas C : Canalisation à pente faible ou forte avec influence aval

Cas A : dans ce cas, la hauteur h_{aval} est déterminée par le calcul d'une courbe de remous dans la canalisation en considérant un passage par la hauteur critique $h_c(Q)$ au niveau de l'exutoire, c'est-à-dire $h_{EX} = h_c(Q)$. Cas B : il n'y a pas d'influence de la canalisation sur le débit évacué. L'engouffrement fonctionne alors en régime dénoyé. Cas C : la hauteur h_{aval} est déterminée par le calcul d'une courbe de remous dans la canalisation. La hauteur à l'exutoire de la conduite h_{EX} est égale au niveau d'eau dans le milieu naturel h_{MN} .

Figure 6. Modes de fonctionnement pour la canalisation de décharge

2. Couplage des lois d'orifice avec la canalisation de décharge

2.1. Méthode de calcul

L'objectif est de tester pas à pas les différentes combinaisons possibles de débit évacué et de hauteur d'eau dans le milieu pour, d'une part, déterminer le mode de fonctionnement de l'ensemble orifice-canalisation de décharge et, d'autre part, calculer la hauteur d'eau dans la bache nécessaire afin d'évacuer le débit considéré, avec la hauteur d'eau dans le milieu considérée.

On peut ainsi construire une table dont les colonnes correspondent à différentes valeurs de hauteur d'eau

dans le milieu et les lignes à différentes valeurs de débit, permettant de lire la hauteur d'eau dans la bache pour une configuration donnée. En pratique, cette table sera inversée en mettant les hauteurs d'eau dans la bache en ligne, pour lire dans la table les valeurs de débit correspondant aux différentes combinaisons de hauteurs amont et aval. Cette table sera simplifiée si la hauteur d'eau dans le milieu n'a aucune influence sur le débit déversé pour la gamme de valeurs rencontrées en pratique. Elle sera encore plus simple si l'orifice fonctionne en régime dénoyé pour toutes les valeurs vraisemblables de hauteur d'eau et de débit : la table sera alors avantageusement remplacée par l'expression analytique de la loi d'orifice.

Les hauteurs d'eau nécessaires à l'établissement d'une table de débits pour un diamètre D donné sont rappelées sur la figure 7. On rappelle que h_{EX} est la hauteur à l'exutoire de la canalisation, potentiellement influencée par la hauteur du milieu naturel h_{MN} .

Le diagramme de la figure 8 schématise la méthode utilisée afin d'évaluer le mode de fonctionnement du système en fonction du débit et des hauteurs d'eau.

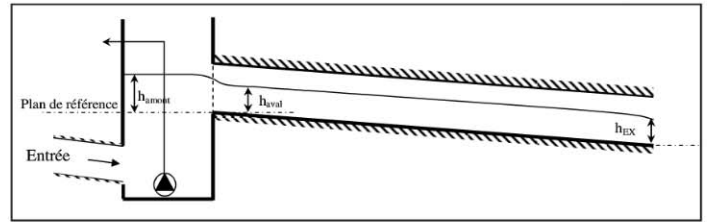
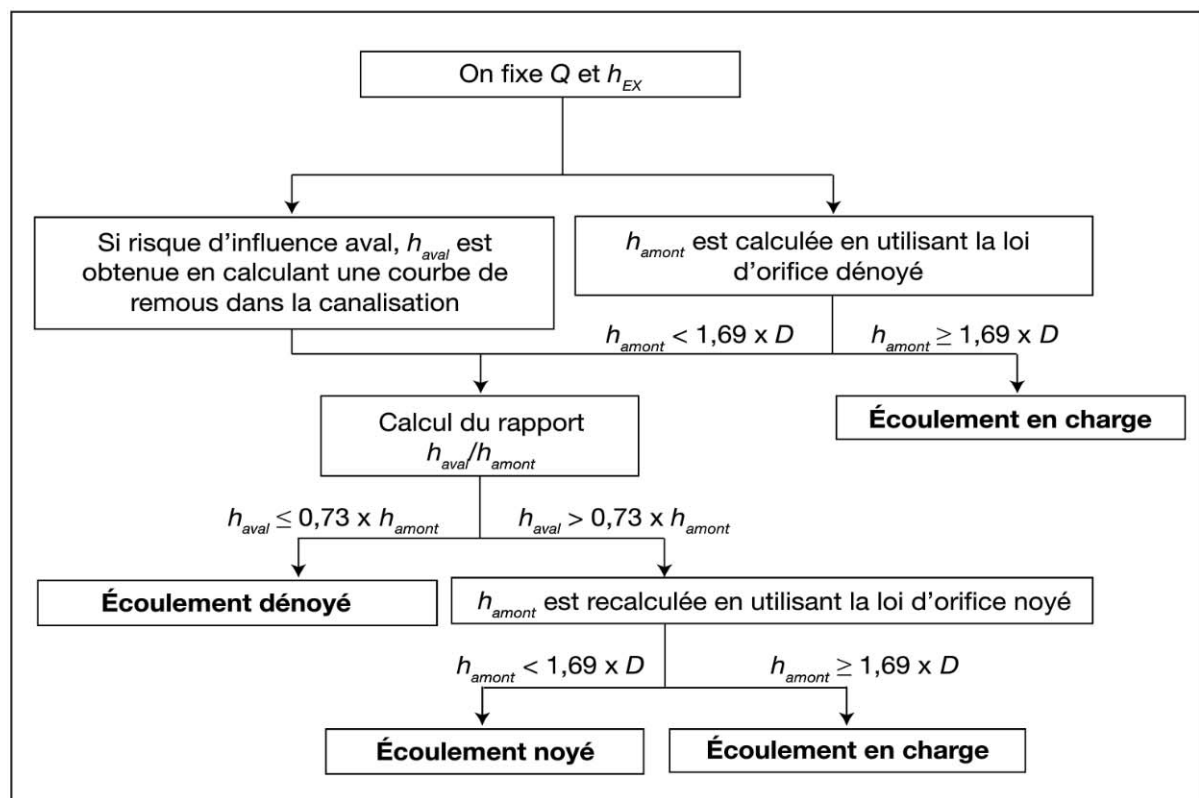


Figure 7. Variables et notations utilisées pour le couplage orifice-canalisation de décharge

2.2. Écoulement dénoyé

Dans le cas d'un écoulement dénoyé, la canalisation n'a aucune influence sur le débit évacué. La connaissance du niveau d'eau dans le poste de pompage h_{amont} suffit pour déterminer le débit à partir de l'équation 1. Dans ce cas, la mise en place d'un capteur de niveau d'eau dans la bache est donc nécessaire.

Les différentes sources d'incertitude sur le débit sont : d'une part, l'incertitude liée au modèle (modélisation 3D et choix de la régression hauteur/débit) et, d'autre part, l'incertitude liée à la mesure de la hauteur d'eau. L'incertitude liée au modèle est évaluée à environ 5 % (qualité du modèle, incertitude numérique liée au maillage, qualité de la relation $h - Q$ choisie). Quant à



h_{amont} : hauteur d'eau dans la bache au-dessus du radier ; h_{aval} : hauteur à l'aval immédiat de l'orifice ; h_{EX} : hauteur à l'exutoire de la canalisation.

Figure 8. Méthode utilisée pour l'établissement d'une table $h_{amont} = f(\text{débit}, h_{EX})$ pour un diamètre de canalisation donné

l'incertitude liée à la mesure de la hauteur d'eau, elle provient de l'incertitude sur le niveau d'eau qui a été évaluée selon les recommandations de l'ISO 6416 [2004].

2.3. Écoulement en charge

Lorsque l'écoulement est en charge, la relation entre le débit et les hauteurs d'eau dans la bache et à l'exutoire est donnée par une formule de type Bernoulli. Deux cas de figure sur la condition aval peuvent être rencontrés pour un écoulement en charge :

Si $h_{MN} > D + Q^2/(2 \cdot g \cdot S^2)$ (dans laquelle S est la section de la canalisation), c'est-à-dire lorsque le niveau du milieu naturel est haut, alors le débit peut être calculé de la façon suivante :

$$Q_{charge} = \left(\frac{h_{amont} + i \cdot L - h_{MN}}{\frac{K_{orifice}}{2 \cdot g \cdot S^2} + \frac{L}{K_s^2 \cdot S^2 \cdot R_h^{\frac{4}{3}}} + \frac{K_{sortie}}{2 \cdot g \cdot S^2}} \right)^{0,5}$$

Sinon, c'est-à-dire lors d'une sortie à gueule bée, le débit peut être calculé comme suit :

$$Q_{charge} = \left(\frac{h_{amont} + i \cdot L - \frac{D}{2}}{\frac{1}{2 \cdot g \cdot S^2} + \frac{K_{orifice}}{2 \cdot g \cdot S^2} + \frac{L}{K_s^2 \cdot S^2 \cdot R_h^{\frac{4}{3}}}} \right)^{0,5}$$

La sortie se faisant à gueule bée, l'écoulement dispose en effet encore d'une énergie cinétique après sa sortie. Par ailleurs, une sortie à gueule bée ne provoque pas de perte de charge singulière (pas de coefficient de perte de charge singulière en sortie K_{sortie} dans la seconde formule). Les variables utilisées dans les deux équations ci-dessus sont (en unités SI) : S la section de la canalisation de diamètre D , R_h le rayon hydraulique $= D/4$, $K_{orifice}$ et K_{sortie} les coefficients de perte de charge à l'engouffrement ($\approx 0,5$) et à la sortie dans le milieu naturel ($\approx 1,0$), K_s la rugosité de Strickler ($\approx 70 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$), i et L la pente et la longueur de la canalisation.

Dans les deux cas, on dispose d'une formule analytique exprimant le débit Q en fonction de h_{amont} ou de h_{MN} et h_{MN} . Pour une sortie à gueule bée, l'incertitude globale sur le débit est évaluée à environ 20 %. Pour un écoulement en charge avec un milieu naturel haut, l'incertitude est également de l'ordre de 20 % à partir du moment où la différence de niveau entre le poste et le milieu naturel ($h_{amont} + i \cdot L - h_{MN}$) est supérieure à 10 cm.

En dessous de 2 cm de différence de niveau, l'incertitude devient très importante ($> 50 \%$).

2.4. Écoulement noyé

Dans le cas d'un écoulement noyé, il faut coupler une loi d'orifice en régime noyé et l'écoulement dans la canalisation de décharge par l'intermédiaire de la hauteur d'eau h_{aval} . Pour ce faire, on peut déterminer pour chaque valeur de débit Q la hauteur à l'aval de l'orifice $h_{aval}(Q)$ en s'appuyant sur le calcul d'une courbe de remous dans la canalisation de décharge. La hauteur d'eau à l'exutoire de la canalisation de décharge $h_{EX}(Q)$ est prise égale : à la hauteur critique pour le débit considéré, si elle est inférieure à la hauteur normale $h_n(Q)$ et à la hauteur du milieu naturel h_{MN} ; à la hauteur normale pour le débit considéré si elle est inférieure à la hauteur critique $h_c(Q)$ et à la hauteur du milieu naturel h_{MN} ; à la hauteur du milieu naturel h_{MN} si elle est supérieure à $\min(h_n(Q), h_c(Q))$.

Ceci permettra de déterminer la loi d'orifice appropriée et de l'appliquer pour remonter à la hauteur d'eau dans la bache h_{amont} . En procédant par itération sur la gamme de débit 0 à $Q_{dénoyé,max}$ et sur la gamme de hauteur du milieu naturel de 0 à $h_{MN,max}$ connue, il est alors possible d'établir une table $Q = f(h_{amont}, h_{EX})$. La limite noyé/dénoyé est mise en évidence en comparant chaque hauteur h_{aval} avec $0,73 \cdot h_{amont}$ pour une hauteur de milieu naturel donnée, puis la gamme de débits est parcourue pour construire la table.

Si pour la gamme de débits choisie et la hauteur maximum du milieu naturel considérée, on obtient toujours un mode de fonctionnement dénoyé, un seul capteur dans la bache suffira pour évaluer le débit à partir de la loi d'orifice la plus simple (équation 1). Dans le cas contraire, l'écoulement sera potentiellement noyé. S'il est noyé du fait d'un débit important transitant dans la canalisation, mais avec un milieu naturel bas (sans influence), alors un seul capteur sera encore suffisant, mais la construction de la table $Q = f(h_{amont})$ combinera la loi d'orifice noyé (équation 2) et un calcul de ligne d'eau dans la canalisation de décharge (avec hauteur critique à l'aval). En revanche, si l'écoulement est noyé du fait d'un milieu naturel haut, il faudra ajouter un capteur pour mesurer le niveau d'eau dans le milieu naturel [ISEL *et al.*, 2014] qui fournira l'entrée h_{EX} dans

la table $Q = f(h_{\text{amont}}, h_{\text{EX}})$, basée là encore sur une loi d'orifice noyé et un calcul de ligne d'eau (avec influence aval).

Dans le cas d'un écoulement noyé, l'incertitude liée au modèle (modélisation 3D et régression hauteur/débit) est évaluée à environ 6 % tant que $h_{\text{aval}}/h_{\text{amont}}$ est inférieure à 0,97. Dans la gamme 0,97 à 1, l'incertitude peut atteindre 40 %. Néanmoins, dans cette gamme de hauteurs, la faible différence de hauteur entre l'amont et l'aval rend de toute façon l'incertitude de mesure très élevée. Par conséquent, cette méthode utilisant la mesure de niveau d'eau n'est pas appropriée lorsque h_{amont} et h_{aval} sont très proches.

3. Exemples

Les exemples suivants ont pour objectifs de montrer l'utilisation et l'applicabilité des méthodes proposées. Le logiciel HSL (librement téléchargeable sur le site hydraulique-des-reseaux.engees.eu) a été utilisé pour les calculs hydrauliques relatifs à la canalisation de décharge.

3.1. Canalisation de trop-plein à pente forte sans influence de la canalisation de décharge sur le débit évacué par l'orifice

Ce cas d'application correspond aux caractéristiques géométriques suivantes : $D = 400 \text{ mm}$; $i = 2 \%$; $K_S = 70 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$; $L = 25 \text{ m}$. La première étape consiste à déterminer le domaine d'application de la loi d'orifice en dénoyé en évaluant le débit maximal et la hauteur maximale dans la bache avant la mise en charge de l'orifice : $h_{\text{amont,max}} = 1,69 \cdot D$ et $Q_{\text{dénoyé,max}} = (9,81 \cdot (0,864 \cdot D)^5)^{0,5}$.

Le débit maximal en condition dénoyée est de 220 L/s et correspond à une hauteur dans la bache de 0,67 m par rapport au radier de la canalisation de décharge. De plus, la canalisation est à pente forte pour la plage de débit 0 à 287 L/s, c'est-à-dire que l'écoulement est torrentiel au régime permanent uniforme. La limite de 220 L/s est inférieure au débit maximal en régime torrentiel de la canalisation de décharge et la valeur 0,67 m est bien supérieure à la hauteur critique (et même au diamètre de la canalisation de décharge) quel que soit le débit pour un écoulement dénoyé. Il n'y aura donc pas

d'influence de celle-ci sur le débit évacué par l'orifice, à condition que le niveau du milieu naturel reste suffisamment bas.

Tant que $h_{\text{amont}} < 0,67 \text{ m}$ la loi utilisée est celle d'un orifice dénoyé (équation 1). En charge, la relation est donnée par :

$$Q_{\text{charge}} = \left(\frac{h_{\text{amont}} + i \cdot L - \frac{D}{2}}{\frac{1}{2 \cdot g \cdot S^2} + \frac{K_{\text{orifice}}}{2 \cdot g \cdot S^2} + \frac{L}{K_S^2 \cdot S^2 \cdot R_h^{\frac{4}{3}}}} \right)^{0,5} \quad [\text{équation 3}]$$

La figure 9 représente l'évolution du débit évacué par la conduite de trop-plein en fonction de la hauteur d'eau dans la bache pour un écoulement dénoyé et un écoulement en charge. Il existe une discontinuité dans les lois utilisées à proximité de la mise en charge ; cette zone constitue une phase transitoire pendant laquelle l'évaluation du débit surversé perdra en précision.

La relation de la figure 9 n'est applicable que si le niveau amont de la canalisation de décharge n'est pas soumis à une influence aval imposée par le niveau du milieu naturel. Nous allons donc déterminer le niveau d'eau dans le milieu naturel nécessaire pour atteindre la valeur limite $h_{\text{aval}} = 0,73 \cdot h_{\text{amont}}$. Le tableau II a été construit en faisant varier le niveau d'eau dans la bache h_{amont} entre 0 et 0,56 m, pour chaque débit en

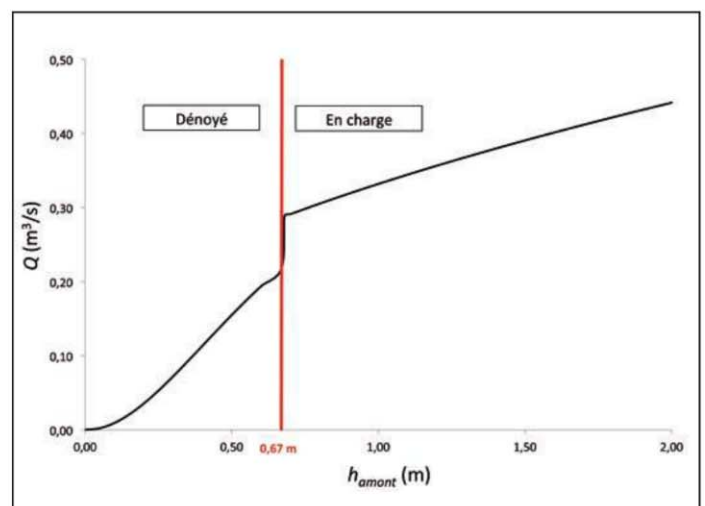


Figure 9. Débit surversé en fonction de h_{amont}

$h_{\text{amont}} \text{ (m)}$	$Q_{\text{dénoyé}} \text{ (L/s)}$	$h_{\text{aval, max}} \text{ (m)}$	$h_{\text{MN}} \text{ (m)}$
0,08	6	0,06	0,57
0,16	23	0,12	0,63
0,24	49	0,17	0,69
0,32	80	0,23	0,72
0,40	113	0,29	0,74
0,48	147	0,35	0,71
0,56	179	> 0,40	0,68

$h_{\text{aval, max}}$: valeur limite à l'aval de l'orifice en fonction de la hauteur à l'amont.

Tableau II. Domaine de validité de la relation de la figure 9

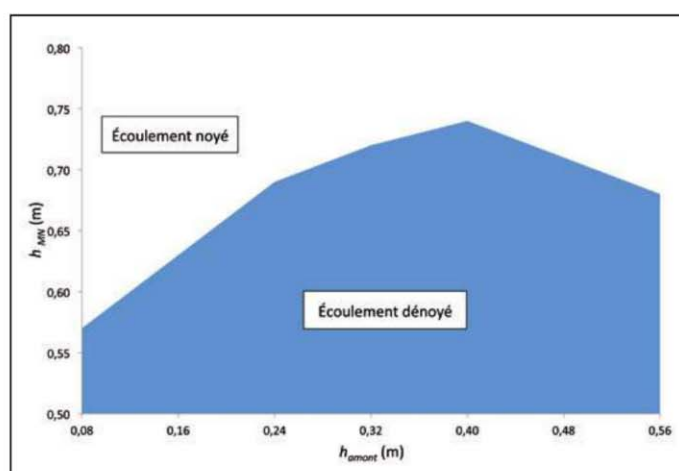


Figure 10. Limite entre les écoulements noyé et dénoyé

dénoyé. Le niveau d'eau dans le milieu naturel h_{MN} a été déterminé en réalisant un calcul de la courbe de remous dans la canalisation de décharge en fixant $h_{\text{aval}} = 0,73 \cdot h_{\text{amont}}$. Au final, afin de s'assurer que l'écoulement reste dénoyé, le niveau d'eau dans le milieu naturel doit être inférieur aux limites calculées dans le *tableau II*. La limite entre un écoulement noyé/dénoyé est également représentée graphiquement sur la *figure 10*.

3.2. Canalisation de trop-plein à pente faible avec influence de la canalisation de décharge sur le débit évacué par l'orifice

Ce cas d'application correspond aux caractéristiques géométriques suivantes : $D = 300 \text{ mm}$; $i = 0,15 \%$; $K_S = 70 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$; $L = 15 \text{ m}$. La canalisation est à pente faible pour la plage de débit entre 0 et 39 L/s ; c'est-à-dire que l'écoulement est fluvial au régime permanent uniforme.

Le domaine d'application de la loi avant mise en charge par le débit est déterminé en évaluant la hauteur et le débit maximal à partir des relations suivantes : $h_{\text{amont, max}} = 1,69 \cdot D$ et $Q_{\text{dénoyé, max}} = (9,81 \cdot (0,864 \cdot D)^5)^{0,5}$.

Le débit maximal avant la mise en charge est de 107 L/s pour une hauteur d'eau h_{amont} égale à 0,51 m. Le canal étant à pente faible, il est nécessaire de vérifier pour chaque débit que la hauteur h_{aval} soit inférieure à $0,73 \cdot h_{\text{amont}}$. Le *tableau III* a été construit en faisant varier le niveau d'eau dans la bêche h_{amont} entre 0 et 0,51 m, avec pour chaque hauteur le débit correspondant pour un écoulement dénoyé. La hauteur h_{aval} a été déterminée en réalisant un calcul de la courbe de remous dans la canalisation de décharge. La condition limite à l'aval de la canalisation a été choisie à gueule bée, c'est-à-dire un passage de la ligne d'eau par la hauteur critique. Cette condition correspond à un milieu naturel n'influençant pas la conduite de décharge.

Le *tableau III* montre que la relation $h_{\text{aval}} > 0,73 \cdot h_{\text{amont}}$ est vérifiée quel que soit le débit : l'orifice est donc toujours noyé. La loi de déversement à utiliser est alors l'équation 2. Le *tableau III* met également en évidence une autre limite pour la mise en charge de la conduite à partir du débit 55 L/s du fait de l'influence de la canalisation. Les débits corrigés en tenant compte de la

$h_{\text{amont}} \text{ (m)}$	$Q_{\text{dénoyé}} \text{ (m}^3/\text{s)}$	$h_{\text{aval}} \text{ (m)}$	$0,73 \cdot h_{\text{amont}} \text{ (m)}$
0,00	0,000	0,00	0,00
0,05	0,002	0,05	0,04
0,10	0,008	0,09	0,07
0,20	0,029	0,18	0,15
0,30	0,055	0,27	0,22
0,35	0,069	> 0,30	0,25
0,40	0,082	> 0,30	0,29
0,51	0,107	> 0,30	0,37

Tableau III. Vérification des conditions d'ennoiement de l'orifice en fonction de la hauteur d'eau h_{amont}

$h_{\text{amont}} \text{ (m)}$	$Q_{\text{dénoyé}} \text{ (m}^3/\text{s)}$	$h_{\text{aval}} \text{ (m)}$	$Q_{\text{noyé}} \text{ (m}^3/\text{s)}$
0,055	0,003	0,05	0,002
0,108	0,009	0,09	0,008
0,213	0,032	0,18	0,029
0,321	0,061	0,27	0,055

Tableau IV. Correction à apporter au débit calculé en dénoyé pour tenir compte de la hauteur d'eau à l'aval de l'orifice

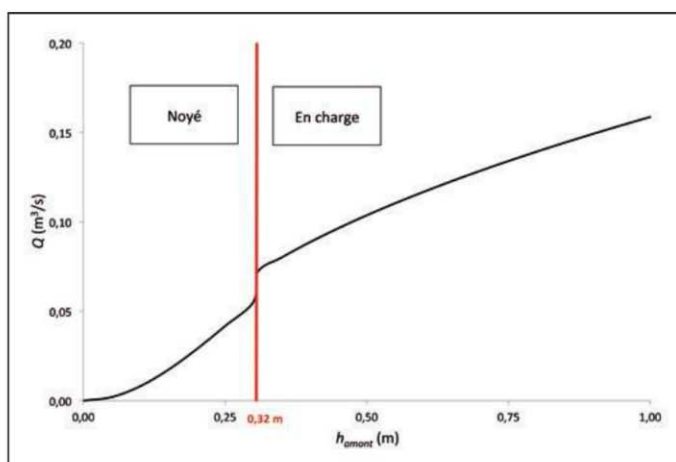


Figure 11. Débit surversé en fonction de hamont

hauteur d'eau à l'aval de l'orifice sont présentés dans le tableau IV.

En charge, la relation hauteur/débit est donnée par l'équation 3. Finalement, l'évolution du débit en fonction de la hauteur d'eau dans la bache h_{amont} est représentée sur la figure 11.

Conclusion

La surveillance des rejets de station de pompage est une nécessité technique et s'inscrit dans la même logique

Bibliographie

- BOS M.G. (1985) : *Long-throated flumes and broad-crested weirs*. Nijhoff, Dordrecht, The Netherlands.
- BOS M.G. (1989) : *Discharge measurement structures*. Wageningen, The Netherlands. ILRI.
- CARLIER M. (1972) : *Hydraulique générale et appliquée*. Paris, Eyrolles.
- GEANKOPLIS C.J. (1983) : *Transport processes and unit operations*. Prentice-Hall, Englewood Cliffs.
- IDEL'CIK I.E., MEURY M. (1986) : *Mémento des pertes de charge : Coefficients de pertes de charge singulières et de pertes de charge par frottement*. Paris : Eyrolles.

que l'autosurveillance des déversoirs d'orage. Elle peut être mise en œuvre sans faire de gros investissements, ni mobiliser des moyens importants en matière de maintenance : un ou deux capteurs de hauteur d'eau suffisent. Cependant, les informations fournies par ces capteurs nécessitent un traitement spécifique afin d'obtenir des débits. Ce traitement n'est pas trivial, car il impose souvent un couplage entre une loi d'orifice et un calcul de ligne d'eau dans la canalisation de décharge. Une cinquantaine de simulations numériques ont été réalisées pour des diamètres d'orifice entre 200 et 600 mm. Elles ont abouti à l'ajustement de formulations génériques de lois d'orifice aussi bien pour un fonctionnement en régime noyé que pour un fonctionnement en régime dénoyé. Une méthodologie détaillée a également été établie pour permettre le couplage avec l'écoulement dans la canalisation de décharge et ainsi aboutir à la construction de tables reliant hauteur(s) d'eau et débit. Les incertitudes associées à ces relations sont d'environ 5 % pour un écoulement dénoyé et 10 % pour un écoulement noyé. Ces valeurs ne prennent pas en compte l'incertitude de mesure liée au capteur. Les tables hauteur(s)/débit peuvent être implémentées dans des transmetteurs ou interpolées pour du posttraitement. Pour des configurations plus complexes, une modélisation numérique spécifique aux sites concernés sera nécessaire.

Remerciements

Ce travail a été réalisé dans le cadre du projet COACHS (appel à projets C2D2 2009, convention de subvention n° 10MGC S 004 notifiée le 1^{er} avril 2010). Nous tenons donc à remercier le ministère de l'Écologie et du Développement durable pour le financement de ce projet

- ISEL S., ARAUD Q., VAZQUEZ J., DUFRESNE M. (2014) : Développement d'outils et de méthodologies pour déterminer le débit par mesure de hauteurs d'eau en collecteur de réseau d'assainissement. *Techniques, Sciences, Méthodes* ; 1/2 : 71-79.
- ISENMANN G., BELLAHCEN S., VAZQUEZ J., DUFRESNE M., JOANNIS C., MOSE R. (2016) : Stage-discharge relationship for a pipe overflow structure in both free and submerged flow. En cours de soumission.
- ISO (2004) : *Mesure du débit à l'aide de la méthode ultrasonique (acoustique)*. AFNOR, NF EN ISO 6416:2004.
- STREETER V.L. (1966). *Fluid mechanics*. McGraw-Hill, New York.

Résumé

G. ISENMANN, S. BELLAHCEN, J. VAZQUEZ, M. DUFRESNE, C. JOANNIS, R. MOSE

Évaluation du débit déversé par le trop-plein d'une station de pompage par la mesure de hauteurs d'eau

Cet article décrit une méthode de calcul permettant d'établir la relation entre la hauteur d'eau au-dessus du radier d'une conduite de trop-plein de station de pompage et le débit déversé. La modélisation numérique 3D a été utilisée afin d'étudier l'ensemble des modes de fonctionnement du système pour une gamme de diamètres d'orifice allant de 200 à 600 mm. Des lois génériques sont ainsi proposées pour chacun des fonctionnements possibles de l'orifice (noyé, dénoyé, en charge). Une méthodologie

détaillée est également exposée pour permettre le couplage de ces lois avec l'écoulement dans la canalisation de décharge et, en particulier, la prise en compte du niveau d'eau dans le milieu naturel lorsque la hauteur d'eau dans la bache ne suffit pas à elle seule à évaluer le débit. Pour finir, la méthodologie est appliquée sur deux exemples de stations de pompage. Les tables hauteur(s)/débit construites peuvent ensuite être implémentées dans des transmetteurs ou interpolées pour du posttraitement.

Abstract

G. ISENMANN, S. BELLAHCEN, J. VAZQUEZ, M. DUFRESNE, C. JOANNIS, R. MOSE

Evaluation of the discharge in an overflow pipe of a pumping station from the measurement of water depths

This article deals with a methodology to establish a relationship between the water level in the recovery tank of a pumping station and the discharge through the overflow pipe. Computational Fluid Dynamics (CFD) was used to take into account all operating conditions of the system for a range of diameter from 200 to 600 mm. Relationships linking the water level and the discharge through the orifice are adjusted for free flow, submerged flow and pressurized flow. A detailed methodology

is also proposed to couple the orifice laws with the flow in the overflow pipe, particularly to take into account the water level in the receiving water when the water level upstream to the orifice is not enough to evaluate the flowrate. Then, the methodology is applied to two examples of pumping stations. Finally, the water level(s)/discharge relationships can be implemented in a sensor transmitter or interpolate for post-processing.

