

CHAPITRE 6

ARTICLE 4 : « SUIVI ET VALIDATION DES MESURES POUR UN DÉVERSOIR D'ORAGE LATÉRAL À SEUIL COURT »

6.1 Introduction

Les impacts dus aux déversements d'eaux usées dans le milieu naturel (Chocat, 1997), (Water Pollution Control Federation, 1989) poussent les municipalités à assurer un meilleur suivi du fonctionnement de leurs déversoirs d'orage. Le suivi du fonctionnement d'un déversoir latéral se fait généralement selon les deux approches suivantes :

- L'approche tout instrumentation consiste à suivre le fonctionnement du déversoir uniquement par l'utilisation de capteurs. Elle nécessite un grand nombre de capteurs pour d'une part mesurer la répartition des flux et d'autre part assurer la validation des données mesurées (Lipeme Kouyi *et al.*, 2005). En effet, la redondance d'information nécessaire à la validation des mesures est obtenue par le dédoublement du nombre des capteurs de mesure. Les coûts élevés d'installation et de maintenance des capteurs (Bertrand-Krajewski *et al.*, 2000) représentent le principal handicap de cette approche gourmande en instruments de mesure.

- L'approche fondamentale se base uniquement sur les équations de l'hydraulique. Les débits déversés sont obtenus en couplant un modèle de simulation des déversoirs latéraux au modèle hydraulique de simulation des réseaux d'assainissement. De nombreux auteurs ont élaboré des modèles de simulation des déversoirs latéraux. De Marchi (1934) a appréhendé le fonctionnement des déversoirs latéraux de manière mécaniste. Les travaux de De Marchi ont été repris plus tard par Smith (1973) dont le

modèle repose sur l'hypothèse de la conservation de l'énergie le long du seuil. Les expériences de El-Khashab et Smith (1976) ont montré que l'énergie n'est pas constante mais plutôt décroissante le long du seuil. Ce constat a permis de reformuler le modèle de Smith en prenant en considération une vitesse longitudinale du flot déversé différente de la vitesse moyenne de l'écoulement dans la conduite. Carleton (1985) a complété les travaux de El-Khashab en tenant compte de la présence éventuelle d'un ressaut hydraulique le long du seuil. Les travaux de Hager (1987) ont conduit à l'élaboration d'une loi générale de déversement qui décrit le fonctionnement de la majorité des déversoirs latéraux rencontrés. Buyer (2002) a montré que l'utilisation des équations complètes de Saint-Venant permet d'appréhender la plupart des phénomènes hydrauliques rencontrés sur le déversoir latéral. Ces différents modèles de déversement donnent d'excellents résultats lorsqu'ils sont testés en laboratoire où tous les paramètres et toutes les variables d'états sont parfaitement contrôlés. Cependant, un nombre limité d'études ont été réalisées pour vérifier l'applicabilité de ces modèles pour le suivi du fonctionnement des déversoirs d'orage latéraux en réseau d'assainissement (Zug *et al.*, 2001). Par exemple, Carleton (1985) a montré sur un déversoir de la ville de Lyon en France que le modèle mécaniste de EL-KHASHAB est très sensible aux incertitudes sur la pente de la conduite et sur la hauteur du seuil. En effet, une erreur d'environ 10% sur la valeur de la hauteur du seuil peut conduire à une erreur de 50% sur l'estimation des débits déversés. De plus, ces paramètres sont susceptibles d'évoluer dans le temps en raison de l'encrassement des collecteurs et de la présence de débris au niveau du déversoir. Par conséquent, l'utilisation exclusive de l'approche fondamentale n'apparaît pas judicieuse pour suivre le fonctionnement des déversoirs d'orage. En revanche cette approche est économiquement très intéressante.

L'approche combinée est un compromis entre l'approche tout instrumentation et l'approche fondamentale. Elle consiste à employer un système de mesure en association avec un modèle hydraulique de déversement afin d'établir la redondance d'information nécessaire à la validation des débits déversés. Elle est généralement employée lors de

l'instrumentation du déversoir afin d'optimiser l'emplacement des capteurs (Ruban *et al.*, 2004).

Dans cet article on propose d'utiliser l'approche combinée pour suivre le fonctionnement hydraulique des déversoirs latéraux à seuil court et assurer la validation en continu des débits déversés. Dans un premier temps, l'instrumentation et le banc d'essai utilisé pour la validation de notre approche combinée est présentée. Dans un second temps, la loi de déversement utilisée et la procédure de validation développée sont introduites. La troisième étape a consisté à valider la loi de déversement avec le banc d'essai. La dernière partie nous a permis de tester et valider la procédure de validation des mesures.

6.2 Montage expérimental

6.2.1 Description du banc d'essai

Le banc d'essai utilisé pour la mise en œuvre et la validation de la méthodologie de suivi des déversoirs latéraux est présenté sur la Figure 23.

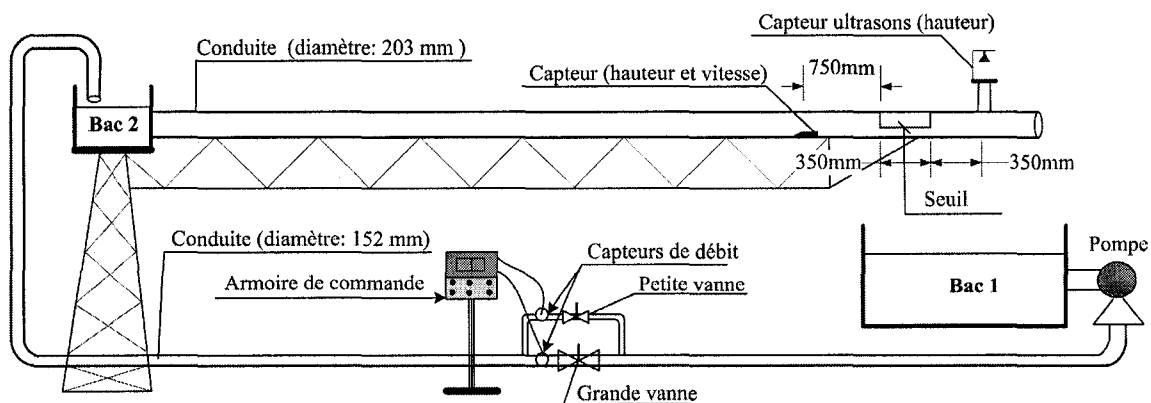


Figure 23 Banc d'essai

Le banc d'essai pour l'expérimentation du déversoir latéral est constitué des éléments suivants :

- 1) une conduite circulaire en plexiglas de longueur 13,3 m et de diamètre 203 mm. La pente de cette conduite peut être modifiée et réglée à l'aide d'un vérin hydraulique.
- 2) un déversoir latéral de longueur 35 cm et de hauteur minimale 50 mm.
- 3) une pompe permettant d'assurer un débit pouvant aller jusqu'à 40 l/s.
- 4) deux vannes papillon qui permettent de réguler le débit. Une des vannes est installée sur un tuyau d'alimentation de diamètre 51 mm et permet un réglage fin du débit. L'autre vanne est située sur un tuyau de diamètre 203 mm et permet d'atteindre les grands débits.
- 5) un bac de réception d'une capacité de 1,7 m³, muni d'une chambre permettant de recueillir les eaux déversées.
- 6) un bac de stabilisation de l'écoulement, constitué de deux compartiments séparés par une paroi perforée qui sert à stabiliser l'écoulement avant son entrée dans la conduite. Le bac de stabilisation est alimenté par une conduite de 203 mm.

Le seuil a une longueur fixe de 350 mm et une hauteur de 50 mm. La crête du seuil présente un angle d'ouverture important. Néanmoins, son fonctionnement est équivalent à celui d'un seuil à crête mince.

6.2.2 Instrumentation

Le suivi du fonctionnement d'un déversoir latéral nécessite la mise en place d'un dispositif d'instrumentation qui doit tenir compte de la géométrie du déversoir, de son fonctionnement hydraulique et du type d'instruments de mesure envisagés (Ruban *et al.*, 2004).

La géométrie du déversoir utilisé et celle d'un déversoir latéral à seuil court classique. Sur un site réel les configurations géométriques des déversoirs latéraux sont multiples et souvent complexes. Quant au fonctionnement hydraulique des déversoirs latéraux, il peut se ramener à l'un des deux cas suivants :

- le déversoir fonctionne en mode non influencé. Dans ce cas, l'écoulement le long du seuil peut être torrentiel ou fluvial.
- le déversoir fonctionne en mode influencé. L'écoulement le long du seuil est conditionné par la condition limite en aval.

L'approche combinée nécessite l'utilisation d'un dispositif de mesure qui fournit les données nécessaires pour la loi de déversement et pour la mesure du débit déversé. Par conséquent, le dispositif de mesure retenu pour le suivi et la validation des débits déversés est constitué des capteurs suivants :

- un débitmètre à effet Doppler composé d'un capteur pressiométrique qui mesure la hauteur d'eau à l'amont du déversoir et d'un capteur à effet Doppler qui mesure la vitesse moyenne de l'écoulement. Le débitmètre calcule le débit en multipliant la section mouillée par la vitesse d'écoulement. L'incertitude sur la mesure du débit est comprise entre 10 et 15%.
- un capteur ultrasonique mesure la hauteur d'eau à l'aval du déversoir. Il permet de calculer le débit à l'aval du seuil par l'intermédiaire d'une relation hauteur-débit. L'incertitude de mesure à l'aide du capteur ultrasonique a été évaluée à 2 mm. En régime permanent, l'incertitude sur la mesure de la hauteur d'eau se traduit par une incertitude inférieure à 10% sur le débit aval estimé.

Le débitmètre à effet Doppler et le liminimètre ultrasonique utilisés dans le cadre de ce travail sont des capteurs industriels couramment utilisés en réseaux d'assainissement.

Afin de valider la loi de déversement et calibrer les capteurs, l'installation dispose des instruments de mesure complémentaires suivants :

- un débitmètre électromagnétique situé sur la conduite de refoulement de la pompe mesure le débit en amont du seuil. L'incertitude de mesure du débitmètre est inférieure à 1% dans le cas d'une mesure en régime permanent (Bertrand-Krajewski *et al.*, 2000). Dans notre cas, l'incertitude sur la valeur du débit est proche de 5%. Elle est principalement due au fait que la pompe fournit un débit qui varie de 5% autour d'une valeur moyenne.
- un seuil calibré triangulaire mesure le débit à l'aval du déversoir pour les essais en mode influencé. L'incertitude de mesure du débit correspond à l'erreur de lecture sur le seuil calibré, soit une division de mesure (environ 0,2 l/s).

6.3 Méthodologie et développements théoriques

6.3.1 Loi de déversement

Le débit déversé par un déversoir latéral se calcule à l'aide de modèles mécanistes ou empiriques. Les modèles mécanistes disposent d'une grande représentativité qui leur permet de décrire finement l'hydraulique des déversoirs latéraux. Ces modèles comportent de nombreux paramètres qui sont difficiles à évaluer dans les réseaux d'assainissement. Les modèles empiriques pour les seuils latéraux courts ne permettent pas de décrire finement l'hydraulique des déversoirs. Cependant, ils présentent l'avantage de comporter moins de paramètres que les modèles mécanistes tout en étant précis.

On propose donc l'utilisation de la loi de déversement semi empirique de Dominguez (Lencastre, 1999) pour calculer le débit déversé par un déversoir latéral à seuil court. La loi de déversement de Dominguez a pour formulation :

$$Q_d = \phi_1 \phi_2 L \sqrt{2g} h^{3/2} \quad (6.1)$$

où ϕ_1 représente le coefficient de forme qui dépend de la géométrie du déversoir latéral; ϕ_2 , le coefficient hydraulique qui dépend du régime d'écoulement dans la conduite; L , la longueur du seuil en (m); h , la hauteur d'eau au dessus du seuil en (m).

La variable h dans l'équation de Dominguez correspond à la hauteur d'eau au dessus du seuil en amont du déversoir dans le cas d'un écoulement torrentiel et à la hauteur d'eau en aval du seuil dans le cas d'un écoulement fluvial.

Le coefficient ϕ_2 s'exprime en fonction du rapport entre la charge à l'amont h_1 et à l'aval h_2 . On propose pour le calcul de ϕ_2 d'utiliser des formules empiriques (Bennis, 2004) déduites à partir des valeurs tabulées de ϕ_2 (Carlier, 1986). Les expressions de ϕ_2 sont les suivantes :

pour $h_1/h_2 \leq 0,5$

$$\phi_2 = 0,4 + 0,5 \frac{h_1}{h_2} \quad (6.2)$$

pour $0,5 < h_1/h_2 \leq 1$

$$\phi_2 = 0,3 + 0,7 \frac{h_1}{h_2} \quad (6.3)$$

pour $1 < h_1/h_2 \leq 2$

$$\phi_2 = 0,3 + 0,7 \frac{h_2}{h_1} \quad (6.4)$$

pour $h_1/h_2 > 2$

$$\phi_2 = 0,4 + 0,5 \frac{h_2}{h_1} \quad (6.5)$$

Le choix de la loi de déversement de Dominguez s'avère particulièrement pertinent pour notre approche combinée en raison de la simplicité de sa formulation et du faible nombre de paramètres à caler. En effet, le coefficient hydraulique ϕ_2 se calcule aisément à partir des mesures de hauteur à l'amont et à l'aval du déversoir. Seul le coefficient de forme ϕ_1 nécessite un calage. La loi de Dominguez, contrairement à la plupart des autres lois, ne fait pas intervenir la géométrie du collecteur au niveau du déversoir.

Dans une perspective plus large, la loi semi empirique de Dominguez est également susceptible d'être employée sur un déversoir à seuil long. En effet, un déversoir à seuil long peut être vu comme une succession de seuils courts où la loi de Dominguez peut s'appliquer moyennant la connaissance des hauteurs d'eaux aux extrémités des sections. Une approche similaire basée sur des lois de déversement totalement empiriques a été utilisée par Lipeme Kouyi *et al.* (2005) à Sélestat en France pour évaluer les débits déversés par cinq déversoirs à seuil long équipés de capteurs de niveau.

6.3.2 Validation des débits déversés

Pour la procédure de validation des débits déversés, on propose d'utiliser l'écart relatif entre la valeur mesurée et simulée du débit déversé qui a pour expression :

$$Er = \frac{Qd^{mesuré} - Qd^{simulé}}{\min [Qd^{mesuré}, Qd^{simulé}]} \quad (6.6)$$

L'écart relatif ne permet pas à lui seul de valider la mesure du débit déversé. Par conséquent, on propose d'utiliser un test statistique pour valider les mesures. La variable aléatoire Er est supposée avoir une distribution normale. Ainsi l'intervalle de confiance à 95% sur l'écart relatif est défini par :

$$\left(\overline{Er} - 1,96 \sigma_{Er} \right) \leq Er \leq \left(\overline{Er} + 1,96 \sigma_{Er} \right) \quad (6.7)$$

où \overline{Er} représente la moyenne des écarts relatifs définie par :

$$\overline{Er} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N Er(i) \quad (6.8)$$

et σ_{Er} est l'écart type des écarts relatifs défini par :

$$\sigma_{Er} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (Er(i) - \overline{Er})^2}{N - 1}} \quad (6.9)$$

L'intervalle de confiance basé sur l'écart relatif des débits déversés par un seuil latéral se construit durant l'étape de calage de la loi de déversement. Cette étape doit idéalement être réalisée à l'aide de données recueillies durant plusieurs événements pluvieux. Il est intéressant de remarquer qu'il est impératif d'utiliser des données validées pour l'élaboration de l'intervalle de confiance qui à son tour sert par la suite à valider les mesures. Le test statistique consiste à rejeter le débit déversé mesuré $Qd^{mesuré}$ si l'écart relatif Er dépasse les limites de l'intervalle de confiance à 95%.

En pratique, deux intervalles de confiance correspondant aux deux principaux types d'erreur de mesure doivent être élaborés. Le premier type d'erreur de mesure correspond aux erreurs accidentelles telles que le passage d'un objet solide au niveau du capteur. L'intervalle de confiance correspondant aux erreurs accidentelles est défini à l'aide des écarts relatifs maximaux relevés pour chaque événements pluvieux ayant servi au calage de la loi de déversement. Le deuxième type d'erreur correspond aux erreurs persistantes liées aux dépôts de sédiments, à la présence d'objets solides à proximité du capteur et à l'accumulation de débris flottants (Amrarenne, 2002) ainsi qu'à la dérive du capteur (Bertrand-Krajewski *et al.*, 2000). L'intervalle de confiance pour les erreurs persistantes est défini à l'aide des écarts relatifs entre les débits déversés mesurés et simulés.

6.3.3 Identification du capteur défaillant et correction des débits déversés erronés

Les débits déversés par les déversoirs d'orage latéraux font rarement l'objet d'une mesure directe. Ils sont généralement obtenus par des mesures de débits faites à l'amont et à l'aval du déversoir qui permettent également de suivre son fonctionnement hydraulique. Or, la mesure du débit dans une conduite d'assainissement est généralement obtenue à l'aide d'une mesure simultanée de la hauteur d'eau et de la vitesse de l'écoulement. Par conséquent, une erreur de mesure sur le débit déversé

provient soit d'une erreur de mesure sur la hauteur soit d'une erreur de mesure sur la vitesse. Il apparaît donc utile de pouvoir identifier le capteur ayant conduit à une mesure erronée du débit déversé afin de pouvoir corriger adéquatement l'erreur de mesure, identifier rapidement la cause de l'erreur et diminuer le cas échéant les temps d'intervention sur le système de mesure.

La procédure d'identification est décrite sur la Figure 24 dans le cas d'un déversoir latéral fonctionnant en mode non influencé et équipé d'un capteur de débit à effet doppler à l'amont et d'un capteur de niveau à ultrasons à l'aval.

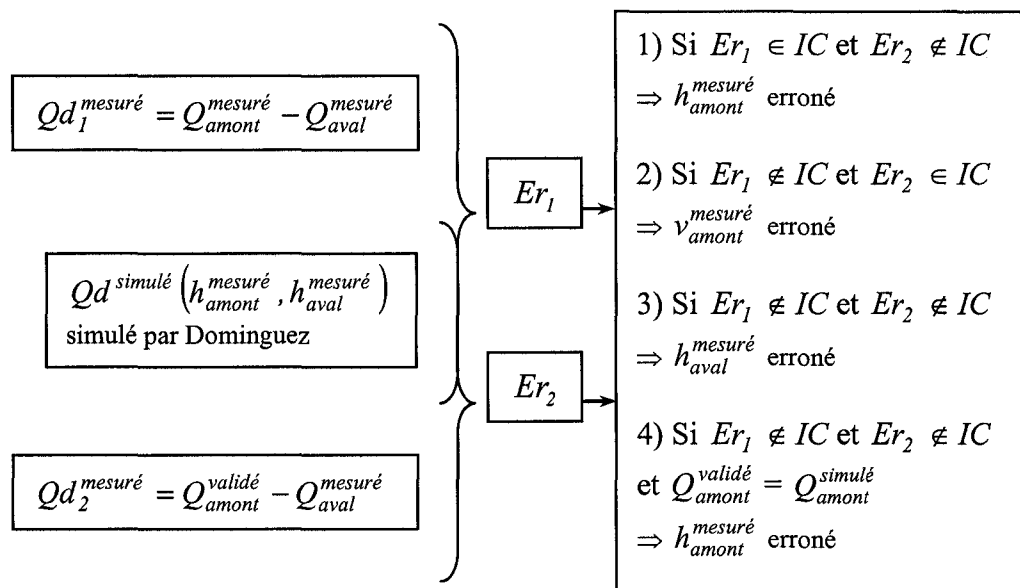


Figure 24 Procédure d'identification des variables mesurées erronées

La procédure d'identification des mesures erronées décrite sur la Figure 24 se compose d'une série de quatre tests statistiques basés sur l'utilisation de l'intervalle de confiance (IC) et sur les écarts relatifs entre les débits déversés mesurés et simulés. Le débit déversé simulé est obtenu à l'aide de la loi de Dominguez en utilisant la hauteur d'eau mesurée à l'amont et à l'aval du déversoir. Le débit déversé mesuré est déduit de la

mesure du débit à l'amont et à l'aval du déversoir. Le débit à l'amont du déversoir peut être estimé avec précision à l'aide d'un modèle hydrologique (Bennis et Crobeddu, 2005). Deux estimations indépendantes du débit amont sont ainsi disponibles. Des techniques de validation développées récemment (Bennis *et al.*, 2000a) permettent d'utiliser la redondance d'information pour valider efficacement les débits mesurés en réseaux d'assainissement. Le débit amont mesuré et validé est utilisé pour définir deux valeurs de débit déversé mesuré. Ces deux valeurs, associées au débit déversé simulé, permettent de définir deux écarts relatifs.

La procédure d'identification est définie en fonction du dispositif instrumental utilisé sur le déversoir. Par conséquent, pour un dispositif instrumental différent du dispositif envisagé dans cet article, la procédure d'identification doit être redéfinie en suivant une démarche similaire.

La phase d'identification des débits déversés erronés est suivie par la phase de correction. Deux options de correction sont envisageables en présence de débits déversés erronés : la première consiste à supprimer les débits déversés erronés et la seconde consiste à remplacer le débit déversé mesuré erroné par un débit déversé estimé. La seconde option est la plus pertinente lorsque la validité de la méthode d'estimation a été démontrée. Cette dernière a été choisie pour la phase de correction des débits déversés.

La phase de correction développée consiste à changer les débits déversés erronés de telle sorte que les écarts relatifs sur les débits déversés réintègrent l'intervalle de confiance. Les modifications s'opèrent en appliquant les règles suivantes :

Cas 1) lorsque les hauteurs et les vitesses mesurées ne sont pas erronées, le débit déversé validé correspond à $Qd_1^{mesuré}$.

Cas 2) lorsque la hauteur mesurée à l'amont est erronée, le débit déversé validé est pris égale au débit déversé $Qd_2^{mesuré}$.

Cas 3) lorsque la vitesse mesurée à l'amont est erronée, le débit déversé validé est alors $Qd_2^{mesuré}$.

Cas 4) lorsque la hauteur mesurée en aval est erronée, celle-ci est modifiée jusqu'à l'atteinte de l'équilibre entre les débits déversés mesurés et simulés.

La procédure d'identification et de correction est conçue pour un seul capteur défaillant à la fois. La détection d'une erreur de mesure devient très difficile dans le cas d'une défaillance simultanée de plusieurs capteurs. En effet, des compensations d'erreur peuvent se produire et conduire à l'acceptation de données erronées. De plus, elle n'est pas applicable aux déversoirs soumis à une influence aval en raison de l'utilisation d'une courbe de tarage pour connaître le débit en aval. Ce cas de figure peut néanmoins se traiter avec une procédure similaire moyennant l'utilisation d'un débitmètre à l'aval.

6.4 Validation de la loi de Dominguez

6.4.1 Calage des lois hydrauliques

L'approche proposée nécessite le calage d'une loi hauteur débit à l'aval du déversoir afin d'obtenir le débit aval. Le capteur de niveaux et le débitmètre sont placés en aval du déversoir pour réaliser le calage de la loi hauteur débit. La courbe de tarage utilisée a pour expression :

$$Q = a f(h) \quad (6.10)$$

où a représente le paramètre de calage; h , la hauteur d'eau dans la conduite.

La fonction de forme $f(h)$ est définie par la formule suivante :

$$f(h) = A R h^{\frac{2}{3}} \quad (6.11)$$

où A représente la surface mouillée en (m²); Rh , le rayon hydraulique en (m).

La courbe de tarage à l'aval du déversoir en fonctionnement non influencé a pour expression :

$$Q = 9,737 A R h^{\frac{2}{3}} \quad (6.12)$$

Les débits mesurés et simulés en aval du déversoir, à l'aide de la courbe de tarage, sont représentés sur la Figure 25.

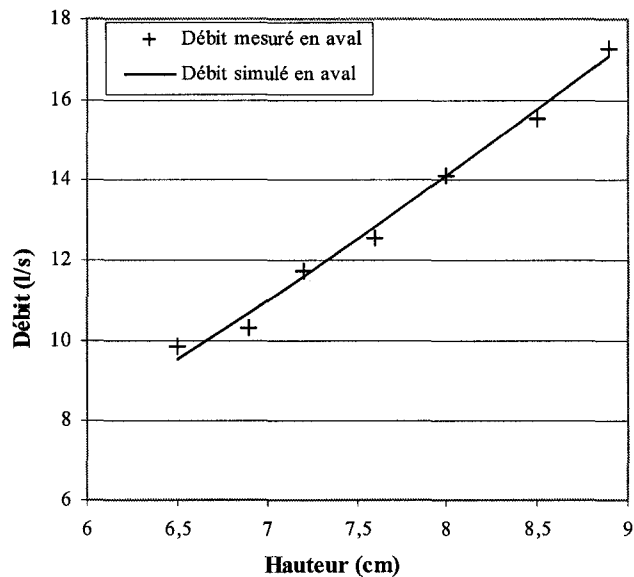


Figure 25 Débit mesuré et simulé par la courbe de tarage en aval du déversoir

La Figure 25 montre une bonne corrélation entre les débits mesurés et simulés en aval. La précision obtenue dans l'estimation du débit s'explique par le fait que la courbe de tarage a été établie pour un écoulement en régime permanent. Bien évidemment, l'utilisation d'une courbe de tarage en réseau d'assainissement présente une incertitude beaucoup plus grande, en raison de la nature transitoire des écoulements.

Le coefficient ϕ_l de la loi de Dominguez est calé à l'aide du débit déversé mesuré selon la formule suivante :

$$\phi_l = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left(\frac{Q_d^{mesuré}(i)}{\phi_2(i) L \sqrt{2g} h(i)^{1,5}} \right) \quad (6.13)$$

Le calage de ϕ_l sur un site réel se fait à l'aide des mesures de débits déversés enregistrées pour différents événements pluvieux. Les débits déversés mesurés devront préalablement être validés afin d'écartier les valeurs erronées. Dans le cas du montage expérimental proposé, le calage du paramètre ϕ_l a été réalisé à l'aide des deux essais suivants :

- essais 1 : Débit amont mesuré : 11,7 l/s; hauteur amont mesurée : 7,8 cm; hauteur aval mesurée : 6,6 cm;
- essais 2 : Débit amont mesuré : 19,4 l/s; hauteur amont mesurée : 10,5 cm; hauteur aval mesurée : 8,1 cm.

La valeur de ϕ_l obtenue par calage à l'aide de la formule (6.13) est de 0,35.

6.4.2 Déversoir fonctionnant en mode non influencé

La loi de déversement a été validée sur le banc d'essai. Dans un premier temps le déversoir a été utilisé en mode non influencé. Treize essais ont été réalisés avec des débits variant de 10 à 30 l/s. Le nombre de Froude dans la conduite principale a varié entre 1,4 et 1,85. L'écoulement rencontré au niveau du déversoir latéral au cours des essais était donc torrentiel et la ligne d'eau observée le long du seuil était descendante. Les données mesurées durant ces essais sont présentées dans le Tableau XVI.

Tableau XVI

Données mesurées sur le déversoir latéral
fonctionnant en mode non influencé

Hauteur amont (cm)	Hauteur aval (cm)	Débit amont (débitmètre Doppler) (l/s)	Débit amont (débitmètre électromagnétique) (l/s)	Débit aval (l/s)
7,5	6,5	10,9	10,7	9,6
7,8	6,6	11,7	11,9	9,9
8,1	6,7	12,3	12,2	10,2
8,3	6,8	12,9	13,1	10,5
8,5	6,9	13,3	13,5	10,7
9,3	7,4	15,2	15,4	12,2
10,0	7,8	17,5	17,0	13,5
10,5	8,1	19,4	19,1	14,5
11,0	8,3	20,5	20,5	15,1
11,6	8,6	22,4	22,9	16,2
12,1	8,8	24,0	24,3	16,8
12,5	9,1	25,7	25,6	17,9
13,5	9,7	29,3	29,1	20,0

Les mesures du débit amont par le débitmètre à effet doppler étaient en accord avec les mesures réalisées par le débitmètre électromagnétique. En revanche, les hauteurs mesurées à l'amont du déversoir par le capteur pressiométrique ont nécessité une validation à l'aide d'une instrumentation complémentaire. En effet, cette hauteur est dans certains cas supérieure à la hauteur de la ligne d'eau en aval du capteur qui est la hauteur réelle à l'entrée du déversoir. La variation de hauteur observée est due aux grandes dimensions du capteur pressiométrique vis à vis du diamètre de la conduite. Par conséquent, le capteur représente un obstacle pour l'écoulement qui est franchi moyennant une surélévation de la ligne d'eau à l'amont du capteur. Cette variation ne se rencontre pas en réseaux d'assainissement en raison du diamètre plus grand des conduites. Les perturbations créées par le capteur pressiométrique sont alors négligeables. Le débit à l'aval du déversoir a été obtenu à l'aide de la courbe de tarage (6.12) en utilisant la hauteur mesurée en aval par le capteur ultrason.

Les débits déversés simulés par la loi de Dominguez sont représentés sur la Figure 26 en fonction des débits déversés mesurés.

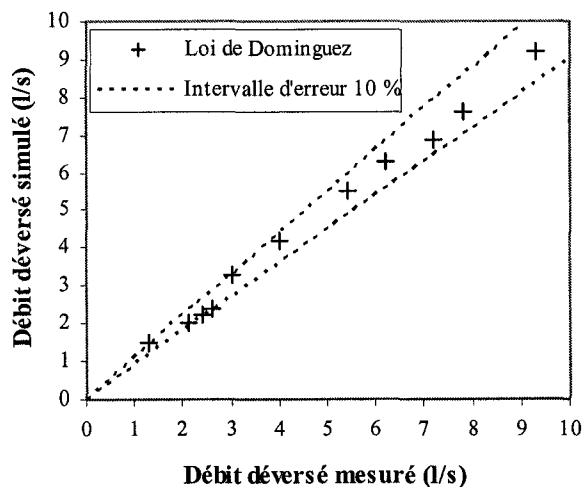


Figure 26 Comparaison entre les débits déversés simulés par la loi de Dominguez et les débits mesurés en mode non influencé

Il y a une bonne concordance entre le débit déversé simulé par la loi de Dominguez et le débit mesuré. En effet, l'écart entre les débits déversés mesurés et simulés par la loi de Dominguez est inférieur à 10%. Cependant, le niveau d'incertitude dans un site réel est plus grand que dans un milieu contrôlé et l'écart entre le débit déversé simulé et mesuré peut dépasser 40% (Carleton, 1985). En revanche, l'écart entre les volumes déversés mesurés et simulés peut être maintenu dans un intervalle de $\pm 20\%$ à $\pm 30\%$ (Ruban *et al.*, 2004).

6.4.3 Déversoir fonctionnant en mode influencé

Il n'est pas rare de rencontrer des déversoirs d'orage latéraux soumis à une influence aval. Cependant, peu d'études ont été menées pour vérifier la validité des lois de déversement sur un déversoir soumis à une influence aval.

Un seuil calibré triangulaire a été disposé à l'aval du dispositif expérimental pour créer une influence aval. Le seuil triangulaire a pour effet de ralentir fortement la vitesse de l'écoulement dans la conduite. Ainsi, un écoulement fluvial se crée à l'amont du seuil triangulaire. Or, le régime d'écoulement dans la conduite sans influence est torrentiel. Par conséquent, la transition entre la zone d'écoulement torrentiel et la zone d'écoulement influencé se fait par l'intermédiaire d'un ressaut hydraulique comme le montre la Figure 27.

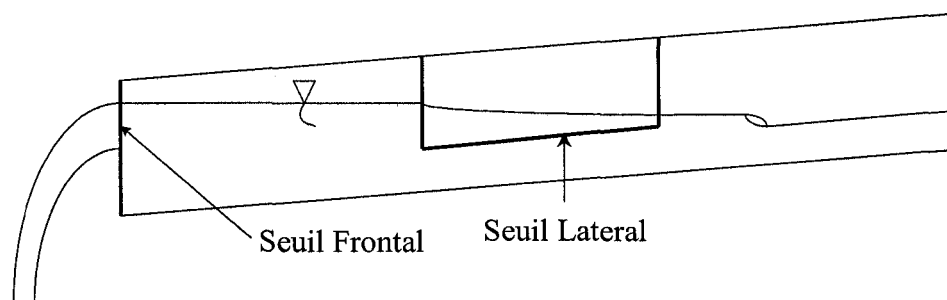


Figure 27 Fonctionnement du déversoir latéral en mode influencé

Lorsque le déversoir latéral se trouve dans la zone influencée, la ligne d'eau le long du seuil est ascendante.

Onze essais ont été réalisés avec des débits qui variaient de 2 à 14 l/s. Les résultats de ces essais sont présentés dans le Tableau XVII.

Tableau XVII

Données mesurées sur le déversoir latéral fonctionnant en mode influencé

Hauteur amont (cm)	Hauteur aval (cm)	Débit amont (débitmètre Doppler) (l/s)	Débit aval (l/s)
6,7	7,2	2,1	0,7
7,0	7,6	2,8	1,0
7,4	8,3	4,4	1,6
7,8	9,0	6,0	2,3
8,4	9,6	7,5	2,9
9,3	10,0	8,5	3,2
8,5	10,3	9,8	3,7

Tableau XVII (suite)

8,5	10,8	10,6	4,0
8,6	11,2	11,7	4,4
8,7	11,7	12,9	5,0
8,8	11,9	13,6	5,5

Le passage du débit amont mesuré de 8,5 à 9,8 l/s se traduit par une chute de niveau à l'amont du déversoir. Ce phénomène s'explique par la formation d'un ressaut hydraulique au niveau du déversoir.

Les débits déversés simulés par la loi de Dominguez sont représentés sur la Figure 28 en fonction des débits déversés mesurés.

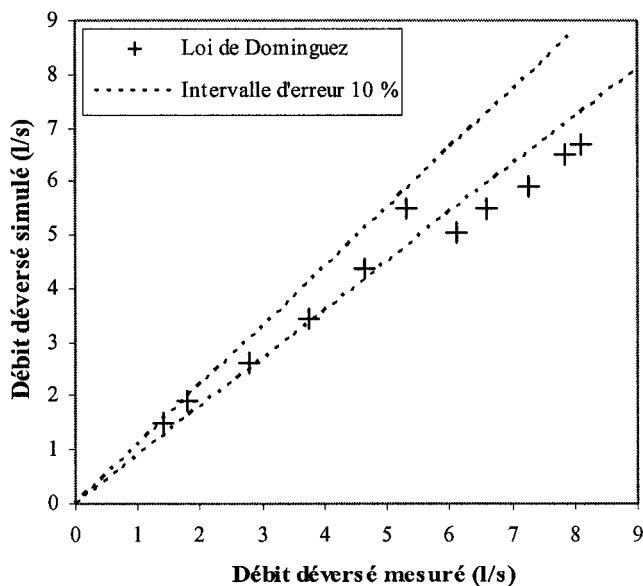


Figure 28 Comparaison entre les débits déversés simulés par la loi de Dominguez et les débits mesurés en mode influencé

L'écart entre les débits déversés mesurés et simulés est inférieur à 10% lorsque le ressaut hydraulique se situe à l'amont du déversoir. En revanche, l'écart devient supérieur à 10% lorsque le ressaut hydraulique se forme le long du déversoir. Par conséquent, en l'absence de ressaut hydraulique le long du déversoir, la loi de Dominguez évalue précisément le débit déversé en mode influencé sans subir un nouveau calage. Ce résultat rend particulièrement pertinente l'utilisation de la loi de Dominguez pour simuler le débit déversé par un déversoir latéral situé dans un réseau d'assainissement. En revanche, la loi de Dominguez n'est plus fiable quand le ressaut hydraulique se forme le long du déversoir.

6.4.4 Analyse de sensibilité

Le coefficient de forme et la hauteur du seuil dans la formule (6.1) sont les seuls paramètres susceptibles d'avoir une influence sur le débit déversé. Or, ces paramètres évoluent dans le temps avec le dépôt de matières organiques ou de déchets ménagers. Ainsi, une variation de la valeur du coefficient de forme liée à un encrassement du seuil se traduit par une variation équivalente pour le débit déversé en terme de pourcentage. En revanche, la variation du débit déversé avec la hauteur du seuil n'est pas linéaire et nécessite une évaluation. Ainsi, une erreur de 6% a été supposée sur la hauteur du seuil. Les résultats fournis par la loi de Dominguez sont présentés sur la Figure 29.

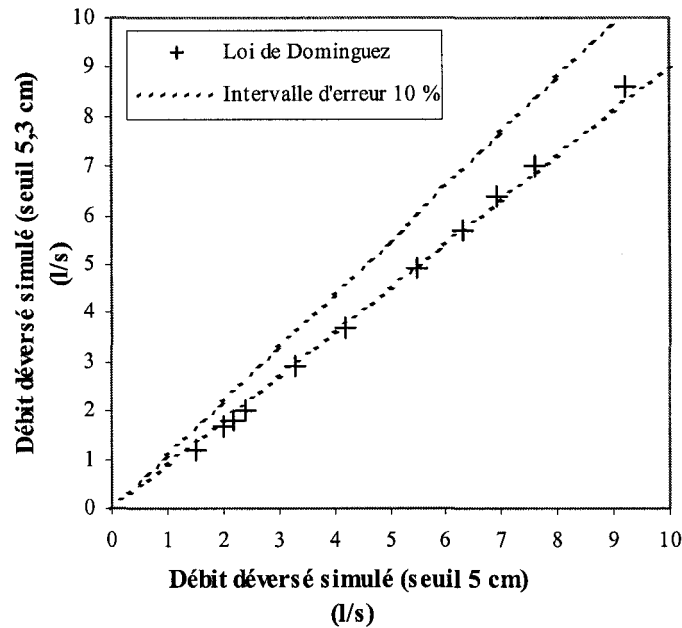


Figure 29 Débits déversés simulés avec des seuils de hauteurs respectives 5 cm et 5,3 cm

Il ressort du test de sensibilité qu'une erreur de 6% sur la hauteur du seuil conduit à un écart relatif de 10% sur les débits déversés simulés. La loi de Dominguez apparaît donc particulièrement sensible à la hauteur du seuil. Ce constat est conforme aux conclusions sur la sensibilité des modèles de déversement énoncées par Carleton (1985).

6.5 Test de la procédure de validation

La première étape a consisté à valider l'hypothèse de normalité pour la distribution des écarts relatifs. Ainsi, un test de normalité de Komolgorov-Smirnov a été mené sur les écarts relatifs des débits déversés. Ce test présente l'avantage de pouvoir être réalisé en présence d'un faible échantillon de données (Sokal et Rohlf, 1981). Les données relevées lors des treize essais de déversement, réalisés en mode non influencé sur le banc

d'essai, ont été utilisées pour calculer les écarts relatifs. Le test a montré que la variable aléatoire Er est effectivement distribuée selon la loi normale.

La seconde étape a consisté à établir l'intervalle de confiance sur les écarts relatifs des débits déversés. Ainsi, les six essais présentés dans le Tableau XVIII ont servi à définir l'intervalle de confiance.

Tableau XVIII

Écarts relatifs sur les débits déversés

Débit déversé mesuré (l/s)	Débit déversé simulé (l/s)	Er (%)
1,3	1,5	- 13,3
2,4	2,2	9,1
3,0	3,3	- 9,1
4,0	4,2	- 4,8
5,4	5,5	- 1,8
7,2	6,9	4,3

En raison du faible nombre de données, l'intervalle de confiance suivant a été défini à l'aide de la loi de Student.

$$\left(\overline{Er} - 2,776 \sigma_{Er}\right) \leq Er \leq \left(\overline{Er} + 2,776 \sigma_{Er}\right) \quad (6.14)$$

Les limites de l'intervalle de confiance à 95%, sur les débits déversés simulés à l'aide de la formule (6.14) ont pour valeurs :

$$- 26 \% \leq Er \leq 21 \% \quad (6.15)$$

La grande amplitude de l'intervalle de confiance s'explique par le faible nombre de données utilisées pour sa détermination. En effet, plus le nombre de données est faible et plus l'intervalle de confiance est large comme le traduit le coefficient de 2,776 de la loi de Student.

La troisième étape a consisté à valider la procédure d'identification des capteurs défaillants. Ainsi, des valeurs aberrantes en forme de W et de A, représentant un décrochage momentané du débitmètre amont, ont été introduites parmi les sept essais n'ayant pas servis à l'élaboration de l'intervalle de confiance. Les erreurs ont été appliquées dans un premier temps aux hauteurs mesurées en amont par le capteur pressiométrique puis dans un second temps aux vitesses mesurées par le capteur Doppler.

Les écarts relatifs entre les débits déversés mesurés et simulés en présence de hauteurs mesurées erronées sont présentés dans le Tableau XIX.

Tableau XIX

Écarts relatifs entre les débits déversés mesurés et simulés
en présence de hauteurs erronées en amont

Essais	$Q_{\text{amont}}^{\text{mesuré}}$ (l/s)	$Q_{\text{amont}}^{\text{validé}}$ (l/s)	$Qd_1^{\text{mesuré}}$ (l/s)	$Qd_2^{\text{mesuré}}$ (l/s)	$Qd^{\text{simulé}}$ (l/s)	Er_1 (%)	Er_2 (%)
1	11,7	11,7	1,8	1,8	1,8	1	1
2*	13,9	12,2	3,7	2,0	2,5	48	- 27
3*	11,7	13,5	1,0	2,8	1,9	- 100	44
4*	22,0	19,1	7,5	4,6	5,8	29	- 26,5
5	22,4	22,4	6,2	6,2	6,3	- 1	- 1
6*	28,8	25,6	10,9	7,7	8,9	23	- 15,5
7	29,3	29,3	9,3	9,3	9,2	1	1

*Écarts relatifs ayant été calculés en présence des hauteurs mesurées modifiées.

Le débit à l'amont du déversoir a été validé à l'aide de la méthodologie développée par (Bennis *et al.*, 2000a). La redondance d'information pour la validation du débit amont est fournie par le débitmètre électromagnétique. Sur un site réel, la redondance d'information est fournie par un modèle hydrologique.

Parmi les sept essais de déversement réalisés, les essais 2, 3, 4 et 6 comportent des écarts relatifs sur les débits déversés qui sortent des limites de l'intervalle de confiance (6.15). De plus, les écarts relatifs des essais 2, 3, 4 valident le quatrième test d'identification soit :

$$Er_1 \notin IC, Er_2 \notin IC \text{ et } Q_{amont}^{validé} = Q_{amont}^{simulé} .$$

Par conséquent, la hauteur mesurée en amont lors des essais 2, 3, 4 est erronée. Or, les hauteurs mesurées, au cours de ces quatre essais, sont les hauteurs qui avaient préalablement été modifiées. En revanche, les écarts relatifs de l'essai 6 valident à tort le deuxième test d'identification qui indique une défaillance sur le capteur de vitesse. En effet, c'est la hauteur mesurée en amont qui avait préalablement été modifiée et non la vitesse. L'identification à tort s'explique par la grande amplitude de l'intervalle de confiance qui conduit à accepter des écarts relatifs qui auraient dus être normalement rejetés. Néanmoins, le test pour l'essai 6 a permis d'identifier une erreur sur le débit déversé mesuré qui est liée à une erreur de mesure du débit à l'amont du déversoir.

La procédure d'identification a ensuite été testée sur les écarts relatifs entre les débits déversés mesurés et simulés en présence de vitesses mesurées erronées. Les résultats du test sont présentés dans le Tableau XX.

Tableau XX

Écart relatifs entre les débits déversés mesurés et simulés en présence de vitesses erronées en amont.

Essais	$Q_{amont}^{mesuré}$ (l/s)	$Q_{amont}^{validé}$ (l/s)	$Qd_1^{mesuré}$ (l/s)	$Qd_2^{mesuré}$ (l/s)	$Qd^{simulé}$ (l/s)	Er_1 (%)	Er_2 (%)
1	11,7	11,7	1,8	1,8	1,8	1	1
2*	13,5	12,2	3,3	2,0	2,0	64,5	- 2
3*	12,0	13,5	1,3	2,8	2,4	-90	14
4*	21,3	19,1	6,8	4,6	4,9	41	- 6
5	22,4	22,4	6,2	6,2	6,3	- 1	- 1
6*	28,3	25,6	10,4	7,7	7,6	27	1
7	29,3	29,3	9,3	9,3	9,2	1	1

*Écart relatifs ayant été calculés en présence des vitesses mesurées modifiées.

Parmi les sept essais de déversement réalisés, les essais 2, 3, 4 et 6 comportent des écarts relatifs sur les débits déversés qui sortent des limites de l'intervalle de confiance (6.15). De plus, ces écarts relatifs valident le deuxième test d'identification soit :

$$Er_1 \notin IC \text{ et } Er_2 \in IC.$$

Par conséquent, la vitesse amont mesurée lors des essais 2, 3, 4 et 6 est erronée. Or, les vitesses mesurées au cours de ces quatre essais sont les vitesses qui avaient préalablement été modifiées.

La procédure d'identification a permis d'identifier la majorité des erreurs de mesure ayant conduit à une mesure erronée du débit déversé. Ce résultat positif et d'autant plus prometteur qu'il a été obtenu en présence d'un intervalle de confiance de grande amplitude. Cependant, il paraît illusoire de penser qu'en réseaux d'assainissement, la procédure d'identification puisse localiser des erreurs de mesure, sur les débits déversés, inférieures à 20% en raison des incertitudes de mesure plus grandes.

La dernière étape a consisté à corriger les débits déversés erronés. En présence de hauteurs et de vitesses amont mesurées erronées, la correction consiste à prendre le débit déversé égale à $Qd_2^{mesuré}$. Les débits déversés validés dans le cas de hauteurs et vitesses amont erronées sont présentés dans le Tableau XXI.

Tableau XXI

Débits déversés validés en présence de vitesses et hauteurs erronées en amont

Essais	Hauteurs erronées	Vitesses erronées
	Débit déversé validé (l/s)	Débit déversé validé (l/s)
1	1,8	1,8
2	2,0	2,0
3	2,8	2,8
4	4,6	4,6
5	6,2	6,2
6	7,7	7,7
7	9,3	9,3

Les débits déversés mesurés erronés 2, 3, 4 et 6 ont été remplacés par le débit déversé $Qd_2^{mesuré}$. Par conséquent, l'écart relatif entre les débits mesurés et simulés regagne les limites de l'intervalle de confiance.

6.6 Conclusion

Le présent article a mis en lumière une approche originale pour le suivi et la validation des débits déversés par les déversoirs latéraux à seuil court. Cette approche repose sur

l'utilisation combinée d'un système d'instrumentation et d'une loi de déversement pour valider les débits déversés.

La loi de déversement fournit une redondance d'information qui permet d'une part de valider les débits déversés et d'autre part de réduire le nombre de capteurs à utiliser. On propose ainsi d'utiliser la loi Dominguez qui présente l'avantage de ne pas faire intervenir la géométrie des conduites et de n'avoir qu'un seul paramètre à caler. De plus, des relations analytiques ont été établies pour faciliter la détermination du coefficient de débit.

La procédure de validation développée consiste premièrement à identifier les mesures erronées et par conséquent le capteur défaillant. L'identification des mesures erronées se fait par l'intermédiaire de quatre tests statistiques sur l'écart relatif entre les débits déversés mesurés et simulés. Ces tests statistiques sont basés sur l'utilisation d'un intervalle de confiance construit lors du calage de la loi de déversement. Enfin des règles de correction ont également été proposées pour corriger les débits déversés mesurés erronés.

La loi de Dominguez a été testée sur un banc d'essai expérimental. Les tests ont démontré la représentativité de la loi de Dominguez pour un déversoir latéral fonctionnant avec ou sans influence aval. La procédure de validation a été testée sur un échantillon de mesures dans lequel a été volontairement introduit différents types d'erreur. La procédure a clairement identifié le capteur défaillant et a permis la correction des valeurs erronées de débits déversés.