

Amélioration des modèles hydrauliques des grilles avaloirs et étude de sensibilité aux paramètres hydrauliques

Improved models of hydraulic gully gratings and study of
sensitivity to hydraulic parameters

Wertel J. *, Vazquez J. *, Boca J. **, Cuny A. **, Morcel Y. **

* Institut de Mécanique des Fluides et des Solides, Université de Strasbourg 2
rue Boussingault - 67000 Strasbourg - (jvazquez@engees.u-strasbg.fr)

** Saint-Gobain PAM – Avenue Victor Claude – 54705 Blénod les Pont à
Mousson

RÉSUMÉ

Cet article propose un modèle générique basé sur des considérations hydrauliques permettant le calcul de la capacité hydraulique d'une grille avaloir installée aux bords des chaussées urbaines pour collecter les eaux de ruissellement. Le modèle de (Anceaux, 1995) a d'abord été considéré. Ce dernier compare l'écoulement à travers une grille à celui d'un seuil. Ce modèle a été adapté afin de prendre en compte la vitesse de l'eau à l'approche de la grille et l'effet de la pente transversale. Plusieurs formulations intermédiaires sont testées afin de faire une étude de sensibilité du débit absorbé par l'avaloir par rapport à ces paramètres. Les résultats du modèle retenu et du modèle de (Anceaux, 1995) sont confrontés aux données expérimentales de (Robert & Tossou, 2006). On constate une meilleure corrélation entre les débits calculés et mesurés pour le présent modèle. Il est montré que le nouveau modèle permet de s'affranchir de la pente longitudinale tout en prenant en compte la vitesse critique de l'écoulement dans le caniveau aux abords de la grille.

ABSTRACT

This article deals with the conception of a model for calculation of the hydraulic capacity of a street gutter gully grating used to collect urban water runoff. The model of (Anceaux, 1995) has been first considerate. It is a similarity-based reasoning that makes the comparison between gully grating flow and weir flow. Modifications have been made in order to take into account the velocity flow near the grating and the transversal slope. Several formulations are tested to perform a sensibility analysis of the maximum absorbed flow rate to these parameters. The developed model is applied to three gratings then results predicted are compared with experimental data from (Robert & Tossou, 2006). There is a great improvement of the agreement between the calculation and the measurements. Moreover, it is found that the use of the critical charge makes it possible to get rid of the need of a longitudinal slope correction and to take the gutter flow velocity into account in the same time.

MOTS CLÉS

Grille avaloir, capacité hydraulique, charge critique, écoulement à surface libre

1 INTRODUCTION

Le présent travail s'intéresse aux grilles avaloirs ou bouches d'égout couramment installées au bord des chaussées en zone urbaine. Ces ouvrages sont chargés d'absorber l'écoulement, généralement d'origine pluviale, canalisé par le caniveau. La capacité hydraulique d'une grille, soit le débit maximal qu'elle peut absorber pour un débit amont donné, est un paramètre crucial dans le choix du nombre de grilles nécessaires à l'équipement d'une commune ou d'un lotissement. Elle est d'autant moins aisée à déterminer qu'elle dépend de la grille elle-même, dont les formes variées influencent localement l'écoulement, mais aussi des paramètres géométriques du caniveau, pentes longitudinale et transversale, rugosité, qui conditionnent eux aussi grandement l'hydraulique aux abords de l'avaloir. Par ailleurs, l'écoulement à travers une grille peut prendre plusieurs formes. L'eau peut s'écouler directement dans les interstices comme pour une chute ou un seuil. Pour de plus forts débits, on observe une submersion de la grille et l'écoulement s'apparente à celui d'un orifice noyé tel celui d'un leaping weir (Moffa, 1997). Enfin, le relief de la grille peut constituer des obstacles sur lesquels l'eau "rebondit" ou "ricoché" provoquant des éclabousses (Robert & Tossou, 2006). Ces trois phénomènes peuvent être observés simultanément. Cet article propose un modèle reprenant la similitude faite avec les seuils par (Anceaux, 1995) complétée par la prise en compte d'une vitesse caractéristique de l'écoulement et par un facteur correctif lié à la pente transversale. Ces apports seront évalués individuellement au moyen de modèles intermédiaires. Les résultats de ces modèles sont comparés aux valeurs expérimentales de (Robert & Tossou, 2006).

2 ETAT DE L'ART

En théorie, en deca d'une valeur seuil de débit d'alimentation, la grille peut intercepter tout l'écoulement amont. Le débit absorbé est donc égal au débit du caniveau que l'on peut évaluer en première approche avec la formule de Manning-Strickler (Lencastre, 1996) relative aux écoulements uniformes à surface libre. Au dessus, la capacité d'avalement d'une grille dépend principalement des paramètres hydrauliques de l'écoulement dans le caniveau, des caractéristiques de ce dernier (dimensions, pentes, rugosité...) et de celles de la grille elle-même. (McCuen, 1989) adapte la formule de Manning-Strickler en considérant que toute l'eau passant sur la largeur au miroir de la grille est avalée plus, le cas échéant, une partie de l'eau qui ruisselle à côté et qui s'engouffre le long de l'arrête longitudinale de la grille.

$$Q_{abs} = 0,375.K_s \sqrt{I} \theta^{5/3} B^{8/3} \quad (2-1)$$

Q_{abs} est le débit absorbé par la grille, K_s est le coefficient de Manning-Strickler caractérisant la rugosité du caniveau, I et θ sont respectivement les pentes longitudinale et transversale du caniveau, B est la largeur au miroir de la grille. Ce modèle ne tient pas compte du fait que l'eau puisse ruisseler sur les barreaux de la grille sans s'y déverser, on notera d'ailleurs qu'aucun paramètre de (2-1) n'est véritablement propre à la grille. A l'inverse, (Robert & Tossou, 2006) mettent au point une loi expérimentale après avoir mené une campagne de mesures avec plusieurs grilles sur un banc permettant de faire varier les paramètres hydrauliques et la forme du caniveau. Le débit absorbé est calculé suivant :

$$Q_{abs} = a_0 \cdot Q_{amont}^{a_1} \cdot I^{a_2} \cdot \theta^{a_3} \quad (2-2)$$

Q_{amont} est le débit dans le caniveau. $a_i \ i \in \{0,1,2,3\}$ sont des paramètres de calage propre à la grille, la valeur de ces derniers, voire leur signe, varient fortement d'une grille à l'autre ce qui rend (2-2) difficilement exploitable. A mi-chemin entre ces deux démarches, (Anceaux, 1995) compare l'eau se déversant dans une grille avaloir à l'écoulement au travers d'un seuil frontal. Il applique donc une loi de fonctionnement similaire à celle d'un seuil (CETMEF, 2005), soit:

$$Q_{abs} = k \cdot h^{3/2} \quad (2-3)$$

où k est un paramètre propre à la grille [k]= $m^{3/2} \cdot s^{-1}$ et h est la hauteur d'eau en amont de la grille. La hauteur est calculée par la relation de Manning-Strickler en fonction du débit amont.

Gomez & al. (2009) proposent une formulation de l'efficacité de la grille (rapport entre le débit absorbé et le débit amont) prenant en compte le nombre de Froude et le tirant d'eau amont. Cette méthode nécessite l'évaluation du tirant d'eau à l'amont, ce qui introduit une variable hydraulique à estimer.

3 MODELE PROPOSE

L'application de la formule (2-3) aux cas expérimentaux de (Robert & Tossou, 2006) montrent en fait une grande variabilité de k en fonction du tirant d'eau. C'est pourquoi il semble judicieux de pousser plus en avant la comparaison de (Anceaux, 1995). En effet, le tirant d'eau d'un écoulement au travers d'un seuil passe obligatoirement par la hauteur critique h_c , qui est la hauteur d'eau pouvant transporter un débit donné en dépensant le moins d'énergie (Lencastre, 1996). Par ailleurs, la loi de déversement au travers d'un seuil ne fait pas qu'intervenir la hauteur d'eau amont mais toute la charge ; la vitesse d'approche est un paramètre incontournable de la loi de seuil. Aussi paraît-il intéressant de tester une formule faisant intervenir la charge critique H_c et une autre implémentant simplement h_c et de les comparer à (Anceaux, 1995). C'est pourquoi, il a été étudié les deux lois suivantes :

$$Q_{abs} = k(h_c).h_c^{3/2} \quad (3-1) \quad Q_{abs} = k(H_c).H_c^{3/2} \quad (3-2)$$

$$H_c = h_c + \frac{Q_{amont}^2}{2.g.S_c^2} \quad (3-3)$$

où g est l'accélération due à la gravité, S_c est la surface mouillée au regard de la hauteur critique h_c . La hauteur critique est calculée par mise en équation du paramètre de Froude, soit :

$$Fr = \frac{Q_{amont}}{S_c \cdot \sqrt{g \cdot D_h}} = 1 \quad (3-4)$$

D_h est le diamètre hydraulique soit $D_h = B/S$.

B représente la largeur au miroir et S la surface mouillée. Le calage du paramètre k dépendant de la hauteur ou de la charge critique pour des pentes transversales et longitudinales différentes a été réalisé à partir des résultats expérimentaux de (Robert & Tossou, 2006). Ces mêmes données ont servi à la validation du modèle.

3.1 Calage des modèles

Dans un premier temps, le coefficient k est calé pour un jeu de données ayant une pente transversale et longitudinale constante en fonction de la hauteur ou de la charge critique. Dans un deuxième temps, on vérifiera le calage effectué pour des pentes différentes. On pourra ainsi plus facilement faire un choix sur la démarche la plus pertinente.

3.1.1 Présentation des résultats expérimentaux

Les données expérimentales sont constituées des débits absorbés et ruisselés, mesurés au moyen de seuils triangulaires complétés par une sonde limnimétrique à ultrasons, pour différentes pentes transversales et longitudinales. Pour la description du pilote, le lecteur se reportera à (Robert & Tossou, 2006). Les données concernant les trois grilles de la Figure 3-1 ont été utilisées. Pour chaque mesure de débit, les auteurs estiment l'erreur à $\pm 5\%$.

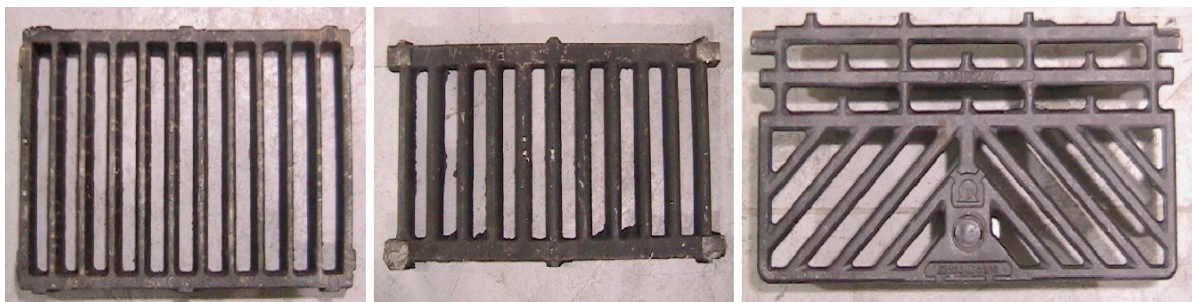


Figure 3-1 Grilles en fonte montées sur le pilote de (Robert & Tossou, 2006): (a) petite grille standard 0,61x0,36 m², (b) grande grille standard 0,91x0,46 m², (c) grille aux barreaux inclinés 0,61x0,36 m²

3.1.2 Calage du coefficient k

Le calage du coefficient k par rapport à H_c , comme l'illustre la Figure 3-2, se fait sur les données correspondant à une pente longitudinale de 3% et une pente transversale de 2%. Une interpolation par un polynôme de degré 3 permet d'avoir un coefficient de corrélation proche de 1. Afin de ne pas extrapoler les données de calage du paramètre k , celui-ci sera limité par sa valeur maximale et convergera vers la valeur zéro.

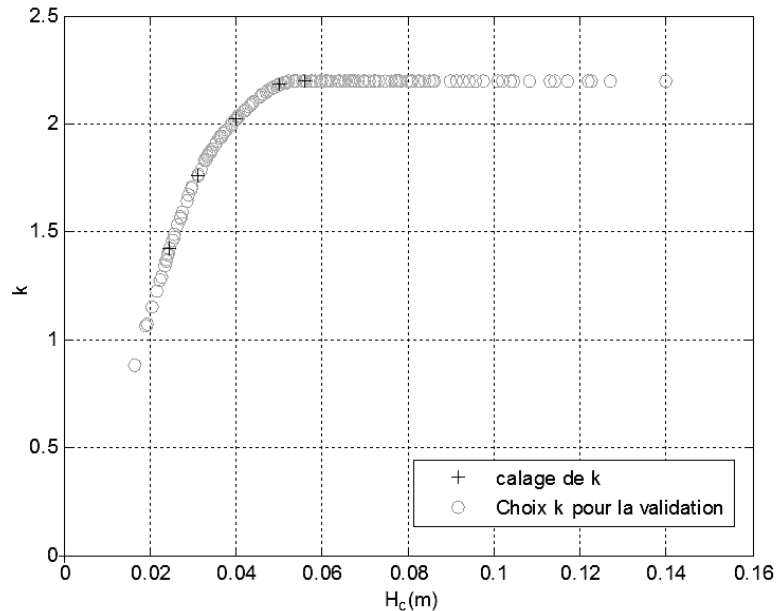


Figure 3-2 Evolution et calage du paramètre k en fonction de H_c pour la petite grille standard

4 RESULTATS

Les formules de calcul de Q_{abs} présentées dans ce paragraphe ont été testées suivant la méthodologie de calcul illustrée Figure 4-1 **Erreur ! Source du renvoi introuvable.**

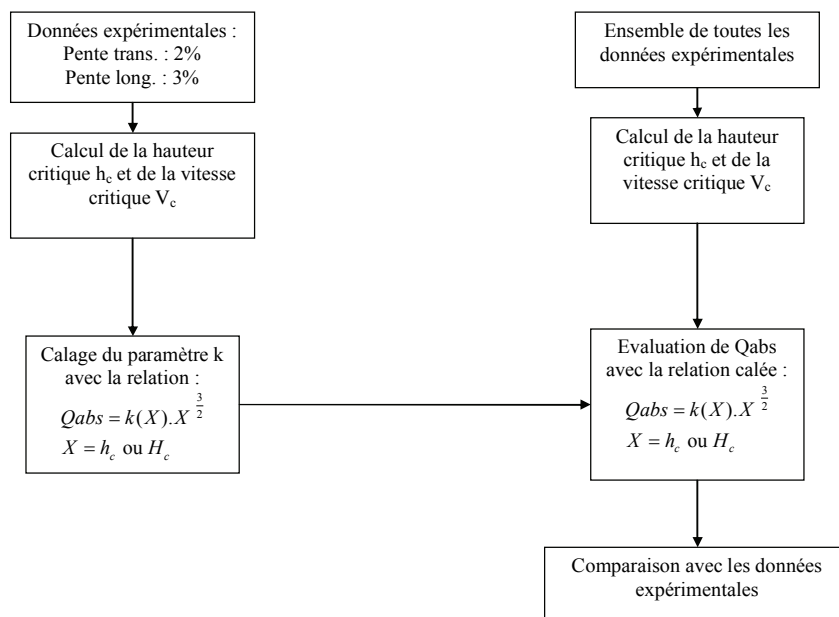


Figure 4-1 Méthodologie du calcul

4.1 Résultats obtenus avec la formule de (Anceaux, 1995)

Le débit absorbé par la grille est calculé avec la formule (2-3) calée avec une pente longitudinale de 3% et une pente transversale de 2% puis comparé aux 198 résultats pour la petite grille standard 0,61x0,36 m² de (Robert & Tossou, 2006) (voir Figure 4-2). On constate une tendance à surestimer le débit expérimental. Plus la pente longitudinale est faible et plus l'erreur augmente. Les points inclus dans le cône d'erreur correspondent aux valeurs qui ont servis au calage de k, pour d'autres pentes l'erreur peut atteindre les 380%, la gamme de validité de la formule est largement dépassée.

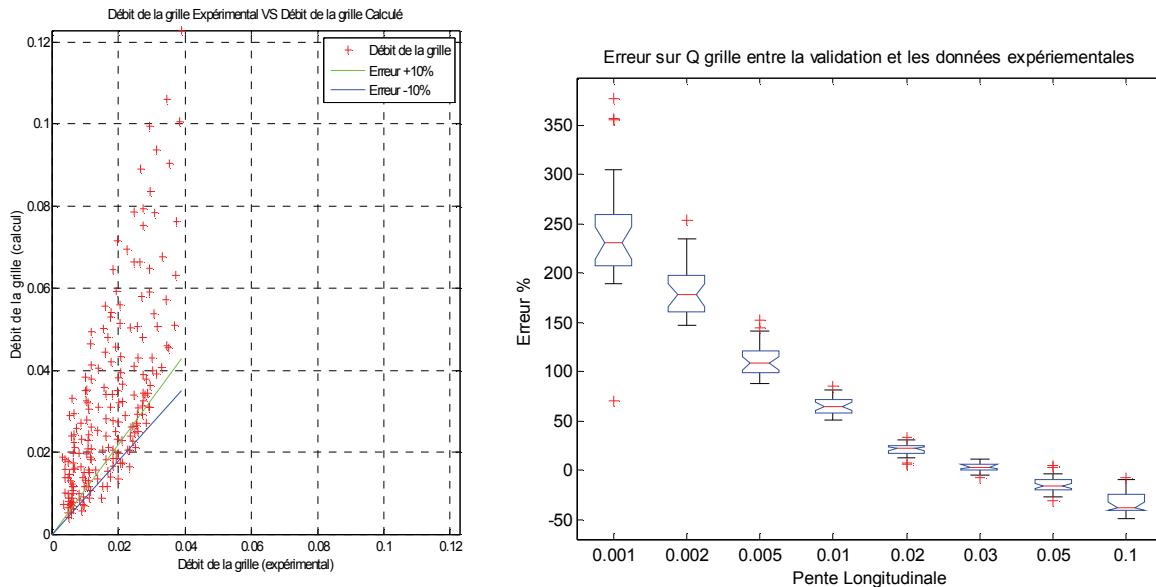


Figure 4-2 Comparaison du débit calculé selon (2-3) avec le débit expérimental de (Robert & Tossou, 2006) pour la petite grille avec cône d'erreur à 10% et erreur en fonction de la pente en %.

4.2 Résultats obtenus avec la formule faisant intervenir h_c

La comparaison suivante est réalisée avec la formule (3-1), Figure 4-3.

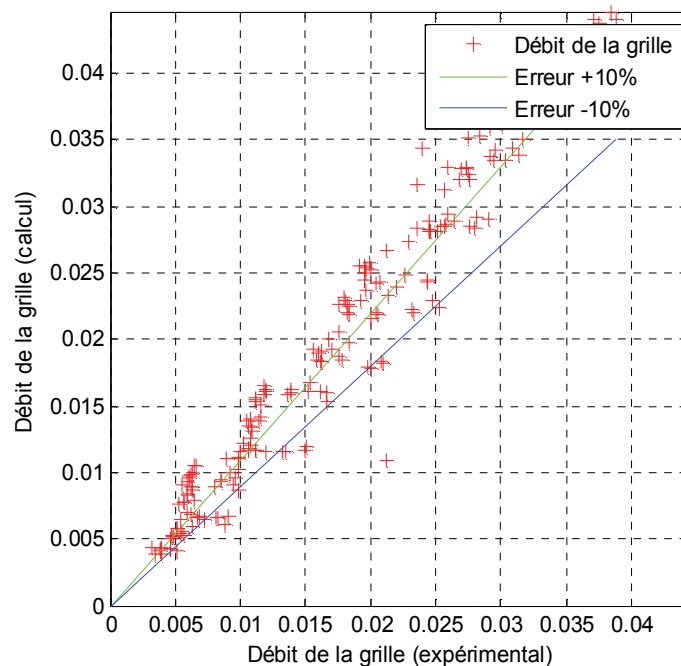


Figure 4-3 Comparaison du débit calculé selon (3-1) avec le débit expérimental de (Robert & Tossou, 2006) pour la petite grille avec cône d'erreur à 10%

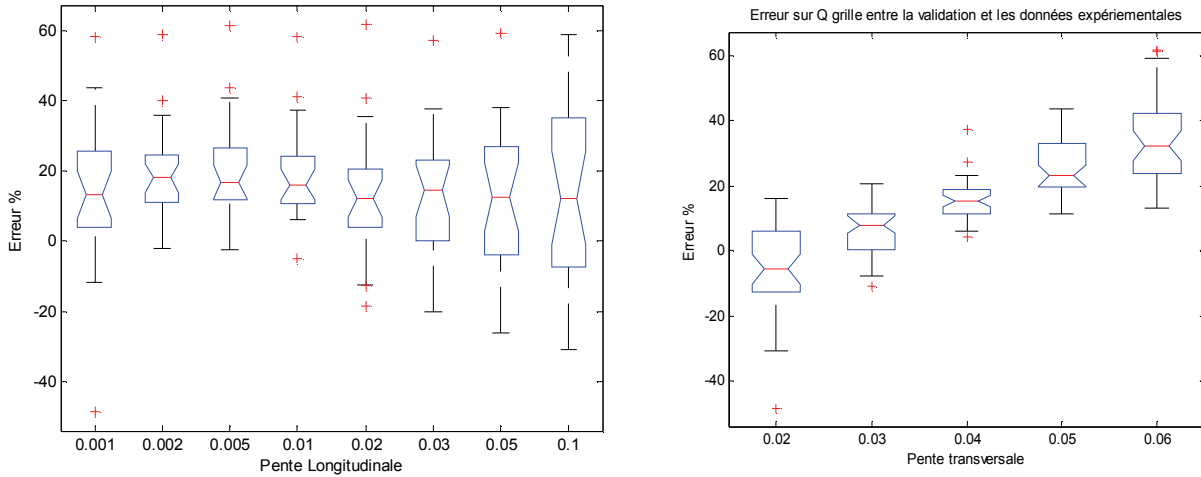


Figure 4-4 Ecart relatif des valeurs de Q_{abs} calculées pour la petite grille avec (3-1) par rapport aux valeurs expérimentales en fonction des pentes longitudinale et transversale

L'étude de l'erreur commise en fonction de la pente, dont les quartiles et les maximum sont illustrés Figure 4-4, montre une relative constance par rapport à la pente longitudinale mais une grande variation par rapport à la pente transversale. L'erreur la plus faible est bien sûr obtenue pour la pente de calage ($\theta=0.02$) mais elle augmente fortement quand on s'éloigne de cette valeur pour avoisiner les 60% pour $\theta=0.06$. C'est pourquoi une correction relative à la pente transversale de calage semble pouvoir améliorer les résultats.

4.3 Résultats obtenus avec la formule faisant intervenir h_c et une correction relative à la pente transversale

Reprenons une formule identique à (3-1) au terme multiplicateur correctif $(\theta / \theta_{calage})^\alpha$ près. En calant α égal à -0,3, sans toucher au calage de k précédemment réalisé, l'équation (3-1) devient :

$$Q_{abs} = k_{petite\ grille} (h_c) h_c^{3/2} \left(\frac{\theta}{\theta_{calage}} \right)^{-0,3} \quad (4-1)$$

L'erreur commise avec la formule (4-1) suivant la pente est représentée Figure 4-5. On constate une nette amélioration, néanmoins l'erreur maximale avoisine les 40%.

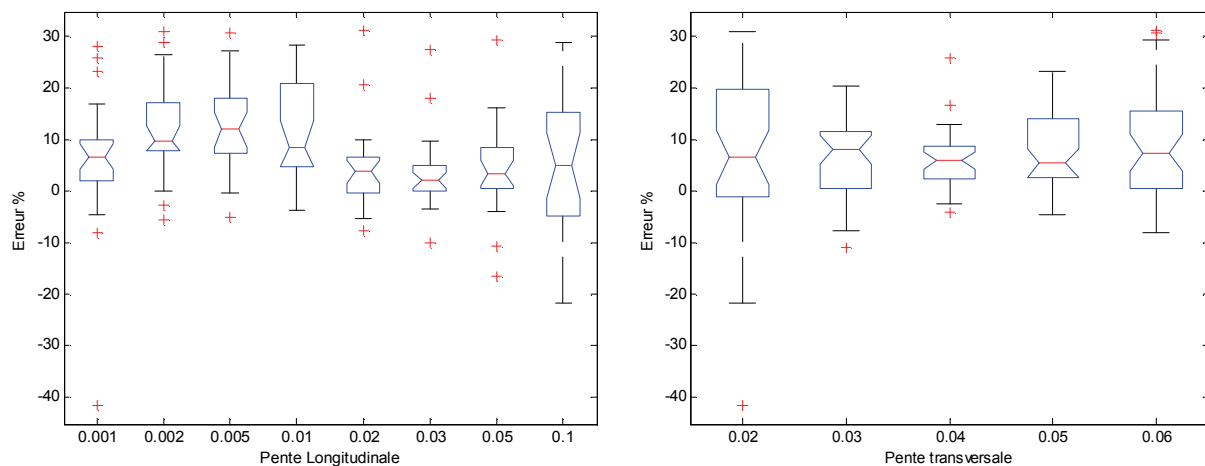


Figure 4-5 Ecart relatif des valeurs de Q_{abs} calculées pour la petite grille avec (4-1) par rapport aux valeurs expérimentales en fonction des pentes longitudinale et transversale

Si le facteur correctif lié à la pente transversale se montre efficace, une relative sensibilité à la pente longitudinale apparaît. Cela montre que la prise en compte de la vitesse d'approche, qui dépend de cette pente, peut se montrer bénéfique au modèle. D'où le choix de l'implémentation de la charge

critique à la place de la hauteur critique. La correction relative à la pente transversale est donc maintenue.

4.4 Résultats obtenus avec la formule faisant intervenir H_c et une correction relative à la pente transversale

La démarche précédente a été reprise pour le modèle (3-2) qui devient :

$$Q_{abs} = k_{\text{petite grille}} (H_c) \cdot H_c^{3/2} \left(\frac{\theta}{\theta_{\text{calage}}} \right)^{-0,45} \quad (4-2)$$

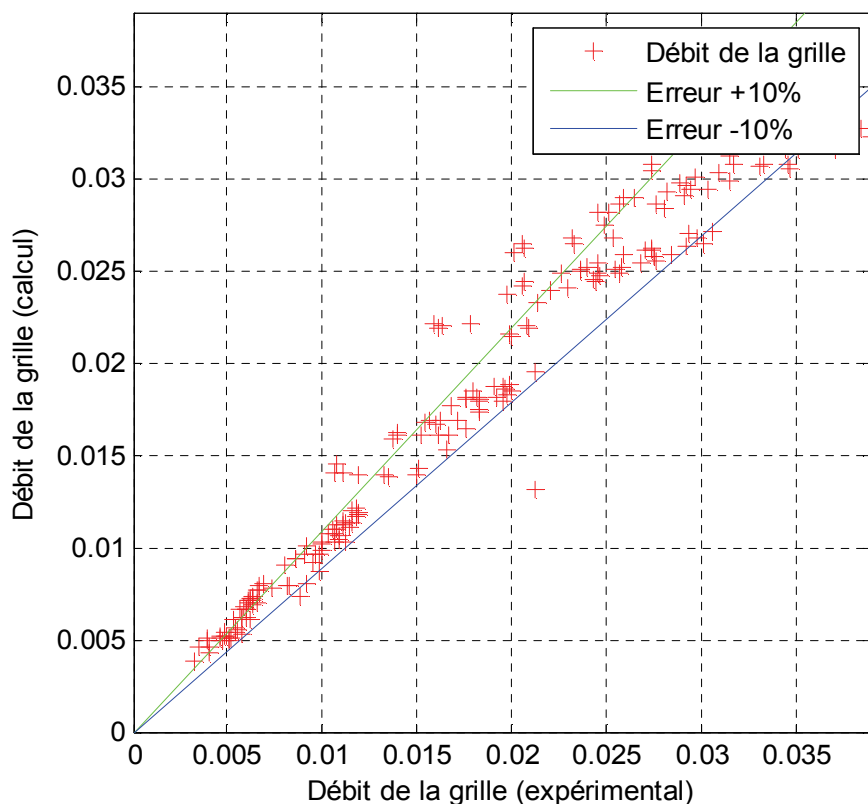


Figure 4-6 Comparaison du débit calculé selon (4-2) avec le débit expérimental de (Robert & Tossou, 2006) pour la petite grille avec cône d'erreur à 10%

Les comparaisons suivantes sont réalisées pour la formule (4-2), Figure 4-6 et Figure 4-7. Il y a une réduction des quartiles et une relative constance par rapport aux pentes. Par ailleurs ces erreurs maximum étant très éloignées des quartiles, il s'agit de données expérimentales (Robert & Tossou, 2006) qui se singularisent par rapport aux autres et qui sont donc peut-être moins fiables. La faible variation de l'erreur par rapport à la pente longitudinale montre qu'une correction liée à ce paramètre n'est pas utile. Globalement cette formule donne de meilleurs résultats même si ponctuellement des erreurs élevées demeurent. La comparaison de la Figure 4-6 avec la Figure 4-2, montre clairement l'évolution des résultats. L'erreur maximale commise est divisée par 10.

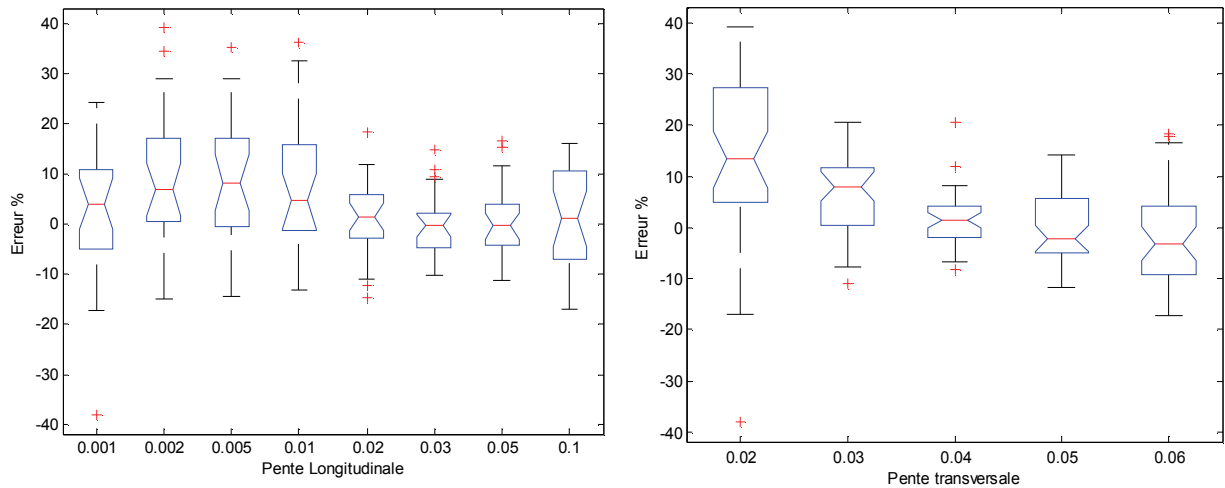


Figure 4-7 Ecart relatif des valeurs de Q_{abs} calculées pour la petite grille avec (4-2) par rapport aux valeurs expérimentales en fonction des pentes longitudinale et transversale

4.5 Validation pour les autres grilles

La grande grille standard et la grille aux barreaux inclinés ont été testées en reprenant la même démarche que précédemment. Seul le coefficient k (propre à la grille) a été recalé avec une pente longitudinale de 3% et une pente transversale de 2%. La formule (4-2) s'écrit :

$$Q_{abs} = k_{\text{grande grille}}(H_c) \cdot H_c^{3/2} \left(\frac{\theta}{\theta_{\text{calage}}} \right)^{-0,45} \quad (4-3)$$

$$Q_{abs} = k_{\text{grille inclinée}}(H_c) \cdot H_c^{3/2} \left(\frac{\theta}{\theta_{\text{calage}}} \right)^{-0,45} \quad (4-4)$$

La plupart des points sont, là encore, inclus dans le cône d'erreur des 10%, Figure 4-9, Figure 4-10. On constate pourtant une plus grande disparité du nuage de points quant à la grille aux barreaux inclinés. Cette grille présente une distribution des trous bien plus complexe que pour les autres ce qui engendre une plus grande perturbation de l'écoulement au niveau même de la grille. En effet (Wertel, 2009) a montré que la multiplication des angles a tendance à augmenter le caractère anisotrope de la turbulence de l'écoulement qui engendre l'apparition de structures complexes aux grandes échelles comme les courants secondaires de (Prandtl, 1925).

Par ailleurs, la Figure 4-8 montre que k varie peu.

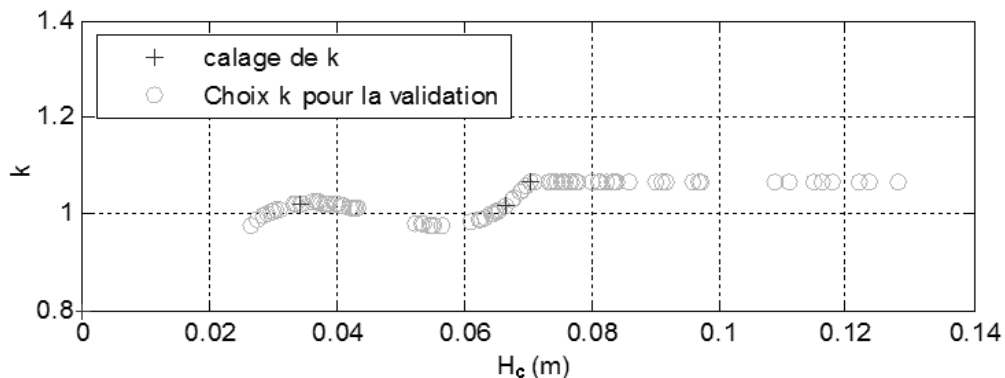


Figure 4-8 Evolution et calage du paramètre k en fonction de H_c pour la grille aux barreaux inclinés

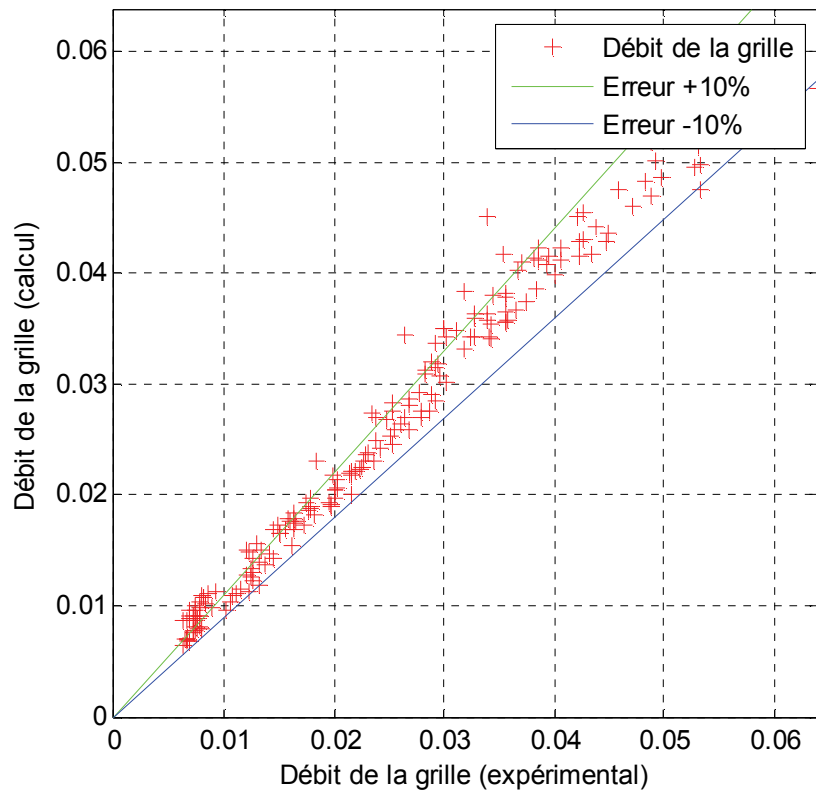


Figure 4-9 Comparaison du débit calculé selon (4-3) avec le débit expérimental de (Robert & Tossou, 2006) pour la grande grille avec cône d'erreur à 10%

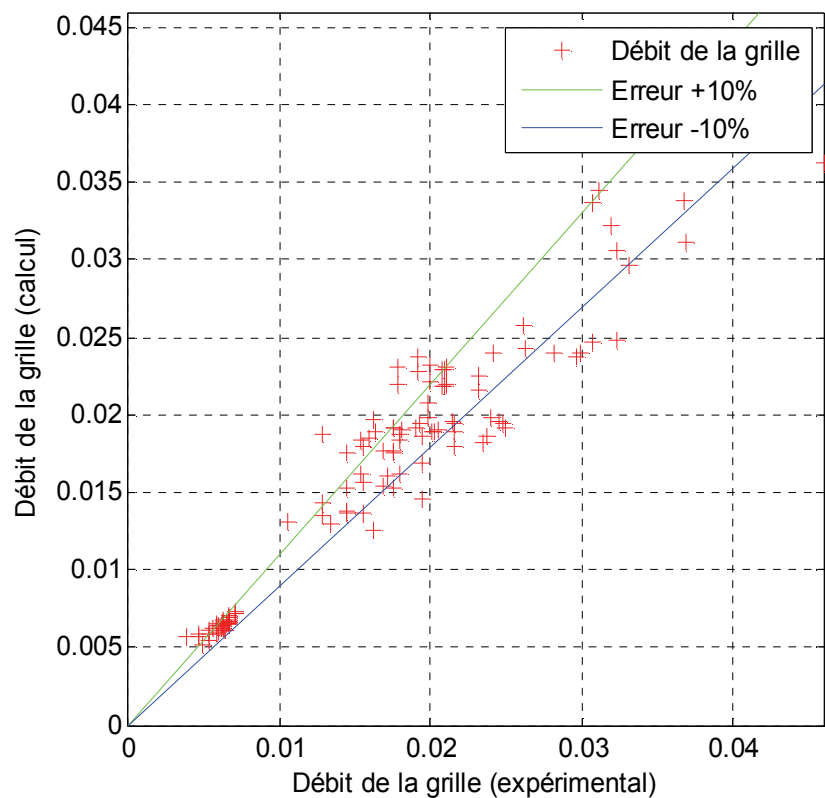


Figure 4-10 Comparaison du débit calculé selon (4-4) avec le débit expérimental de (Robert & Tossou, 2006) pour la grille aux barreaux inclinés avec cône d'erreur à 10%

5 CONCLUSION

Le présent travail s'attache à la conception d'un modèle permettant de déterminer la capacité hydraulique d'une grille avaloir. La similitude avec les écoulements de seuil de (Anceaux, 1995) est reprise et adaptée. Il a été fait une étude de sensibilité de la capacité hydraulique de la grille par rapport à la pente longitudinale et transversale. Il en ressort que la prise en compte de la charge critique et de la pente transversale permet de modéliser correctement le comportement hydraulique des grilles. En revanche une correction relative à la pente longitudinale se révèle inutile avec ce type de formulation. Cette étude a permis de montrer que le coefficient de correction de la pente transversale est constant pour les trois grilles étudiées. On en déduit qu'il est nécessaire de caler ces paramètres pour une pente longitudinale et transversale sans avoir besoin de données expérimentales pour d'autres pentes. Il serait intéressant de pouvoir généraliser cette démarche à d'autres types de grilles afin de montrer la pertinence des coefficients de calage. Cette méthode ne nécessite pas l'estimation de paramètre hydraulique telle que le tirant d'eau amont par exemple.

Les formes des grilles avaloirs sont de plus en plus élaborées du fait notamment de contraintes liées à la loi d'accessibilité aux personnes handicapées (Loi du 11 février 2005). Certaines grilles sont, par exemple, équipées de facettes antidérapantes créant un relief complexifiant encore l'écoulement. Il peut sembler pertinent, dans ces cas là, d'envisager une modélisation tridimensionnelle (résolution des équations de Navier Stokes 3D couplées à un modèle de turbulence) spécifique à la grille afin d'optimiser la forme pour en déterminer la capacité hydraulique. Ces résultats 3D, après une validation hydraulique, permettraient de s'affranchir de données expérimentales difficiles et coûteuses à obtenir. La modélisation 3D permettrait également de générer une base de données pouvant valider notre démarche précédente dans le cas d'autres grilles avaloirs.

BIBLIOGRAPHIE

- Anceaux, D. (1995). *Détermination de la capacité d'absorption des grilles et avaloirs de SAINT-GOBAIN PAM*. Rapport technique interne de Saint Gogain/Pont à mousson.
- CETMEF. (2005). *Notices sue les déversoirs– synthèse des lois d'écoulement au droit des seuils et des déversoirs*. Centre d'études techniques maritimes et fluviales.
- Gomez & Russo (2009), *Hydraulic efficiency of continuous transverse grates for paved areas*, Journal of irrigation and drainage engineering, vol.135, n°2, pp.225-230.
- Lencastre, A. (1996). *Hydraulique générale*. Editions Eyrolles.
- McCuen, R. (1989). *Hydrologic Analysis and Design*. Englewood Cliffs, NJ: Prentice Hall.
- Moffa, P. E. (1997). *The control and treatment of combined sewer overflows*. New York: Van Nostrand Reinhold environmental engineering series.
- Prandtl, L. (1925). Über die ausgebildete Turbulenz. ZAMM , Vol.5- pp.136-139.
- Robert, J., & Tossou, E. (2006). *Evaluation expérimentale de la capacité hydraulique des grilles d'égouts pluviaux*. Université Laval, Département de génie civil.
- Wertel, J. (2009). *Modélisation tridimensionnelle des écoulements turbulents en conduite d'assainissement à surface libre*. Thèse de doctorat, Université de Strasbourg.