



COACHS

Guide Technique n°2

Évaluation d'un débit en collecteur par la mesure de deux hauteurs d'eau

Auteurs : José Vazquez^{1,2,4}, Matthieu Dufresne^{1,2,4}, Sandra Isel^{1,2,4}, Martin Fischer^{1,2,4}, Claude Joannis^{3,4}

¹ Ecole Nationale du Génie de l'Eau et de l'Environnement de Strasbourg (ENGEES)

² Laboratoire des Sciences de l'Ingénieur, de l'Informatique et de l'Imagerie (ICube), Equipe Mécanique des Fluides

³ Institut Français des Sciences et Technologies des Transports, de l'Aménagement et Des Réseaux (IFSTTAR)

⁴ Groupement pour l'Evaluation des Mesures en Continu dans les Eaux et en Assainissement (GEMCEA)

Ce guide technique est un livrable du projet **COACHS** (COmputations and their Applications in Channel Hydraulics for Sewers) financé par le Ministère de l'Écologie, du Développement Durable, des Transports et du Logement dans le cadre de la Convention de subvention n°10MGC S 004 notifiée le 1 avril 2010 obtenue en réponse à Appel à Projet C2D2 2009

Date : 27/05/2014

Contact : jose.vazquez@engees.unistra.fr

Le projet COACHS est un partenariat entre :

- l'IFSTTAR (Institut Français des Sciences et Technologies des Transports, de l'Aménagement et des Réseaux - Laboratoire Eau et Environnement)
- l'INSA de Lyon (Laboratoire de Génie Civil et l'Ingénierie Environnementale)
- l'ICUBE (Laboratoire des Sciences de l'Ingénieur, de l'Informatique et de l'Imagerie, Equipe Mécanique des Fluides)
- Le GEMCEA (Groupement pour l'Évaluation des Mesures en Continu dans les Eaux et en Assainissement)



Sommaire

1. INTRODUCTION	5
2. PRINCIPE DE MESURE	6
3. MODE OPERATOIRE	7
3.1. POSITIONNEMENT DES CAPTEURS DE HAUTEUR D'EAU	7
3.2. ETUDE HYDRAULIQUE DU SITE	7
<i>Géométrie du site</i>	7
<i>Fonctionnement hydraulique</i>	8
3.3. CONSTRUCTION D'UN MODELE HYDRAULIQUE	8
<i>Modèle hydraulique</i>	8
<i>Génération d'une banque de données représentative de la station de mesure</i>	9
<i>Mise en forme de la banque de données sous une forme opérationnelle</i>	9
<i>Evaluation de l'incertitude sur le débit</i>	9
3.4. INSTRUMENTATION, EVALUATION DU DEBIT ET DE SON INCERTITUDE	9
4. AVANTAGES ET INCONVENIENTS	10
4.1. AVANTAGES DE LA METHODE	10
4.2. INCONVENIENTS DE LA METHODE	10
5. EXEMPLES DE MISE EN ŒUVRE	10
5.1. SITES EQUIPES SELON CETTE METHODE	10
5.2. QUELQUES RESULTATS	11
<i>Abaque d'analyse des données</i>	11
<i>Relation mathématique</i>	12
<i>Incetitude sur le débit</i>	12
6. CONCLUSION	13
7. REFERENCES	14

1. INTRODUCTION

Qu'il s'agisse de connaître le fonctionnement du réseau, d'effectuer un diagnostic, de mettre en place une régulation ou bien encore de répondre aux contraintes réglementaires de l'autosurveillance, l'exploitant d'un réseau est régulièrement amené à mettre en place des stations de mesure du débit. Le débit n'est jamais directement mesuré ; il s'agit toujours d'une détermination indirecte fondée sur la mesure d'une ou plusieurs autres grandeurs physiques. Plusieurs méthodes s'offrent alors à l'exploitant pour parvenir à la détermination du débit ; les deux principales sont les suivantes.

La plus utilisée est probablement la mesure conjointe de la vitesse et de la hauteur d'eau dans une section géométriquement connue (capteurs dits « Doppler », profilomètres, cordes de vitesse, *etc.*). Les principaux inconvénients d'une mesure hauteur-vitesse sont une maintenance plus importante (due à l'immersion d'un capteur), et une incertitude pouvant être importante (due au lien complexe entre la vitesse mesurée par le capteur et la vitesse moyenne nécessaire au calcul du débit), notamment dans le cas où la station est située à proximité de singularités hydrauliques telles que coudes, chutes, jonctions, *etc.*.

Une autre possibilité est de mesurer la hauteur d'eau dans une section où un lien direct hauteur/débit peut être établi, par exemple en amont d'un dispositif provoquant un changement de régime hydraulique (seuil, canal Venturi, vanne, *etc.* fonctionnant en régime dénoyé). Si cette méthode permet une mesure précise et robuste du débit (pas de capteur immergé, incertitude faible), à cause du dispositif de mesure à installer dans l'ouvrage (seuil, vanne, Venturi...), elle est rarement mise en œuvre en collecteur du fait de l'impact qu'elle peut avoir sur la ligne d'eau à l'amont

Le même principe $Q = f(h)$ est parfois appliqué pour convertir une mesure de hauteur en une estimation de débit en section courante, en utilisant la formule de **Manning-Strickler** (M.S.) Celle-ci exprime l'équilibre entre les forces de gravité et de frottement par une relation entre la vitesse et le tirant d'eau. L'hypothèse d'uniformité de l'écoulement ne permet en principe de n'appliquer cette relation qu'à une mesure de tirant d'eau dans un canal de caractéristiques constantes, sans apports latéraux, sur une longueur suffisante pour s'affranchir d'influences aval. De plus, la mauvaise connaissance des caractéristiques hydrauliques des ouvrages d'assainissement conduit généralement à caler cette relation à partir d'une campagne de mesures du débit et de la hauteur d'eau. Ces mesures doivent couvrir toute la gamme des valeurs de hauteur d'eau rencontrées en temps sec et en temps de pluie, afin que la relation obtenue après traitement des données soit valable sans extrapolation. *Faute de pouvoir garantir la validité de la relation déterminée, il est impossible de couvrir toutes les conditions de fonctionnement du réseau : une influence aval peut se manifester dans certaines conditions et perturber considérablement le calcul de débit.* **Dans la grande majorité des cas, cette méthode n'est pas utilisable.**

Dans ce contexte, ce guide technique s'intéresse à une méthode alternative et innovante de détermination du débit à partir de deux hauteurs d'eau en collecteur. Les objectifs de cette méthode sont de déterminer le débit en **réduisant au maximum la maintenance** et en **évaluant précisément l'incertitude sur le débit** tout en évitant d'influencer le fonctionnement du réseau.

Dans le cas du régime non-uniforme et/ou non-permanent, l'évolution du tirant d'eau peut être évaluée par la **courbe de remous**. Cette équation différentielle, ayant pour origine la relation de Bernoulli, ne peut être résolue qu'en connaissant deux conditions à la limite amont en régime torrentiel ou une condition amont et aval en régime fluvial. Si la condition à la limite est facilement identifiable, comme par exemple une station de pompage à l'aval ou une chute d'eau, alors un seul capteur de hauteur d'eau à l'amont peut permettre de calculer le débit. Dans les autres cas, deux capteurs de hauteur d'eau sont nécessaires pour déterminer le débit. **Cette méthode est largement utilisable pour les écoulements présentant des effets transitoires faibles, ce qui est le cas de la plupart des écoulements en réseau d'assainissement. Cette méthode par mesure de 2 hauteurs d'eau est développée dans ce document.**

2. PRINCIPE DE MESURE

Le principe de la méthode est d'associer un débit à une ligne piézométrique évaluée à partir de la mesure de la cote altimétrique de la surface libre en deux points suffisamment distants pour que la différence de cotes puisse être mesurée avec une précision satisfaisante.

Pour ce faire :

- 1) On détermine des gammes plausibles de débits et de hauteurs aval pouvant être observées sur le futur site de mesure ;
- 2) À partir des caractéristiques du collecteur on simule des courbes de remous pour toutes les combinaisons H_{aval} - Débit discrétisées par exemple avec un pas de X% de chaque gamme, et on obtient la hauteur d'eau amont correspondant à chaque combinaison ;
- 3) On cale une fonction d'interpolation (réseau de neurones par exemple), avec les hauteurs d'eau en entrée, et le débit en sortie ;
- 4) On peut implémenter l'expression analytique de cette fonction d'interpolation dans un automate pour calculer des débits ;
- 5) On peut aussi différencier cette expression analytique pour faire un calcul d'incertitudes.

Cette méthode n'est valable que dans les conditions suivantes :

- Le régime de l'écoulement demeure fluvial entre les deux mesures de hauteur ;
- Il n'y a pas d'apport significatif de débit (inférieur à quelques %) entre les deux mesures de hauteur ;
- Absence de dépôts (susceptibles de modifier la section mouillée, voire la pente) ;
- Dans le cas d'un coude à l'aval ou/et à l'amont immédiat des points de mesure, il est nécessaire de s'assurer qu'il ne perturbe pas la surface libre de l'écoulement.

Cette méthode est plus simple à appliquer si le collecteur est prismatique, c'est-à-dire que sa section en travers est quelconque (circulaire, ovoïde, fer à cheval,...) mais demeure constante.

Si le régime est torrentiel, une méthode plus simple ne nécessitant la mesure que d'une seule hauteur d'eau peut être mise en place. Si un ressaut hydraulique a lieu entre les deux mesures de hauteur, l'équation de la courbe de remous n'est plus valable et cette méthode ne peut alors pas être utilisée.

3. MODE OPERATOIRE

3.1. Positionnement des capteurs de hauteur d'eau

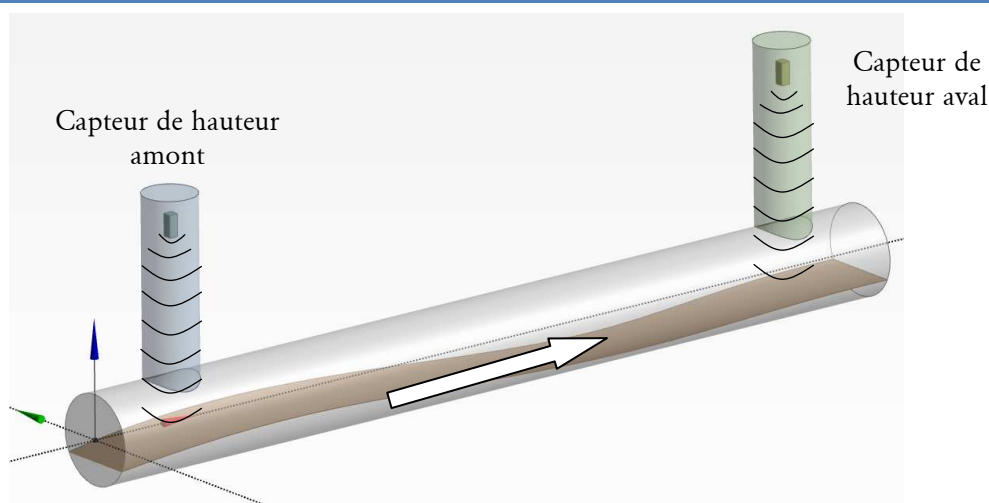


Figure 1. Illustration de l'instrumentation

La méthode par 2 hauteurs d'eau repose sur la mise en place de deux capteurs de hauteur d'eau en deux sections distinctes du collecteur, par exemple dans deux regards, ainsi qu'illustré sur la Figure 1. Pour que la méthode soit opérationnelle, il faut que la différence de niveau mesurée entre les deux capteurs soit significative (au-delà de 5 cm).

3.2. Etude hydraulique du site

Une fois que les conditions d'application de la méthode ont été vérifiées, une étude hydraulique du site de mesure doit être effectuée. Elle se compose de deux parties, à savoir l'analyse de la géométrie du site et l'analyse de son fonctionnement hydraulique.

Géométrie du site

Concernant l'analyse de la géométrie, il s'agit de mesurer les grandeurs géométriques nécessaires au calcul du débit à partir des deux hauteurs d'eau :

- La pente ou les pentes du collecteur ;
- La section en travers du collecteur.

Fonctionnement hydraulique

L'analyse du fonctionnement hydraulique consiste à déterminer la plage de débit et celle de hauteur dans laquelle le site va fonctionner. Pour cela, il est important de disposer :

- D'un profil en long de la canalisation instrumentée (amont et aval du site de mesure) ;
- D'une identification des influences aval ;
- D'une quantification de la plage de débit pouvant transiter et des gammes de hauteur d'eau ;
- De données de mesure si des capteurs sont déjà en place à proximité du site.

3.3. Construction d'un modèle hydraulique

Une fois connues les caractéristiques du site ainsi que la plage de fonctionnement, l'étape suivante consiste en la conception des modèles hydrauliques.

Modèle hydraulique

Physiquement, la courbe de remous est une équation traduisant la perte de charge le long d'un écoulement. Dans le cas d'un écoulement sans apport de débit dans un collecteur prismatique (sans variation de la section en travers), l'équation de la courbe de remous s'écrit comme suit :

$$\frac{dh}{dx} = \frac{I - J}{1 - Fr^2} \quad \text{Equation 1}$$

Dans l'équation 1, h est la hauteur d'eau ; x , la position le long du collecteur ; I , la pente géométrique ; J , la pente énergétique (la perte de charge par unité de longueur) et Fr , le nombre de Froude faisant intervenir le débit Q , la hauteur d'eau h à travers la section mouillée S et le diamètre hydraulique D_h et enfin la constante d'accélération gravitationnelle g , ainsi qu'exprimé ci-dessous :

$$Fr = \frac{Q}{S \cdot \sqrt{g \cdot D_h}} \quad \text{Equation 2}$$

La perte de charge peut être évaluée au moyen de différentes méthodes, par exemple par la formule de Manning-Strickler (équation 3 où K_s est la rugosité de Strickler, et R_h le rayon hydraulique) ou encore la formule de Colebrook.

$$J = \frac{Q^2}{K_s^2 \cdot S^2 \cdot R_h^{4/3}} \quad \text{Equation 3}$$

Traditionnellement en hydraulique, l'équation de la courbe de remous est utilisée pour déterminer la hauteur d'eau en un endroit donné, connaissant le débit circulant dans le collecteur et la hauteur d'eau en condition aux limites dans le collecteur. Pour cela, il suffit d'intégrer le terme dh/dx .

L'idée est ici d'utiliser l'équation de la courbe de remous dans un sens différent, à savoir déterminer le débit connaissant la hauteur d'eau en deux endroits distincts. Comme précédemment, la méthode repose sur l'intégration du terme dh/dx exprimé ci-dessus.

Génération d'une banque de données représentative de la station de mesure

La méthode repose sur la génération, à partir de la courbe de remous précédemment décrite, d'une banque de données représentative du fonctionnement hydraulique de la station de mesure. Une fois cette banque de données générée, on dispose d'un tableau à trois colonnes : débit, hauteur amont et hauteur aval.

En soi, ce tableau comprend toute l'information nécessaire au calcul du débit à partir des deux hauteurs d'eau mesurées. L'étape suivante ne consiste qu'à le mettre en forme dans un objectif plus opérationnel.

Mise en forme de la banque de données sous une forme opérationnelle

Cette mise en forme consiste à exprimer la triple information (h_1, h_2, Q) sous des formes plus facilement exploitables :

- Une relation mathématique constituée d'opérations arithmétiques simples permettant sa mise en œuvre dans un transmetteur (utilisation d'un réseau de neurones par exemple) ;
- Un abaque permettant l'analyse des données collectées, notamment de diagnostiquer d'éventuels problèmes de mesure.

Évaluation de l'incertitude sur le débit

L'évaluation de l'incertitude repose sur l'utilisation de la relation mathématique reliant le débit aux deux hauteurs d'eau. L'incertitude de mesure de chacune des deux hauteurs d'eau est propagée à travers la relation mathématique pour en déduire l'incertitude sur le débit. Ceci peut être effectué pour la totalité des conditions de la banque de données.

Les cas déjà traités au moyen de cette méthode ont mis en évidence que l'incertitude sur le débit est complètement conditionnée par la différence de niveau, c'est à dire de la ligne piézométrique (et non-pas la différence de tirant d'eau) entre les deux points de mesure. Il faut au moins quelques centimètres de différence de niveau entre les deux capteurs pour avoir une incertitude suffisamment faible pour être compatible avec une exploitation opérationnelle du débit.

3.4. Instrumentation, évaluation du débit et de son incertitude

Cette troisième et dernière étape consiste en la mise en place des capteurs sur site et à la vérification des mesures effectuées. Il est particulièrement important de veiller à ce que le zéro des capteurs soit correctement effectué.

Une fois les capteurs mis en place, le débit peut être calculé grâce à la relation $Q = f(h_1, h_2)$. Selon le bruit présent sur les données mesurées, il peut être nécessaire de mettre en place un filtrage, par exemple d'utiliser la médiane calculée sur quelques pas de temps plutôt que de considérer chaque instant individuellement.

4. AVANTAGES ET INCONVENIENTS

4.1. Avantages de la méthode

- Utilisation de capteurs robustes non-intrusifs (peu de maintenance) ;
- Aide à l'analyse des mesures de hauteurs : connaissance du fonctionnement hydraulique grâce à l'analyse de données ;
- Evaluation des incertitudes sur le débit ;
- Fonctionnement pour une grande gamme de débit, hauteur et régime d'écoulement (utilisation possible surtout en cas de forte influence aval).

4.2. Inconvénients de la méthode

- Nécessité d'une analyse hydraulique du site en pré-requis à l'utilisation de la méthode ;
- Longueur minimale de collecteur nécessaire entre les deux mesures de hauteur d'eau sans apport latéral (entre un à deux regards environ, quelques dizaines de mètres) ;
- Ne pas avoir de coude à l'amont et/ou à l'aval ayant un impact fort sur la surface libre dans les zones de mesure.

5. EXEMPLES DE MISE EN ŒUVRE

5.1. Sites équipés selon cette méthode

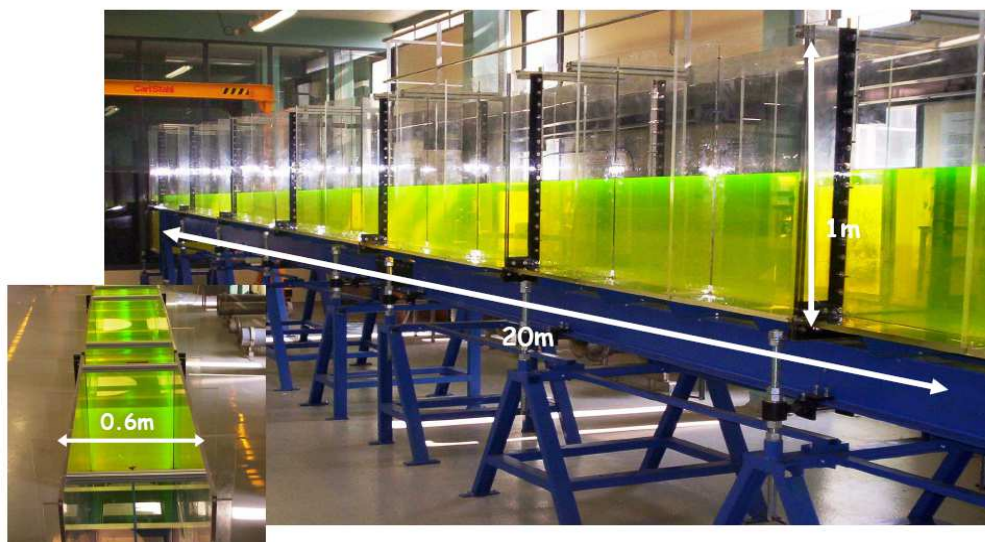


Figure 2. Canal à surface libre de l'Institut de Mécanique des Fluides et des Solides de Strasbourg

Après validation dans le canal à surface libre de l'équipe Mécanique des Fluides du Laboratoire des Sciences de l'Ingénieur, de l'Informatique et de l'Imagerie (la référence en débit est un débitmètre électromagnétique), cette méthode a été mise en œuvre avec succès sur les sites suivants :

- Le collecteur Milan à Mulhouse (Lyonnaise des Eaux) ;
- Le collecteur quai Forst à Mulhouse (Lyonnaise des Eaux) ;
- Le collecteur du Steingiessen (entrée de la station de traitement des eaux usées) à Strasbourg (Communauté Urbaine de Strasbourg) ;
- Le cours d'eau du Routhouan à Saint-Malo (Veolia).

5.2. Quelques résultats

Illustrons la méthode grâce à quelques résultats obtenus sur le collecteur du Steingiessen à Strasbourg.

Abaque d'analyse des données

La Figure 3 présente l'abaque d'analyse des données établi pour cette station de mesure.

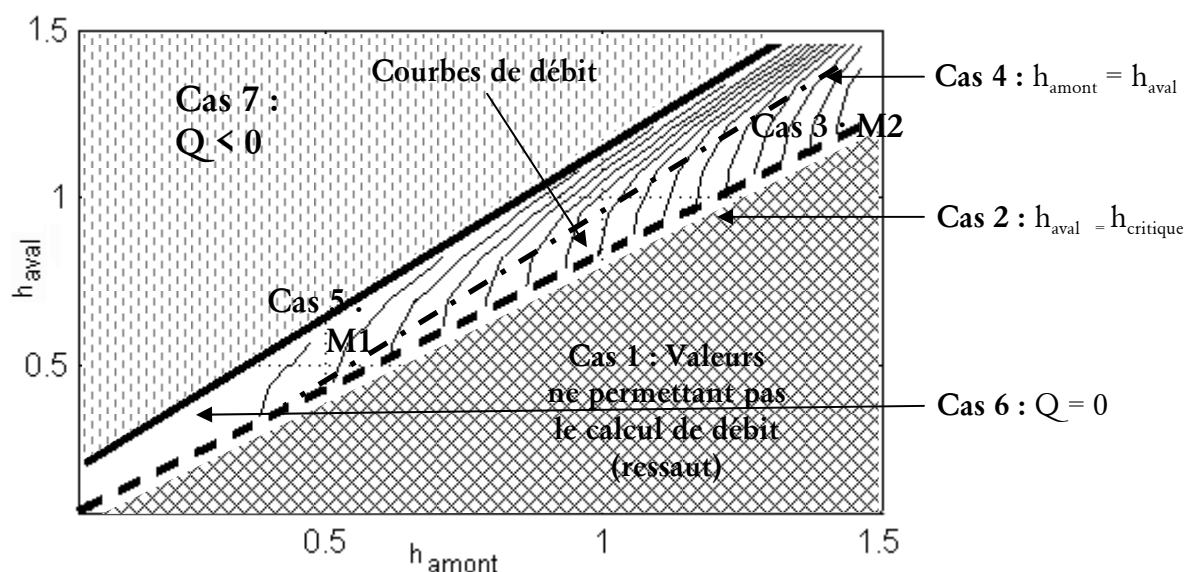


Figure 3. Abaque d'analyse des hauteurs mesurées pour le collecteur du Steingiessen :
Les courbes correspondent à différentes valeurs de débit

L'abaque met en évidence 7 comportements hydrauliques différents de l'écoulement. La superposition des points mesurés sur la Figure 3 permet l'analyse des données collectées et leur interprétation en termes de fonctionnement hydraulique du site, et dans certains cas de détecter des erreurs de mesure.

- **Cas 1** : Valeurs impossibles dans les collecteurs. En effet, l'hydraulique à surface libre dans les conduites à pente faible ne permet pas à la hauteur aval d'être inférieure à la hauteur critique. L'écoulement ne peut pas être torrentiel avec les conditions amont considérées. Il ya donc une erreur de mesure affectant au moins un des deux capteurs.
- **Cas 2** : $h_{\text{aval}} \approx h_{\text{critique}}$. En principe cette configuration ne peut pas être observée, car on évite de positionner un capteur au droit d'une section critique qui serait nécessairement associée à une chute ou une rupture vers une pente plus forte.
- **Cas 3** : Domaine situé entre $h_n \geq h_{\text{aval}} > h_{\text{critique}}$ et $h_{\text{aval}} = h_{\text{amont}}$. Cela correspond aux courbes de remous de type M2. La sensibilité de l'évaluation de débit à la précision des mesures de cotes est modérée (car les courbes iso-débits sont assez espacées).

- **Cas 4** : $h_{\text{aval}} = h_{\text{amont}}$. L'écoulement est permanent et uniforme. Ce cas est souvent transitoire entre les courbes de remous de type M1 et M2.
- **Cas 5** : Domaine situé entre $h_{\text{aval}} = h_{\text{amont}}$ et $h_{\text{amont}} + I \cdot L = h_{\text{aval}}$ avec $I =$ pente et $L =$ longueur entre h_{amont} et h_{aval} . Cela correspond aux courbes de remous de type M1 et à une grande sensibilité de l'évaluation de débit à la précision des mesures de cotes (car les courbes iso-débites sont très proches).
- **Cas 6** : Les deux mesures correspondent à la même cote altimétrique. Dans ce cas, le débit est nul.
- **Cas 7** : La cote aval est supérieure à la cote amont. Dans ce cas, la condition aux limites aval a une influence importante sur l'écoulement, entraînant un débit négatif (i.e. l'eau coule de l'aval vers l'amont). Néanmoins, cette méthodologie pourrait être réemployée avec une pente négative en inversant les conditions aux limites amont et aval.

Relation mathématique

Sur l'exemple considéré, on a calibré un réseau de neurones reliant les deux mesures de niveau d'eau à la valeur du débit, puis on l'a exprimé sous forme analytique afin de pouvoir l'implémenter dans un automate ou un superviseur.

Incertitude sur le débit

La Figure 4 illustre l'incertitude évaluée sur le débit en fonction de la différence de cote entre la mesure amont et la mesure aval. Une incertitude de 1 cm a été supposée sur la mesure de chacune des deux hauteurs. Dans ce cas, l'incertitude sur le débit devient inférieure à 20% à partir d'une différence de 3 cm ; elle devient inférieure à 10% à partir d'une différence de 6 cm, etc..

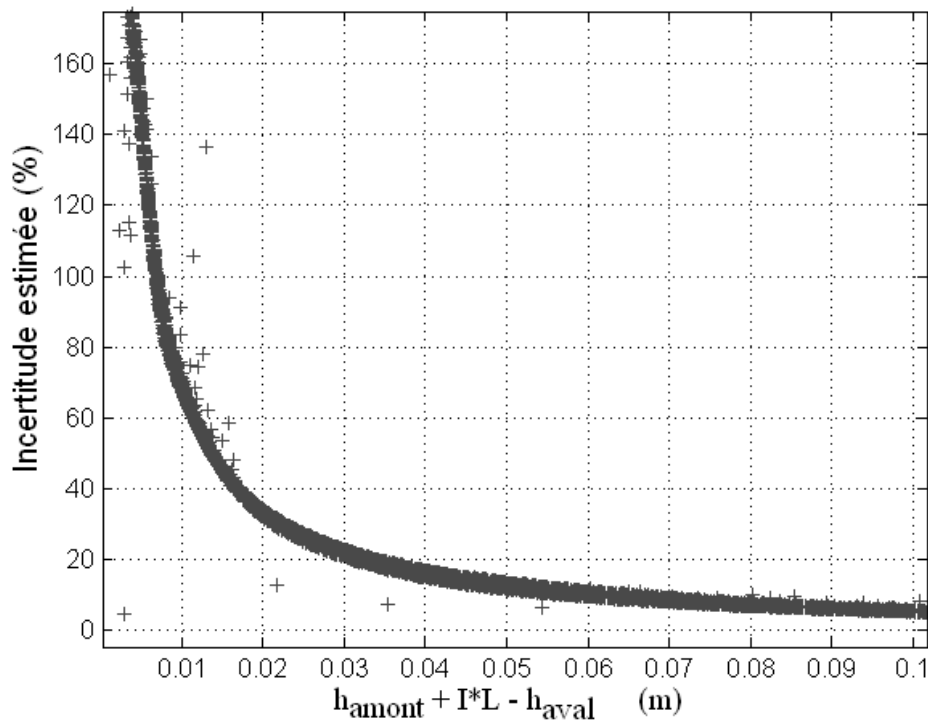


Figure 4. Incertitude sur le débit en fonction de la différence de cote entre la mesure amont et la mesure aval (et en supposant une incertitude de 1 cm sur la mesure de chaque hauteur d'eau)

6. CONCLUSION

Ce guide technique a présenté une méthode innovante de détermination du débit à partir de la mesure de deux hauteurs d'eau en collecteur. Issue de la recherche et après avoir été validée en laboratoire, cette méthode a montré son caractère opérationnel sur les quatre sites pilotes sur lesquels elle a été mise en œuvre. Elle peut à présent passer dans le domaine de l'ingénierie.

7. REFERENCES

- Vazquez J., Montandon I., Joannis C. (2006). *Instrumentation of sewage networks: assessment of water discharge from the measure of one or two water depths in transitory mode*. Proceedings of the 7th International Conference on Hydroinformatics (HIC 2006), Nice, France.
- Vazquez J., Joannis C., Zug M., (2009). *Modélisation et métrologie des déversoirs d'orage*. L'encyclopédie des Techniques de l'Ingénieur (ETI Sciences et Techniques), vol. W3, W6902.
- Isel S, Araud Q., Philippe R., Dufresne M., Vazquez J. (2012a). *Assessment of the discharge in sewer pipes using two water level measurements and the relationship of gradually varying flow*. Proceedings of the 9th International Conference on Urban Drainage Modelling (UDM 2012), Belgrade, Serbia.
- Isel S., Vazquez J., Dufresne M. (2012b). *Développement d'outils et de méthodologies pour déterminer le débit par mesures de hauteurs d'eau en collecteur de réseau d'assainissement*. Actes des 5^{èmes} Journées Doctorales en Hydrologie Urbaine (JDHU 2012), Strasbourg, France.