

Développement d'outils et de méthodologies pour déterminer le débit par mesure de hauteurs d'eau en collecteur de réseau d'assainissement

■ S. ISEL¹, Q. ARAUD¹, J. VAZQUEZ¹, M. DUFRESNE¹

Mots-clés : instrumentation, codes hydrodynamiques, collecteur, mesure de débit

Keywords: monitoring, hydroinformatics, sewer pipe, discharge determination

Introduction

L'exploitation d'un réseau d'assainissement requiert la détermination de certaines grandeurs physiques telles que le débit, la hauteur d'eau, la concentration de polluants, etc. Ces grandeurs permettent de répondre à des contraintes réglementaires (arrêté du 22 juin 2007), de gérer le réseau en temps réel ou encore d'effectuer un diagnostic du fonctionnement du réseau. Elles peuvent être déterminées soit par mesure directe, soit par évaluation indirecte en couplant la mesure d'une ou de plusieurs autres grandeurs intermédiaires à un modèle. Le choix de la technique de mesure effectuée par l'exploitant s'appuie sur différents critères parmi lesquels la maintenance (facilité et nombre réduit d'interventions humaines) occupe une place importante. L'exploitation de la mesure ainsi obtenue requiert une validation des données ainsi que l'évaluation des incertitudes (et si possible leur minimisation).

Cet article a pour objectif de présenter des méthodologies de modélisation permettant d'exploiter la connaissance hydrodynamique pour déterminer un débit à partir de mesures de hauteurs d'eau. Ces méthodologies d'instrumentation originales basées sur la mesure exclusive de hauteur(s) d'eau et intégrant l'évaluation des incertitudes ont été développées pour les collecteurs de réseau d'assainissement. Cette évaluation est rendue possible par le dévelop-

pement de modèles numériques fondés sur l'équation de la courbe de remous ou les équations unidimensionnelles de Barré de Saint-Venant. Le choix du modèle à utiliser dépend du type d'ouvrage à instrumenter ainsi que de sa complexité géométrique et hydraulique.

L'évaluation des incertitudes, et leur transmission, est couplée directement avec la technique d'instrumentation proposée. Elle tient compte de l'erreur numérique liée au code de calcul, mais également de la précision des capteurs ainsi que de la variabilité ou de la méconnaissance des conditions aux limites.

1. Présentation des méthodes

Le principe de ces méthodes de détermination du débit par mesures de hauteurs d'eau dans un collecteur est d'exploiter au maximum l'hydrodynamique 1D pour simplifier l'instrumentation et l'exploitation des mesures. L'objectif est d'établir une relation entre le débit dans une canalisation et la mesure de hauteur d'eau dans deux sections courantes distantes de quelques dizaines de mètres :

$$Q = f_{BSV}(h_{amont}, h_{aval}) \quad [\text{Équation 1}]$$

avec Q le débit transitant dans le collecteur, f_{BSV} est la formule de Barré de Saint-Venant, h_{amont} la hauteur mesurée avec le capteur amont et h_{aval} la hauteur d'eau à l'aval.

Ces techniques de débitmétrie sont principalement destinées aux ouvrages présentant des conditions aux limites complexes, variables ou indéterminées, notamment à l'aval. Elles se distinguent ainsi des autres relations hauteurs/débit connues, telles que

¹ Institut de mécanique des fluides et des solides (IMFS) / École nationale du génie de l'eau et de l'environnement de Strasbourg – Laboratoire Icube – 2, rue Boussingault – 67000 Strasbourg.
Courriel : sandra.isel@engees.u-strasbg.fr

celle de Manning-Strickler ou encore la relation de Jones, qui ne permettent pas de tenir compte de ces influences [VAZQUEZ *et al.*, 2006].

Plusieurs conditions doivent néanmoins être remplies pour utiliser ces méthodologies :

- les paramètres géométriques (forme, pente, diamètre...) doivent, idéalement, être constants entre les deux mesures de hauteurs d'eau. Des variations graduelles sont théoriquement admissibles, si tant est que la singularité est connue et intégrable en tant que terme source dans l'équation ;
- le collecteur ne doit présenter aucune connexion latérale entre les deux appareils de mesure. En effet, le débit doit être le même sur l'ensemble de la section étudiée.

Remarque : les méthodologies présentées dans cet article sont principalement destinées aux écoulements fluviaux. Dans le cas d'un écoulement torrentiel, l'écoulement atteint très rapidement la hauteur normale, ce qui permet une instrumentation plus simple avec une seule mesure de hauteur d'eau.

1.1. Méthodologie générale fondée sur les équations de Barré de Saint-Venant (BSV)

La méthodologie fondée sur les équations de Barré de Saint-Venant (équation 2) présente un cadre d'application très général. Ce système d'équations est constitué de deux relations, la première traduisant la conservation de la masse (équation de la continuité) et la seconde la conservation de la quantité de mouvement [GUINOT, 2010].

$$\left\{ \begin{array}{ll} \frac{\partial S}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = 0 & \text{Équation de la continuité} \\ \frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{Q^2}{S} \right) + g \cdot S \cdot \frac{\partial h}{\partial x} = g \cdot S \cdot (I - J) & \text{Équation de la quantité de mouvement} \end{array} \right.$$

[Équation 2]

où Q : débit (m^3/s), x : abscisse le long du collecteur (m), t : temps (s), J : pente énergétique (m/m), I : pente du fond (m/m), S : section transversale (m^2), g : accélération gravitationnelle (m/s^2), h : hauteur d'eau (m).

La résolution numérique de ces équations alliée au traitement des conditions aux limites par la méthode des caractéristiques permet de déterminer le débit en

connaissant la hauteur d'eau à l'amont et à l'aval du canal à chaque pas de temps. Cette résolution est effectuée à l'aide d'un outil de calcul développé à partir d'un schéma numérique stable de type *total variation diminishing* implicite (TVD). Cette méthode a été validée lors d'une étude précédente [VAZQUEZ, 2006] par comparaison avec une campagne expérimentale réalisée dans le canal hydraulique de l'Institut de mécanique des fluides et des solides de Strasbourg (France).

Pour être appliquée à l'évaluation des débits, cette méthode implique donc de mesurer le tirant d'eau en deux sections d'un canal de géométrie connue, suffisamment éloignées pour que les erreurs de mesure ne masquent pas les différences de cote du niveau d'eau. Elle est divisée en deux étapes :

- modélisation 1D du site à partir des paramètres géométriques du collecteur. La taille du pas d'espace, qui dépend de la distance entre les deux capteurs, est choisie de sorte à obtenir un résultat indépendant du maillage ;
- simulation 1D de l'écoulement en utilisant les hauteurs d'eau mesurées à l'amont et à l'aval comme conditions aux limites du code hydrodynamique ; les débits au centre du tronçon sont calculés.

Cette méthode présente de bons résultats, mais requiert des moyens techniques et humains importants pour la mise en place et l'utilisation de l'outil de calcul permettant de résoudre les équations de BSV, qui sera forcément externe au superviseur.

1.2. Méthodologie simplifiée et implémentable : équation de la courbe de remous

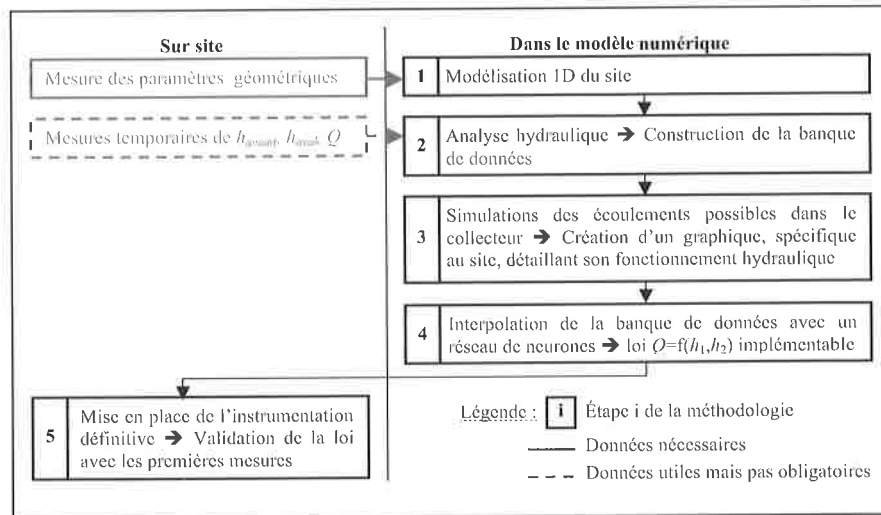
Le caractère opérationnel de la méthodologie générale utilisant les équations de Barré de Saint-Venant est donc limité par la puissance de calcul importante qu'elle requiert. De ce fait, une méthodologie simplifiée, plus facilement applicable sur site, mais néanmoins valide dans le cas où les effets transitoires sont négligeables, a été développée [ISEL *et al.*, 2012]. La condition permettant de considérer comme négligeables des effets transitoires (faibles variations temporelles de l'écoulement) doit être satisfaite.

Ainsi, au lieu de s'intéresser aux équations hyperboliques de Barré de Saint-Venant, le code ne résoudra plus que l'équation différentielle de la courbe de remous (équation 3) [CHOW, 1959] associée à l'écoulement dans le collecteur :

$$\left\{ \begin{array}{l} \cancel{\frac{\partial Q}{\partial t}} + \frac{\partial Q}{\partial x} = 0 \\ \cancel{\frac{\partial Q}{\partial t}} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{Q^2}{S} \right) + g \cdot S \cdot \frac{\partial h}{\partial x} = g \cdot S \cdot (I - J) \end{array} \right. \xrightarrow{\text{entraîne}} \boxed{\frac{\partial h}{\partial x} = \frac{I - J}{(1 - Fr^2)}} \quad [\text{Équation 3}]$$

où I est la pente du fond en m/m, J la pente énergétique (m/m), Fr le nombre de Froude, h la hauteur d'eau (m) et x l'abscisse le long du collecteur (m). La pente énergétique de cette équation peut être calculée en utilisant la relation de Manning-Strickler.

Cette méthodologie simplifiée est divisée en plusieurs étapes présentées dans l'organigramme de la figure 1 et détaillées par la suite.



h_{amont} : hauteur mesurée avec le capteur amont ; h_{aval} : hauteur d'eau à l'aval.

Figure 1. Organigramme présentant les cinq étapes de la méthodologie simplifiée et leur lieu de mise en place

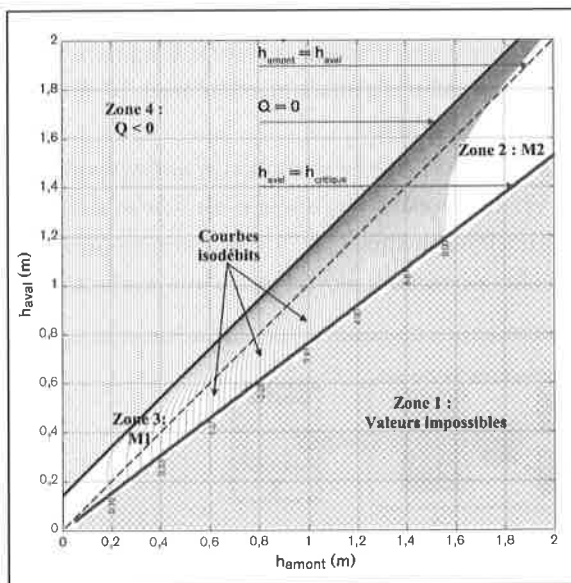
- Étape 1. Modélisation 1D du site - même étape que pour la méthode BSV.
- Étape 2. Analyse hydraulique. Cette étape consiste à déterminer les valeurs de h_{amont} , h_{aval} et Q pouvant

apparaître dans le collecteur ainsi que leur gamme de variation afin de construire une banque de données.

- Étape 3. Simulations de l'écoulement dans le collecteur avec le modèle 1D en tenant compte de l'ensemble des combinaisons de conditions aux limites possibles, c'est-à-dire : la gamme de variabilité de h_{amont} , h_{aval} et Q préalablement définie est balayée ; création d'un abaque, similaire à la figure 2, spécifique au site.

Cet abaque met en évidence différents comportements hydrauliques de l'écoulement :

- zone 1 : $h_{\text{aval}} < h_{\text{critique}}$. Valeurs impossibles dans le cas des collecteurs à pente faible et dont l'écoulement est fluvial. En effet, l'hydraulique à surface libre introduit la notion de hauteur critique, caractéristique d'un nombre de Froude égale à 1 et définissant la limite entre le régime d'écoulement fluvial ($h_{\text{aval}} > h_{\text{critique}}$) et torrentiel ($h_{\text{aval}} < h_{\text{critique}}$) ;
- transition 1 : $h_{\text{aval}} = h_{\text{critique}}$. Si cette relation est atteinte, la condition aux limites aval correspond à une chute ou à une discontinuité de la surface libre appelée « ressaut » ;



Cet abaque spécifique au site étudié s'exploite en lecture directe. À partir des mesures de hauteurs d'eau à l'amont et à l'aval du collecteur, il est possible de déterminer le débit circulant en identifiant la courbe d'isodébit correspondante à ce point de mesure.

Figure 2. Abaque présentant le débit en fonction de la hauteur d'eau à l'aval (h_{aval}) et de la hauteur mesurée avec le capteur amont (h_{amont})

- zone 2 : domaine situé entre $h_{aval} = h_{critique}$ et $h_{aval} = h_{amont}$. Cela correspond aux courbes de remous de type M2 [HAGER, 1999], typique d'un écoulement fluvial dans un canal descendant ($I > 0$) à pente faible sans influence aval (figure 3) ;
- transition 2 : $h_{aval} = h_{amont}$. L'écoulement est permanent et uniforme. Ce cas est souvent éphémère entre les courbes de remous de types M1 et M2 ;
- zone 3 : domaine situé entre $h_{aval} = h_{amont}$ et $h_{amont} + I^*L = h_{aval}$ avec I = pente et L = longueur entre h_{amont} et h_{aval} . Cela correspond aux courbes de remous de type M1, typique d'un écoulement fluvial dans un canal descendant ($I > 0$) à pente faible avec influence aval (figure 3) ;
- transition 3 : $h_{amont} + I^*L = h_{aval}$. Dans ce cas, le débit est nul ;
- zone 4 : $h_{amont} + I^*L < h_{aval}$. Dans ce cas, la condition aux limites aval est tellement importante qu'elle entraîne un débit négatif (c'est-à-dire l'eau coule de l'aval vers l'amont).

• Étape 4. Interpolation de la banque de données à l'aide d'un réseau de neurones [MATLAB, 2011]. L'objectif de ce réseau de neurones est d'approximer

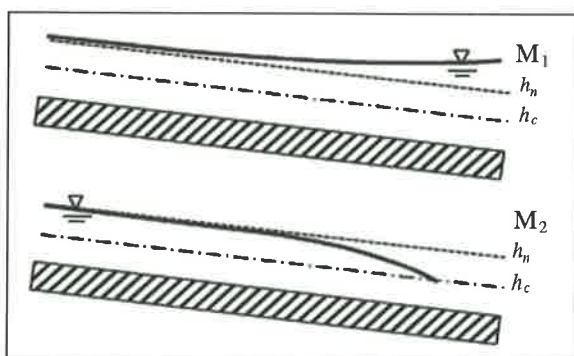


Figure 3. Allure des courbes de remous en canal descendant à pente faible avec influence aval (M1) et sans (M2)

la fonction inconnue $Q = f(h_{amont}, h_{aval})$, régissant la banque de données, à l'aide d'une succession de n couches (appelées « neurones ») dont chacune prend les entrées sur les sorties de la précédente. Au final, la fonction à déterminer correspond à une somme pondérée des deux variables d'entrées (les « inputs » normalisés au préalable : h_{amont} et h_{aval}) et d'une constante, effectuée dans chacun des multiples neurones qui composent le réseau (figure 4). Ce neurone peut d'ailleurs être activé ou non selon la fonction d'activation. L'objectif de l'apprentissage (phase principale de l'utilisation d'un réseau de neurones) est d'optimiser le choix des différents coefficients pondérateurs de chaque neurone du réseau de manière à approcher au mieux la valeur de la variable de sortie (l'« output » normalisé au préalable : Q).

Le nombre n de neurones composant le réseau est déterminé grâce à un compromis entre une optimisation correcte du critère de performance du réseau de neurones (par exemple, l'erreur quadratique moyenne) et un bon paramétrage du problème (éviter le surapprentissage).

L'utilisation d'un tel réseau de neurones requiert trois phases successives :

- l'apprentissage du réseau de neurones, réalisé par exemple à l'aide de l'algorithme de Levenberg-Marquardt [MATLAB, 2011], considéré comme l'un des plus rapides utilisant la rétropropagation. Cette étape nécessite l'utilisation d'environ 70 % de la donnée disponible ;
- la validation visant à minimiser le surapprentissage et vérifier ainsi la pertinence du réseau avec des échantillons inédits. Les 15 % de données prévues à cet effet permettent de vérifier qu'une diminution de

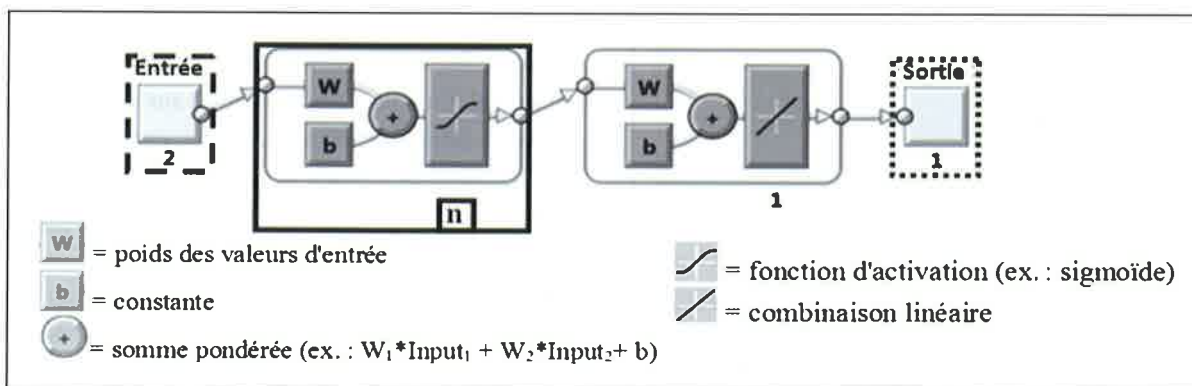


Figure 4. Architecture d'un réseau de neurones

l'erreur de prédiction du réseau sur les données d'apprentissage entraîne effectivement une diminution sur l'ensemble des données (notamment celles qui n'ont pas servi lors de la première étape). En effet, on parle de surapprentissage lorsque le réseau continue à améliorer ses performances sur les échantillons d'apprentissage, mais perd son pouvoir de prédiction sur ceux provenant de la validation. Dans ce cas, il est nécessaire d'arrêter la phase d'apprentissage, de diminuer la taille du réseau de neurones et de recommencer l'apprentissage ;

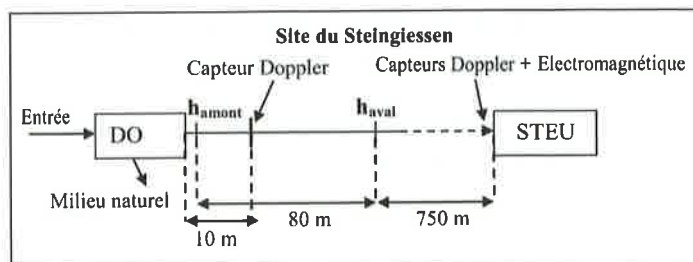
- la phase de test correspondant à l'évaluation du pouvoir de prédiction du réseau de neurones. Ainsi, on applique le réseau de neurones aux données restantes (soit 15 % du pool de départ), écartées délibérément des échantillons d'apprentissage et de validations et dont on connaît la valeur de sortie associée. Une fois ces trois phases réalisées, la fonction d'interpolation de la banque de données est facilement identifiable (issue de l'optimisation des coefficients pondérateurs lors de l'étape d'apprentissage). Cette loi paramétrée peut être utilisée directement et intégrée dans le superviseur sans passer par un moteur de calcul.

- Étape 5. Enfin, il s'agit de tester la relation hauteurs/débit issue du réseau de neurones sur des chroniques de mesure du site afin d'ajuster éventuellement le zéro des capteurs l'un par rapport à l'autre et valider ce calage sur toute la durée de la chronique. Cette étape de validation de la loi inclut parfois un filtrage des données d'entrée et notamment des incohérences hydrauliques (par exemple des points situés dans la zone 1 de l'abaque présenté dans la figure 2). Dans ce cas, un algorithme de lissage robuste basé sur le calcul de la médiane mobile d'ordre 10 peut, par exemple, être utilisé [MATLAB, 2011].

2. Application à un collecteur : comparaison des deux méthodes

2.1. Le site réel du « Steingiesen »

Les deux méthodologies proposées ci-dessus ont été testées sur le collecteur du Steingiesen de la communauté urbaine de Strasbourg (CUS) (figure 5). Ce collecteur unitaire est caractérisé par une forme circulaire et un diamètre de 2,62 m. De plus, sa pente moyenne est faible (0,178 %). Le coefficient de Manning-Strickler a été évalué à 60. Nous disposons



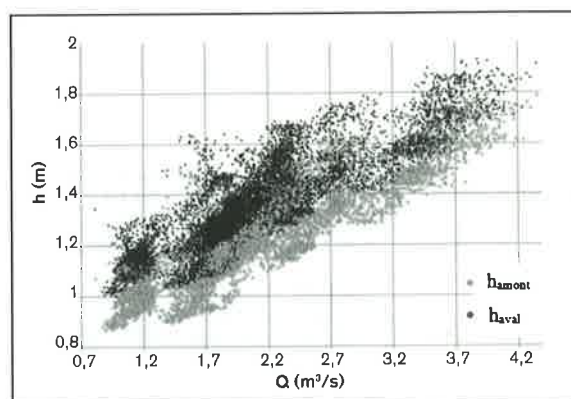
DO : déversoir d'orage ; STEU : station de traitement des eaux usées ; h_{amont} : hauteur mesurée avec le capteur amont ; h_{aval} : hauteur d'eau à l'aval.

Figure 5. Schéma de présentation du site du Steingiesen. Caractéristiques physiques et instrumentation

pour ce site de deux mesures de hauteur d'eau (amont et aval) localisées à 80 m de distance l'une de l'autre. Le pas de temps d'acquisition de ces mesures est de 2 minutes. En outre, ce collecteur répond bien aux conditions d'utilisation des méthodologies proposées, puisqu'il ne présente pas d'apport latéral, ni de rupture de pente ou de géométrie entre les deux appareils de mesure.

Enfin, étant donné sa situation stratégique dans la collectivité de la CUS, ce collecteur a été surinstrumenté à l'aide de trois débitmètres (un doppler dans le collecteur, ainsi qu'un électromagnétique et un doppler à la station d'épuration) afin de sécuriser la mesure du débit. Seule la mesure du débitmètre électromagnétique sera utilisée comme référence par la suite, car c'est elle qui est la plus précise.

L'analyse des données disponibles a permis de mettre en évidence la non-bijektivité de la relation liant les hauteurs d'eau au débit (figure 6). Ce comportement est dû à une influence aval de la station d'épuration sur l'écoulement dans le collecteur.



L'analyse de données permet de mettre en évidence la non-bijektivité de la relation hauteur-débit (que ce soit pour la hauteur amont ou la hauteur aval). Cette grande variabilité des conditions aux limites du collecteur justifie donc l'utilisation des équations de Barré de Saint-Venant ou de la courbe de remous.

Figure 6. Analyse de données : hauteur amont (h_{amont}) et hauteur aval (h_{aval}) en fonction du débit

2.2. Application des méthodologies et comparaison des résultats

2.2.1. Méthodologie basée sur les équations de Barré de Saint-Venant

Dans un premier temps, le site a été modélisé dans le code numérique en tenant compte des paramètres géométriques moyens.

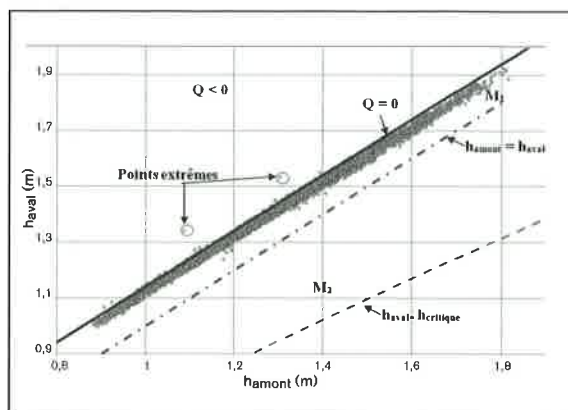
Le collecteur a été divisé à l'aide de 100 pas d'espace de 0,8 m. Puis, dans un second temps, les simulations 1D de l'écoulement ont pu être réalisées en utilisant les hauteurs d'eau mesurées à l'amont et à l'aval comme conditions aux limites du code hydrodynamique ; les débits au centre du tronçon ont été calculés et comparés aux mesures de débit disponibles (figure 8).

Remarque : du fait de la difficulté de mesurer les hauteurs d'eau par rapport à un même niveau de référence, les niveaux des capteurs ont dû être ajustés. Dans l'exemple présenté, 1,5 cm a été ôté à la hauteur aval et 0,7 cm ajouté à la hauteur amont.

2.2.2. Méthodologie basée sur la courbe de remous

L'analyse des données disponibles du Steingiessen permet d'émettre l'hypothèse d'effets transitoires faibles, ce qui justifie l'utilisation possible de la courbe de remous. Une quantification précise de la limite d'application de cette méthode sera investiguée dans le futur.

La méthodologie simplifiée nécessite une analyse hydraulique du site, couplée à une analyse des données disponibles. Celles-ci ont permis d'identifier la gamme de variation de h_{amont} , h_{aval} et Q (h_{amont} et h_{aval} entre 0,05 et 2,5 m et Q entre 0,05 et 8 m³/s). Ces



Abaque spécifique au site du Steingiessen permettant de caractériser la fonction hydraulique du collecteur et d'identifier le débit pour chacun des points de mesure de cette campagne de 15 jours.

Figure 7. Analyse de données : abaque des débits en fonction de hauteur aval (h_{aval}) et hauteur amont (h_{amont})

résultats ont permis la création de l'abaque suivant (figure 7), spécifique au site du Steingiessen, présentant les courbes isodébits transitant dans le collecteur en fonction des hauteurs à l'amont et à l'aval du collecteur. Cet abaque permet également l'identification du comportement hydraulique de l'ouvrage. En l'occurrence, l'écoulement du Steingiessen a suivi une courbe de remous de type M1 avec une forte influence aval sur la période de 15 jours considérée (figure 7).

L'abaque a ensuite été interpolé à l'aide d'un réseau de neurones présentant une architecture constituée de deux entrées (h_{amont} et h_{aval}) et une sortie (Q) ainsi que 18 neurones placés en réseau. À la suite de l'apprentissage, de la validation et du test du réseau de neurones, une relation hauteurs-débit implémentable dans un capteur a été identifiée. La relation obtenue est valable pour $(H_{amont} + I \cdot L) \geq H_{aval}$ et se présente sous la forme :

$$\text{Débit} = 3,975 \cdot \left[\begin{array}{l} -16,636 \cdot \text{tansig}(-3,115 \cdot (H_{amont_norm}) + 4,694 \cdot (H_{aval_norm}) - 1,606) \\ + 0,712 \cdot \text{tansig}(2,205 \cdot (H_{amont_norm}) + 0,047 \cdot (H_{aval_norm}) - 1,891) \\ \dots \\ + 0,009 \cdot \text{tansig}(4,305 \cdot (H_{amont_norm}) - 7,015 \cdot (H_{aval_norm}) - 2,425) \\ - 31,581 \cdot \text{tansig}(1,659 \cdot (H_{amont_norm}) + 0,389 \cdot (H_{aval_norm}) + 5,106) \\ - 32,130 \end{array} \right] + 4,025$$

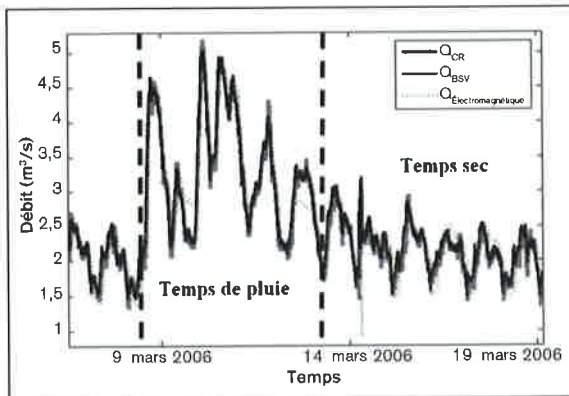
1^{er} neurone
18 neurones
18^e neurone

avec : $\text{tansig}(X)$ (fonction tangente sigmoïde) = $2/(1 + \exp(-2 \cdot X(H_{amont_norm}, H_{aval_norm}))) - 1$

H_{amont_norm} : H_{amont} normalisée ; H_{aval_norm} : H_{aval} normalisée.

Les résultats ont été comparés par la suite à ceux issus de la méthode générale, basée sur les équations de Barré de Saint-Venant (figure 8).

2.2.3. Comparaison des méthodologies entre elles et par rapport aux données disponibles



Comparaison entre les deux méthodologies de détermination du débit et les mesures disponibles du mois de mars 2006. Les deux débits simulés – débit calculé à partir de la courbe de remous (Q_{CR}) et débit calculé avec les équations de Barré de Saint-Venant (Q_{BSV}) – reproduisent bien le temps sec ainsi que le temps de pluie et semblent bien suivre l'évolution du débit mesuré de référence ($Q_{Electromagnétique}$). De plus, l'hypothèse des faibles effets transitoires semble adaptée au vu des résultats similaires entre la méthodologie générale avec BSV et la méthodologie simplifiée.

Figure 8. Débit en fonction du temps

Par la suite, l'erreur entre les différents résultats a été calculée à partir de l'équation 4 :

$$\left| \frac{Q - Q_{ref}}{Q_{ref}} \right| \quad [\text{Equation 4}]$$

Les débits simulés par les deux méthodologies (Barré de Saint-Venant et courbe de remous) sont quasi identiques

avec une erreur moyenne de 2 % et un écart type sur l'erreur de 3,5 % ($Q_{ref} = Q_{BSV}$). Ces résultats semblent donc confirmer l'hypothèse selon laquelle les effets transitoires dans le collecteur sont faibles : le cadre d'application plus restreint de la méthodologie de la courbe de remous est respecté.

De plus, en comparant les résultats des deux méthodologies au débit mesuré de référence ($Q_{ref} = Q_{Electromagnétique}$), l'erreur moyenne observée est de 8 % dans les deux cas, avec un écart type de 14,5 %.

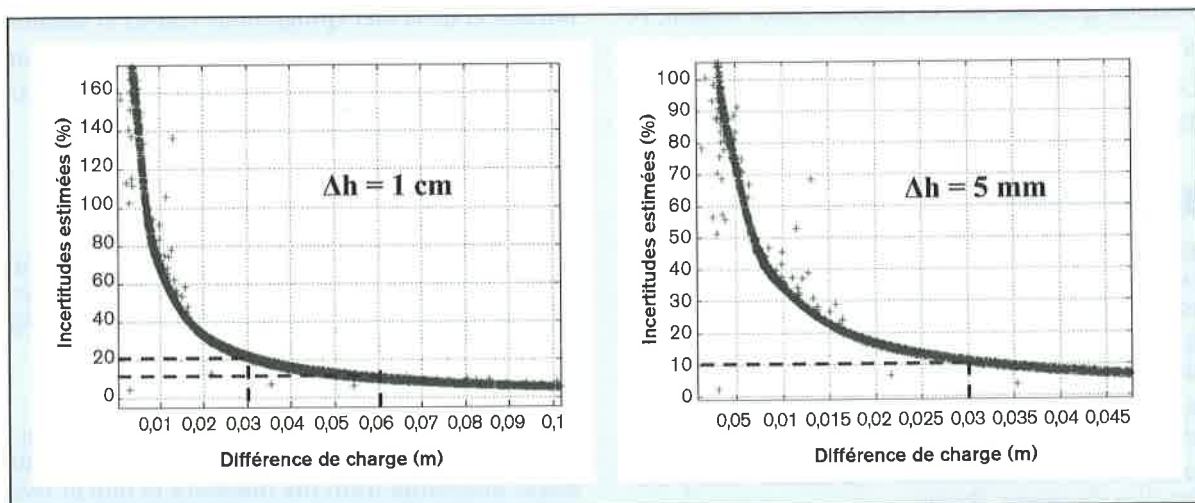
Remarque: dans le cas présent, aucune filtration des données d'entrée (peu bruitées) n'a été nécessaire.

3. Incertitudes

L'incertitude de la relation hauteur-débit issue de l'application de la méthode simplifiée peut être estimée grâce à la loi de propagation des incertitudes décrite ci-dessous [BERTRAND-KRAJEWSKI *et al.*, 2000] :

$$\frac{\Delta Q}{Q} = \frac{\sqrt{\left(\frac{\partial Q}{\partial h_{amont}} \right)^2 \cdot (\Delta h_{amont})^2 + \left(\frac{\partial Q}{\partial h_{aval}} \right)^2 \cdot (\Delta h_{aval})^2}}{Q} \quad [\text{Equation 5}]$$

Cette incertitude dépend de la précision des capteurs de hauteur d'eau ($\Delta h_{amont} = \Delta h_{aval} = \Delta h$). Ainsi, dans le cas particulier du Steingiesse, elle a été calculée avec deux sensibilités différentes (figure 9).



Incertitudes estimées en fonction de la différence de charge ($h_{amont} + l \cdot L - h_{aval}$) en considérant une sensibilité du capteur de hauteur d'eau de 1 cm (graphique de gauche) ou de 5 mm (graphique de droite).

Figure 9. Incertitudes liées à la méthodologie « courbe de remous » selon la sensibilité des capteurs

En considérant une précision du capteur de hauteur d'eau de 1 cm, une différence de ligne piézométrique de 3 cm entre l'amont et l'aval du dispositif entraîne une incertitude de 20 % alors qu'elle n'est plus que de 12 % pour une différence de ligne piézométrique de 6 cm. En considérant un capteur précis à 0,5 cm, l'incertitude est divisée par deux et 3 cm de différence de ligne piézométrique ne correspond plus qu'à 10 % d'incertitude. Bien sûr, plus la différence de ligne piézométrique augmente, plus l'incertitude de cette méthodologie diminue.

Conclusions

Deux méthodologies de modélisation permettant d'exploiter la connaissance hydrodynamique pour déterminer un débit à partir de mesures de hauteurs d'eau dans un collecteur de réseau d'assainissement ont été développées. Cette nouvelle technique de mesure permet de s'affranchir des problèmes de maintenance associée à la débitmétrie plus « classique » (doppler, etc.). De plus, ces méthodologies ne nécessitent pas d'étalonnage et les données nécessaires à leur mise en place sont facilement identifiables (pente, diamètre, géométrie du collecteur, etc.). Les deux procédures ont été décrites dans un cadre général pour permettre l'instrumentation des collecteurs à pente faible, dont les conditions aux limites sont inconnues ou variables et présentant un régime d'écoulement fluvial. Elles ont par la suite été appliquées au cas concret du Steingiessen permettant ainsi de comparer les résultats obtenus avec la méthode générale, dite de Barré de Saint-Venant, et la méthode simplifiée de la courbe de remous.

Cette méthodologie simplifiée ne s'applique qu'en cas d'effet transitoire faible et permet, en outre, d'identi-

fier le comportement hydraulique de l'écoulement au travers de la création d'un abaque spécifique à l'ouvrage étudié. Cet abaque permet d'identifier graphiquement le débit circulant au sein du collecteur, ainsi que le sens de circulation de l'écoulement et même une éventuelle saturation d'un des deux capteurs. L'interpolation de cet abaque à l'aide d'un réseau de neurones permet finalement l'identification d'une relation hauteurs-débit implémentable dans un capteur. Au final, l'incertitude de cette technique de mesure peut être estimée compte tenu de la précision des capteurs et de la différence de hauteurs piézométriques entre les deux extrémités de l'appareil de mesure. Cela permet de conclure que cette méthode est utilisable à partir de quelques centimètres de différence entre l'amont et l'aval ; le positionnement des capteurs peut éventuellement être modifié pour remplir cette condition.

Remerciements

Nous remercions la communauté urbaine de Strasbourg et en particulier M. Philippe R. pour avoir permis l'application à un site grandeur nature. Une reconnaissance particulière est également exprimée envers la région Alsace qui a contribué financièrement au succès de cette étude. Enfin, ce travail s'inscrit dans le cadre de deux projets nationaux, impliquant de nombreux partenaires, appelés Coachs (pour Computations and their Applications in Channel Hydraulics for Sewers) financé par le ministère français de l'Écologie, de l'Énergie, du Développement durable et de la Mer (programme C2D2) et Mentor (pour Measurement Sites Conception Method for Sewer Networks), financé par l'Agence nationale française de la recherche (ANR).

Bibliographie

- BERTRAND-KRAJEWSKI J.-L., LAPLACE D., JOANNIS C., CHEBBO G. (2000) : *Mesures en hydrologie urbaine et assainissement*. Éd. Tec & Doc Lavoisier, Paris, 793 p.
- CHOW V.T. (1959) : *Open-channel hydraulics*. McGraw-Hill, New York.
- GUINOT V. (2010) : *Wave propagation in fluids: models and numerical techniques*, ISTE, London, UK.
- HAGER W.H. (1999) : *Wastewater Hydraulics: Theory and Practice*. Springer, Berlin.
- ISEL S., ARAUD Q., PHILIPPE R., DUFRESNE M., VAZQUEZ J. (2012) : « Assessment of the discharge in sewer

pipes using two water level measurements and the relationship of gradually varying flow ». *9th International Conference on Urban Drainage Modelling UDM 2012*, Belgrade, Serbia, 10 p.

MATLAB (2011). *User's Guide*. The MathWorks.

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 ». *7th International Conference on Hydroinformatics HIC 2006*, Nice, France, 8 p.

Résumé

S. ISEL, Q. ARAUD, J. VAZQUEZ, M. DUFRESNE

Développement d'outils et de méthodologies pour déterminer le débit par mesures de hauteurs d'eau en collecteur de réseau d'assainissement

Cet article présente deux méthodologies de détermination du débit à partir de mesures de hauteurs d'eau dans un collecteur de réseau d'assainissement. Les techniques proposées sont fondées sur des modèles numériques qui tiennent compte de la complexité hydraulique du site de mesure, et en particulier de la variabilité des conditions hydrauliques amont et aval. Ces conditions peuvent en effet induire une relation non bijective entre le débit et la hauteur d'eau. La première méthodologie est fondée sur les équations de Barré de Saint-Venant ; elle tient compte des effets transitoires, mais requiert un investissement humain et matériel assez important. La seconde méthodologie est une simplification de la première : dans le cas où les effets transitoires sont négligeables (très souvent le cas dans un

réseau d'assainissement où les variations sont relativement lentes), les équations de la courbe de remous sont utilisables ; cette méthode est plus facilement applicable sur site. La méthode de détermination du débit par mesures de hauteurs d'eau ainsi élaborée passe par la création d'un réseau de neurones permettant l'identification d'une relation hauteurs-débit directement implémentable dans un transmetteur. De plus, cette approche permet la qualification du comportement hydraulique du collecteur ainsi qu'une estimation des incertitudes correspondantes. Une fois les deux méthodes présentées, l'article s'attache à leur application sur le « Steingiessen », un collecteur du réseau d'assainissement de Strasbourg. Les résultats sont comparés entre eux et aux mesures disponibles.

Abstract

S. ISEL, Q. ARAUD, J. VAZQUEZ, M. DUFRESNE

Development of tools and methodologies to assess the discharge in sewer pipes using two water level measurements

This article deals with two methodologies to assess the discharge in sewer pipes using water-level measurements. These proposed methodologies are based on numerical models that take into account the hydraulic complexity of the measurement site, in particular the variability of the up- and downstream hydraulic conditions. These conditions often lead to a non-bijective relationship between the discharge and the water level. The first methodology is based on the Shallow water equations (SW); it takes the transient effect into account but requires quite a lot of material and human means. The second methodology is a simplification of the first one: considering low transient effects (which is often the case in sewer networks where the temporal variations are slow), the Gradually Varying Flow

equations (GVF) are applicable. This method is more easily applicable on site. This method to assess the discharge using water level measurements goes through the building of a neural network which leads to the identification of a height-discharge relationship directly implementable in a sensor transmitter. Moreover, this approach enables a qualification of the hydraulic behaviour considering the available water depth measurements and an estimation of its related uncertainties. Once these methodologies have been introduced, this article aims at presenting their application on a real-life pipe located in the sewer network of Strasbourg (France), named "Steingiessen". The results have been compared with each other and with the available discharge measurements.