



HAL
open science

Méthode h2Q : Une méthode innovante pour évaluer le débit en collecteur par la mesure de deux hauteurs d'eau

Sandra Isel, José Vazquez, Matthieu Dufresne, Martin Fischer, Claude Joannis

► To cite this version:

Sandra Isel, José Vazquez, Matthieu Dufresne, Martin Fischer, Claude Joannis. Méthode h2Q : Une méthode innovante pour évaluer le débit en collecteur par la mesure de deux hauteurs d'eau. [Rapport de recherche] IFSTTAR - Institut Français des Sciences et Technologies des Transports, de l'Aménagement et des Réseaux. 2016, 24p. hal-01884540

HAL Id: hal-01884540

<https://hal.science/hal-01884540>

Submitted on 1 Oct 2018

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



Méthodologie et outils opérationnels de conception et de qualification de sites de mesures en réseau d'assainissement.

PROJET MENTOR GUIDE TECHNIQUE

Méthode h2Q : Une méthode innovante pour évaluer le débit en collecteur par la mesure de deux hauteurs d'eau

Auteurs : Sandra Isel ¹, José Vazquez ^{2,3,5}, Matthieu Dufresne ^{2,3,5}, Martin Fischer ^{2,3,5}, Claude Joannis ^{4,5}

¹ 3D EAU – www.3deau.fr

² Ecole Nationale du Génie de l'Eau et de l'Environnement de Strasbourg (ENGEES) – <https://engees.unistra.fr>

³ Laboratoire des Sciences de l'Ingénieur, de l'Informatique et de l'Imagerie (ICube), Equipe Mécanique des Fluides – <https://icube.unistra.fr>

⁴ Institut Français des Sciences et Technologies des Transports, de l'Aménagement et Des Réseaux (IFSTTAR) – <http://www.ifsttar.fr>

⁵ Groupement pour l'Evaluation des Mesures en Continu dans les Eaux et en Assainissement (GEMCEA)– <http://www.gemcea.org>

I. Avant-propos

Ce guide technique est un livrable du projet MENTOR acronyme de « MEasurement sites conception method for sewer NeTWORKs » (en Français : Méthodologie et outils opérationnels de conception et de qualification de sites de mesures en réseau d'assainissement). Ce projet a été financé par l'Agence Nationale de la Recherche (ANR) dans le cadre du programme ECOTECH Edition 2011 et s'est déroulé sur la période 2012 – 2016.

La méthode h2Q a été mise au point au cours de la thèse de doctorat de Sandra Isel au sein du laboratoire ICube (thèse soutenue en janvier 2014) et a, dans ce cadre, fait l'objet de plusieurs publications (Isel et al. [2012], Isel et al. [2013]). Cette thèse a bénéficié du soutien financier du projet COACHS (projet C2D2 conduit entre 2010 et 2013) et du projet MENTOR décrit ci-dessus.

Le développement de la méthode h2Q a conduit à la création d'un savoir-faire protégé par le laboratoire ICube. Ce savoir-faire est actuellement utilisé dans le cadre d'un contrat de licence par la startup 3D EAU.

Date : 4/02/2016

Contact : sandra.isel@3deau.fr , jose.vazquez@engees.unistra.fr,
matthieu.dufresne@engees.unistra.fr

SOMMAIRE

| | | |
|------|---|----|
| I. | Avant-propos..... | 2 |
| I. | Introduction | 4 |
| 1. | Objectif du guide | 4 |
| 2. | Contenu du guide | 4 |
| 3. | Problématiques de la mesure en collecteur | 4 |
| 3.1. | Contexte : exploitation des réseaux et problématiques | 4 |
| 3.2. | Panorama des technologies existantes | 4 |
| II. | Solution h2Q : présentation de la méthode | 8 |
| 1. | Principe de mesure..... | 8 |
| 2. | Conditions d'application | 8 |
| 3. | Procédure de mise en application..... | 9 |
| 4. | Bénéfices | 10 |
| 4.1. | En termes d'investissement..... | 10 |
| 4.2. | En termes d'exploitation..... | 10 |
| 4.3. | En termes de fiabilité | 10 |
| III. | Exemples d'application | 11 |
| 1. | Caractéristiques des sites équipés | 11 |
| 2. | Résultats..... | 13 |
| 2.1. | Utilisation directe de la méthode : évaluation du débit et estimation de l'incertitude..... | 13 |
| 2.2. | Utilisation experte de la méthode h2Q : diagnostic permanent de la station de mesure et détection des erreurs de mesure | 15 |
| 2.3. | Bilan sur l'application sur les sites : comparaison à d'autres technologies..... | 17 |
| IV. | Conclusion | 20 |
| V. | Annexes..... | 21 |
| 1. | Procédure détaillée d'application de la méthode..... | 21 |
| 1.1. | Etude hydraulique du site | 21 |
| 1.2. | Construction du modèle hydraulique | 21 |
| 1.3. | Génération d'une banque de données représentative de la station de mesure .. | 22 |
| 1.4. | Mise en forme de la banque de données sous une forme opérationnelle | 22 |
| 1.5. | Evaluation de l'incertitude sur le débit..... | 23 |
| 2. | Références..... | 24 |

I. Introduction

1. Objectif du guide

Ce guide a pour objectif de présenter la méthode h2Q, une méthode innovante de détermination du débit en collecteur à surface libre. L'accent est mis sur sa facilité de mise en place et d'exploitation pour les gestionnaires de réseau.

2. Contenu du guide

Le présent guide donne des instructions permettant de comprendre et de mettre en place la technologie h2Q.

Dans un souci de transparence, ce guide présente également les données nécessaires, les conditions d'application et la méthode de calcul qui conditionnent l'utilisation de cette technologie de mesure.

3. Problématiques de la mesure en collecteur

3.1. Contexte : exploitation des réseaux et problématiques

L'exploitant d'un réseau est régulièrement amené à mettre en place des stations de mesure du débit afin 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 (voir Arrêté du 21 juillet 2015). 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 (vitesse, hauteur...). Plusieurs méthodes s'offrent alors à l'exploitant pour parvenir à la détermination du débit.

3.2. Panorama des technologies existantes

La technologie d'évaluation du débit 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 », profileurs...) (cf. **Figure 1, Tableau 1-1**). Les principaux inconvénients d'une mesure hauteur – vitesse sont une maintenance importante (due à l'immersion des capteurs), 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. (voir norme ISO 15769:2010 et Guide Technique n°4).

D'autres technologies d'évaluation du débit par mesure de vitesse existent notamment les capteurs de radar de surface (cf. **Figure 1, Tableau 1-2**). Ceux-ci présentent l'avantage d'être émergés et donc de ne nécessiter qu'une maintenance réduite. De plus, cette technologie est très adaptée pour les fortes vitesses mais présente des difficultés pour relier la vitesse de surface mesurée à la vitesse moyenne de l'écoulement. De plus, en régime fluvial, la présence d'ondes de surface se déplaçant à une vitesse différente de celle de l'écoulement peut fausser la mesure.

Enfin, une technologie externe nommée « corde de vitesse » ou « capteur à temps de transit » permet d'évaluer le débit de manière fiable tant qu'aucune singularité ne la perturbe (voir ISO 6416:2005). De plus, la présence de bulles d'air induit une perte de données. Enfin, cette technologie nécessite des travaux de génie civil pour sa mise en place qui sont lourds et contraignants.

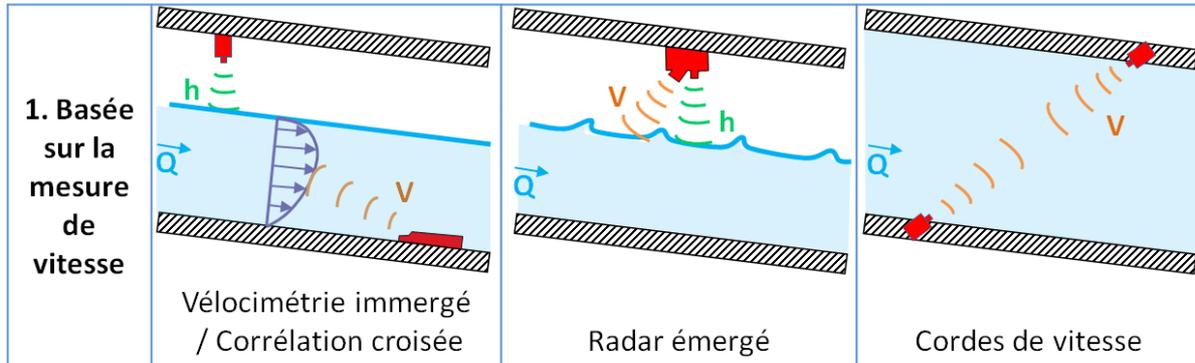


Figure 1 Schéma des différentes technologies d'évaluation du débit avec une mesure de hauteur-vitesse

Une autre possibilité revient à 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), 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 (hausse du niveau d'eau) (cf. **Figure 2**, **Tableau 1-2a**). Voir par exemple à ce sujet les normes ISO 4359:2013, ISO 4360:2008 ou encore ISO 1438:2008.

Le même principe 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.)** (cf. **Figure 2**, **Tableau 1-2b**). 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 d'appliquer cette relation qu'à une mesure de tirant d'eau dans un canal de caractéristiques constantes, sans apports latéraux, et surtout d'une longueur suffisante pour s'affranchir de l'influence des singularités hydrauliques (notamment les influences aval). Ce dernier point ne se rencontre quasiment jamais dans la pratique. 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 le cas du régime non uniforme et permanent, l'évolution du tirant d'eau peut être évaluée par la **courbe de remous** (cf. **Figure 2, Tableau 1-2c**). Cette équation différentielle, qui a pour origine la relation de Barré de Saint-Venant, ne peut être résolue qu'en connaissant deux conditions à la limite amont en régime torrentiel ou une condition amont et une en aval en régime fluvial. **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. C'est celle qui est développée dans ce document.**

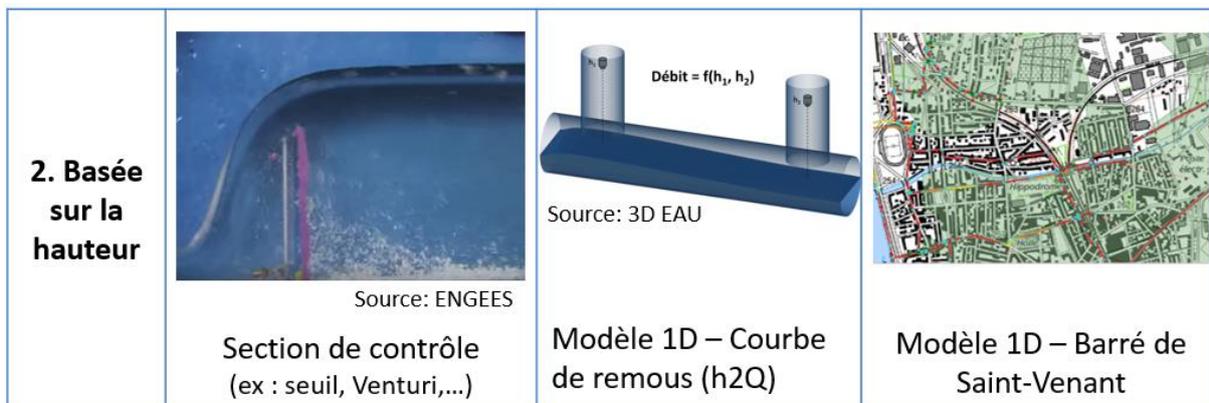


Figure 2 Schéma des différentes technologies d'évaluation du débit avec une mesure de hauteur dans un collecteur

Au final, les différents avantages et inconvénients des méthodes d'instrumentation en débit des collecteurs pour l'exploitant ont été résumés dans le **tableau 1** suivant.

| Type d'instrumentation | Perturbation de l'écoulement | Sensibilité à l'encrassement | Performance hydraulique | Coût d'investissement | Coût d'exploitation | Disponibilité de la donnée | Gamme de validité | Incertitude attendue | Sécurité du personnel |
|--|------------------------------|------------------------------|-------------------------|-----------------------|---------------------|----------------------------|-------------------|----------------------|-----------------------|
| 1 : Basée sur la mesure de vitesse | | | | | | | | | |
| 1a : Immergée (Doppler, profilomètre,...) | Red | Red | Yellow | Red | Red | Red | Yellow | Red | Red |
| 1b : Emergée (radar) | Yellow | Green | Yellow | Red | Green | Yellow | Yellow | Yellow | Green |
| 1c : Pas de contact avec le flux (temps de transit) | Green | Yellow | Green | Red | Green | Yellow | Green | Green | Yellow |
| 2 : Basée sur la mesure émergée de hauteurs d'eau | | | | | | | | | |
| 2a : Section de contrôle (seuil, venturi, ...) | Red | Red | Green | Yellow | Red | Green | Yellow | Green | Yellow |
| 2b : Modèle 0D (Manning-Strickler) | Green | Green | Yellow | Green | Green | Green | Red | Yellow | Green |
| 2c : Modèle 1D (Courbe de remous = h^2Q , BSV) | Green | Green | Green | Green | Green | Green | Green | Green | Green |

Légende : Avantage  Inconvénient

Tableau 1 Comparaison des techniques d'instrumentation existantes des collecteurs de réseau d'assainissement

La technique d'instrumentation proposée est basée sur l'utilisation d'un **modèle 1D de la courbe de remous** associé à deux mesures de hauteurs d'eau à l'aide d'une technologie non-intrusive (ultrason émergé ou radar) et si possible autonome.

II. Solution h2Q : présentation de la méthode

Dans ce contexte, ce guide technique s'intéresse à une méthode 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.

1. Principe de mesure

La méthode proposée 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 3**.

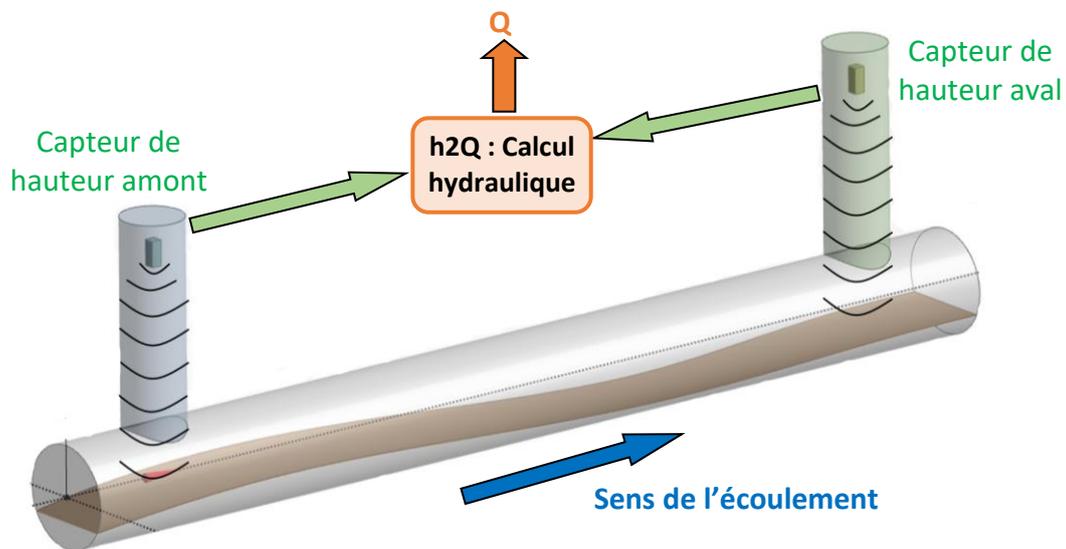


Figure 3 Principe de mesure de la méthode h2Q

2. Conditions d'application

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

- Le régime de l'écoulement demeure fluvial entre les deux mesures de hauteur (régime d'écoulement habituellement rencontré dans les réseaux à faible pente),
- Il n'y a pas d'apport significatif de débit (inférieur à quelques %) entre les deux mesures de hauteur,
- Absence de dépôt (susceptible 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,
- Les deux capteurs doivent être suffisamment éloignés pour que la différence de niveau mesurée soit significative (au moins 5 centimètres en fonction de l'incertitude du capteur).

Remarque 1 : Elle 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 le long de la canalisation.

Remarque 2 : Si le régime est torrentiel (cas généralement des réseaux à forte pente), l'écoulement tend sur une longueur très courte vers la hauteur normale de Manning Strickler. Dans ce cas particulier seul un capteur de hauteur d'eau est nécessaire.

3. Procédure de mise en application

Le principe de la mesure 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 ($\Delta h \gg \text{Inc}_{\text{Mesure}}$). Pour ce faire, seules les données géométriques du site (section transversale, pente, distance entre les 2 capteurs, singularités éventuelles...) sont nécessaires (cf. **Figure 4**). Plus de détails sur le mode opératoire de la technologie et le principe de calcul sont disponibles en **Annexe V.1**.

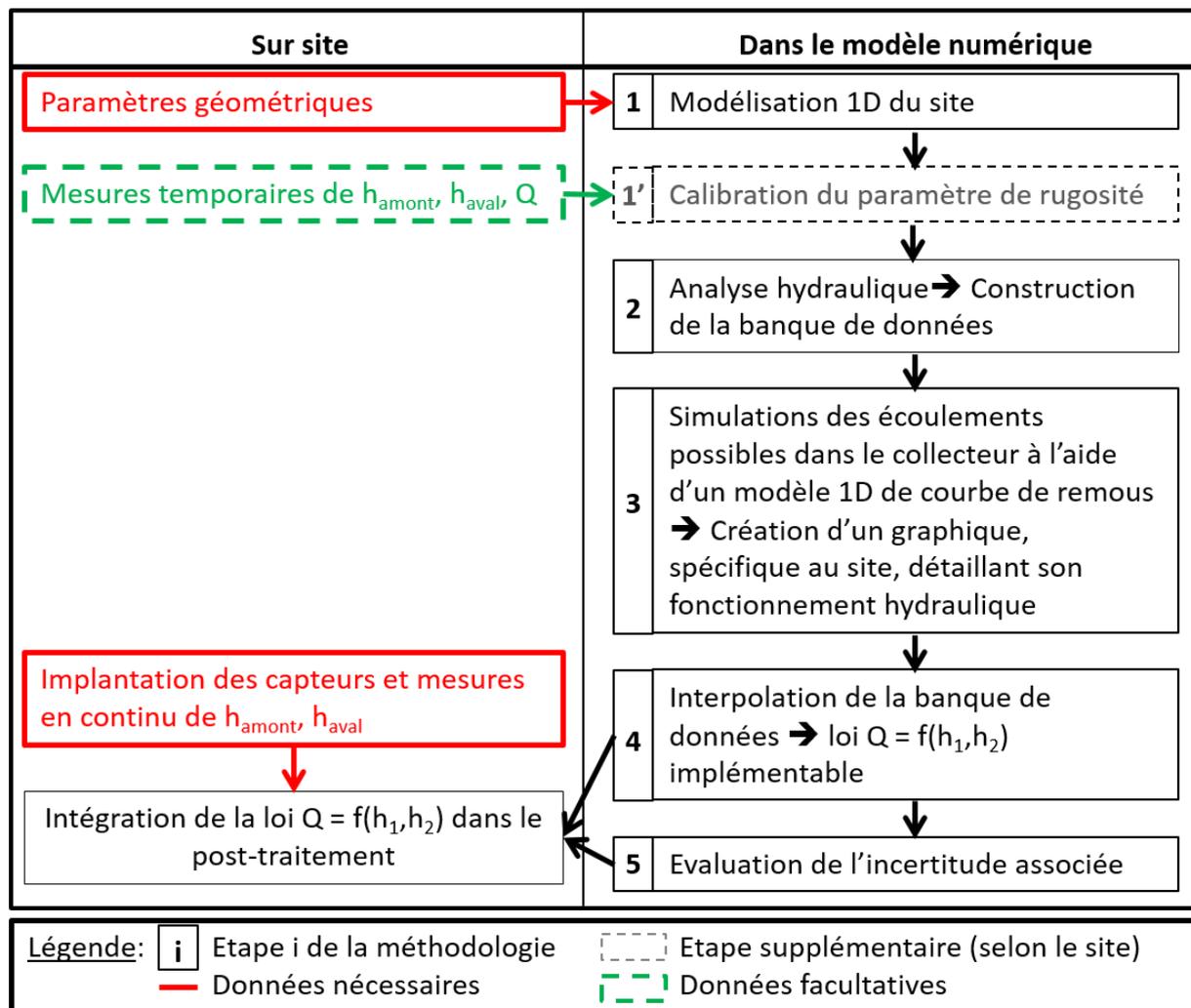


Figure 4 Procédure de mise en application de la méthode

Remarque : Afin de minimiser l'incertitude, une calibration du paramètre de rugosité peut être effectuée ; une campagne de mesure temporaire peut alors être effectuée.

Au final, une loi explicite $Q=f(h_{\text{amont}}, h_{\text{aval}})$ peut être implémentée (sous la forme d'une formule ou bien d'un tableau) dans le post-traitement de l'exploitant ainsi qu'une relation d'évaluation de l'incertitude associée. De ce fait, le débit peut être calculé directement à partir des deux mesures de hauteurs d'eau.

4. Bénéfices

Cette technique est basée uniquement sur des mesures de hauteurs d'eau ce qui présente de nombreux bénéfices en termes d'investissement, d'exploitation et de fiabilité.

4.1. En termes d'investissement

Les capteurs de hauteur d'eau de type ultrason (ou éventuellement radar) sont peu coûteux à l'achat. Ils peuvent, de plus, être **autonomes** ce qui permet de s'affranchir d'éventuels travaux de raccordements électriques souvent coûteux et difficiles à mettre en œuvre.

4.2. En termes d'exploitation

Ce type de mesure peut être **non-intrusif**. L'absence de contact avec le flux limite donc la fréquence de passage des agents d'entretien sur site (1 à 2 fois par an pour changer la batterie en cas de capteur autonome). De plus, les capteurs sont souvent accessibles à partir de la surface ; il n'est donc pas nécessaire de descendre dans l'ouvrage pour l'entretenir (nombre restreint de personnel requis et sécurité du personnel renforcée).

Enfin, la mesure de hauteur d'eau est facile d'interprétation, contrairement à une mesure de vitesse pour laquelle l'identification d'une dérive potentielle est plus difficile.

4.3. En termes de fiabilité

Les capteurs de hauteurs d'eau sont connus pour leur **fiabilité**. La disponibilité de la donnée est excellente (notamment s'ils sont placés dans un regard, limitant l'influence de la zone morte). On prendra soin néanmoins d'identifier la possibilité de mise en charge du collecteur instrumenté, ainsi que son niveau maximum et sa fréquence avant toute installation.

III. Exemples d'application

1. Caractéristiques des sites équipés

A l'heure actuelle, cette technique d'instrumentation a fait l'objet d'une validation en canal de laboratoire (canal hydraulique du Laboratoire ICube à Strasbourg) puis sur 5 sites grandeur nature afin de valider son opérationnalité face à des contraintes d'exploitation diverses :

- Le collecteur Milan à Mulhouse (Lyonnaise des Eaux) (cf. **Figure 5a**),
- 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 (Véolia Ouest) (cf. **Figure 5b**),
- Le collecteur du Leingarten à Eppingen, Allemagne (Nivus) (cf. **Figure 5c**)

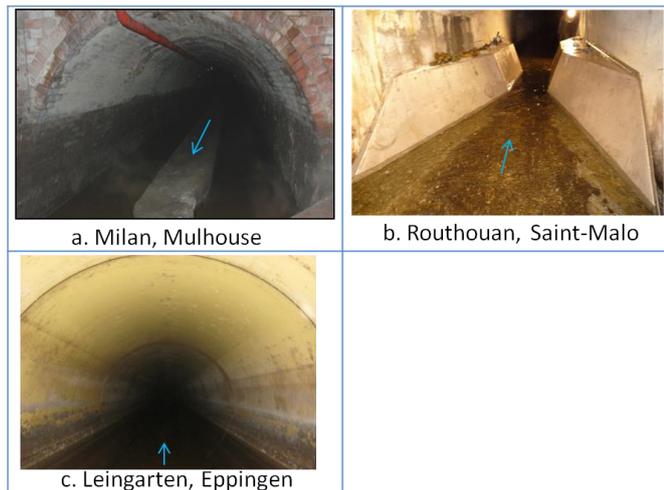


Figure 5 Photos de 3 des 5 sites grandeur nature

Les caractéristiques de ces sites sont résumées dans le **Tableau 2**.

Lors de ces validations, la technique h2Q a été confrontée à différentes technologies d'évaluation du débit : un canal Venturi, un capteur électromagnétique, des cordes de vitesse et un profilomètre. L'ensemble de ces comparaisons a mis en évidence une très forte disponibilité de la donnée avec la méthode h2Q (> 95 % du temps) (cf. III.2.3.).

Remarque : La méthode étant basée uniquement sur des mesures de hauteurs d'eau, il est particulièrement important de veiller à ce que le zéro des capteurs et leur installation soit correctement effectué.

| Sites | Schéma des stations de mesures |
|--|--------------------------------|
| <p>Laboratoire</p> <p>Canal à surface libre « Icube »</p> | |
| <p>Steinggiessen</p> | |
| <p>Sites grandeur nature</p> <p>Routhouan</p> | |
| <p>Milan</p> | |
| <p>Forst</p> | |
| <p>Eppingen</p> | |
| <p>Légende</p> <ul style="list-style-type: none"> ● Capteurs pour la méthodologie proposée ● Dispositifs de validation (par comparaison) ● Dispositif de transmission (GSM) ⊗ pompe ➡ Sens de l'écoulement | |

Tableau 2 Caractéristiques des sites instrumentés avec cette technologie

2. Résultats

La méthodologie d'instrumentation proposée intègre une modélisation de tous les écoulements théoriques pouvant avoir lieu dans le collecteur, et ce à l'aide du modèle 1D de la courbe de remous (pour plus de détails, se référer à l'**annexe 1**). Ces simulations numériques ont permis de créer une base de données associant le débit au couple (h_{amont} , h_{aval}), conditions limites du modèle. Le **Tableau 3** fournit ainsi un extrait de cette base de données : on y voit une série de couples (h_{amont} , h_{aval}) correspondant à un débit de 2 m³/s.

| h_{amont} [m] | h_{aval} [m] | Q [m ³ /s] |
|------------------------|-----------------------|-----------------------|
| ... | ... | ... |
| 1.321 | 0.962 | 2 |
| 1.322 | 0.979 | 2 |
| 1.324 | 0.997 | 2 |
| 1.326 | 1.014 | 2 |
| 1.329 | 1.032 | 2 |
| 1.333 | 1.049 | 2 |
| 1.337 | 1.067 | 2 |
| 1.342 | 1.084 | 2 |
| 1.347 | 1.102 | 2 |
| 1.353 | 1.119 | 2 |
| 1.359 | 1.137 | 2 |
| 1.367 | 1.154 | 2 |
| 1.374 | 1.171 | 2 |
| 1.382 | 1.189 | 2 |
| 1.391 | 1.206 | 2 |
| 1.400 | 1.224 | 2 |
| ... | ... | ... |

Tableau 3 Extrait de la base de données créée pour le collecteur du Routhouan

2.1. Utilisation directe de la méthode : évaluation du débit et estimation de l'incertitude

La base de données ainsi créée est ensuite interpolée mathématiquement en reliant les deux mesures de niveau d'eau à la valeur du débit. Au final, cette relation est exprimée sous forme analytique afin de pouvoir l'implémenter dans un superviseur.

Une fois la loi explicite $Q = f(h_{\text{amont}}, h_{\text{aval}})$ établie, l'erreur associée à cette mesure de débit a pu être calculée. Cette erreur intervient essentiellement par l'intermédiaire de l'erreur sur la différence des niveaux amont et aval (cf. **Figure 6**¹). Nous avons donc utilisé les combinaisons d'erreurs qui maximisent l'erreur sur la différence, c'est à dire des erreurs de sens opposé entre les capteurs amont et aval.

¹ Cette figure 6 a été établie à partir de 100 valeurs de débit et 100 valeurs de hauteurs d'eau aval (la hauteur d'eau amont étant calculée à partir de la hauteur d'eau aval et du débit) et en simulant une erreur de 1 cm sur les mesures de hauteurs amont et aval.

La branche supérieure de la **Figure 6a** correspond à +1 cm sur le capteur amont et -1 cm sur le capteur aval, conduisant à une surestimation des débits. La branche inférieure correspond à -1cm sur le capteur amont et +1 cm sur le capteur aval, et donc une sous-estimation des débits. Nous parlons ici d'erreurs, car une valeur unique a été ajoutée ou retranchée à la valeur des mesurandes primaires (les hauteurs d'eau)².

On retiendra que sur ce site et pour les valeurs d'erreurs choisies, l'incertitude sur le débit est inférieure à 20% à partir d'une différence de hauteurs supérieure à 3 cm ; elle devient inférieure à 10% à partir d'une différence de 6 cm, etc.

Il est remarquable de constater que l'erreur relative sur le débit ne dépend pas de la hauteur d'eau : les 10 000 configurations simulées se regroupent sur deux courbes (cf. **Figure 6a**). Ces erreurs ne dépendent pas non plus directement du débit (cf. **Figure 6b**), même si une tendance à la diminution des erreurs lorsque les débits augmentent est observée en **Figure 6b**. Cela s'explique par le fait que les forts débits nécessitent des différences de hauteurs relativement élevées pour tous les taux de remplissages de la conduite. Pour les faibles débits, on a une plus grande variété de configurations, échelonnées entre « faible remplissage et forte différence de hauteur » (induisant une faible erreur sur les débits), ou « fort remplissage et faible différence de hauteur » (et ainsi forte erreur sur les débits).

² L'effet de ces erreurs sur les débits peut s'exprimer en termes d'incertitudes, car la manière d'appliquer ces erreurs permet de borner la gamme de variation des débits calculés en fonction de la gamme des erreurs possibles sur la mesure des hauteurs.

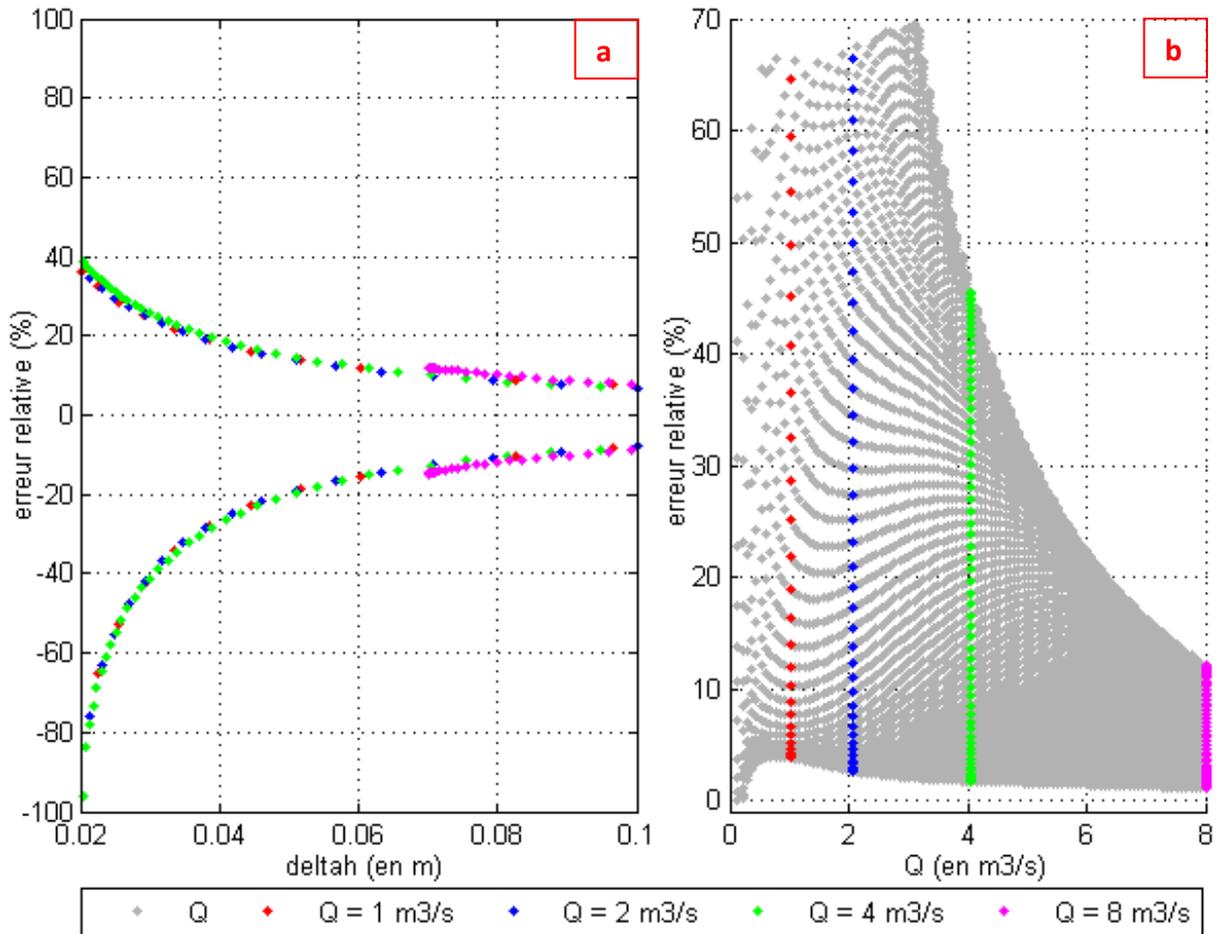
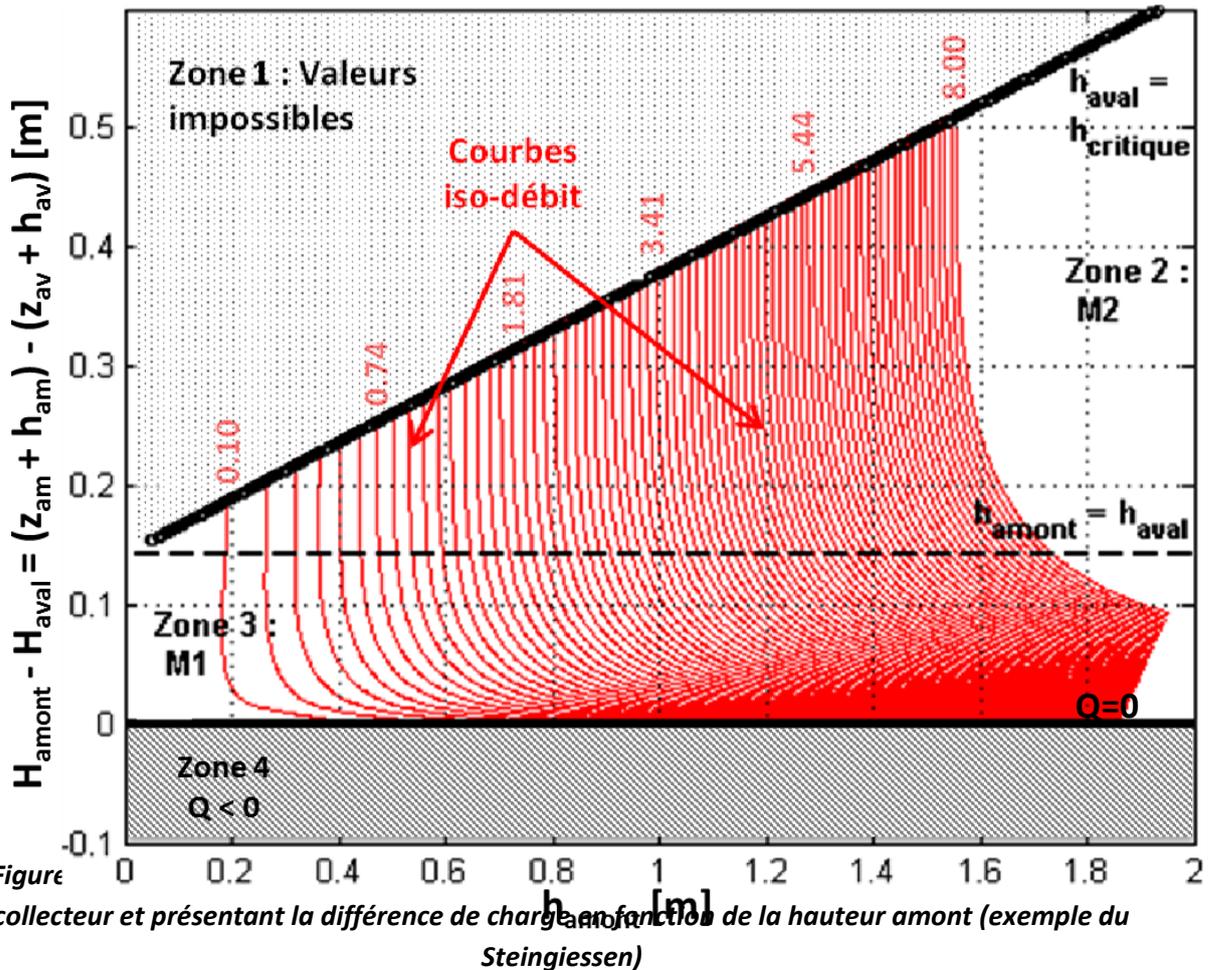


Figure 6 Incertitude sur le débit en fonction de la différence de cote entre la mesure amont et la mesure aval (et en supposant une incertitude de 1 cm sur la mesure de chaque hauteur d'eau) sur le site du Routhouan (6a) et en fonction du débit (6b)

Remarque : Le comportement de l'incertitude sur le débit et notamment sa sensibilité à la différence de niveaux d'eau entre amont et aval est généralisable, mais les valeurs numériques ne le sont pas. En particulier la valeur d'incertitude sur les mesures de hauteur d'eau doit intégrer non seulement l'incertitude issue des capteurs, mais également celle qui porte sur leur repérage altimétrique (nivellement). En outre il faudrait ajouter l'effet de l'incertitude sur le coefficient de rugosité du collecteur et diverses incertitudes affectant sa géométrie.

2.2. Utilisation experte de la méthode $h2Q$: diagnostic permanent de la station de mesure et détection des erreurs de mesure

La base de données créée à partir du modèle numérique présente un intérêt particulier pour l'exploitation des données de mesure. En effet, présentée graphiquement dans un abaque, elle permet d'identifier le fonctionnement hydraulique du collecteur (cf. **Figure 7**).



Ainsi, il est possible de savoir quel type d'écoulement a lieu pour chaque point de mesure de coordonnées $(h_{\text{amont}}, h_{\text{aval}})$. Pour ce faire, on distingue 4 zones et 7 comportements hydrauliques différents de l'écoulement (pour rappel, le site à instrumenter fonctionne en régime fluvial (voir Conditions d'application II.2)).

La superposition des points mesurés sur ce graphique permet l'analyse des données collectées et des les interpréter en termes de fonctionnement hydraulique du site, et dans certains cas de détecter des erreurs de mesure.

- **Zone 1** : Valeurs hydrauliquement impossibles dans un collecteur à pente faible fonctionnant en régime fluvial. Il y a donc une erreur de mesure affectant au moins un des deux capteurs.
- **Zone 2** : Domaine correspondant à une courbe de remous de type M2 (courbe plongeante, cf. **Figure 8-2**). La précision sur le débit est bonne car les courbes isodébits sont relativement espacées.
- **Zone 3** : Domaine correspondant à une courbe de remous de type M1 (courbe montante cf. **Figure 8-1**).
- **Zone 4** : La charge aval est supérieure à la charge amont. Dans ce cas, le débit est négatif (l'eau coule de l'aval vers l'amont) ; la méthodologie pourrait être employée avec une pente négative en inversant les conditions aux limites amont et aval pour

évaluer le débit. Néanmoins, ce cas de figure correspond généralement plutôt à des erreurs de mesure.

Remarque 1 : la limite entre les zones 2 et 3 correspondant au régime uniforme $h_{\text{aval}} = h_{\text{amont}}$. Si ce cas est rencontré en permanence sur une station de mesure (très rarement le cas), un seul capteur est nécessaire.

Remarque 2 : la limite entre les zones 3 et 4 correspondant à un débit nul (même niveau d'eau à l'amont et à l'aval) ; l'eau stagne.

Remarque 3 : Selon le bruit présent sur les données mesurées, il peut être pertinent 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.

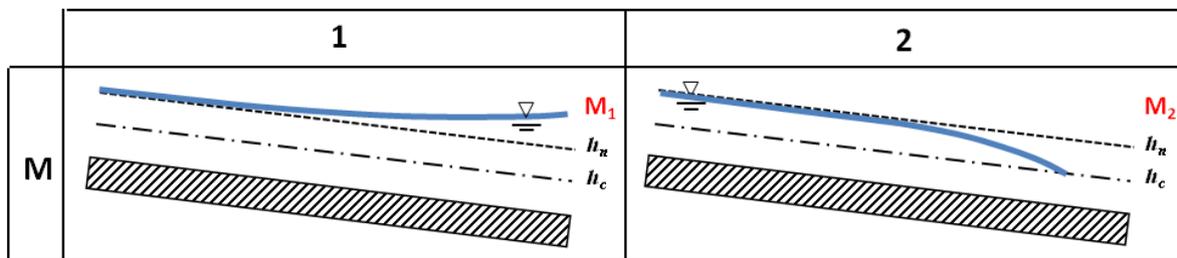


Figure 8 Schéma de courbes de remous de type M (pente faible avec influence (M1) et sans influence (M2))

Grâce à un graphique spécifique au site, l'utilisation experte de la méthode h2Q permet ainsi de comprendre le fonctionnement hydraulique du site et de détecter des erreurs de mesure. La méthode permet donc d'effectuer de la validation de données.

2.3. Bilan sur l'application sur les sites : comparaison à d'autres technologies

Comme évoqué précédemment, les 5 sites grandeur nature présentés ont permis de confronter la méthode à différentes technologies et de les valider dans des contextes particuliers (cf. **Tableau 4**).

| | Technologie comparée | Incertitude pour $\Delta y > 0.03$ m | Commentaires |
|---------------------|----------------------------------|---|---|
| Steingiessen | 1 électromagnétique et 2 Doppler | Entre 20 % (faibles Δh) et ≈ 5 % | La méthode h2Q a été mise en place pour sécuriser un point stratégique du système d'assainissement de la communauté urbaine de Strasbourg : la facturation repose en effet sur la mesure du débit en entrée de la STEU. |
| Routhouan | 1 Venturi | Entre 20 % (faibles Δh) et ≈ 5 % | Méthode h2Q mise en place en redondance d'un canal Venturi construit sur mesure en inox et spécialement installé dans ce cours d'eau urbanisé de 2.5 m de large. Aujourd'hui que la méthode h2Q a été validée, la mise en place du canal Venturi (couteuse en investissement et maintenance) ne serait plus nécessaire. |
| Milan | 4 cordes de vitesse | Non renseigné | Méthode h2Q mise en place en redondance de quatre cordes de vitesses installées dans ce collecteur de 2.8 m de large en forme de fer à cheval avec une banquette centrale Aujourd'hui que la méthode h2Q a été validée, la mise en place des cordes de vitesse (très couteuse en investissement) ne serait plus nécessaire. |
| Forst | 3 cordes de vitesse | Non renseigné | Méthode h2Q mise en place en redondance de trois cordes de vitesses installées dans ce collecteur de 1.2 m de large en forme d'ovoïde et pour avoir une information de temps sec indisponible actuellement. Aujourd'hui que la méthode h2Q a été validée, la mise en place des cordes de vitesse (très couteuse en investissement) ne serait plus nécessaire. |
| Eppingen | 1 profilomètre | Ecart moyen de 6 % avec les profilomètres | Méthode h2Q mise en place par l'entreprise NIVUS pour mettre à l'épreuve la méthode . Suite à ce test (cf. Figure 9), la société a décidé de proposer cette technologie à ses clients. |

Tableau 4 Résumé de la comparaison des résultats de la méthode h2Q à des mesures de débit à l'aide de technologies distinctes pour les 5 sites tests

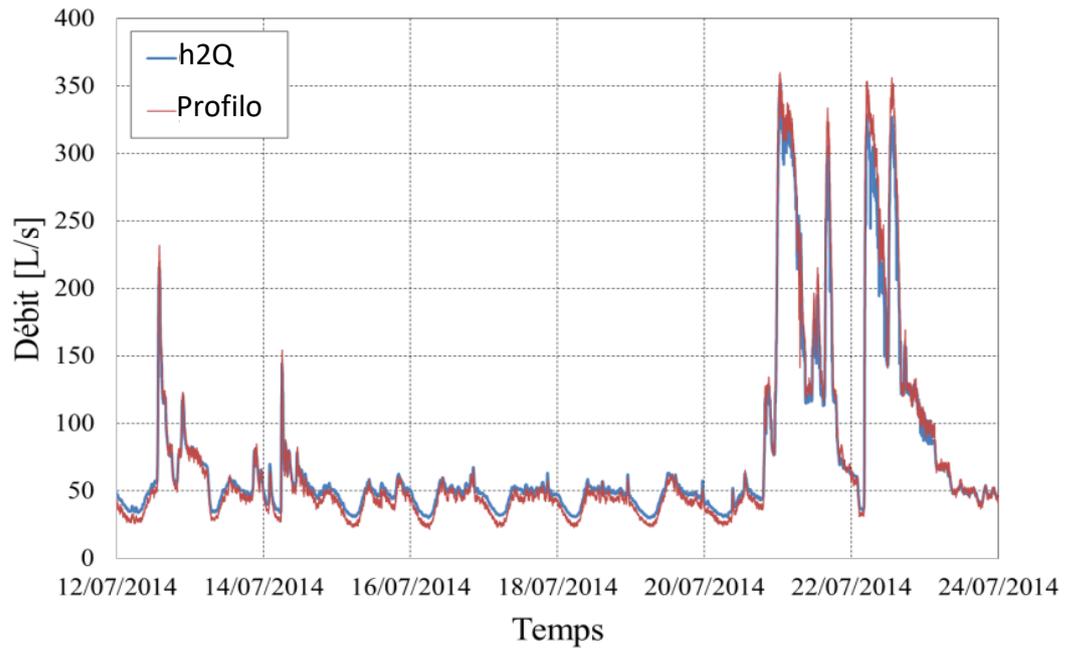


Figure 9 Comparaison des résultats de la méthode h2Q confronté à un profilomètre sur le site d'Eppingen

IV. 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. Cette méthode consiste à utiliser un deuxième capteur de hauteur plutôt qu'un capteur de vitesse dans les situations où une seule mesure de hauteur d'eau ne suffit pas à évaluer un débit. L'évaluation de la vitesse est alors obtenue en résolvant l'équation de Barré de Saint Venant, ou, dans les cas les plus simples, en tabulant des courbes de remous.

Basée sur des mesures de niveau d'eau, elle permet d'utiliser des capteurs sans contact, ce qui constitue un avantage décisif dans le contexte de l'assainissement. Elle est néanmoins exigeante en termes de sites de mesure : il faut disposer d'un site où l'on pourra observer en toutes conditions une différence de niveaux d'eau de quelques centimètres, *même en cas d'influence aval*. Cela suppose en général des longueurs de collecteur de 50 à 100 m sans apports latéraux importants, car la méthode prend tout son intérêt dans le cas de faibles pentes.

Avantages et inconvénients sont détaillés dans le **Tableau 5**. Issue de la recherche et après avoir été validée en laboratoire, cette méthode a montré son caractère opérationnel sur les cinq sites pilotes sur lesquels elle a été mise en œuvre. Elle peut à présent passer dans le domaine de l'ingénierie.

| Avantages | Inconvénients |
|--|--|
| <ul style="list-style-type: none"> • Méthode utilisable pour une large gamme de conditions hydrauliques, notamment en cas de forte influence aval • Maintenance minimale (capteurs robustes et non intrusifs) • Evaluation précise du débit et quantification de l'incertitude • Utilisation experte possible pour analyser le comportement hydraulique de la station et pour détecter les erreurs de mesure | <ul style="list-style-type: none"> • Nécessité d'une analyse hydraulique du site en pré-requis à l'utilisation de la méthode • Longueur droite minimale nécessaire entre les deux mesures de hauteur d'eau sans apport latéral (quelques dizaines de mètres environ, dépend de la taille du collecteur) • Pas de coude à l'amont et/ou à l'aval avec un impact fort sur la surface libre dans les zones de mesure |

Tableau 5 Avantages et inconvénients de cette technique d'évaluation du débit

V. Annexes

1. Procédure détaillée d'application de la méthode

La mise en place de la méthode passe par 5 étapes précédemment présentée dans la Figure 4 (cf. II.3) :

- 1 – Construction du modèle et détermination des gammes plausibles de débits et de hauteurs aval pouvant être observées sur le futur site de mesure, déterminées à l'aide d'une étude hydraulique du site.
- 2 - A partir des caractéristiques du collecteur, des courbes de remous pour toutes les combinaisons h_{aval} – Débit sont simulées en discrétisant chaque gamme avec un pas de X %. On calcule ainsi la hauteur d'eau amont correspondant à chaque combinaison avec la relation de la courbe de remous.
- 3 – Cette banque de données une fois créée est interpolée mathématiquement avec comme variables d'entrées les hauteurs d'eau, et le débit en variable de sortie.
- 4 - L'expression analytique issue de cette interpolation est implémentée dans un automate pour calculer des débits.
- 5 – L'incertitude associée au débit en chaque point peut être calculée à partir de la relation $Q=f(h_{\text{amont}}, h_{\text{aval}})$.

1.1. 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 : il s'agit de mesurer les grandeurs géométriques nécessaires au calcul du débit à partir des deux hauteurs d'eau, à savoir la pente ou les pentes du collecteur et la section en travers du collecteur,
- Fonctionnement hydraulique consiste à déterminer la plage de débit et de hauteurs 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.

1.2. Construction du modèle hydraulique

Une fois les caractéristiques du site ainsi que la plage de fonctionnement connues, il est nécessaire de concevoir le 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 [1] de la courbe de remous s'écrit comme suit :

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

Dans cette équation, 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 dans l'équation [2].

$$Fr = \frac{Q}{S\sqrt{gD_h}} \quad [2]$$

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

$$J = \frac{Q^2}{K_s^2 S^2 R_h^{4/3}} \quad [3]$$

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 un autre endroit du 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.

1.3. 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.

1.4. 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 (cf. III.2) :

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

1.5. Evaluation 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.

2. Références

Arrêté du 21 juillet 2015 relatif aux systèmes d'assainissement collectif et aux installations d'assainissement non collectif, à l'exception des installations d'assainissement non collectif recevant une charge brute de pollution organique inférieure ou égale à 1,2 kg/j de DBO5 [en ligne], In *Journal Officiel*, n°0190 du 19 août 2015, p. 14457

<http://www.legifrance.gouv.fr/eli/arrete/2015/7/21/DEVL1429608A/jo>

COACHS, *Guide Technique n°4 : Représentativité des capteurs de vitesse et impact sur l'évaluation en continu du débit d'un écoulement à surface libre*, 2014, 27 p.

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. *Proceedings of the 9th International Conference on Urban Drainage Modelling (UDM 2012)*, Belgrade, Serbia.

Isel S., Vazquez J., Dufresne M. (2013). *Développement d'outils et de méthodologies pour déterminer le débit par mesures de hauteurs d'eau en collecteur de réseau d'assainissement*. Techniques, Sciences et Méthodes, 1/2, p. 71 – 79.

Isel S. Développement de méthodologies et d'outils numériques pour l'évaluation du débit en réseau hydraulique à surface libre. Thèse de Doctorat. Université de Strasbourg, 2014.

[https://publication-theses.unistra.fr/public/theses_doctorat/2014/Isel Sandra 2014 ED269.pdf](https://publication-theses.unistra.fr/public/theses_doctorat/2014/Isel_Sandra_2014_ED269.pdf)

ISO (2010). Hydrometry – Guidelines for the application of acoustic velocity meters using the Doppler and echo correlation methods. ISO 15769:2010.

ISO (2008). Hydrometry – Open channel flow measurement using thin-plate weirs. ISO 1438:2008.

ISO (2005). Hydrometry — Measurement of discharge by the ultrasonic (acoustic) method. International Standard ISO 6416:2005.

ISO (2008). Hydrometry – Open channel flow measurement using triangular profile weirs. International Standard ISO 4360:2008.

ISO (2013). Flow measurement structures – Rectangular, trapezoidal and U-shaped flumes. International Standard ISO 4359:2013.

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.