

Évaluation des incertitudes de la méthode h2Q : détermination du débit par la mesure de deux hauteurs d'eau

Maxence GRAEBLING¹, Sandra ISEL², José VAZQUEZ³

¹ ENGEES, ICUBE - 1 Quai Koch, 67070 Strasbourg - graebling.maxence@gmail.com

² 3DEAU - 3 Rue des Camélias, 75014 Paris - sandra.isel@3deau.fr

³ ENGEES, ICUBE - 1 Quai Koch, 67070 Strasbourg - jose.vazquez@engees.unistra.fr

RÉSUMÉ. – Cet article présente l'étude réalisée pour évaluer l'incertitude attachée à chaque valeur de débit calculé par la méthode h2Q. Le principe de la méthode h2Q repose sur la mesure de deux hauteurs d'eau distinctes d'une certaine distance couplée à un modèle hydraulique basé sur la résolution de l'équation différentielle de la courbe de remous. Le débit est ainsi déterminé à l'aide d'une différence de cotes piézométriques. Après avoir identifié les différentes sources d'incertitudes, une évaluation de chacune d'entre elles est effectuée. L'incertitude de mesure issue de la précision des capteurs de hauteur d'eau est obtenue en appliquant et en comparant trois méthodes distinctes. La méthode dite de propagation des incertitudes, la méthode des bornes et la méthode de Monte Carlo. À la suite de cette comparaison, une corrélation entre l'incertitude de mesure sur le débit et la différence de cotes piézométriques est mise en exergue. C'est l'invariabilité de l'incertitude relative vis-à-vis d'une différence de cotes piézométriques donnée qui permet d'établir une loi valable sur n'importe quel site d'étude. Par conséquent, l'incertitude de mesure est obtenue grâce à la différence de cotes piézométriques. En combinant les différentes sources d'incertitudes, l'incertitude globale sur le débit est ainsi déterminée.

Mots-clés : assainissement, débit, collecteur, hauteur d'eau, incertitudes

Uncertainties assessment of the h2Q method: determining the flow by the measurement of two water level

ABSTRACT. – This article presents the study carried out to estimate the uncertainty associated with each flow rate value calculated by the h2Q method. The principle of the h2Q method is based on the measurement of two water levels distinguished by a certain distance coupled with a hydraulic model based on the resolution of the differential equation of the backwater curve. In this way, the flow is determined using a difference of piezometric water levels. After identifying the different sources of uncertainty, an assessment of each of them is performed. The measurement uncertainty, due to the exactitude of water level sensors, is obtained by applying and comparing three different methods. The propagation of uncertainty method, the bounds method and the Monte Carlo method. Following this comparison, a correlation between the measurement uncertainty of the flow and the difference of piezometric water levels is highlighted. It's the invariability of the relative uncertainty regarding of a given difference of piezometric water levels which allows to established a valid law on any study site. Consequently, the measurement uncertainty is achieved through the difference of piezometric water levels. Then, by combining the different sources of uncertainty, the overall uncertainty of the flow is determined.

Key-words: sewerage, discharge, pipe, water depth, uncertainties

INTRODUCTION

Dans le but d'optimiser la performance des réseaux, les gestionnaires de réseaux d'assainissement ont besoin d'effectuer des mesures de débit. L'objectif étant d'établir le fonctionnement du réseau, d'effectuer un diagnostic du réseau afin de permettre sa régulation mais également de respecter les contraintes réglementaires de l'autosurveillance [Arrêté du 21 juillet 2015].

Le débit est une grandeur qui ne peut pas être mesurée directement. Il est toujours déterminé en calculant d'autres grandeurs intermédiaires. On parle d'évaluation de débit. Il existe plusieurs méthodes permettant d'évaluer un débit en continu au sein d'un réseau d'assainissement [Isel, 2014].

La plus utilisée est l'évaluation d'un débit par le biais d'une mesure de vitesse associée à une surface mouillée.

Plusieurs technologies utilisent ce principe pour évaluer un débit comme les capteurs à effet Doppler, cordes de vitesse, radar vitesse [Sollic, 2013]. La principale difficulté de ces technologies réside dans le passage de la vitesse mesurée localement au calcul de la vitesse moyenne sur l'ensemble de la section [COACHS, 2014]. Lorsqu'elles sont mises en œuvre conformément aux règles de l'art [normes ISO 15769, 2010 ; ISO 6416, 2004], ces techniques permettent d'obtenir une incertitude sur le débit d'environ 10% à 20%. Néanmoins, ces différentes technologies sont associées à des coûts d'investissement et de maintenance relativement importants.

Une autre possibilité pour mesurer un débit est d'exploiter un changement de régime hydraulique. Celui-ci permet d'établir avec précision la relation hauteur/débit avec une incertitude faible (de l'ordre de 10 à 15% d'après [Normes ISO 4359, 1983] en raison du passage obligatoire par la hauteur critique. Dans ces conditions, une seule mesure de

hauteur d'eau située à l'amont est nécessaire pour mesurer un débit. Mais l'établissement de ce changement de régime hydraulique est possible uniquement en présence d'une singularité (chute, canal Venturi, seuil, ...) tout en étant en régime dénoyé. Or au sein d'un collecteur, il est rarement possible d'introduire une telle singularité en raison des conséquences des modifications du fonctionnement hydraulique (possible mise en charge ou risque de débordement), du génie civil nécessaire à sa mise en place mais également du risque d'obstruction ou de colmatage dans le temps.

Dans la pratique, il arrive parfois que le débit soit estimé au sein d'un collecteur à l'aide de la formule de Manning-Strickler (ou une courbe de tendance) couplée à une campagne de mesure de courte durée (quelques semaines). Dans ce cas, la relation de Manning-Strickler est la relation hauteur/débit recherchée. Or l'utilisation de cette formule nécessite des conditions hydrauliques particulières avec notamment l'hypothèse d'uniformité de l'écoulement et d'absence d'influence aval. Cette hypothèse d'uniformité de l'écoulement est forte et est rarement observée au sein d'un réseau d'assainissement. Pour ces raisons, les incertitudes sont souvent conséquentes (de l'ordre de 50 à 100% voir supérieures si le régime d'écoulement est davantage éloigné du régime permanent uniforme). Le problème réside également dans la représentativité de la campagne de mesure. En effet, cette campagne doit être capable de représenter l'ensemble des conditions hydrauliques susceptibles d'être rencontrées au sein du collecteur afin de ne pas avoir à extrapoler les données. En pratique, le plus souvent cette méthode n'est pas applicable du fait de ce qui est détaillé ci-dessus.

Enfin, il est possible de mesurer un débit à partir d'un calcul de ligne piézométrique déterminée à l'aide de deux mesures de hauteurs d'eau séparées d'une certaine distance. C'est sur ce principe que la méthode h2Q est basée.

Les objectifs de cet article sont dans un premier temps de présenter brièvement le principe général de cette méthode puis dans un second temps de présenter l'étude effectuée visant à évaluer l'incertitude globale sur le débit de cette méthode.

I. PRÉSENTATION DE LA MÉTHODE H2Q

I.1. Principe de mesure

Le principe général de la méthode h2Q est l'estimation d'un débit à partir d'une ligne piézométrique déterminée à l'aide de deux mesures de hauteurs d'eau (h_{amont} , h_{aval}). En effet, lorsque l'écoulement est non uniforme et quasi-permanent, la position de la surface libre peut être déterminée à l'aide de l'équation différentielle de la courbe de remous

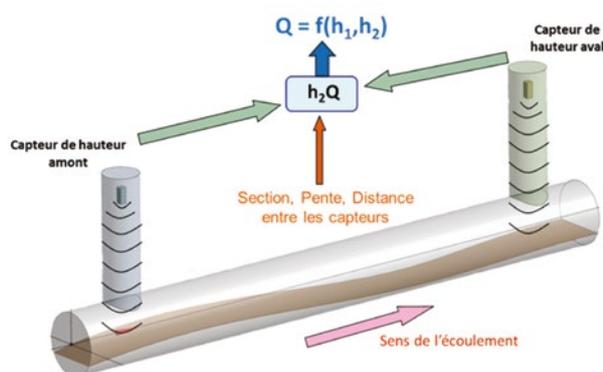


Figure 1 : Principe général de la méthode h2Q

[Hager, 1999]. Celle-ci nécessite de renseigner deux conditions aux limites d'où la mesure de deux hauteurs d'eau en régime fluvial. La distance entre les deux points de mesures doit être suffisamment importante (quelques dizaines à quelques centaines de mètres) pour pouvoir obtenir une différence de cotes piézométriques significative et ainsi obtenir des résultats satisfaisants. On parle bien d'une différence de cotes piézométriques et non d'une différence de tirant d'eau d'où la possibilité de prendre en compte l'ensemble des configurations hydrauliques. La méthode est également capable de prendre en compte des effets transitoires forts ; dans ce cas, elle utilise les équations de Saint-Venant [Isel 2014]. Ce principe est illustré sur la Figure 1.

I.2. Le modèle hydraulique

Cette méthodologie intègre un outil numérique (1D) permettant de calculer l'ensemble des courbes de remous susceptibles d'être rencontrées au sein du collecteur d'étude. Pour ce faire, l'ensemble de la gamme de variation des hauteurs aval et des débits sont pris en considération pour permettre l'obtention des hauteurs amont correspondantes. De ce fait, un tableau de n lignes et 3 colonnes (h_{amont} , h_{aval} , Q) est généré, ce qui correspond à l'ensemble des configurations hydrauliques. Cette banque de données peut soit être interpolée à l'aide d'un outil adapté pour obtenir une relation $Q=f(h_{\text{amont}}, h_{\text{aval}})$ et ainsi être implémentée dans un superviseur ou alors être programmée dans un tableur.

I.3. Conditions d'applications

L'application de cette méthode requiert le respect de certaines conditions qui sont énumérées ci-dessous :

- Régime hydraulique fluvial ($Fr < 1$, c'est le régime hydraulique habituellement rencontré dans un réseau à faible pente)
- Écoulement non-uniforme ou uniforme, quasi-permanent (non adaptée pour les effets transitoires trop importants)
- Pas de singularité située à l'amont du dispositif pouvant entraîner une perturbation significative de la surface libre
- Pas d'apport latéral important sur la zone d'étude (distance entre les deux capteurs de hauteur) risquant de perturber la surface libre
- Pas de dépôt trop important risquant de modifier le tirant d'eau (modification de la section mouillée voire de la pente)
- Une différence de cotes piézométriques suffisante ($> 5\text{cm}$) afin d'obtenir des résultats significatifs

Pour obtenir plus d'informations sur la méthode h2Q, notamment la méthodologie appliquée pour permettre la mise en place de celle-ci sur un site d'étude ou des résultats d'applications de cette méthode sur différents sites, un guide technique est disponible à l'adresse suivante :

<http://hydraulique-des-reseaux.engees.eu/home/documents-techniques/guide-technique-sur-l-evaluation-d-un-debit-en-collecteur-en-fonction-de-la-mesure-deux-hauteurs-d-eau>

II. ÉVALUATION DE L'INCERTITUDE GLOBALE SUR LE DÉBIT DE LA MÉTHODE H2Q

L'objectif de cette étude vise à encadrer l'erreur commise lors de l'estimation d'un débit par la méthode h2Q. L'erreur est la différence entre la valeur mesurée et la valeur « vraie » de la grandeur que l'on cherche à déterminer aussi appelée « mesurande ». Comme en pratique, la valeur

« vraie » est inconnue, on procède à un calcul d'incertitude afin d'encadrer l'erreur. Par la suite, l'ensemble de la procédure mise en place pour déterminer les incertitudes s'appuie sur des normes faisant office de référence.

II.1. Les différentes sources d'incertitudes

Afin d'évaluer l'incertitude globale sur le débit de la méthode h2Q, il convient d'identifier les différentes sources d'incertitudes. Dans notre cas, nous pouvons les regrouper en 5 catégories (voir Figure 2) :

- Incertitude sur la rugosité (coefficient de rugosité)
- Incertitudes géométriques (pente, diamètre du collecteur et distance entre les capteurs)
- Incertitude liée à l'utilisation du modèle hydraulique (courbe de remous)
- Incertitude liée à l'interpolation par le réseau de neurones (RN)
- Incertitude liée à la précision des capteurs de hauteur d'eau

L'incertitude globale sur le débit peut être estimée à partir d'un écart-type $\sigma_{Q\text{ globale}}$ et ainsi construire un intervalle $[Q - \sigma_{Q\text{ globale}} ; Q + \sigma_{Q\text{ globale}}]$. Il représente un intervalle de confiance de 68% pour une distribution normale. Sous réserve que les différentes sources soient indépendantes, l'incertitude globale peut être calculée de la manière suivante :

$$\sigma_{Q\text{ globale}}^2 = \sqrt{\sigma_{\text{géométrique}}^2 + \sigma_{\text{rugosité}}^2 + \sigma_{\text{modèlehydraulique}}^2 + \sigma_{\text{interpolation}}^2 + \sigma_{\text{Qmesures}}^2} \quad (1)$$

où σ_i représente l'incertitude de la source i .

Les incertitudes calculées par la suite sont établies pour un intervalle de confiance de 95%. Pour permettre le passage d'un intervalle de confiance de 68% à 95%, l'utilisation d'un facteur d'élargissement k est nécessaire. Pour une distribution normale, $k=2$ permet d'obtenir un intervalle de confiance de 95% et ainsi obtenir l'intervalle $[Q-2 \times \sigma_{Q\text{ globale}} ; Q+2 \times \sigma_{Q\text{ globale}}]$.

En pratique, on calcule une incertitude relative globale qui est obtenue en divisant $\sigma_{Q\text{ globale}}$ par Q . De cette manière, on exprime l'incertitude en pourcentage par rapport à une référence.

II.1.1. Incertitude sur la rugosité

La rugosité hydraulique est déterminée à partir de la rugosité de la conduite (coefficient de Strickler) selon le modèle de Zaghoul qui prend en compte des frottements plus importants pour des faibles remplissages. Par défaut, la valeur du coefficient de rugosité de Strickler est fixée à $70\text{m}^{1/3}/\text{s}$ (valeur représentative en assainissement [AFNOR NF EN 752, 2008]). Mais en pratique, il arrive que la rugosité de conduite fixée à $70\text{m}^{1/3}/\text{s}$ ne soit pas toujours la plus adaptée. Etant donné que l'erreur commise sur la valeur du coefficient de rugosité est une erreur dite « systématique »,

il est possible de la réduire en calant ce paramètre. Pour ce faire plusieurs méthodes existent, comme l'utilisation d'un test traceur, d'un jaugeage de la vitesse ou bien en exploitant les données d'une campagne de mesure temporaire de débit. On peut considérer que si l'étape de calibration est correctement effectuée, l'incertitude sur le coefficient de rugosité est de l'ordre de 10%.

II.1.2. Incertitude géométrique

L'incertitude géométrique est générée lors du relevé des données géométriques comme la dimension du collecteur, la distance entre les deux capteurs de hauteur d'eau et la pente géométrique du site d'étude. Cette incertitude est généralement insignifiante par rapport aux autres sources. Toutefois, en pratique on remarque fréquemment des erreurs lors du relevé topographique. Ces erreurs peuvent alors être corrigées lors d'un calibrage par le biais d'une campagne de mesure temporaire du débit sur site. Dans ce cas on corrige en même temps, la pente et la rugosité.

II.1.3. Incertitude du modèle hydraulique

L'utilisation du modèle hydraulique basé sur la résolution de l'équation différentielle de la courbe de remous engendre des incertitudes sur le résultat final. Cette incertitude est relativement faible en raison de la précision de l'équation et peut être estimée à une valeur inférieure à 5%. Cette estimation provient des hypothèses faites pour permettre l'application du modèle. En particulier, une faible courbure des lignes de courant caractéristique des effets transitoires faibles permettant d'atteindre un régime quasi-permanent. Cette hypothèse est largement respectée au sein d'un réseau d'assainissement pour un régime d'écoulement fluvial, en raison du linéaire de canalisation amont qui tempore ces effets.

II.1.4. Incertitude liée à l'interpolation par un réseau de neurones

L'incertitude apportée par l'utilisation du réseau de neurones provient de l'interpolation de la banque de données permettant d'obtenir une relation explicite hauteur/débit. Cette incertitude peut être considérée comme négligeable en raison des très faibles erreurs commises lors de cette étape (inférieures au %).

II.1.5. Incertitude liée à la précision des capteurs de hauteur d'eau

Enfin l'incertitude de mesure sur le débit provient de l'incertitude de mesure sur les hauteurs d'eau. L'incertitude sur la mesure des hauteurs d'eau qui traduit la précision des

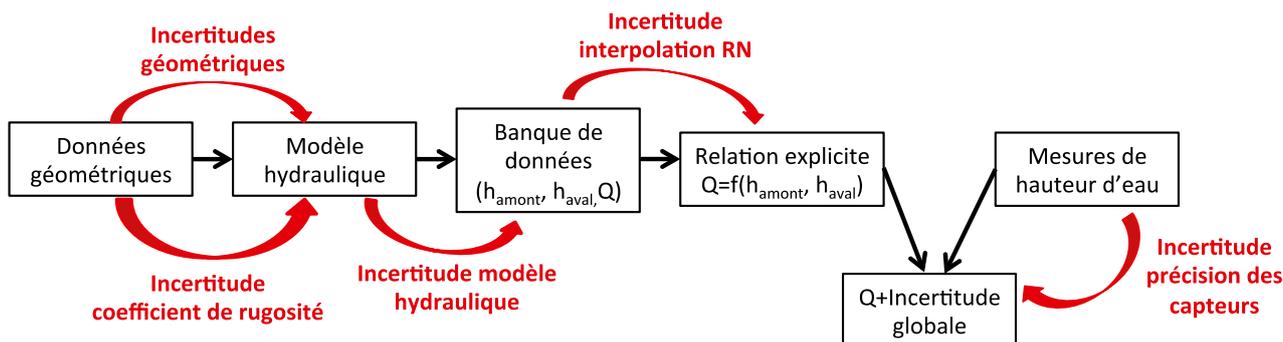


Figure 2 : Identification et localisation des sources générant les incertitudes sur le débit de la méthode h2Q

capteurs peut être calculée par le biais d'un écart-type défini de la manière suivante :

$$\sigma_{\text{hmesures}}^2 = \sqrt{\sigma_{z_0}^2 + \sigma_z^2} \quad (2)$$

où $\sigma_{\text{hmesures}}^2$ est l'incertitude de mesure sur les hauteurs d'eau $\sigma_{z_0}^2$ est l'incertitude sur le zéro du capteur et σ_z^2 est l'incertitude sur le niveau d'eau.

L'incertitude sur la hauteur d'eau provient d'une part de l'incertitude sur le zéro $\sigma_{z_0}^2$ (5mm pour un intervalle de confiance de 68% d'après [ISO NF 6416, 2004] couplée à l'incertitude sur le niveau d'eau σ_z^2 (2mm pour un intervalle de confiance de 68% d'après [ISO NF 6416, 2004]). L'incertitude sur la mesure de hauteur d'eau $\sigma_{\text{hmesures}}^2$ est donc de 5,4mm pour un intervalle de confiance de 68% ce qui équivaut à 11mm pour un intervalle de confiance de 95% (facteur d'élargissement égal à 2).

Trois méthodes ont été mises en place pour estimer l'incertitude de mesure sur le débit et ainsi donner plus de poids aux résultats finaux. L'objectif étant de caractériser la propagation de l'incertitude issue de la sensibilité des capteurs de hauteur d'eau sur la mesure de débit.

Méthode dite de « Propagation des incertitudes »

Cette méthode consiste à dériver la fonction explicite $Q=f(h_{\text{amont}}, h_{\text{aval}})$ tout en prenant en compte la précision des capteurs (1cm pour obtenir un intervalle de confiance de 95%). Comme les deux variables de la fonction sont indépendantes, l'incertitude relative de mesure sur le débit peut être calculée de la manière suivante [JCGM 100, 2008] :

$$\frac{\sigma_{Q_{\text{mesures}}}}{Q} = \sqrt{\left(\frac{\partial Q}{\partial h_{\text{amont}}}\right)^2 (\sigma_{\text{hamontmesures}})^2 + \left(\frac{\partial Q}{\partial h_{\text{aval}}}\right)^2 (\sigma_{\text{havalmesures}})^2} \quad (3)$$

A la différence des deux autres méthodes qui suivent, cette méthode permet l'obtention d'une seule enveloppe d'incertitude étant donné que l'erreur commise par les capteurs est élevée au carré. L'enveloppe inférieure est donc obtenue par symétrie.

Méthode dite « Des bornes »

Cette méthode consiste à appliquer à l'ensemble des données de hauteurs d'eau utilisées pour déterminer le débit une variation constante égale à la sensibilité des capteurs et effectuer le calcul de débit avec les données de hauteurs modifiées. Ce calcul revient à traduire la variabilité du débit vis-à-vis d'une modification de la pente énergétique.

Pour le calcul de la borne maximum, le débit est estimé de manière à avoir une pente énergétique maximale. Cela signifie que la sensibilité des capteurs est répartie de cette manière [$h_{\text{amont}} = h_{\text{amont}} + 1\text{cm}$; $h_{\text{aval}} = h_{\text{aval}} - 1\text{cm}$]. Sur le même principe, le calcul de la borne minimum est effectué dans le but de minimiser la pente énergétique avec des données modifiées [$h_{\text{amont}} = h_{\text{amont}} - 1\text{cm}$; $h_{\text{aval}} = h_{\text{aval}} + 1\text{cm}$].

En calculant l'écart relatif entre les débits obtenus avec la borne maximum (respectivement avec la borne minimum) et les débits calculés avec les données de hauteurs non modifiées, l'incertitude relative de mesure sur le débit est caractérisée.

Méthode dite de « Monte Carlo »

Une troisième méthode permet de calculer l'incertitude relative de mesure sur le débit. Comme les autres méthodes, elle vise à propager des variations sur les données de hauteurs d'eau à travers le calcul du débit. Néanmoins, la grande différence avec cette méthode réside dans le choix des variations. En effet, les deux autres méthodes considèrent la sensibilité des capteurs constante sur la totalité des données de hauteurs d'eau. La méthode de Monte Carlo [JCGM 101, 2008] consiste à appliquer des variations (d_{hamont} , d_{haval}) tirées selon une loi normale sur les données de hauteurs amont et aval. Afin de retrouver un intervalle de confiance de 95%, les variations d_{ham} , d_{hav} sont tirées selon une loi normale d'écart-type 0,005 (facteur d'élargissement égale à 2). Pour que cette méthode soit considérée comme représentative, il faut que le nombre de tirages aléatoires soit suffisamment important. Après avoir effectué un test de sensibilité, 10500 tirages sont effectués pour appliquer cette méthode dans notre cas. Ceci revient à effectuer 10500 variations sur chaque point.

En utilisant la relation explicite hauteur/débit issue du modèle h2Q, le débit est calculé avec l'expression

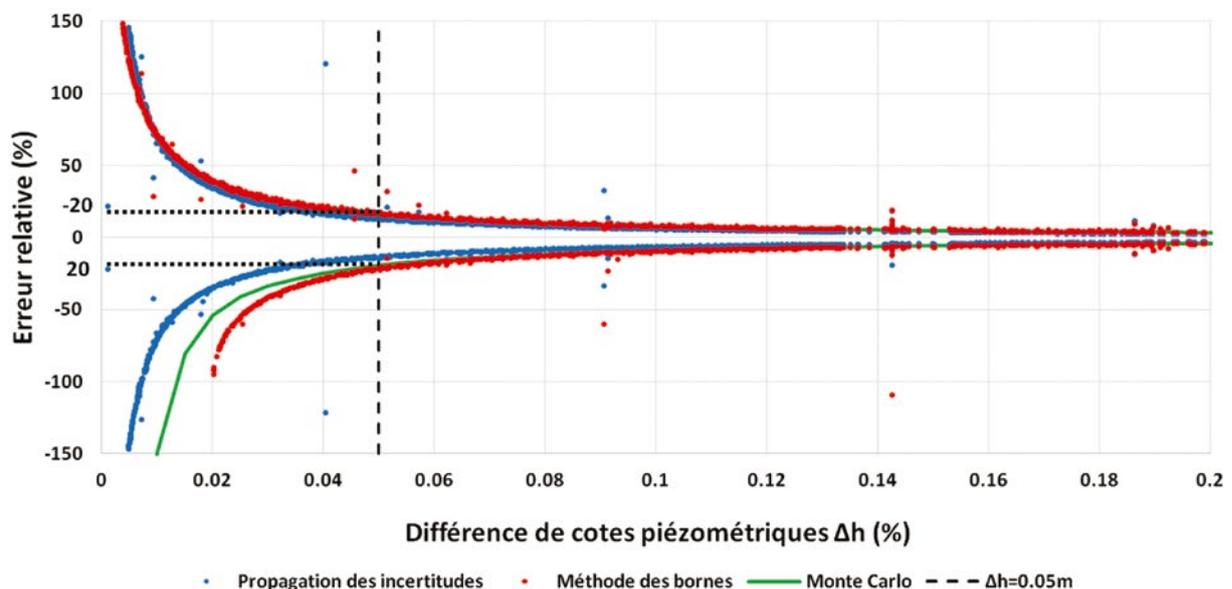


Figure 3 : Comparaison des trois méthodes permettant d'évaluer l'incertitude de mesure sur le débit issue de la précision des capteurs de hauteur d'eau

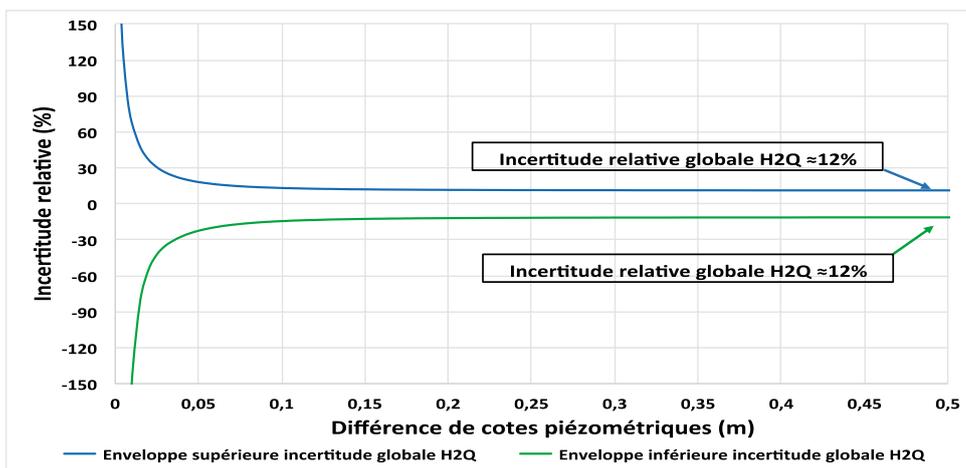


Figure 4 : Évolution de l’incertitude relative globale sur le débit de la méthode h2Q en fonction de la différence de cotes piézométriques

$Q=f(h_{\text{amont}}+dh_{\text{amont}}; h_{\text{aval}}+dh_{\text{aval}})$. En calculant l’écart relatif entre les débits obtenus avec la méthode de Monte Carlo et les débits calculés avec les données de hauteurs non modifiées, l’incertitude relative de mesure sur le débit est caractérisée.

Cette étude a permis de mettre en exergue une corrélation entre l’évolution de l’incertitude relative de mesure sur le débit et la différence de cotes piézométriques. En comparant les trois méthodes précédemment présentées (voir Figure 3), on constate que celles-ci sont équivalentes en ce qui concerne l’enveloppe supérieure. Toutefois, pour l’enveloppe inférieure, on observe des variations significatives pour les plus faibles différences de cotes piézométriques (inférieures à 5cm, voir Figure 3). À noter que la méthode dite de propagation des incertitudes semble sous-estimer légèrement les incertitudes pour l’enveloppe inférieure. Étant donné que la méthode dite de Monte Carlo permet d’obtenir une enveloppe inférieure sur l’ensemble de la plage des différences de cotes piézométriques, c’est celle qui est retenue. En pratique, la méthode h2Q n’est pas préconisée pour une différence de cotes piézométriques inférieure à 5cm en raison d’une incertitude globale trop importante sur le débit. Par conséquent, l’enveloppe retenue issue la méthode de Monte Carlo est quasiment équivalente aux deux autres méthodes pour cette gamme de cotes piézométriques. Les deux enveloppes obtenues sont valables pour n’importe quel site d’étude. En effet, elles sont indépendantes des caractéristiques du site de mesure (type de section, distance entre les deux capteurs et pente géométrique).

II.1.6 Incertitude globale sur le débit

Pour résumer, l’incertitude globale sur le débit de la méthode h2Q peut être estimée en considérant que les différentes sources d’incertitudes sont indépendantes. D’après ce qui est détaillé au-dessus, seulement trois sources engendrent des incertitudes significatives sur le résultat final. L’incertitude relative globale peut donc s’écrire de la manière suivante :

$$\frac{\sigma_{Q_{\text{global}}}}{Q} \approx \sqrt{\frac{\sigma_{\text{rugosité}}^2 + \sigma_{\text{modèlehydraulique}}^2 + \sigma_{Q_{\text{mesures}}}^2}{Q}} \quad (4)$$

La Figure 4 est un exemple d’évolution de l’incertitude globale sur le débit de la méthode h2Q. Les différentes sources d’incertitudes sont combinées suivant la formule 4. Dans ce cas, une incertitude de 10% sur le coefficient de rugosité a été

utilisée. Cette valeur est susceptible de légèrement varier en fonction de la méthode utilisée pour calibrer ce paramètre.

La figure 4 illustre la corrélation entre l’incertitude globale sur le débit et la différence de cotes piézométriques. Étant donné que la différence de cotes piézométriques est connue pour chaque valeur de débit alors son incertitude globale l’est également.

III CONCLUSION

Cette étude a identifié et caractérisé toutes les sources d’incertitudes de la méthode h2Q. Concernant la rugosité et la pente, il est possible de réduire ces incertitudes en effectuant un calibrage par le biais d’une campagne temporaire de mesure. L’application de trois méthodes fréquemment utilisées (propagation des incertitudes, méthode des bornes et Monte Carlo) a permis d’évaluer l’incertitude de la précision des capteurs de hauteur d’eau sur le débit. Une étude paramétrique en fonction des caractéristiques géométriques du site (pente, forme et dimension de la section) révèle le caractère universel de la distribution des incertitudes en fonction de la différence de ligne piézométrique quel que soit le débit. Les résultats démontrent qu’il est nécessaire d’avoir une différence de cotes piézométriques suffisante (>5cm) pour pouvoir obtenir des résultats représentatifs et fiables dans le temps. Lorsque les conditions d’application de la méthode h2Q sont respectées, chaque valeur de débit est associée à une incertitude connue qui est de l’ordre de 15%. Cet ordre de grandeur est comparable aux autres technologies déjà présentes sur le marché lorsque celles-ci sont installées dans les règles de l’art.

IV. REFERENCES

AFNOR (2008) – Réseaux d’évacuation et d’assainissement à l’intérieur des bâtiments ; NF EN 752.

ARRETE DU 21 JUILLET (2015) – 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 1,2Kg/j de DBO5 [en ligne]. *Journal Officiel du 19 août 2015*, 0190, p. 14457.

COACHS (2014) – Représentativité des capteurs de vitesse et impact sur l’évaluation en continu du débit d’un écoulement à surface libre. *Guide Technique*, 4, p. 27.

- HAGER W H (1999) – *Wastewater hydraulics. Theory and practice.* Springer.
- ISEL, S (2014) – Développement de méthodologies et d'outils numériques pour l'évaluation du débit en réseau hydraulique à surface libre. *Thèse de doctorat Université de Strasbourg*, 234 p.
- ISO (1983) – *Mesure de débit des liquides dans les canaux découverts – Canaux jaugeurs à col rectangulaire, à col trapézoïdal et à col en U.* Association Française de Normalisation ; Iso 4359.
- ISO (2004) – *Hydrometry – Measurement of discharge by the ultrasonic (acoustic) method*, International Standardization Association, ISO 6416, 2004.
- ISO (2010) – *Hydrometry – Guidelines for the application of acoustic velocity meters using the Doppler and echo correlation methods*, International Standardization Association, ISO 15769, 2010.
- JCGM 100 (2008) – *Evaluation of measurement data - Guide to the expression of uncertainty in measurement*, p. 120.
- JCGM 101 (2008) – *Evaluation of measurement data. Guide to the expression of uncertainty in measurement – Propagation of distributions using a Monte Carlo Method, Supplement 1*, p. 82.
- SOLLIEC, L (2013) – *Modelling and validation of a real time flow rate model established from velocity profiles in disturbed open channels.* *Thèse de doctorat Université de Strasbourg*, 190 p.