



HAL
open science

Fiabiliser les mesures de vitesse - Représentativité spatiale des mesures en continu de vitesse et incertitudes sur les mesures de débit

Frédérique Larrarte, Claude Joannis, Emmanuel Mignot, Nicolas Riviere,
Gislain Lipeme Kouyi

► To cite this version:

Frédérique Larrarte, Claude Joannis, Emmanuel Mignot, Nicolas Riviere, Gislain Lipeme Kouyi. Fiabiliser les mesures de vitesse - Représentativité spatiale des mesures en continu de vitesse et incertitudes sur les mesures de débit. [Rapport de recherche] IFSTTAR - Institut Français des Sciences et Technologies des Transports, de l'Aménagement et des Réseaux. 2016, 28p. hal-01306130

HAL Id: hal-01306130

<https://hal.science/hal-01306130>

Submitted on 22 Apr 2016

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.



Guide Technique

Fiabiliser les mesures de vitesse Représentativité spatiale des mesures en continu de vitesse et incertitudes sur les mesures de débit

Auteurs :

Frédérique Larrarte¹, Claude Joannis¹, E.Mignot², Nicolas Rivière², Gislain Lipeme Kouyi³

¹ Institut Français des Sciences et Technologies des Transports, de l'Aménagement et Des Réseaux (IFSTTAR)

² Univ Lyon, INSA Lyon, CNRS, Laboratoire de Mécanique des Fluides et d'Acoustique (LMFA, UMR5509), F-69621 Villeurbanne, France

³ Univ Lyon, INSA Lyon, Laboratoire DEEP, F-69621 Villeurbanne, France

Ce guide technique est un livrable des projets :

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

Date : 18/03/2016

Contact : frederique.larrarte@ifsttar.fr, claude.joannis@ifsttar.fr, nicolas.riviere@insa-lyon.fr



SOMMAIRE

1. Introduction.....	4
2. Un peu d'hydraulique.....	4
3. Pourquoi mesurer des vitesses ?	6
4. Représentativité d'une mesure de vitesse	7
4.1. Exemples de distributions de vitesses (profils développés, loin de singularités).....	7
4.2. Exemples d'influence de singularités sur les champ de vitesse	9
4.3. Qu'appelle-t-on vitesse moyenne, utilisée pour calculer le débit?.....	11
5. Principe et représentativité des mesures effectuées par différents capteurs.....	12
5.1. Mesure par temps de transit	12
5.2. Débitmétrie à effet Doppler	15
5.3. Mesure par profils verticaux de vitesse.....	18
5.4. Mesure de vitesse de surface.....	18
6. Simulations de capteurs – exemples d'erreurs.....	19
6.1. Mesures à l'aval d'une confluence avec deux types de capteur (temps de transit et effet Doppler).....	20
6.2. Mesures à l'aval d'un coude avec deux types de capteur (temps de transit et effet Doppler).....	22
6.3. Conclusions concernant l'influence d'une singularité	24
7. Vérifications in situ.....	24
7.1. Exploration du champ de vitesses	24
7.2. Mesures de débit par traçage.....	25
8. Conclusion	26
9. Références.....	28

1. Introduction

Le contexte réglementaire (arrêtés interministériels du 22 décembre 1994 et du 22 juin 2007) et normatif (NF EN 752, NF P15-900-2) demande/incite les gestionnaires à surveiller les réseaux, évaluer leurs performances, intervenir rapidement en cas de dysfonctionnements ponctuels, informer le maître d'ouvrage sur les aménagements souhaitables pour améliorer les performances et augmenter la fiabilité de la collecte. Dans ce contexte, la connaissance du débit est un préalable indispensable.

Cette note porte sur les techniques permettant la mesure *en continu* du débit dans des écoulements à surface libre lorsqu'on a choisi de déterminer le débit à partir de la vitesse moyenne \bar{U} et de la surface mouillée S_m :

$$Q = \bar{U} \cdot S_m \quad \text{Equation 1}$$

Ce document vise à préciser la représentativité des vitesses obtenues à l'aide des deux capteurs les plus couramment utilisés, à savoir les cordes de vitesse (temps de transit) et le capteur à effet Doppler. L'objectif opérationnel est d'aider les maîtres d'ouvrage à évaluer des projets de mise en place de mesure de débits en continu. Il donne également des indications pour la vérification et la réception de ces appareils. Pour cela nous rappellerons les notions de base de fonctionnement des capteurs et leurs sources d'erreur avant de présenter les mesures qu'il est raisonnablement possible de faire avec des capteurs de mesure de vitesse en continu puis de présenter les mesures qu'il est possible de réaliser dans le cas de contrôle ou d'opérations ponctuelles. Le propos est centré sur les méthodes utilisables en assainissement urbain et adaptées **aux mesures en continu du débit** d'écoulements à surface libre sur des sites permanents ou temporaires.

2. Un peu d'hydraulique

Un écoulement à surface libre peut être schématisé comme sur la Figure 1 avec des parois solides, un écoulement de hauteur h avec une interface eau-air dont la largeur, appelée largeur au miroir, sera notée B . Le schéma présente un collecteur clos car le propos est axé sur les réseaux urbains enterrés mais la démarche reste valable pour les canaux à ciel ouvert.

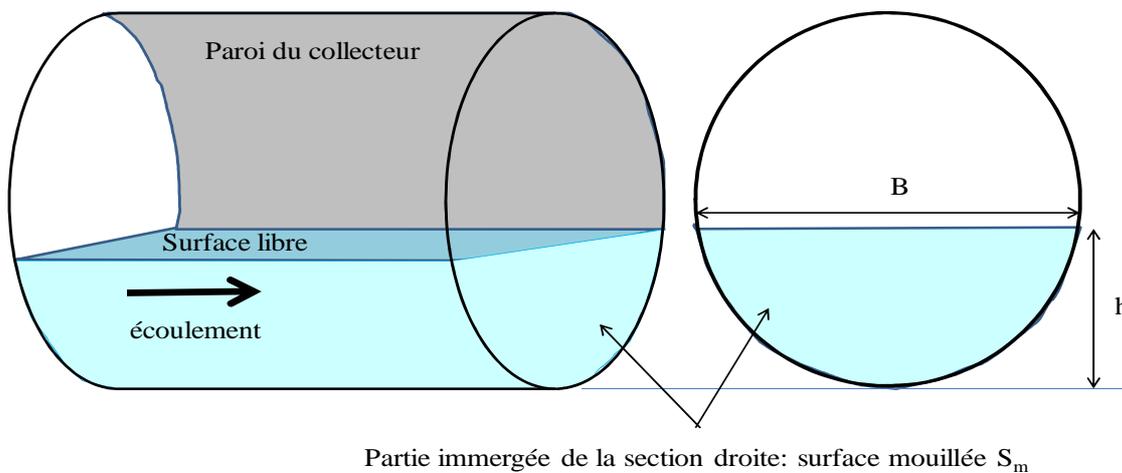


Figure 1. Définitions des principaux paramètres

Le profil vertical de la vitesse longitudinale peut être représenté comme sur la Figure 2 avec une vitesse qui croît du fond vers la surface et des parois vers le plan médian de l'écoulement.

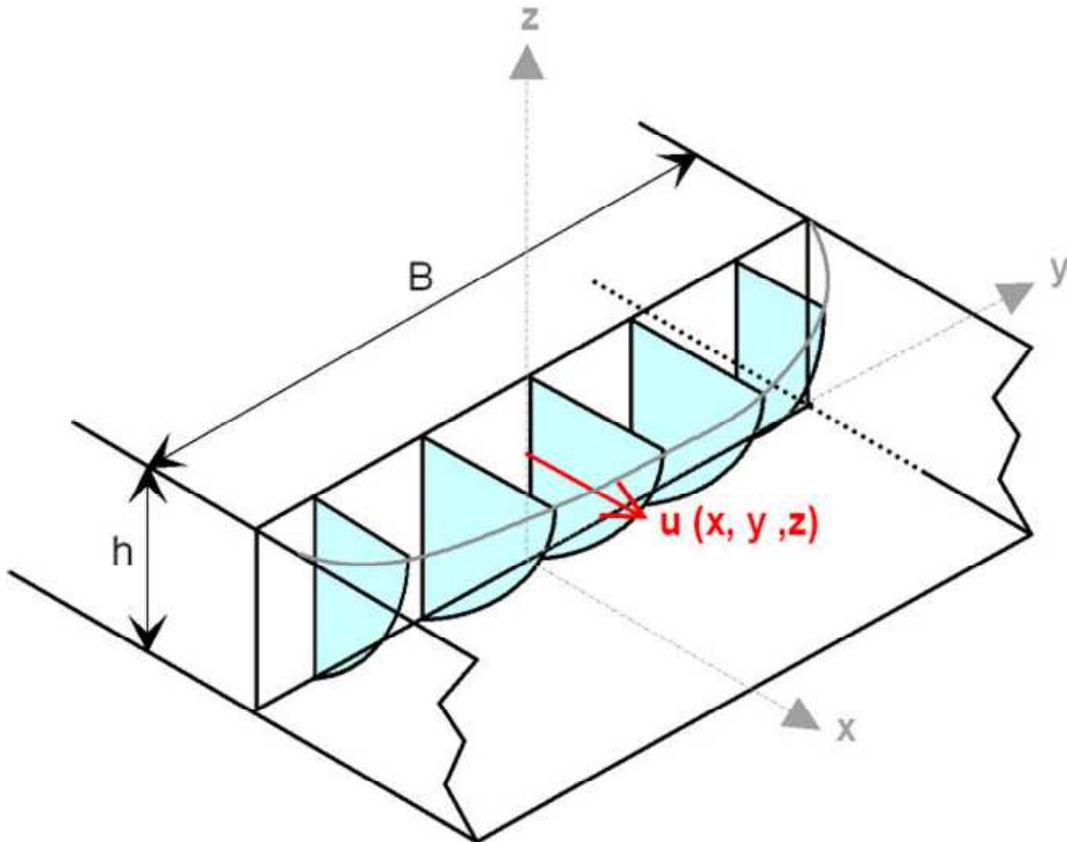


Figure 2. Distribution des vitesses longitudinales dans une section

En fait, cette schématisation correspond au cas de canaux larges caractérisés par un facteur d'aspect Ar supérieur à 5, où $Ar=B/h$ est le rapport de la largeur au miroir B et du tirant d'eau h . Pour les canaux larges la vitesse maximale est au niveau de la surface (Figure 3a). Pour les canaux étroits ($Ar < 5$), la distribution des vitesses présente un « dip-phenomenon » (phénomène de plongée) c'est-à-dire que la vitesse maximale est située au-dessous de la surface libre (Figure 3b).

Les collecteurs de section circulaire ou ovoïde ont un facteur d'aspect inférieur à 5 (Figure 3b). On observe donc souvent un maximum de vitesse situé en-dessous de la surface libre, comme nous le verrons à la section 7, sauf pour les taux de remplissage faibles.

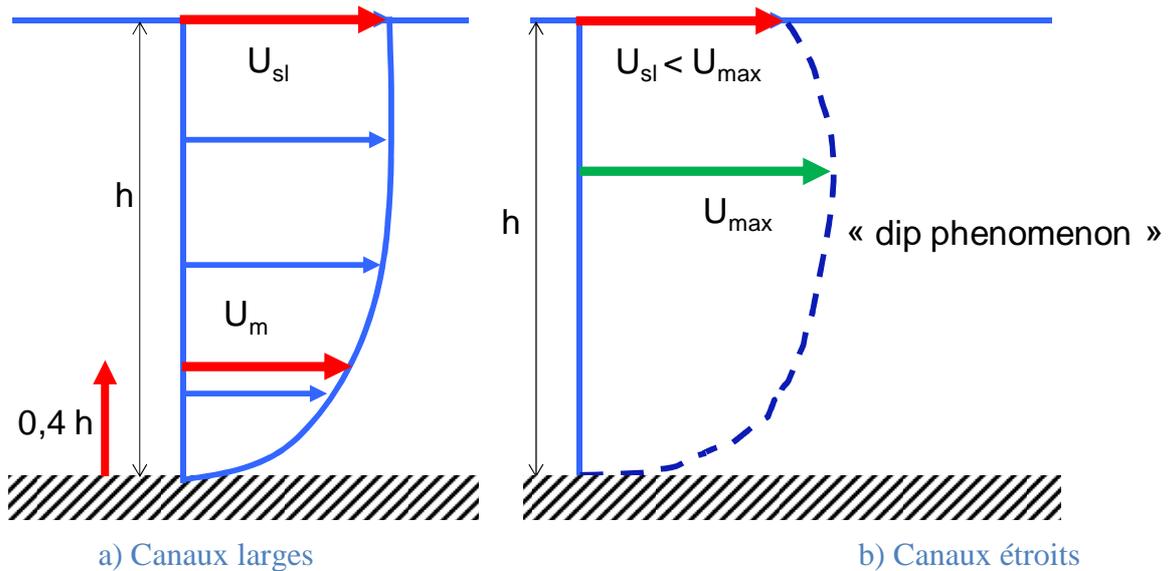
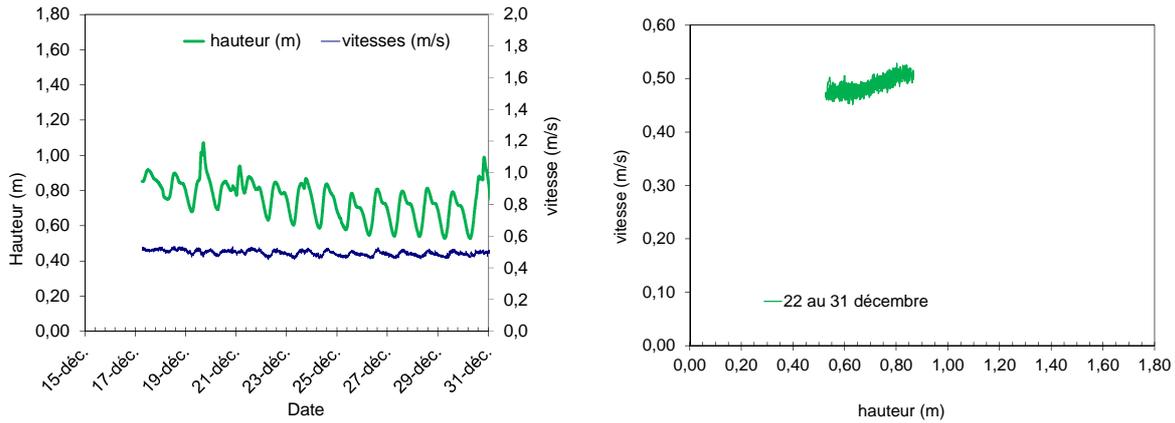


Figure 3. Profils de vitesse au centre d'un canal à distance de toute singularité

3. Pourquoi mesurer des vitesses ?

Le débit dont il est question dans ce document est un débit volumique qui se mesure comme le rapport d'une unité de volume par une unité de temps – soit des m^3/s – ou une unité dérivée. Pour des raisons de simplicité de mise en œuvre et de fiabilité de la mesure, les installations ne mettant en œuvre que des mesures de hauteurs d'eau sont à privilégier. Le principe et la mise en œuvre en sont détaillés au sein du guide « Méthode h2Q » (Isel et al, 2016). Cependant, elles impliquent l'existence d'une relation permanente entre hauteur et débit. Dès que cette dernière n'est pas assurée, il faut associer une mesure de vitesse à la mesure de hauteur pour évaluer le débit Q .

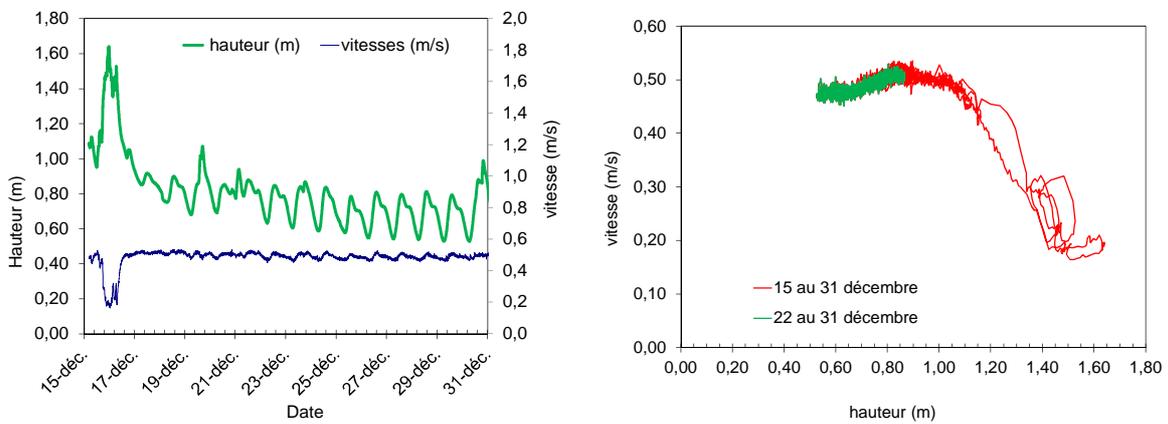
Comment vérifier au préalable si une relation permanente entre hauteur et débit existe ? La réponse est : en mesurant hauteur et vitesse et surtout "pendant une durée pas trop courte". Les figures 4 et 5 visent à illustrer cette phrase sibylline. Sur la figure 4a, on observe les chroniques de hauteur et de vitesse mesurées sur un site urbain de réseau unitaire. Ces mêmes données, représentées selon une courbe hauteur vitesse (figure 4b), montrent une relation que l'on peut qualifier d'univoque sur la période considérée, soit une dizaine de jours. Sur la figure 5a, on observe les chroniques sur ce même site mais sur une durée d'acquisition plus longue comprenant notamment un évènement pluvieux le 15 décembre. On constate alors un effondrement de la vitesse alors que la hauteur augmente de manière substantielle (quasiment du simple au double par rapport au régime de temps sec). Ces mêmes données, représentées selon une courbe hauteur vitesse (figure 5b), montrent l'absence de relation simple. Ceci est caractéristique de la présence d'une influence aval (seuil, confluence, siphon, ...). Dans ce cas, il n'est pas possible d'obtenir de relation univoque hauteur/débit et la mesure de débit nécessite une mesure de vitesse.



a) chroniques temporelle

b) Relation univoque

Figure 4 : Acquisition de données de vitesse et hauteur sur une période



a) chroniques temporelle

b) Relation plus complexe

Figure 5 : Acquisition de données de vitesse et hauteur sur une période

4. Représentativité d'une mesure de vitesse

Partons du principe que l'on s'intéresse à des sites où, faute de relation univoque hauteur-débit, la mesure de vitesse est nécessaire. Nous allons maintenant aborder la question de la représentativité spatiale des mesures de vitesses. En effet, au sein d'un écoulement, la vitesse n'est pas constante, ce qui doit être pris en compte pour la mesure de débit. Les collecteurs présents en réseau unitaire d'assainissement urbain sont, à plus de 50%, de sections circulaires ou ovoïdes. Les grandes caractéristiques des champs de vitesses sont d'abord présentées, loin de toute singularité. Ensuite, les caractéristiques d'un champ de vitesse modifié par la présence de singularités sont discutées. Enfin, le principe de l'obtention du débit à partir de mesures locales de vitesse au sein de ces champs non-uniformes est exposé.

4.1. Exemples de distributions de vitesses (profils développés, loin de singularités)

Pour les collecteurs circulaires, le facteur d'aspect est généralement inférieur à 5 (voir section 2) et on observe souvent un maximum de vitesse situé en-dessous de la surface libre (Figure 6b) sauf pour les taux de remplissage faible (Figure 6a).

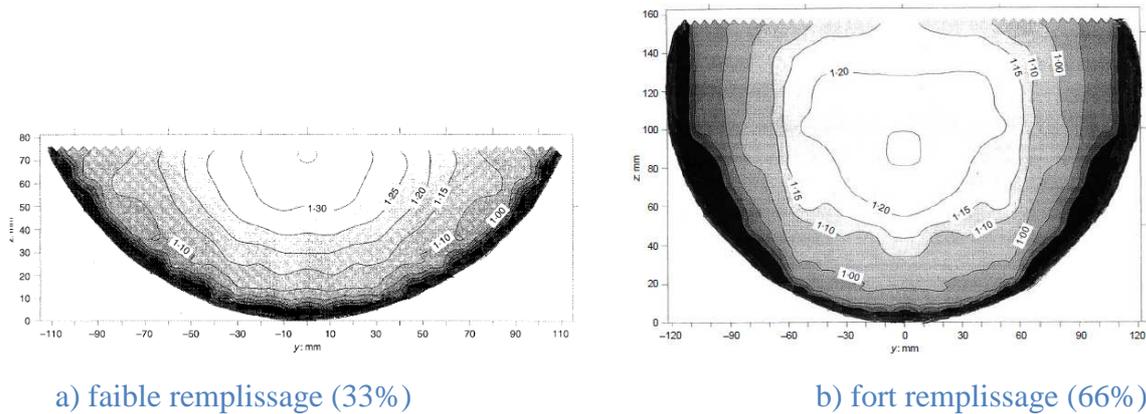


Figure 6. Champ de vitesses développé dans un ouvrage de section circulaire - résultats expérimentaux de (Knight et Sterling, 2000)

Les plus grands des collecteurs unitaires sont par ailleurs munis de banquettes qui permettent d'augmenter la vitesse pour un débit et une hauteur d'eau donnés et donc de minimiser les risques de dépôt sédimentaire. On a alors une section simple pour les faibles débits avec une vitesse maximale située au-dessous de la surface et des gradients transversaux et verticaux de vitesse (Figure 7). Pour les plus forts débits, la section devient composée et le champ de vitesses se complexifie : on observe notamment la présence d'un minimum local de vitesse au-dessus de la banquette (Figure 7b) et un gradient transversal de vitesse très marqué à proximité de la face verticale de la banquette.

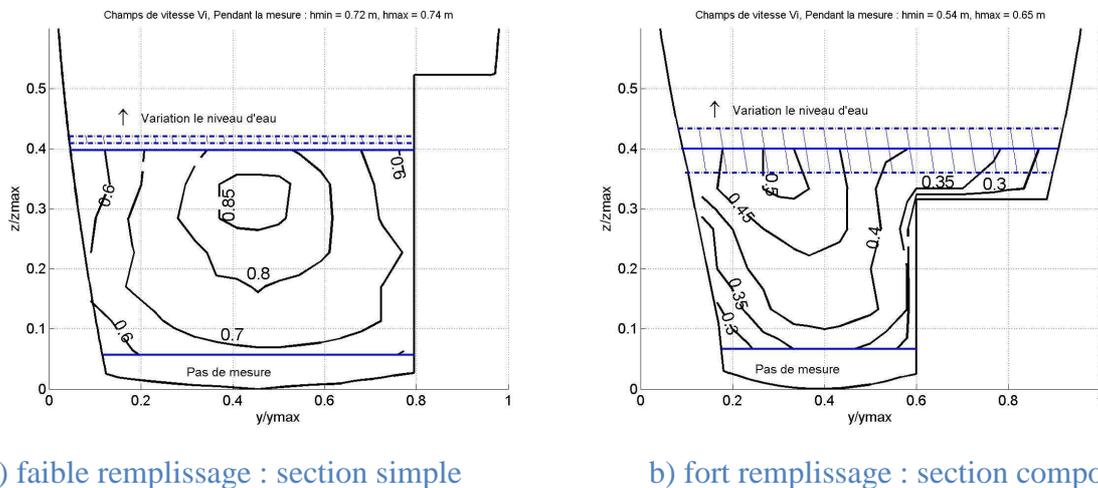


Figure 7. Champ de vitesses développé dans un ouvrage de section complexe

Les Figures 6 et 7 correspondent à des écoulements uniformes et notamment dans une section éloignée de toute singularité (à l'amont ou l'aval). Dans ces conditions, le champ de vitesses est assez prévisible et peut être extrapolé à partir des mesures de capteurs implantés dans des conditions standardisées. C'est pourquoi les constructeurs de débitmètres donnent des recommandations quant à la distance minimum d'installation à l'aval d'une singularité à partir de laquelle l'écoulement n'est plus influencé par celle-ci. Par exemple, pour les capteurs à effet Doppler, le guide d'installation TeledyneIsco (2009) stipule que « le capteur doit être installé assez loin des perturbations (coude, jonction) pour que l'écoulement soit stabilisé ». Les préconisations de Néotek-Ponsel sont plus précises et indiquent que la sonde doit être

fixée à « 6 à 10 fois le diamètre à distance des coudes, intersections (organes générant des turbulences) ». Le fabricant NIVUS (2003) indique que pour assurer une mesure optimale, le capteur doit être installé à une distance minimale par rapport à la sortie d'une déviation en fonction de l'angle α . Pour un angle supérieur à 45° , la distance minimum est de $10D$ pour une vitesse inférieure à 1 m/s et $20D$ pour une vitesse supérieure, D désignant le diamètre de la canalisation.

4.2. Exemples d'influence de singularités sur les champ de vitesse

Nous avons indiqué en section 4.1 que les capteurs doivent être positionnés loin de toute singularité (coude, jonction, *etc.*). En pratique il est difficile, voire impossible, de respecter ces préconisations. La Figure 8 montre un exemple de plan de réseau, où on note de très nombreuses singularités (coudes, confluences, défluences, ...) et il n'y a donc parfois pas d'autre solution que d'instrumenter en aval de l'une d'elles, et l'écoulement est alors influencé comme on peut le voir sur les Figures 8 et 9.

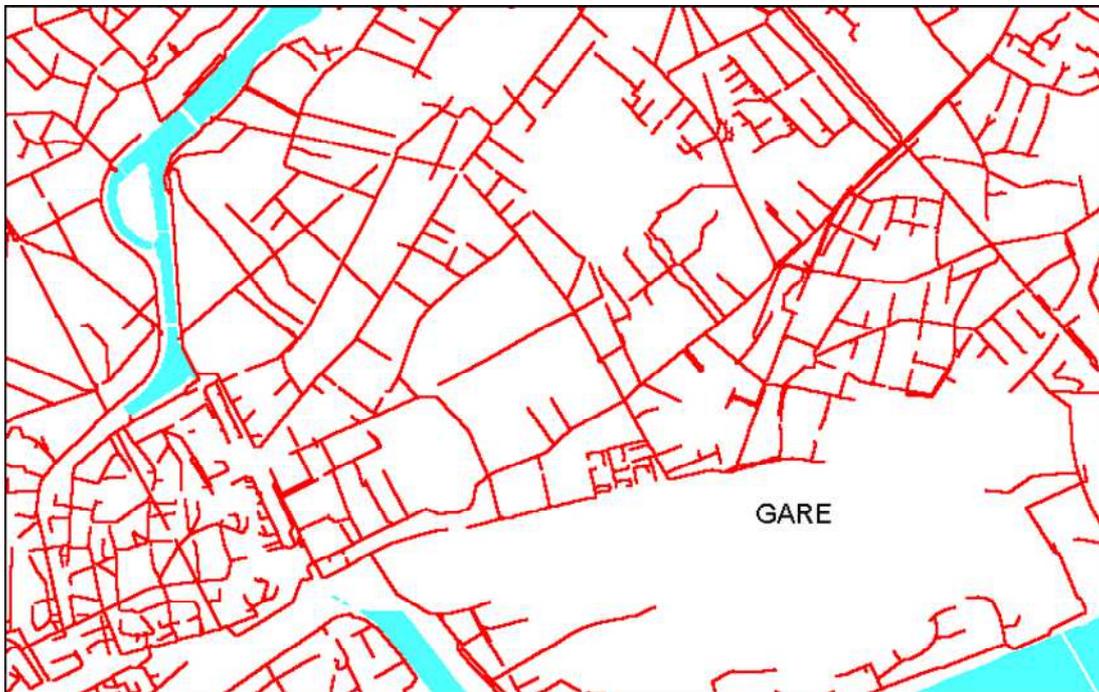


Figure 8. Extrait d'un plan de réseau d'assainissement urbain

La Figure 9 montre le champ de vitesses à $15B$ en aval d'un coude à 90° pour une vitesse d'écoulement moyenne de 0,8 m/s. On voit clairement que le champ de vitesses est encore fortement décalé vers l'extrados. Nous y reviendrons dans la section 7. De même la Figure 10 montre l'influence d'une jonction sur l'écoulement en aval. Il est intéressant de noter l'ondulation de la surface, signe de la présence de fortes turbulences et de perturbation du champ de vitesses.

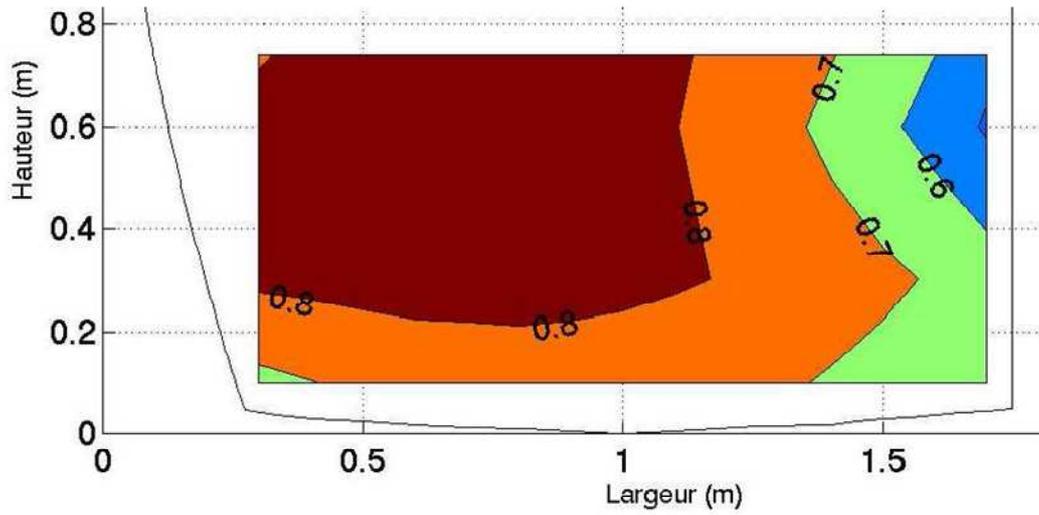


Figure 9. Champ de vitesses mesuré par temps sec dans la cunette d'un collecteur à banquette à l'aval d'un coude à 90° à une distance de 15 B



Figure 10. Influence d'une confluence sur l'écoulement en aval

4.3. Qu'appelle-t-on vitesse moyenne, utilisée pour calculer le débit?

La vitesse moyenne \bar{U} que l'on souhaite mesurer dans une section est le rapport du débit à la section mouillée : c'est la moyenne de la composante longitudinale (*i.e.* perpendiculaire à la section) des vitesses de toutes les particules fluides qui passent à travers la section à un instant donné. Cette vitesse moyenne peut être approchée en échantillonnant 'n' points répartis dans la section (cf. NF EN ISO 748) :

$$\bar{U} = \frac{1}{S_m} \cdot \sum U_i \cdot dS_i \quad \text{Equation 2}$$

où U_i est la composante de la vitesse locale (moyennée dans le temps) au point d'indice i qui est perpendiculaire à la section à travers laquelle on évalue le débit, et dS_i est l'élément de surface associé à cette vitesse (Figure 11). Généralement, le débit est déterminé dans une section perpendiculaire à la direction principale Ox de l'écoulement et donc U_i est la composante longitudinale de la vitesse.

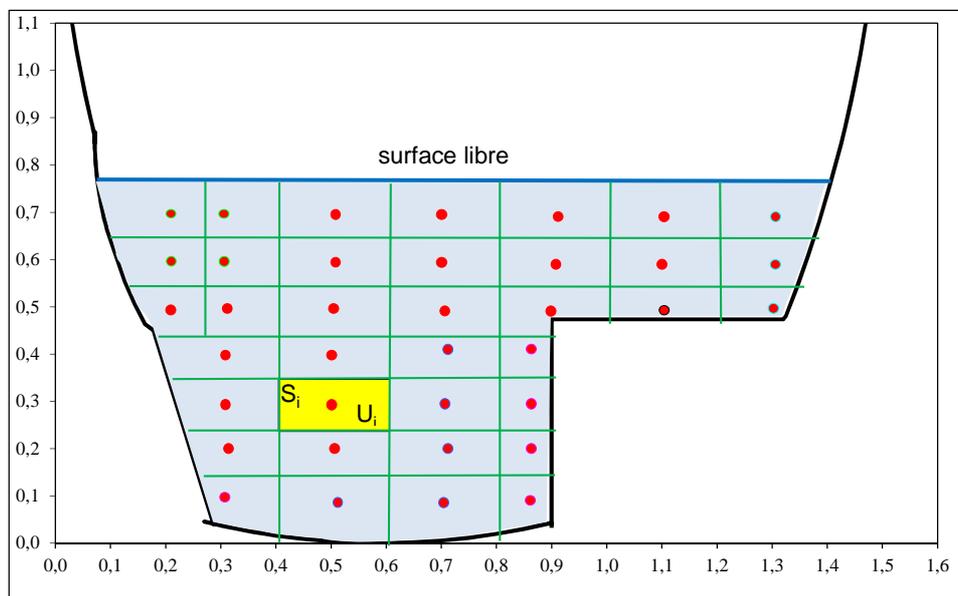


Figure 11. Exemple de discrétisation d'un champ de vitesses en éléments de surface associé chacun à une vitesse locale

En pratique, pour des raisons technologiques, la plupart des capteurs de vitesse ne mesurent qu'une composante de la vitesse, définie par une direction arbitraire (suivant l'axe de mesure du capteur), qui est généralement différente de l'axe de l'écoulement. La mesure intègre donc toutes les composantes de la vitesse, sans qu'il soit possible de les dissocier autrement qu'en considérant que la vitesse longitudinale est prépondérante. Ce point sera détaillé dans la suite pour chaque capteur.

De plus, les capteurs de vitesse utilisés pour une mesure en continu n'échantillonnent, pour la plupart d'entre eux, qu'une partie de l'écoulement. Cet échantillonnage n'est pas limité à un plan perpendiculaire à l'écoulement et intègre souvent un ensemble de sections. Il faudra donc extrapoler le résultat brut issu de ces capteurs (représentatif d'une partie de l'écoulement) pour évaluer la vitesse moyenne recherchée (représentative de l'ensemble de la section). Cette

extrapolation doit prendre en compte la représentativité de l'échantillonnage réalisé par le capteur, et le champ de vitesses dans la zone échantillonnée pour le relier à l'ensemble de la section mouillée considérée.

On peut donc dire en résumé que :

- idéalement un capteur effectue un échantillonnage complet de la section sur laquelle on mesure la vitesse moyenne,
- en pratique un capteur mesure une vitesse \hat{U} représentative d'une partie seulement de la section
- pour assurer la représentativité spatiale de la mesure de vitesse dans une section, il faut qu'il existe une fonction f telle que :

$$\hat{U} = f(\bar{U}) \quad \text{Equation 3}$$

- en pratique il est préférable que la fonction f se réduise à l'application d'un coefficient constant sur toute la gamme des vitesses et des hauteurs de remplissage

$$\hat{U} = k\bar{U} \quad \text{Equation 4}$$

Dans la section 5, nous revenons en détails sur cette question pour deux capteurs de vitesse les plus couramment utilisés (temps de transit et capteur à effet Doppler) et de quelques autres capteurs apparus plus récemment sur le marché de l'instrumentation en hydraulique urbaine.

5. Principe et représentativité des mesures effectuées par différents capteurs

5.1. Mesure par temps de transit

Le principe de cette méthode repose sur l'émission d'ondes ultrasonores entre deux capteurs (émetteurs-récepteurs) qui sont positionnés à la même élévation, de part et d'autre de la section et installées selon un angle prescrit par le constructeur. Soient deux émetteurs-récepteurs A et B immergés dans un fluide animé d'une vitesse moyenne \bar{U} . On appelle L la distance séparant A et B, α l'angle formé par la direction moyenne de l'écoulement et la ligne AB (Figure 12). Les vecteurs \vec{V}_i (en noir sur la Figure 12) représentent le champ de vitesses dont la composante longitudinale est indiquée en vert sur la figure. Les vecteurs \vec{V}'_i (en orange) sont leurs projections sur la corde de vitesse et les vecteurs \vec{U}_i (bleu) sont les projections des vecteurs \vec{V}'_i suivant l'axe de la canalisation.

En pratique, les capteurs A et B sont alternativement émetteurs et récepteurs. Soit t_1 le temps mis par un signal acoustique issu de A pour atteindre B et inversement t_2 celui allant de B à A. La mesure par temps de transit appréhende les vitesses d'écoulement par leurs projections V' sur le segment AB.

En considérant que les composantes parallèles à l'axe du collecteur sont prépondérantes sur les composantes transversales et verticales (Figure 12), la vitesse V' mesurée par la corde est convertie en vitesse longitudinale U (en bleu sur la Fig.12) par application du coefficient $1/\cos(\alpha)$.

La vitesse \hat{U} mesurée par le capteur le long du segment AB s'exprime par :

$$\hat{U} = \frac{L}{2 \cdot \cos(\alpha)} \cdot \left(\frac{t_2 - t_1}{t_2 \cdot t_1} \right) \quad \text{Equation 5}$$

\hat{U} est proche de la vitesse de l'écoulement \bar{U} moyennée sur la transversale AB (équation 6).

$$\hat{U} \cong \frac{1}{L \cdot \cos(\alpha)} \int_0^L V' \cdot dl$$

$$\dots = \frac{1}{L \cdot \cos(\alpha)} \int_0^L V \cdot \cos(\beta) \cdot dl = \frac{1}{L} \int_0^L U \cdot dl = \bar{U} \quad \text{Equation 6}$$

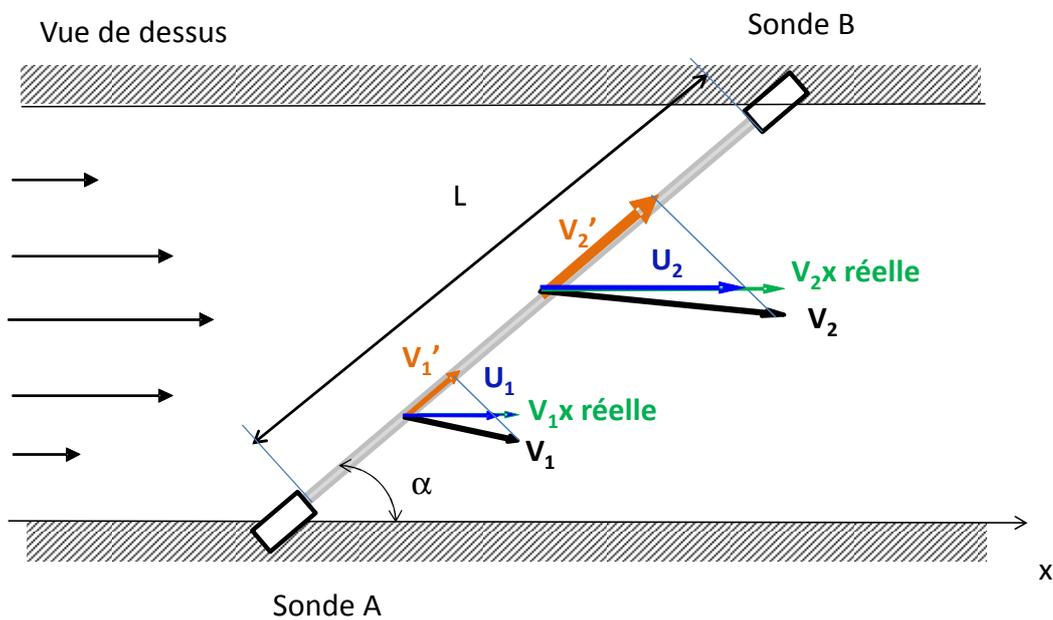


Figure 12. Schéma de principe d'une corde de vitesse (vue en plan) montrant les différentes composantes des vitesses

A l'opposé, la Figure 13 montre que si la composante transverse de la vitesse V est forte, la vitesse longitudinale estimée U est très différente de la vitesse longitudinale réelle (V_x réelle en vert). La présence de vitesses transverses non-négligeables est donc une première source d'erreur importante.

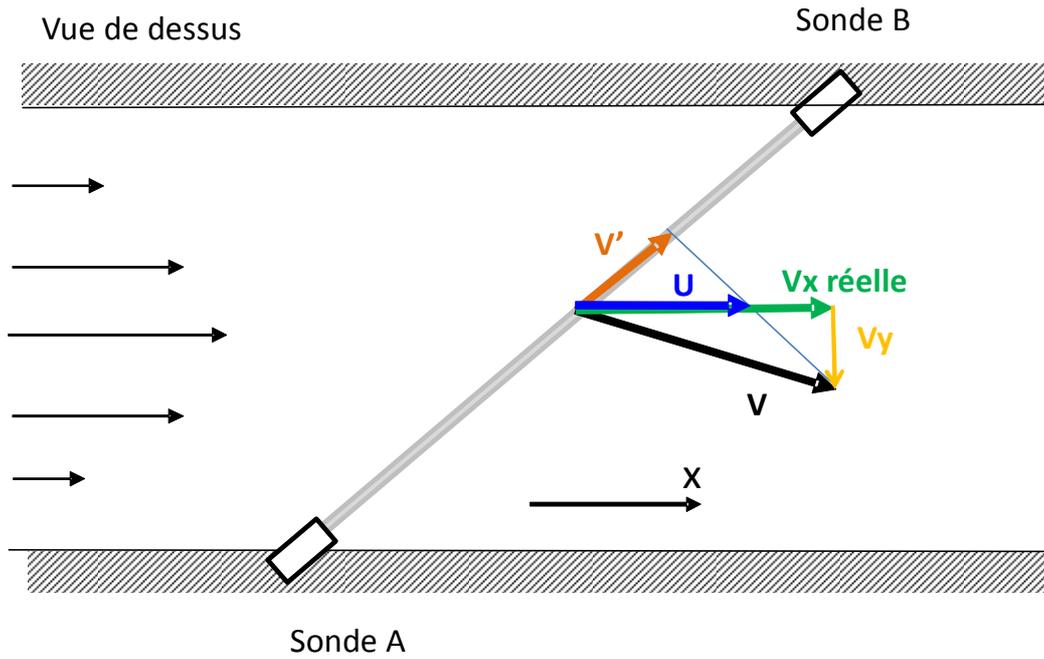


Figure 13. Influence d'une composante transversale V_y forte sur l'écart entre la vitesse U mesurée selon une corde et la vitesse longitudinale V_x

Le segment AB est appelé « corde » au sens géométrique du terme. Cette corde permet un échantillonnage horizontal homogène du profil transversal de vitesses (Figure 14a), mais ceci seulement à une hauteur donnée. Cette mesure n'étant représentative de l'écoulement qu'à la hauteur de la corde, il est fréquent sur le terrain d'utiliser plusieurs cordes à plusieurs hauteurs afin de mieux scanner la totalité de la section. Ceci correspond à un échantillonnage vertical obtenu en installant plusieurs cordes de vitesse échelonnées à des niveaux différents (Figure 14b).

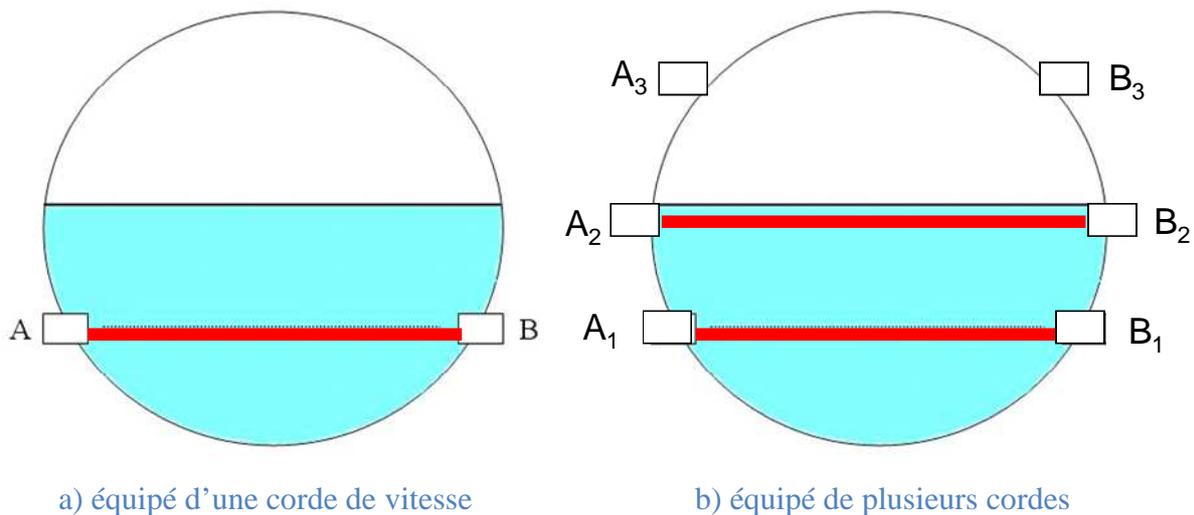


Figure 14 : Vues en coupe d'un collecteur

Le débit est calculé en affectant une surface à chaque corde et en appliquant le cas échéant des coefficients k_i correcteurs aux vitesses mesurées par les différentes cordes (équation 5) :

$$Q = \sum_{i=1}^n k_i \cdot \hat{U}_i \cdot S_i \quad \text{Equation 7}$$

où \hat{U}_i et S_i sont respectivement la vitesse mesurée par la $i^{\text{ème}}$ corde et la surface mouillée correspondante. Les coefficients k_i ne sont différents de 1 que pour l'élément de surface inférieur (fond) et supérieur (voisinage de la surface libre). La norme NF EN ISO 6416 propose deux méthodes pour affecter des surfaces aux cordes (non détaillées ici).

5.2. Débitmétrie à effet Doppler

Un vélocimètre à effet Doppler est un appareil qui émet des ondes ultrasonores à la fréquence f_s (en général entre 0,5 et 1 MHz). Lorsqu'elles rencontrent un contraste d'impédance acoustique donc de densité (constitué en pratique par des particules pouvant être solides ou gazeuses), les ondes sont renvoyées avec une fréquence $f_s + f_{D,i}$ où $f_{D,i}$ est proportionnelle à la vitesse de la particule n suivant la direction du capteur (vitesse radiale V_r) soit :

$$V_r = \frac{c \cdot f_{D,i}}{2 \cdot f_s} \quad \text{Equation 8}$$

Où c est la célérité des ultrasons dans l'eau, f_s la fréquence d'émission, $f_{D,i}$ la différence entre les fréquences d'émission et de réception.

La grandeur que l'on cherche à mesurer étant la vitesse U dans l'axe de l'écoulement, celle-ci est calculée à partir de la vitesse radiale par :

$$U = V_r / \cos(\beta_i) \quad \text{Equation 9}$$

où β_i est l'angle entre la direction de déplacement de la particule 'i' et la droite joignant le capteur à la particule. Pour les conditions de pose classiques (en radier) l'angle β_i est assimilé à l'angle θ_i , situé dans le plan de symétrie verticale du capteur, qui lui-même est assimilé à l'angle d'émission $\bar{\theta}$ du capteur, même si en toute rigueur ceci n'est vrai que pour les particules situées sur l'axe du cône d'émission (Figure 15).

La norme internationale ISO 15769 définit certaines caractéristiques du capteur :

- angle d'émission $\bar{\theta}$;
- portée ;
- ouverture du faisceau ultrasonore θ_w ;
- fréquence d'émission f_s ;
- analyse du signal.

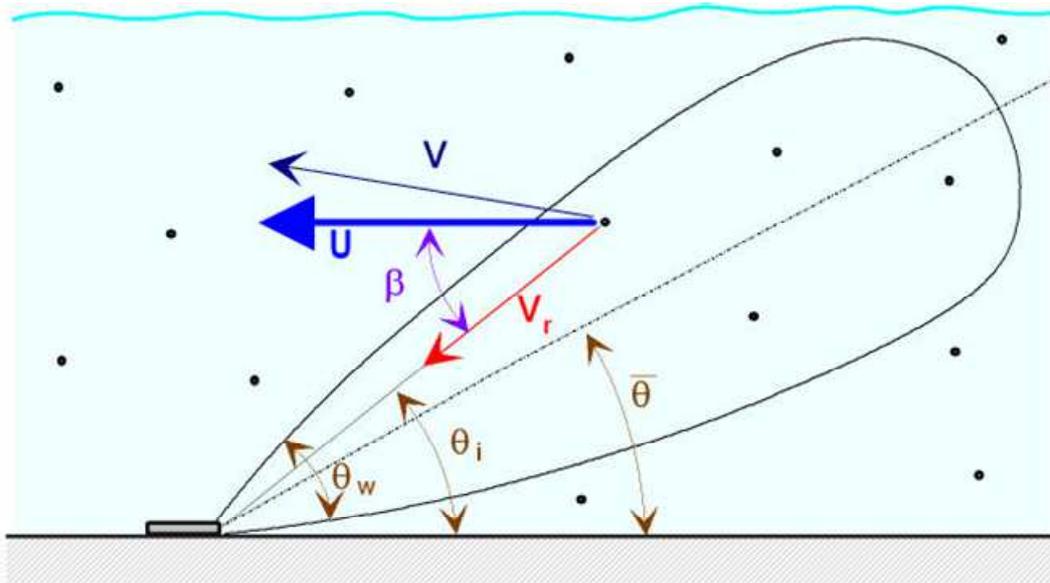


Figure 15. Paramètres caractéristiques d'un débitmètre à effet Doppler
(Schéma adapté de la spécification technique ISO/TS 15769 :2000)

La Figure 15 est une vue de profil qui précise certains de ces paramètres mais ne montre pas que le faisceau ultrasonore émis échantillonne un cône tridimensionnel qui coupe un ensemble de sections verticales (Figure 16).

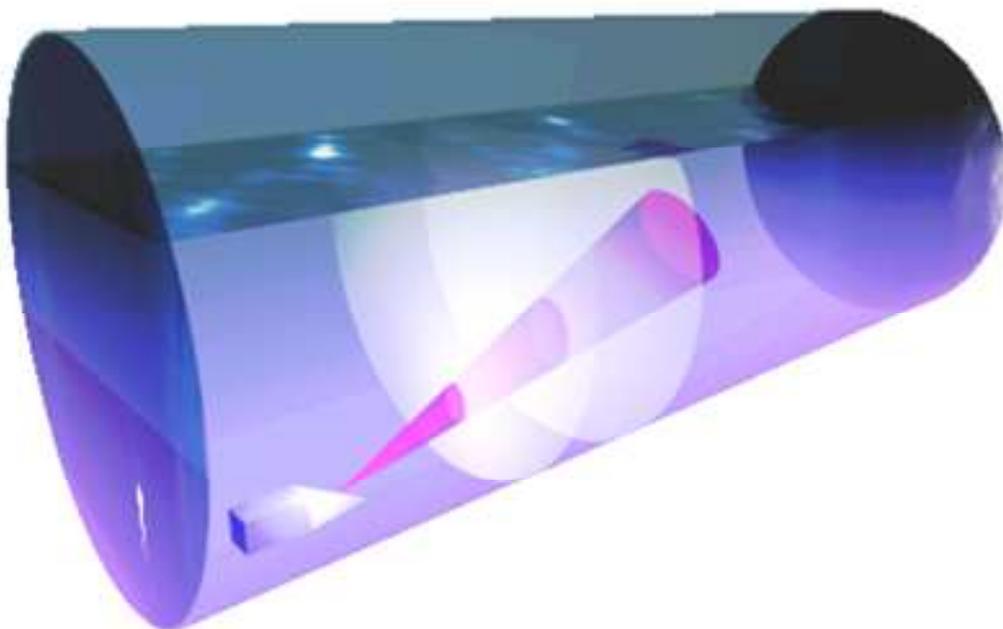


Figure 16. Cône ultrasonore tridimensionnel et deux exemples de sections échantillonnées

Tout comme pour les cordes, la présence de vitesses transverses ou verticales tend à fausser la mesure; en effet sur la Figure 17 la vitesse longitudinale réelle (V_x réelle en vert) diffère de la vitesse longitudinale U estimée par le capteur (en bleu) du fait que la vitesse en ce point (V , en noir) n'est pas parallèle à l'axe principal de la conduite.

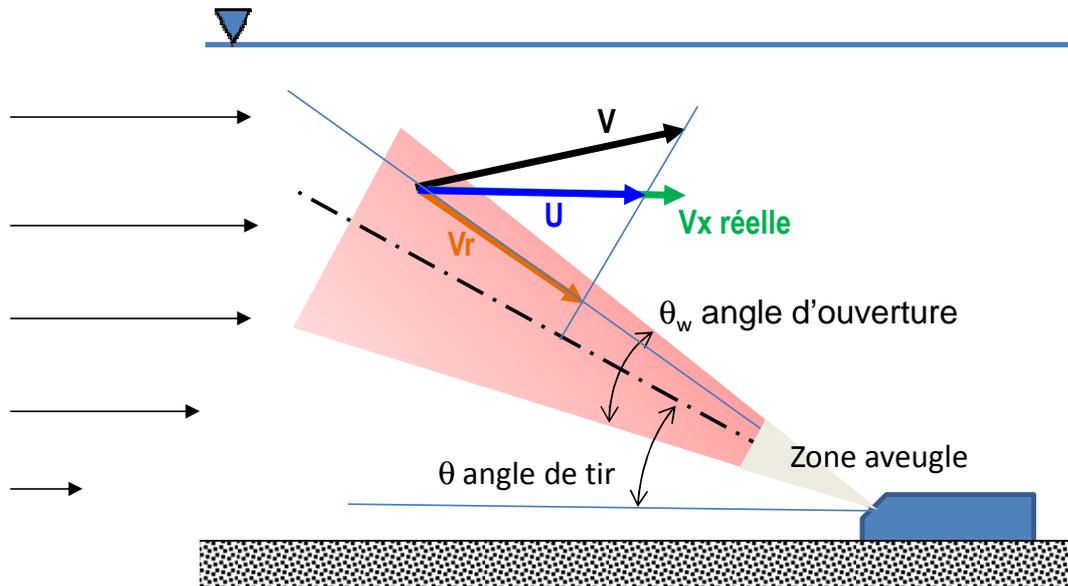


Figure 17. Influence d'une composante transversale V_y forte sur l'écart entre la vitesse U mesurée avec un capteur à effet Doppler et la vitesse longitudinale V_x

Pour évaluer les paramètres caractéristiques de capteurs Doppler, Larrarte *et al.* (2008) ont mis au point un banc d'essais et ont montré que ces paramètres varient considérablement selon les capteurs (Tableau 1).

Lors de ces essais, la portée a été définie en disant que la portée maximale est atteinte lorsque le capteur n'est plus capable de lire avec une précision acceptable (20%) la vitesse d'un écoulement contrôlé, localisé dans un tube transparent aux ultrasons, et immergé dans une cuve d'eau immobile à une distance donnée du transducteur Doppler. C'est donc une définition arbitraire, qui reflète partiellement les capacités réelles de mesure *in situ*, mais permet des comparaisons objectives entre différents appareils.

Tableau 1. Caractéristiques de divers capteurs Doppler (Larrarte *et al.*, 2008)

Capteur	A	B	C
Fréquence (MHz)	1,0	0,5	1,0
Angle d'émission (°)	15	31	14
Angle d'ouverture (°)	17	10	24
Portée (m)	> 3,5	0,8	1,2

En réalité, la portée résulte de l'atténuation des signaux reçus en fonction de la distance, essentiellement par des effets géométriques. En effet, des expérimentations en laboratoire ont montré que les eaux usées, aux concentrations rencontrées en réseaux urbains, soit inférieures à 1 g/l, n'atténuent pas les ultrasons (Larrarte et François, 2008) et donc n'ont pas d'influence

sur la portée. L'atténuation constatée est un effet géométrique dû à la répartition de l'énergie ultrasonore sur une calotte sphérique de surface proportionnelle au carré de la distance entre le transducteur et le réflecteur, à l'aller puis au retour.

Ainsi, la valeur moyenne donnée par le capteur est :

$$\hat{U} = \frac{1}{\cos(\bar{\theta})} \cdot \frac{\sum_1^n \frac{V_i}{d_i^4}}{\sum_1^n \frac{1}{d_i^4}} \quad \text{Equation 10}$$

où V_i est la vitesse radiale locale d'un réflecteur i et d_i la distance entre le capteur et le réflecteur i . Lorsque le terme $1/d^4$ devient trop petit, le signal correspondant devient trop faible par rapport au bruit, ou s'il ne l'est pas, le poids des vitesses correspondantes devient négligeable.

5.3. Mesure par profils verticaux de vitesse

Pour corriger l'effet d'atténuation géométrique présentée dans le paragraphe précédent, il existe depuis une dizaine d'année des appareils qui distinguent la vitesse des réflecteurs en fonction de leur distance. Ils reconstituent ainsi un profil vertical de vitesses U_i (Figure 18). Le calcul du débit s'effectue alors par une méthode des aires (équation 2) en faisant l'hypothèse que la vitesse est la même dans toute la largeur ou en appliquant un coefficient de pondération pour tenir compte du ralentissement près des parois.

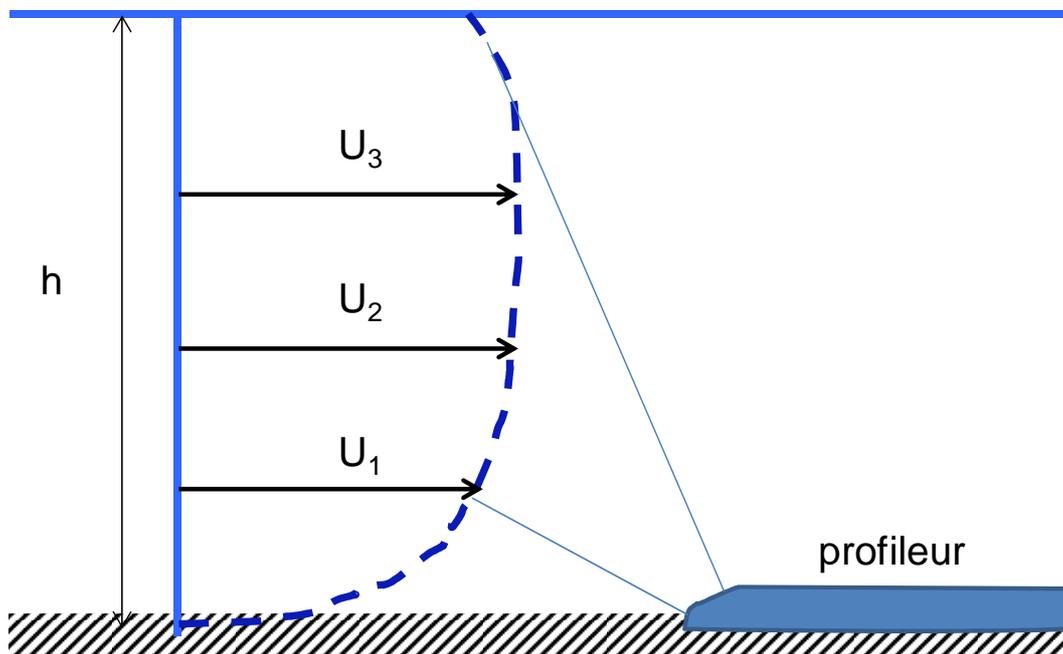


Figure 18. Schéma de principe d'un profileur de vitesse

5.4. Mesure de vitesse de surface

La mesure de vitesse en surface permet de mettre en œuvre des capteurs situés au-dessus de la surface libre et sans contact avec l'effluent (sauf mise en charge du site de mesure). Cela présente des avantages décisifs en termes de maintenance, mais l'extrapolation de la mesure

brute à la valeur moyenne dans la section est plus délicate. Il faut donc, pour calculer le débit, disposer d'informations permettant de déterminer la vitesse moyenne en fonction de la vitesse à la surface. Les sites des constructeurs indiquent d'ailleurs parfois explicitement que « la vitesse mesurée est convertie ensuite en vitesse moyenne à l'aide d'algorithme ». Quelles que soient les conditions qui ont prévalu à l'établissement de ces algorithmes, il appartient à chaque utilisateur de vérifier son adéquation avec son site de mesure.

Les mesures de vitesse en surface utilisent généralement des ondes radar, mais des techniques d'imagerie vidéo sont également en cours de développement. Quoiqu'il en soit, ces techniques de mesure de vitesse en surface sont en développement rapide non-seulement en rivière mais aussi en collecteur (Nguyen *et al.*, 2009).

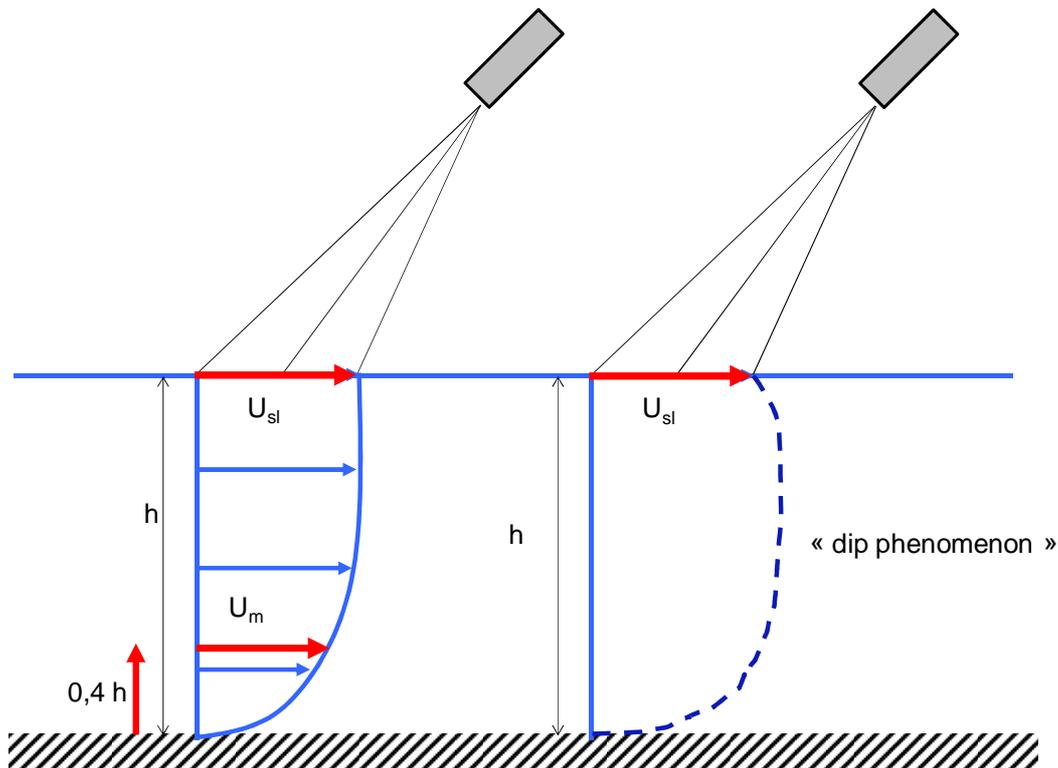


Figure 19. Mesure de la vitesse de surface et vitesse moyenne

6. Simulations de capteurs – exemples d’erreurs

Comme nous l’avons rappelé dans la section 4, il n’y a parfois pas d’autre choix que d’instrumenter à proximité d’une singularité. Dans cette éventualité, chaque cas nécessiterait une étude spécifique au site. Cependant, l’usage d’exemples détaillés ci-dessous permet d’appréhender l’ordre de grandeur de l’erreur ainsi introduite. Ces exemples s’appuient sur deux types de singularités, coudes et défluences, qui engendrent des perturbations fortes de l’écoulement et donneront un ordre de grandeur des erreurs plutôt majorées pour les écoulements établis (loin de toute singularité).

Pour estimer les erreurs, nous avons étudié par simulations numérique l’effet des deux singularités sur la distribution des vitesses en aval, puis nous avons simulé le résultat de l’échantillonnage de cette distribution par un capteur en fonction de ses caractéristiques et de sa distance à la singularité. Nous avons ensuite calculé la moyenne \hat{U} de ces vitesses

échantillonnées. Selon le cas il s'agit d'une moyenne brute (équation 10, cas des capteurs Doppler) ou pondérée par des surfaces (équation 7, cas des cordes). Enfin nous avons comparé cette moyenne à une valeur de référence, pour évaluer l'impact de la singularité sur les mesures effectuées à l'aval. L'erreur relative est donnée alors par:

$$\text{erreur relative (en \%)} = 100 \cdot \frac{\hat{U}_x - \bar{U}}{\bar{U}} \quad \text{Equation 9}$$

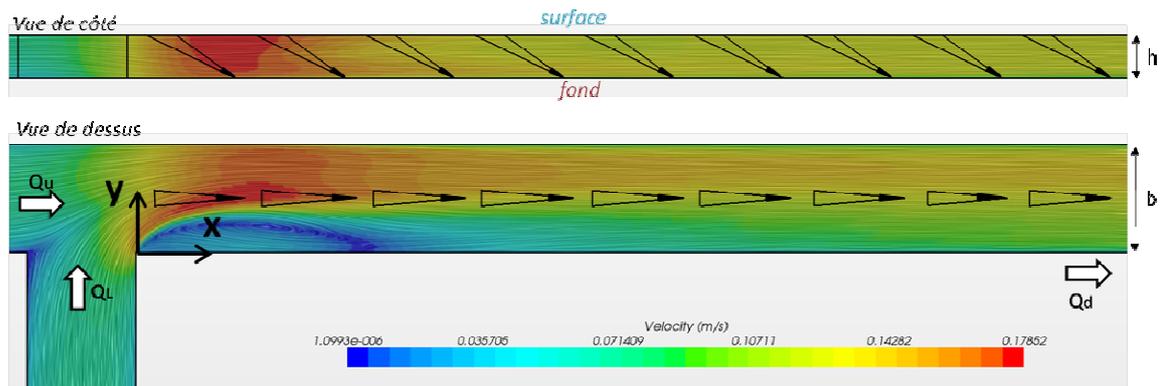
\bar{U} est la vitesse moyenne dans la section de mesure hors de l'influence de la singularité, utilisée comme référence.

6.1. Mesures à l'aval d'une confluence avec deux types de capteur (temps de transit et effet Doppler)

Les écoulements au voisinage et à l'aval d'une jonction à 90° de canaux rectangulaires à surface libre ont été simulés à l'aide d'un code de calcul 3D en considérant deux séries d'écoulement (S1 et S2) : la première (S1) pour laquelle le paramètre qui varie est la répartition des débits en provenance des deux canaux amont (tout en maintenant un débit total fixé à 4 l/s) et la deuxième (S2) pour laquelle le paramètre qui varie est le taux de remplissage (égal au rapport entre la largeur des canaux et la profondeur d'eau). Pour chaque écoulement, le débit qui serait mesuré dans la branche par des capteurs typiques des réseaux d'assainissement est comparé au débit réel dans la branche. Deux capteurs (C1 et C2) sont considérés ici : C1 un capteur de mesure par temps de transit à deux cordes (voir §5.1) et C2 un capteur à effet Doppler (voir section §5.2). Pour chaque écoulement, l'erreur du débit estimé par le capteur est relevée en fonction de la distance de positionnement du capteur par rapport à la jonction noté x/b (égal au nombre de largeurs à l'aval de la jonction).

L'analyse du fonctionnement des capteurs a montré que deux sources possibles d'erreur peuvent fausser les estimations de débits : 1) la présence de courants secondaires, c'est-à-dire de composantes non-nulles de vitesse perpendiculairement à l'axe de la branche aval et 2) le fait que le volume de mesure vu par le capteur n'est pas représentatif de la section totale. Pour cette deuxième source d'erreur, il apparaît que l'erreur avec le capteur Doppler (C2) est principalement due au fait que ce capteur ne mesure que dans la partie centrale de l'écoulement où les vitesses longitudinales sont plus importantes que dans le reste de la section (voir Figure 20a) et possède une zone aveugle qui l'empêche de mesurer dans la partie basse de la colonne d'eau. Les cordes, elles, ne mesurent qu'aux altitudes où elles sont placées et elles scrutent en oblique par rapport à la section de la branche par rapport à l'écoulement, ce qui implique que leur mesure n'est pas dans une section mais dans une série de sections (voir Figure 20b à la section $x/b=2$).

a : volumes de mesure vus par des capteurs Doppler



b : volumes de mesure vus par des cordes

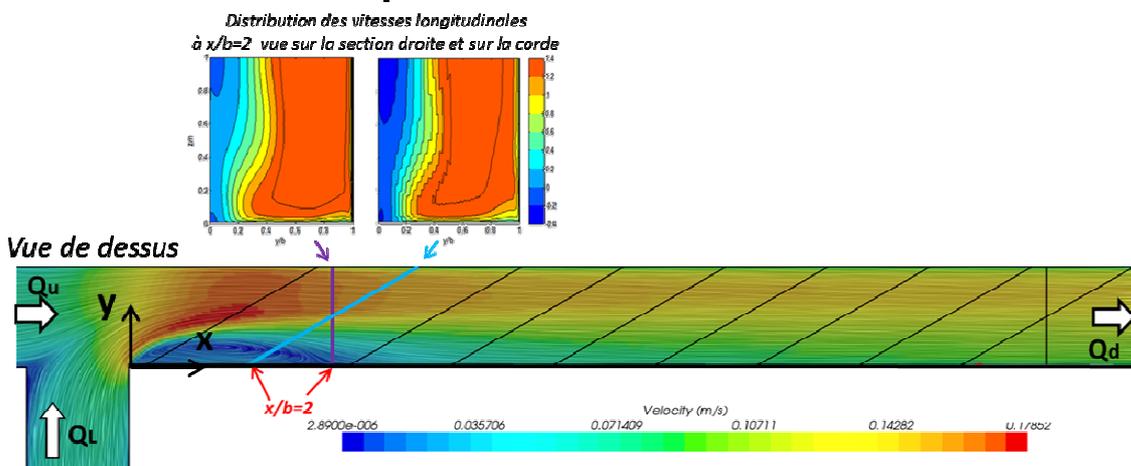


Figure 20. Schéma de l'écoulement dans la jonction calculée numériquement avec les volumes de mesures vu par les systèmes Doppler (a) et par les cordes (b)

Les erreurs d'estimation de débit par ces deux types de capteur (C1 et C2) pour les deux séries d'écoulement (S1 et S2) présentées en Figure 21 montrent que :

- 1) Les cordes tendent à sous-estimer les débits alors que les capteurs Doppler tendent à les surestimer et que ces erreurs sont maximales à proximité de la jonction et diminuent rapidement vers l'aval.
- 2) Le positionnement des capteurs à une distance supérieure à 5 largeurs à l'aval de la jonction permet d'obtenir une erreur inférieure à 8% dans le cas d'utilisation des cordes et inférieure à 20% dans le cas d'utilisation d'un capteur Doppler.
- 3) A proximité de la jonction, les erreurs de débit varient fortement en fonction des caractéristiques des écoulements de sorte qu'un coefficient de correction du débit universel ne peut être obtenu, ces erreurs atteignent ici jusqu'à 60% de surestimation dans le cas le plus défavorable.

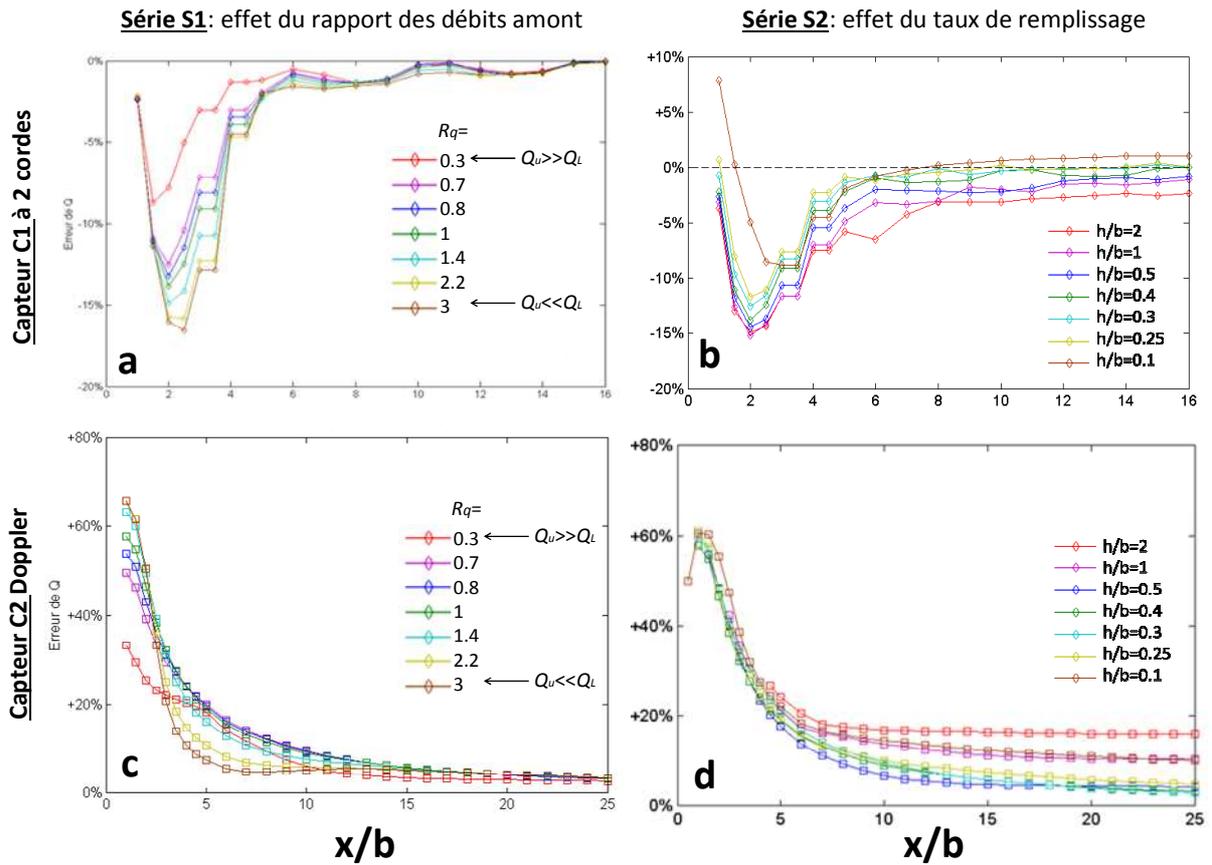


Figure 21. Erreur d'estimation du débit par le capteur Doppler C1 (1^{ère} ligne, a et b) et le capteur à cordes (2^e ligne, c et d) pour les écoulements de jonction à différents rapports de débit entrant (colonne de gauche, a et c) et à différents taux de remplissage (colonne de droite, b et d).

6.2. Mesures à l'aval d'un coude avec deux types de capteur (temps de transit et effet Doppler)

Un autre exemple de singularité présenté ici est un coude à l'aval duquel on évalue l'impact des perturbations sur la mesure.

L'étude porte sur un capteur Doppler d'angle de tir de 15° et d'angle d'ouverture 17° , avec une zone morte de 20 cm, placé comme pour l'exemple précédent dans une canalisation circulaire de 1,5m de diamètre, à l'aval d'un coude à 90° de rayon 10 m. Six contextes hydrauliques ont été définis en faisant varier indépendamment la vitesse et la hauteur de remplissage. La Figure 22 montre que dans toutes les configurations la perturbation du champ de vitesses par le coude a un effet sensible et d'autant plus marqué que le point de mesure est proche de la singularité : on peut atteindre un écart de 25 à 30% pour un capteur situé à $5B$ à l'aval du coude, alors qu'on ne dépasse pas 15% pour un capteur situé à $20B$.

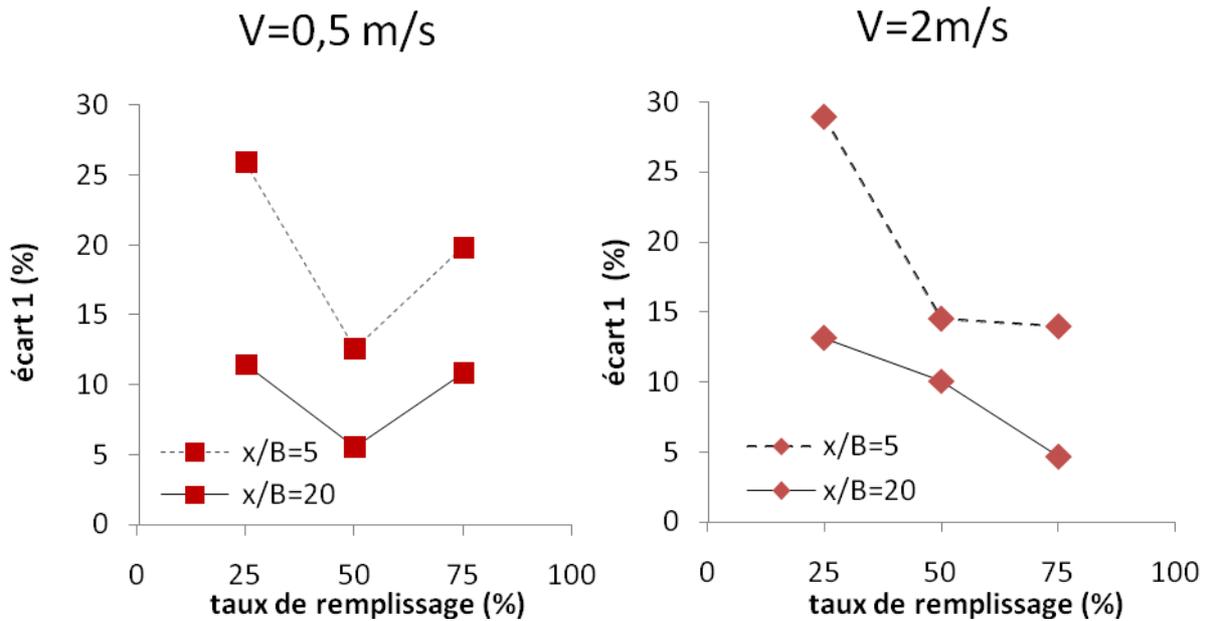


Figure 22. Écarts entre les mesures fournies par un capteur Doppler à l’aval d’un coude et le même capteur non-soumis à l’influence du coude, pour deux distances à l’aval du coude, deux vitesses et trois taux de remplissage.

Le Tableau 2 présente les résultats obtenus à partir des simulations pour une canalisation circulaire de 1,5 m de diamètre, à l’aval d’un coude à 90° de rayon 10 m pour vitesse d’entrée 0,5 m/s. Les mesures effectuées par les cordes sont peu influencées par le coude. En effet celui-ci a surtout pour effet de modifier les profils transversaux de vitesse, en déportant la zone de vitesse maximum vers l’extrados en sortie de courbe. Or les cordes appréhendent de manière très correcte la vitesse moyenne sur une transversale. De plus les écarts calculés sont les mêmes à une distance $5B$ du coude et à une distance $70B$: ils ne sont donc pas dus à la perturbation du champ de vitesses (absente à $70B$) mais plutôt au calcul d’une moyenne pondérée par des surfaces.

Tableau 2. Écarts obtenus avec un débitmètre à cordes de vitesse
(à $5B$ et à $70B$ à l’aval d’un coude)

	Remplissage 25% (1 corde)	Remplissage 50% (2 cordes)	Remplissage 75% (3 cordes)
Ecart (%)	12	7	5

Pour une position donnée du capteur cet effet dépend du contexte hydraulique : le taux de remplissage et la vitesse semblent avoir un effet important, sans que des tendances se dégagent. Il sera donc difficile de corriger cet effet (NB : dans ces simulations, les variations de taux de remplissage pour une vitesse donnée sont obtenues en faisant varier la pente du radier. Les variations de pente de la ligne d’eau induites par une influence aval n’ont pas été étudiées).

6.3. Conclusions concernant l'influence d'une singularité

A condition de prendre des précautions minimales (capteur placé au moins à 5 largeurs de conduite à l'aval de la singularité, utilisation des normes et recommandations), les incertitudes sur la mesure de débit sous l'influence d'une singularité sont limitées mais néanmoins non négligeables, de l'ordre de la dizaine de pour-cent. Elles sont dues principalement à l'échantillonnage spatial, c'est-à-dire au fait que les capteurs ne mesurent les vitesses que dans des zones limitées de l'écoulement (segment(s) pour les cordes, cône pour les capteurs Doppler) qui doivent ensuite être extrapolées à toute la section pour en déduire le débit. Or ces zones de mesure « vues par le capteur » peuvent être en sur- ou sous-vitesse du fait des perturbations induites par les singularités. Les erreurs additionnelles, dues à la présence de vitesses transverses à la conduite (courant secondaire), entraînent des erreurs inférieures, de l'ordre du pour-cent cette fois. Ces conclusions sont valables pour les sections courantes : la section 4.1 a en effet montré qu'elles peuvent contenir des courants secondaires mais aussi de fortes inhomogénéités de vitesse comme par exemple en présence de banquettes.

La connaissance de ces incertitudes de mesure dues à l'influence de singularités évaluées ici sur des exemples est malheureusement très difficile à transposer avec précision sur le terrain. Elles dépendent des géométries des singularités spécifiques à chaque ouvrage et, pour un site donné, des conditions d'écoulement qui peuvent fortement varier, (niveau de remplissage, rapport des débits entrant dans une confluence, des influences aval...), *etc.* Des campagnes de mesure *in situ* (exploration du champ de vitesse au courantomètre, vérification par dilution de traceur, empotage ou pose d'un seuil temporaire, mesures redondantes utilisant plusieurs capteurs) ou des campagnes par simulation numérique de l'écoulement restent nécessaires pour vérifier que l'ordre de grandeur des incertitudes correspond bien aux valeurs proposées ci-dessus. Cette vérification ne permet pas pour autant une correction des résultats : il faudrait pour cela que les valeurs de contrôle soient mesurées avec une précision bien supérieure à la valeur de la correction à appliquer. Il faudrait en outre que les vérifications couvrent l'ensemble des contextes hydrauliques, car l'erreur à corriger peut dépendre de ces conditions.

7. Vérifications *in situ*

Avant d'installer un point de mesure fixe mais surtout afin de vérifier les résultats obtenus une fois le matériel en place, il est nécessaire d'effectuer des mesures complémentaires sur site. La norme ISO 15769:2010 précise également que tout capteur à effet Doppler et apparenté doit faire l'objet d'un étalonnage *in situ*, pour une gamme de débits et le cas échéant une gamme de hauteurs. Si cela peut être envisagé pour des stations de jaugeages de cours d'eau, il n'en est pas de même pour les mesures en collecteurs et on s'en tiendra le plus souvent à une vérification. Deux méthodes principales peuvent être utilisées : une vérification directe par échantillonnage des vitesses locales dans une section, ou une vérification indirecte à partir d'une mesure ponctuelle du débit.

7.1. Exploration du champ de vitesses

Une manière relativement simple, tout au moins quant au matériel à mettre en œuvre, consiste à échantillonner les vitesses locales dans l'ensemble de la section de mesure avec un courantomètre portable (Figure 22). Il existe des courantomètres à ultrasons ou électromagnétiques beaucoup plus adaptés aux mesures en assainissement que les moulinets utilisés traditionnellement pour ce type de mesure. Il est préférable que le site de mesure soit aménagé pour permettre cette vérification en permettant le déploiement d'une passerelle sur laquelle l'opérateur pourra travailler relativement confortablement et sans interférer avec

l'écoulement. Pour des raisons d'accessibilité et de sécurité, ce type de vérification reste limité à la gamme basse des débits à mesurer. De plus le résultat du contrôle reste entaché d'incertitudes lié à cette mesure. Il permet cependant de détecter de grosses anomalies dans le champ de vitesses, voire des erreurs de paramétrage du débitmètre à poste fixe.



Figure 22. Mise en œuvre d'un courantomètre pour l'exploration du champ de vitesses dans un collecteur

7.2. Mesures de débit par traçage

Le débit transitant dans une section peut être déterminé par traçage. Pour cela il faut disposer d'une section suffisamment longue pour assurer le bon mélange du traceur (sel, colorant, ...) avec l'ensemble de l'écoulement (ce qui se traduit par une concentration constante du traceur en tout point de la section de prélèvement). Cette méthode peut être mise en œuvre selon deux variantes : injection continue ou instantanée (NF ISO 9555-1). L'injection instantanée est la plus simple à mettre en place : on injecte soudainement une masse M de traceur et on enregistre l'évolution de sa concentration $C(t)$ à l'aval.

Le débit Q supposé constant est la solution de l'équation 11 ci-dessous :

$$M = Q \cdot \bar{C} \quad \text{Equation 11}$$

$$\text{avec } \bar{C} = \frac{1}{(t_i - t_f)} \cdot \int_{t_i}^{t_f} C(t) \cdot dt \quad \text{Equation 12}$$

et t_i , t_f instants de début et de fin de passage de l'« onde » de concentration.

Cette méthode peut être utilisée pour des forts débits à condition qu'ils soient relativement constants dans le temps. Les points sur lesquels il faut porter l'attention sont :

- une distance suffisante entre le point d'injection et le point de contrôle pour assurer le bon mélange (une distance de l'ordre de 100 fois la largeur de l'écoulement est recommandée),
- l'optimisation de la masse à injecter pour que la vague de concentration soit compatible avec la gamme de mesure de l'appareil qui assure le suivi de la concentration.

On se reportera à Lepot *et al.* (2011) pour plus de détails.

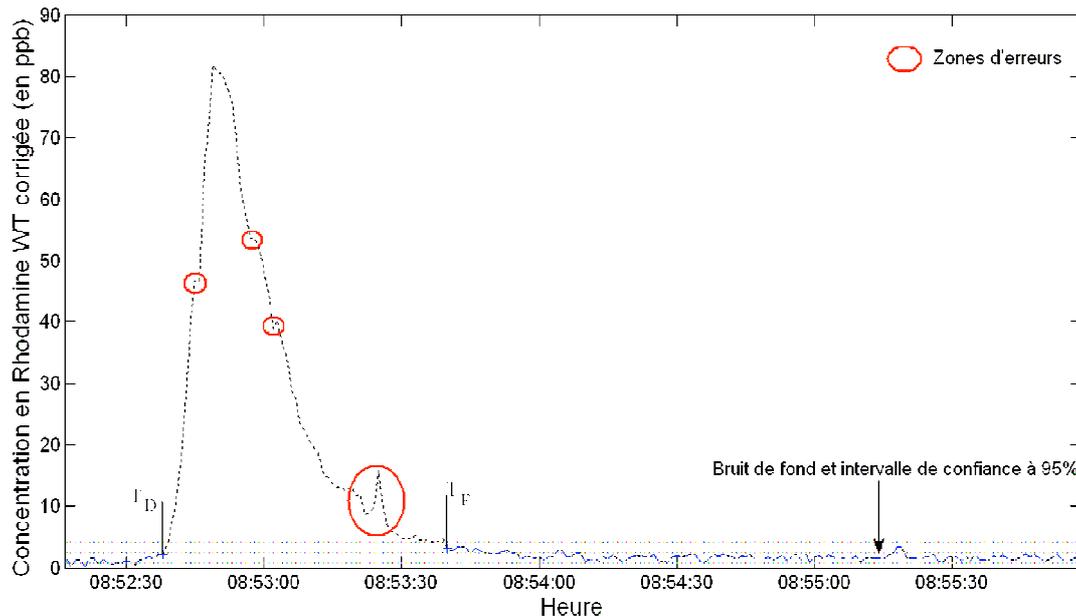


Figure 23. Exemple d'enregistrement d'une onde de concentration de traceur coloré (Rhodamine WT) dans un collecteur (Lepot *et al.*, 2011)

8. Conclusion

La vitesse moyenne d'un écoulement à surface libre n'est pas mesurée directement par les capteurs utilisés en débitmétrie ; ceux-ci se contentent de mesurer la vitesse dans une partie de la section seulement. Or, en fonction du champ de vitesses dans la section de mesure et de la manière dont ce champ est échantillonné par le capteur, la mesure brute obtenue sera plus ou moins pertinente pour être extrapolée afin d'évaluer la vitesse moyenne de l'écoulement.

Lorsque le point de mesure est éloigné d'une singularité, la répartition des vitesses est prévisible, et l'extrapolation à la vitesse moyenne est assez aisée pour des sections de forme simple (collecteurs circulaires ...). Dans le cas de sections de forme complexe (section composées – collecteurs à banquette) l'extrapolation peut nécessiter des jaugeages d'étalonnage. Il faudrait en toute rigueur que ces étalonnages couvrent toute la gamme des débits et des taux de remplissage. En effet l'utilisation d'un capteur de vitesse se justifie si un capteur de hauteur d'eau ne suffit pas, ce qui suppose qu'un même débit puisse être observé avec différents taux de remplissage. Dans ce contexte les capteurs de vitesse sans contact présentent de nombreux avantages quant à la mise en œuvre, mais du fait de leur échantillonnage limité aux vitesses de surface, ils posent avec une acuité particulière la question de l'étalonnage. Pour les capteurs immergés, on peut améliorer la représentativité des mesures de vitesse en implémentant plusieurs capteurs dans une même section notamment

pour les sections composées. Cette option est assez systématiquement mise en œuvre pour les débitmètres à temps de transit. Elle peut être transposée aux capteurs Doppler.

Des singularités telles que coudes, chutes, confluences perturbent le champ de vitesses. Cela peut augmenter sensiblement l'incertitude des mesures qui seraient réalisées plus à l'aval, en particulier pour les faibles taux de remplissage de la conduite. Ce guide s'appuie sur quelques exemples de ce type d'influence, étudiés par des simulations hydrodynamiques 3D du champ de vitesses couplées à des simulations des réponses des capteurs. Ils ont montré qu'on ne peut se contenter de l'incertitude de mesure donnée par les constructeurs – qui concerne la valeur locale de la vitesse – pour évaluer l'incertitude associée à l'estimation du débit. En effet, des incertitudes additionnelles proviennent de l'influence de l'échantillonnage spatial et de l'effet des courants secondaires.

Dans la pratique, une étude hydraulique du site, préalablement à l'installation de ces capteurs, s'avère la solution la plus efficace pour optimiser la localisation et les réglages des capteurs et ainsi contrôler les erreurs d'estimation de débit. Une telle étude hydraulique permet par exemple d'éviter une installation erronée dans une zone exagérément sous influence. Elle doit être complétée par un étalonnage (physique ou numérique) visant à corriger l'effet des singularités sur la mesure de vitesse.

En règle générale on s'en tiendra aux principes suivants :

- éloigner *au maximum* les points de mesure des singularités ;
- choisir des capteurs de vitesse dont la représentativité spatiale est adaptée aux perturbations potentielles sur le site considéré ;
- vérifier par des contrôles ponctuels que les résultats obtenus sont acceptables, en gardant à l'esprit que ces contrôles sont également affectés d'incertitude. La mesure de débit par traçage, encore peu utilisée, est sans doute celle qui est la plus adaptée à ce type de contrôle, en particulier en termes de gamme accessible.

9. Références

- AFNOR (2001), Norme NF P15-900-2. Services publics locaux - Lignes directrices pour les activités de service dans l'alimentation en eau potable et dans l'assainissement - Partie 2 : gestion d'un réseau d'assainissement, 46 pages.
- AFNOR (2005), Norme, NF EN ISO 6416, Hydrométrie - Mesure du débit à l'aide de la méthode ultrasonique (acoustique), 62 pages.
- AFNOR (2008), Norme NF EN 752, Réseaux d'évacuation et d'assainissement à l'extérieur des bâtiments, 106 pages.
- AFNOR (2009), Norme NF EN ISO 748, Hydrométrie - Mesurage du débit des liquides dans les canaux découverts au moyen de moulinets ou de flotteurs, 57 pages.
- AFNOR (2009), Norme NF ISO 9555, (1994), Mesure de débit des liquides dans les canaux découverts - Méthodes de dilution en régime permanent utilisant des traceurs.
- Bertrand-Krajewski J-L., Laplace D., Joannis C., Chebbo G., (2000), *Mesures en hydrologie urbaine et assainissement*, Tech. and Doc., Paris.
- Bertrand-Krajewski J-L., Laplace D., Joannis C., Chebbo G., (2001), *Quelles mesures pour quels objectifs*, TSM, Vol. 2, pp. 45-56.
- Isel S, José Vazquez J , Dufresne M. , Fischer M. , Joannis C. (2016), Méthode h2Q : Une méthode innovante pour évaluer le débit en collecteur par la mesure de deux hauteurs d'eau, Guide technique du projet MENTOR, 30 pages.
- ISO (2010), ISO 15769:2010, Hydrométrie - Lignes directrices pour l'application des compteurs acoustiques de vitesse utilisant l'effet Doppler et la corrélation d'échos
- Jeanbourquin D., Sage D., Nguyen L., Schaeli B., Kayal S., Barry D-A., Rossi L., (2011), *Flow measurements in sewer based on image analysis : automatic flow velocity algorithm*, Water Sciences and Technology, 64-5, pp. 1108-114.s
- Larrarte F., Bardiaux J-B., Battaglia P., Joannis C., (2008), *Acoustic Doppler flow-meters : a proposal to characterize their technical parameters*, Flow Measurement and Instrumentation; 19 (2008), pp. 261-267.
- Larrarte F., François P., (2012), Attenuation of an ultrasonic beam by suspended particles and range of acoustic flow meters in sewer networks, Water Science & Technology, 65-3, pp. 478-483.
- Lepot M., LipemeKouyi G., Bertrand-Krajewski J-L., (2011), *Vérification des mesures de débit en réseau d'assainissement par traçage à la Rhodamine WT*, La Houille Blanche, n°4, 2011, p. 43-48.
- Mignot E., Bonakdari H., Knothe P., Lipemekouyi G., Bessette A., Rivière N., Bertrand-krajewski J-L., (2011), *Experiments and 3D simulations of flow structures in junctions and of their influence on location of flowmeters*. Water Science & Technology, 66-6, pp. 1325-1332.
- Neotek-Ponsel, (2008), *Fiche technique débitmètre*, site internet.
- Nguyen L-S., Schaeli B., , Sage D., Kayal S., Jeanbourquin D., Barry L-D-A., Rossi L., (2009), *Vision-based system for the control and measurement of wastewater flow rate in sewer systems*, Water Sciences and Technology, 60-9, pp. 2281-2289.
- Nivus, (2003), Manuel d'instructions.
- Sterling M., Knight D-W., (2000), *Resistance and boundary shear in circular conduits with flat beds running par full*, Proc Instn. Engrs Water & Mar. Engng, 142, dec. 229-240.
- Teledyne Isco, (2009), 2110 *Ultrasonic Flow Module and sensor*, Installation and operation guide.