



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

Auteurs : Frédérique Larrarte¹, Claude Joannis^{1,2}

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

² Groupement pour l'Evaluation des Mesures en Continu dans les Eaux et en Assainissement (GEMCEA)

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

Date : 27/05/2014

Contact : frederique.larrarte@ifsttar.fr , claude.joannis@ifsttar.fr

Le projet COACHS est un partenariat entre :

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



Sommaire

1. INTRODUCTION	5
2. UN PEU D'HYDRAULIQUE	6
3. REPRÉSENTATIVITÉ DES MESURES DE VITESSE EFFECTUÉES PAR DIFFÉRENTS CAPTEURS	11
3.1. MESURE PAR TEMPS DE TRANSIT	11
3.2. DEBITMETRIE A EFFET DOPPLER	13
3.3. MESURE PAR PROFILS VERTICAUX DE VITESSE	16
3.4. MESURE DE VITESSE DE SURFACE.....	17
4. EXEMPLES D'INFLUENCE DE SINGULARITÉS SUR LES DÉBITS MESURÉS PAR DIFFÉRENTS TYPES DE CAPTEUR	18
4.1. MESURE PAR TEMPS DE TRANSIT A L'AVANT D'UN COUDE	19
4.2. MESURE PAR EFFET DOPPLER A L'AVANT D'UN COUDE	19
4.3. MESURE PAR PROFILEUR A L'AVANT D'UNE CONFLUENCE.....	20
5. VÉRIFICATION DE LA VITESSE MOYENNE	21
5.1. EXPLORATION DU CHAMP DE VITESSES.....	21
5.2. MESURES DE DEBIT PAR TRAÇAGE	22
6. CONCLUSION	24
7. REFERENCES	25

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.

Cette note porte sur les techniques permettant la mesure *en continu* du débit dans des canaux 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 :

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

La vitesse \bar{U} est la moyenne des vitesses de toutes les particules fluides qui passent à travers une 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 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 affecté à cette vitesse. Pour des collecteurs d'assainissement, U_i est généralement prise égale à la composante longitudinale alors que la contribution des composantes transversale et verticale sont négligées. En réalité, pour des raisons technologiques la plupart des capteurs de vitesse ne mesurent qu'une composante de la vitesse, définie par une direction arbitraire, 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.

Les capteurs de vitesse utilisés pour une mesure en continu n'échantillonnent, pour la plupart d'entre eux, qu'une partie de l'écoulement. De plus 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 pour évaluer la vitesse moyenne recherchée. Cette extrapolation doit prendre en compte la représentativité de l'échantillonnage réalisé par le capteur, et le champ de vitesses dans la zone échantillonnée ainsi que dans l'ensemble de la section mouillée considérée.

Ce document vise à préciser la représentativité des capteurs de vitesse couramment utilisés, (temps de transit et capteur à effet Doppler) et de quelques autres capteurs apparentés afin d'aider les maîtres d'ouvrage à évaluer des projets d'équipement. Il donne également des indications pour la vérification et la réception de ces appareils. Pour cela nous rappellerons les notions de base avant de présenter les mesures qu'il est raisonnablement possible de faire

avec des capteurs de mesure en continu puis avec ceux utilisables lors 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 nos propos restent globalement valables pour les canaux à ciel ouvert.

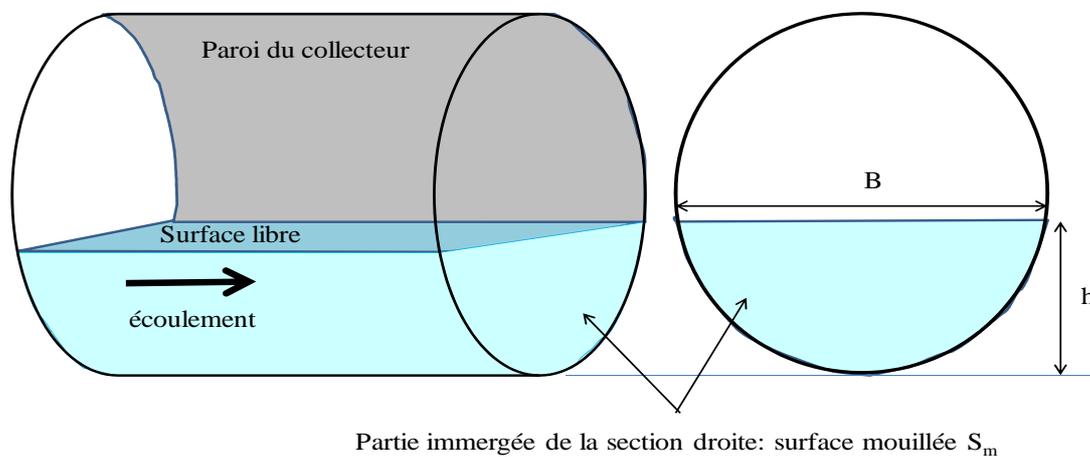


Figure 1. Définitions des principaux paramètres

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.

En fait cette schématisation correspond au cas de canaux larges caractérisés par un facteur d'aspect Ar supérieur à 5, où Ar est le rapport de la largeur au miroir B par le 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.

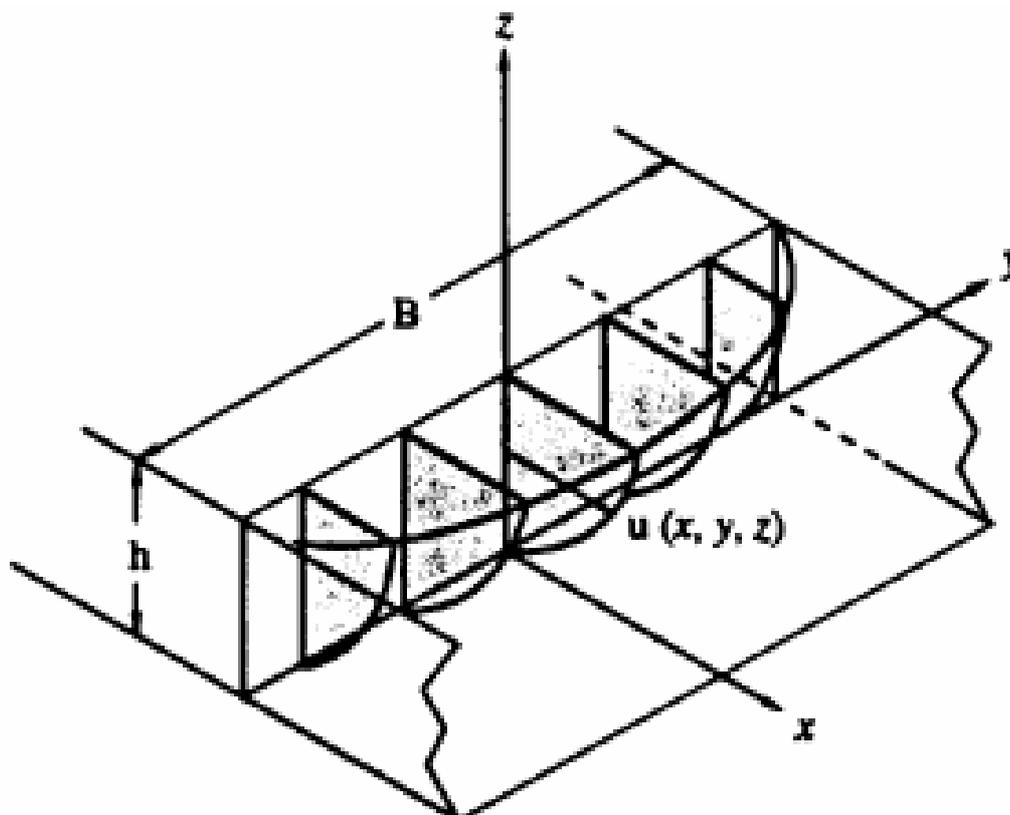


Figure 2. Distribution des vitesses longitudinales dans une section

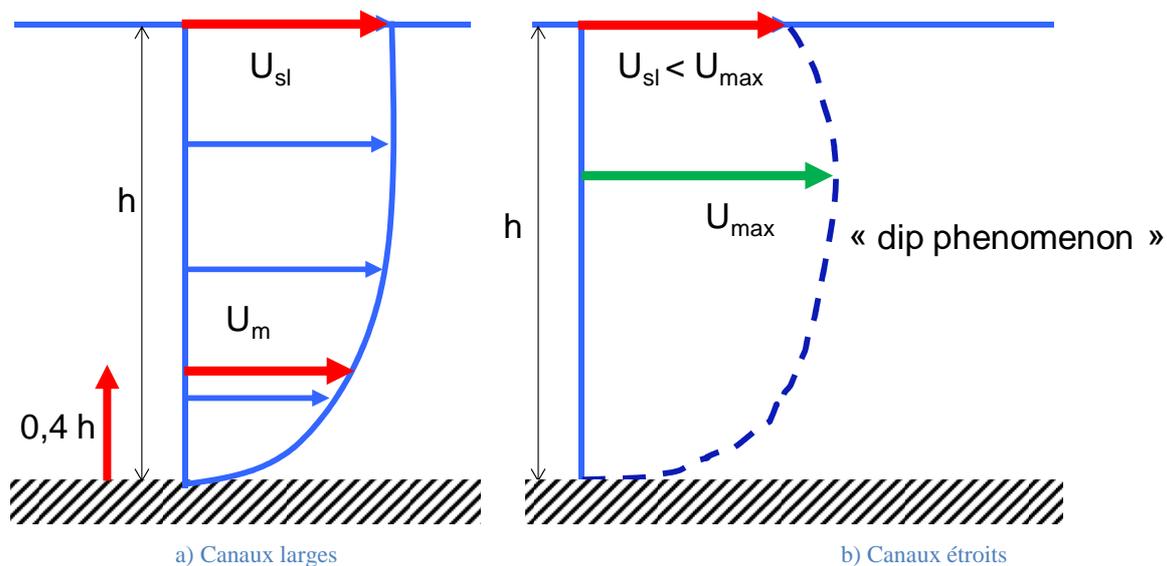


Figure 3. Profils de vitesse au centre d'un canal à distance de toute singularité

Les collecteurs de sections circulaires ou ovoïdes ont un facteur d'aspect inférieur à 5. On observe donc souvent un maximum de vitesse situé en-dessous de la surface libre (Figure 4b) sauf pour les taux de remplissage faible.

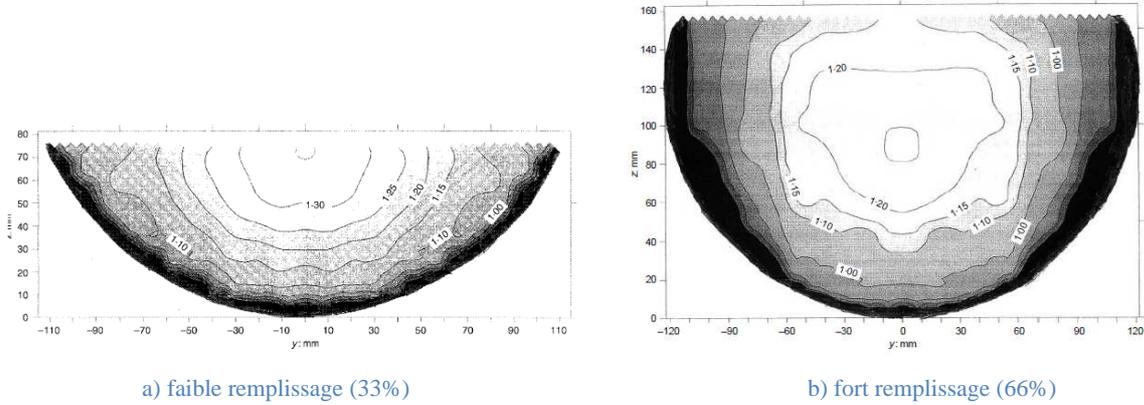


Figure 4. Champ de vitesses développé dans un ouvrage de section circulaire (résultats expérimentaux) (Knight et Sterling, 2000)

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 minimisent 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 5a). 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 au-dessus de la banquette (Figure 5b) et un gradient transversal de vitesse très marqué à proximité de la face verticale de la banquette.

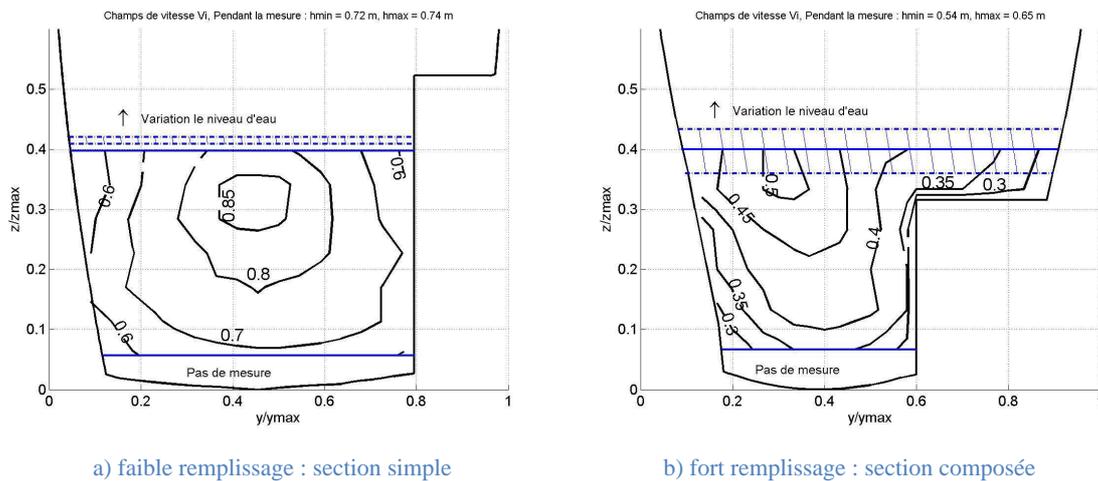


Figure 5. Champ de vitesses développé dans un ouvrage de section complexe

Les Figures 4 et 5 correspondent à des écoulements uniformes c'est-à-dire dans une section éloignée de toute singularité. 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 en terme de distance minimum à l'aval d'une singularité à partir de laquelle l'écoulement

n'est plus influencé. 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.

En pratique il est difficile, voire impossible, de respecter ces préconisations. La Figure 6 montre un exemple de plan de réseau, où on note de très nombreuses singularités (coude, confluence, 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 7 et 8.



Figure 6. Extrait d'un plan de réseau d'assainissement urbain

La Figure 7 montre le champ de vitesses à 15 fois la largeur à la surface libre en aval d'un coude à 90° pour une vitesse d'écoulement 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 4.

De même la Figure 8 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.

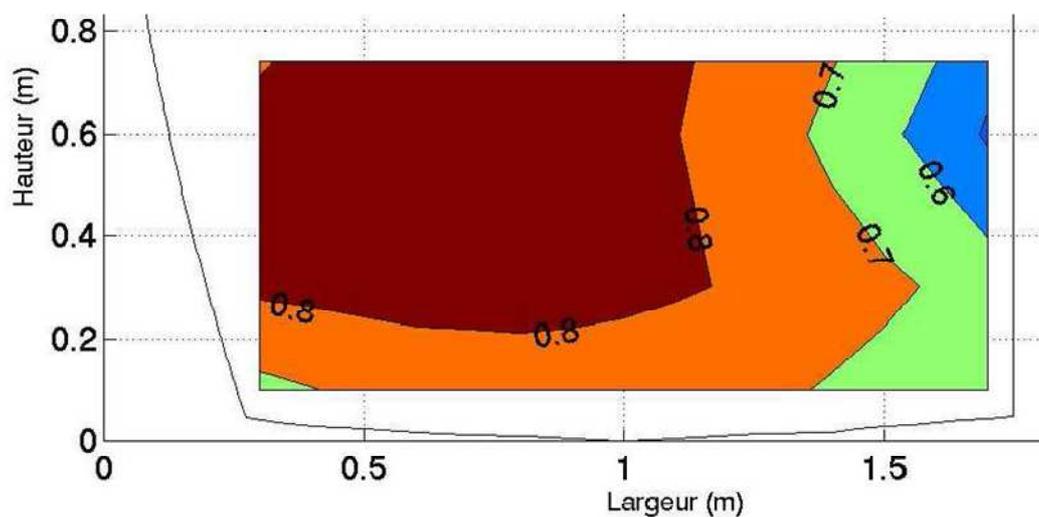


Figure 7. Champ de vitesses de temps sec observé dans la cunette d'un collecteur à banquettes à l'aval d'un coude à 90° à une distance de 15 fois la largeur à la surface libre



Figure 8. Influence d'une confluence sur l'écoulement en aval

3. REPRÉSENTATIVITÉ DES MESURES DE VITESSE EFFECTUÉES PAR DIFFÉRENTS CAPTEURS

3.1. Mesure par temps de transit

Le principe de cette méthode repose sur l'émission d'ondes ultrasonores entre deux sondes qui doivent être au même niveau 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} (Figure 9). On appelle L la distance séparant A et B, α l'angle formé par la direction moyenne de l'écoulement et la ligne AB. Les vecteurs \vec{V}_i représentent le champ de vitesses. Les vecteurs \vec{V}'_i sont leurs projections sur la corde de vitesse et les vecteurs \vec{U}_i leurs projections dans la direction de l'axe de la canalisation.

On suppose que 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, la mesure mesurée par la corde est convertie en vitesse longitudinale par application du coefficient $1/\cos(\alpha)$.

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

$$\hat{U}_{AB} = \frac{L}{2 \cdot \cos(\alpha)} \cdot \left(\frac{t_2 - t_1}{t_2 \cdot t_1} \right) \quad \text{Equation 3}$$

\hat{U}_{AB} est très proche de la vitesse de l'écoulement \overline{U}_{AB} moyennée sur la transversale AB (équation 4).

$$\begin{aligned} \hat{U} &\cong \frac{1}{L \cdot \cos(\alpha)} \int_0^L V' \cdot dl \\ \dots &= \frac{1}{L \cdot \cos(\alpha)} \int_0^L V \cdot \cos(\beta) \cdot dl = \frac{1}{L} \int_0^L U \cdot dl = \overline{U}_{AB} \end{aligned} \quad \text{Equation 4}$$

Le segment AB est appelé « corde » au sens géométrique du terme. Une corde permet un échantillonnage horizontal homogène du profil transversal de vitesses à un niveau donné (Figure 10a).

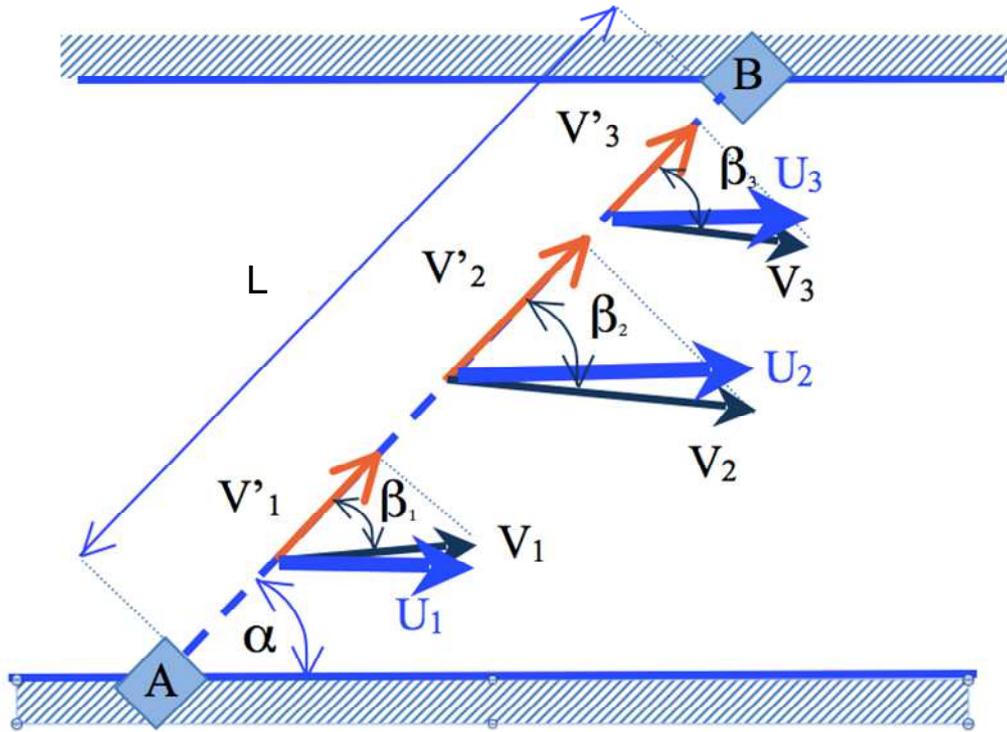


Figure 9. Schéma de principe d'une corde de vitesse (vue en plan) montrant les différentes composantes des vitesses

En pratique on complète cet échantillonnage horizontal par un échantillonnage vertical en installant plusieurs cordes de vitesse échelonnées à des niveaux différents (Figure 10b). La zone échantillonnée est donc un plan faisant un angle α avec l'axe du collecteur et la direction principale de l'écoulement.

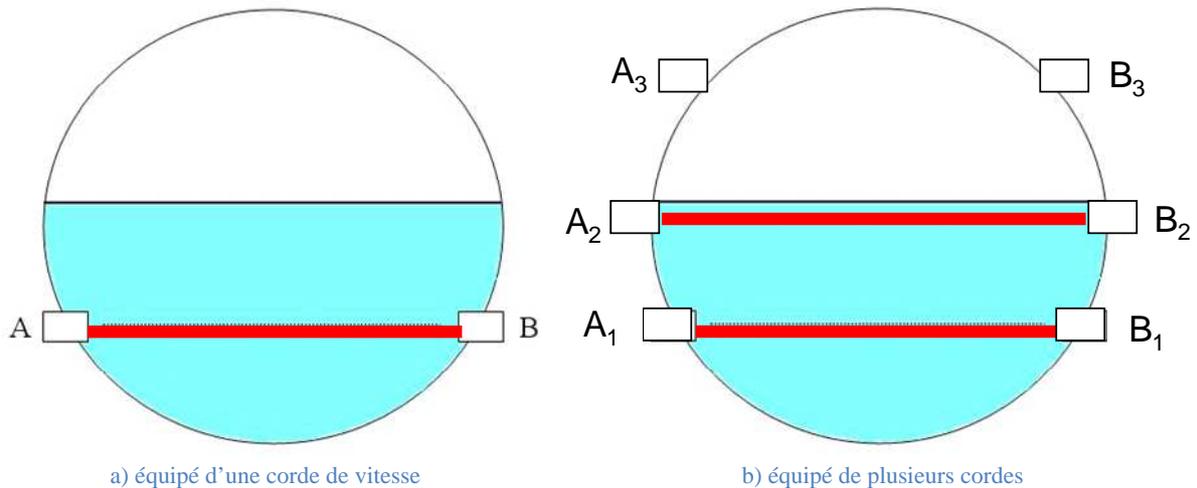


Figure 10. Vues en coupe d'un collecteur

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) :

$$Q = \sum_{i=1}^n k_i \cdot \hat{U}_i \cdot S_i \quad \text{Equation 5}$$

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.

3.2. 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 réfléchies avec une fréquence $f_s + f_{D,i}$ où $f_{D,i}$ est proportionnelle à la vitesse de la particule n en direction du capteur (vitesse radiale V_r) soit :

$$V_r = \frac{c \cdot f_{D,i}}{2 \cdot f_s} \quad \text{Equation 6}$$

Où c est la célérité des ultrasons dans l'eau, f_s la fréquence d'émission, $f_{D,n}$ 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 :

$$U = V_r / \cos(\beta_i) \quad \text{Equation 7}$$

Où β_i est l'angle entre la direction de déplacement de la particule 'n' et la droite joignant le capteur à la particule. Pour les conditions de pose classiques (en radier) l'angle β_i est identifié 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 (cf. Figure 11).

La norme internationale ISO 15769 définit certaines caractéristiques du capteur :

- angle d'émission ;
- portée ;
- ouverture du faisceau ultrasonore ;
- fréquence d'émission ;
- analyse du signal.

La Figure 11 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 12).

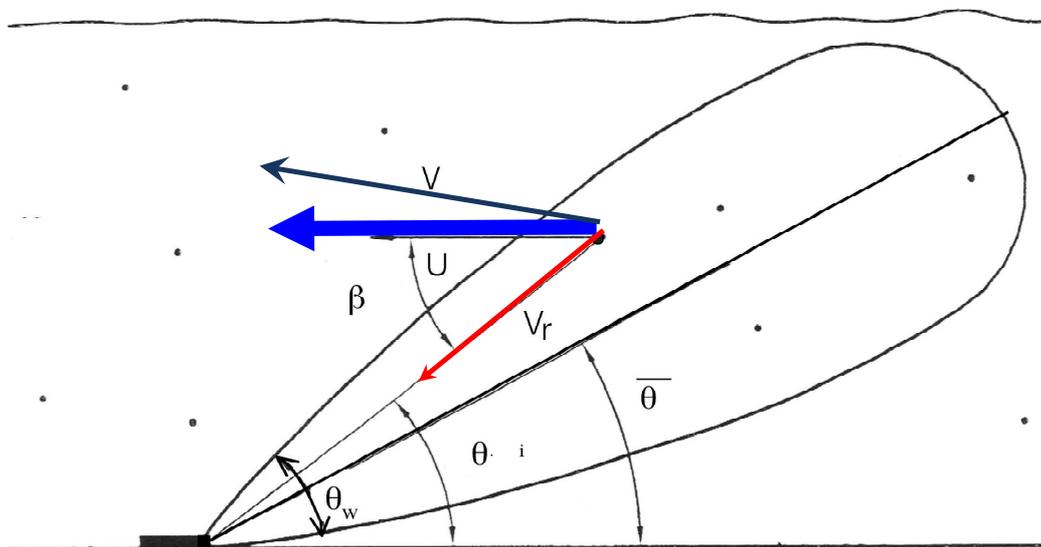


Figure 11. Paramètres caractéristiques d'un débitmètre à effet Doppler (Schéma adapté de la spécification technique ISO 15769)

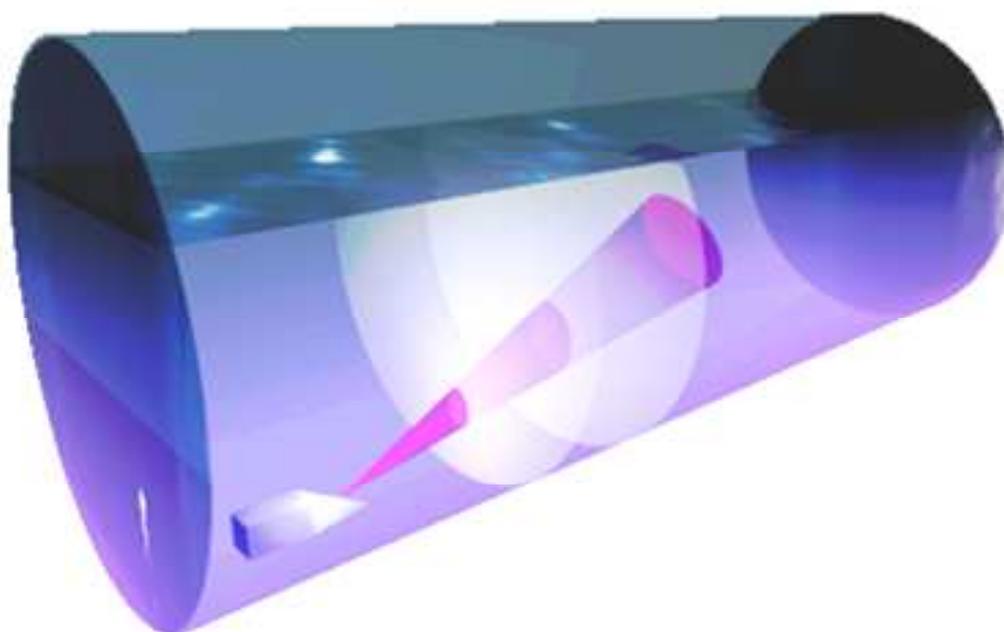


Figure 12. Cône ultrasonore tridimensionnel et deux exemples de sections échantillonnées

Si l'écoulement est quasi-uniforme, le champ de vitesses dans des sections voisines variera peu, et la zone échantillonnée peut être assimilée à la projection du cône sur un plan perpendiculaire à l'axe de l'écoulement. Elle varie selon l'angle de tir, l'ouverture du cône et la portée (Figure 13).

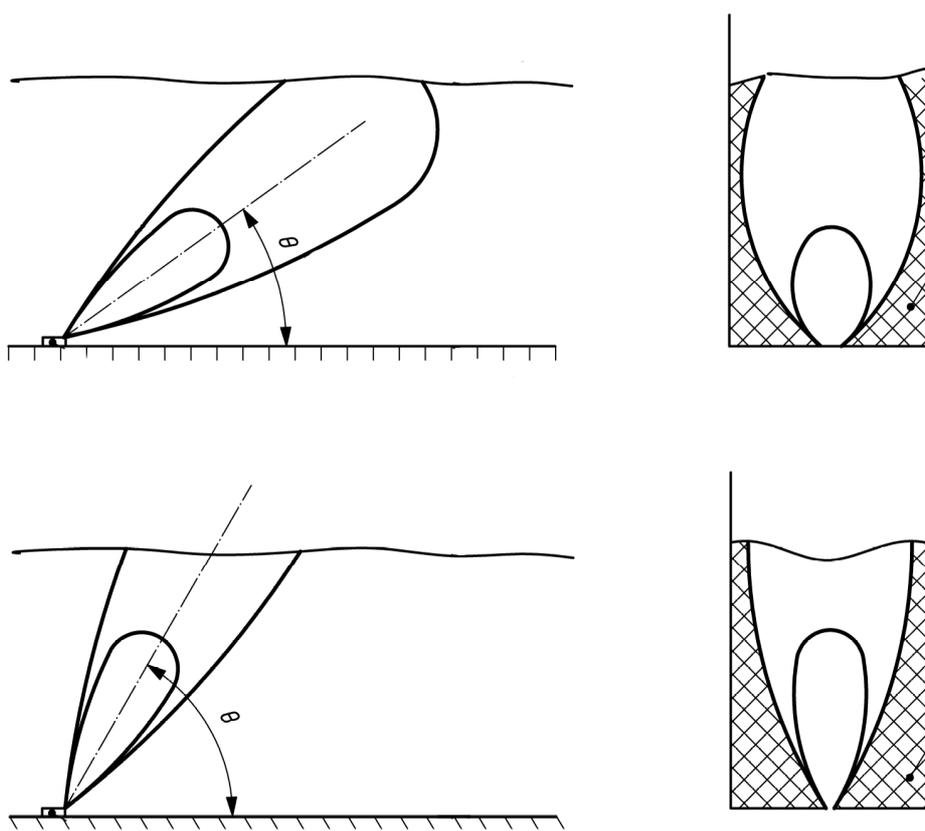


Figure 13. Variations de la zone échantillonnée par un capteur Doppler en fonction de la portée et de l'angle de tir (Schéma adapté de la spécification technique ISO 15769)

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. Cet effet géométrique est 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 :

$$\hat{U} = \frac{1}{\cos(\bar{\theta})} \cdot \frac{\sum_1^n \frac{V_i}{d_i^4}}{\sum_1^n \frac{1}{d_i^4}} \quad \text{Equation 8}$$

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.

3.3. 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 14). Le calcul du débit s'effectue alors par une méthode des aires (équation 5) 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.

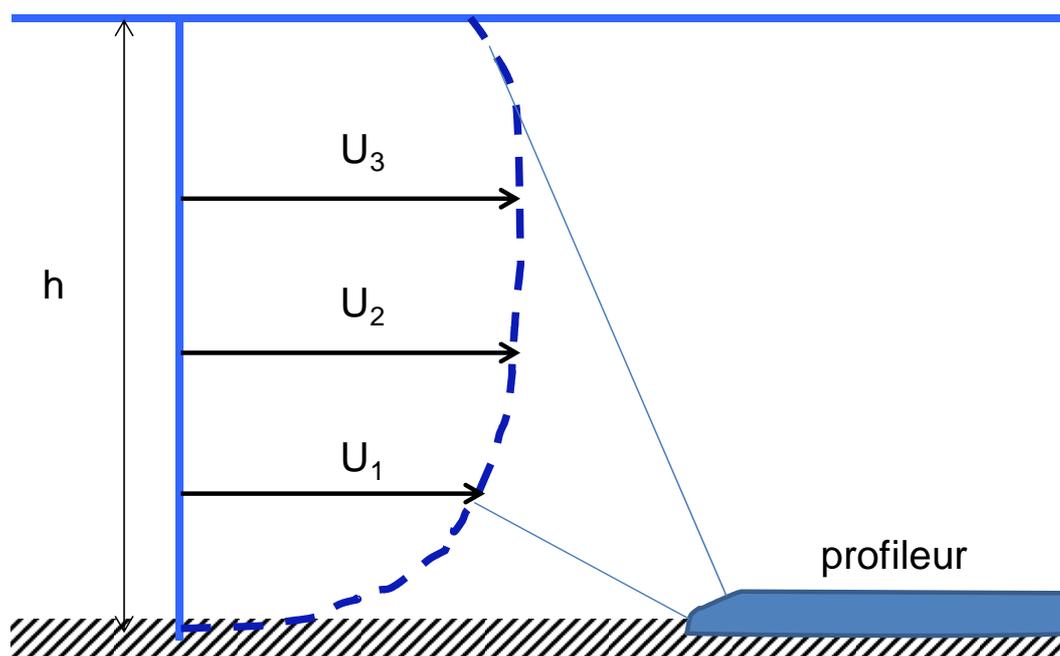


Figure 14. Schéma de principe d'un profileur de vitesse

3.4. 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.

Les mesures de vitesse en surface utilisent généralement des ondes radar, mais des techniques d'imagerie vidéo sont également en cours de développement.

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.

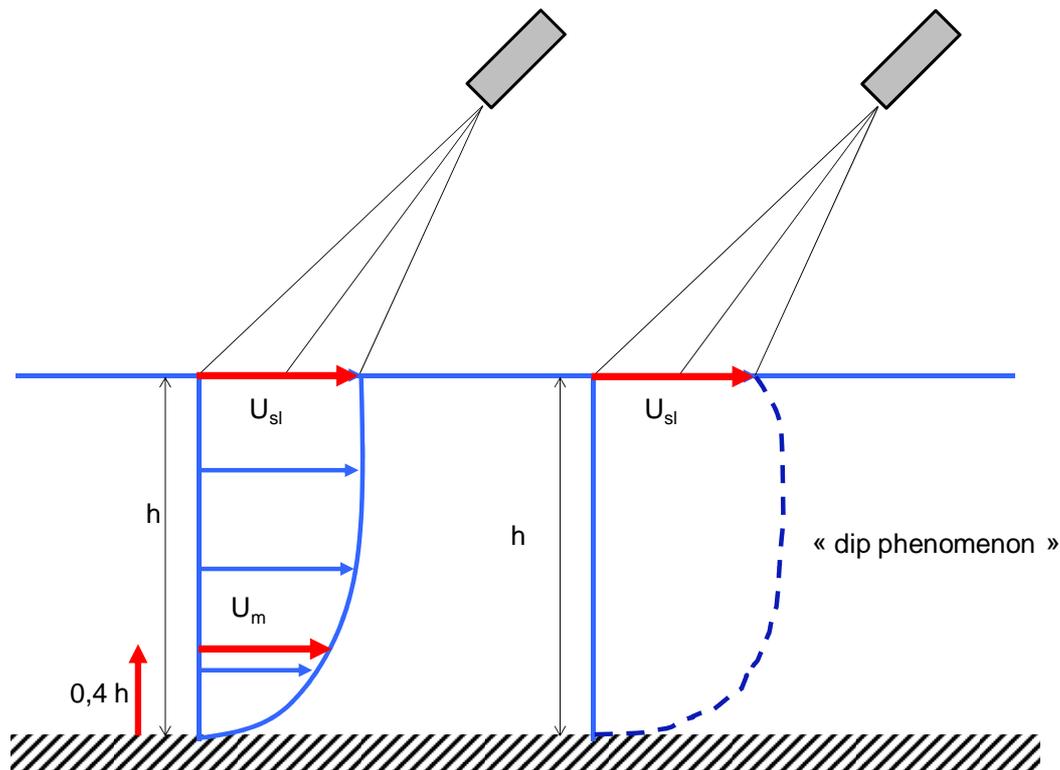


Figure 15. Mesure de la vitesse de surface et vitesse moyenne

Quoi qu'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).

4. EXEMPLES D'INFLUENCE DE SINGULARITÉS SUR LES DÉBITS MESURÉS PAR DIFFÉRENTS TYPES DE CAPTEUR

Comme nous l'avons rappelé dans la section 2, il n'y a parfois pas d'autre choix que d'instrumenter à proximité d'une singularité. Dans cette éventualité, chaque cas nécessite une étude spécifique au site mais, dans le cadre du projet COACHS, nous avons cherché à appréhender sur quelques exemples quel pouvait être l'ordre de grandeur de l'erreur ainsi introduite.

Pour y parvenir nous avons étudié par simulations numérique l'effet d'une singularité 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 ou pondérée par des surfaces (dans le 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.

Le choix d'une référence peut toujours être discuté, et la référence utilisée a varié au cours du projet.

Pour l'influence d'un coude sur un débitmètre à effet Doppler la référence est la vitesse mesurée par le même capteur à une distance de 70B, située hors de la zone d'influence des singularités.

$$\text{écart 1 (en \%)} = 100 \cdot \frac{\hat{U}_x - \hat{U}_{70}}{\hat{U}_{70}} \quad \text{Equation 9}$$

Pour l'influence d'un coude ou d'une confluence sur respectivement les mesures effectuées avec un débitmètre par temps de transit et un débitmètre mesurant une moyenne sur un profil vertical de vitesse, la référence est la vitesse moyenne \bar{U} dans la section de mesure, obtenue en divisant le débit (donnée d'entrée de la simulation) par la surface mouillée (calculée par la simulation).

$$\text{écart 2 (en \%)} = 100 \cdot \frac{\hat{U}_x - \bar{U}}{\bar{U}} \quad \text{Equation 10}$$

Ces écarts ne sont pas à proprement parler des erreurs, en particulier pour le capteur Doppler, puisqu'ils sont calculés sur des valeurs brutes, et ne préjugent pas du traitement de ces données, que ce soit par l'appareil de mesure ou en post-traitement. Ils donnent néanmoins une idée de l'erreur commise en l'absence de campagnes d'étalonnage poussées.

4.1. Mesure par temps de transit à l'aval d'un coude

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 2 (%)	12	7	5

4.2. Mesure par effet Doppler à l'aval d'un coude

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 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 16 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.

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).

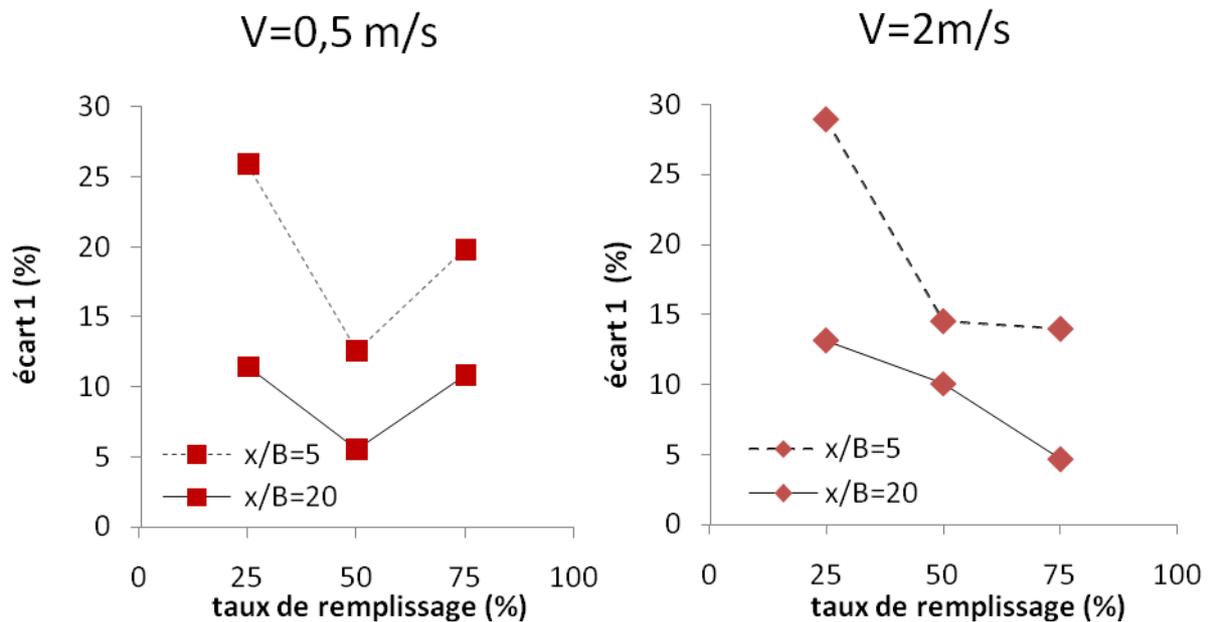


Figure 16. Écarts entre les mesures fournies par un capteur Doppler à l'aval d'un coude et le même capteur non-soumis à l'influence du coude, pour deux distances, deux vitesses et trois taux de remplissage ; Mesure par profileur à l'aval d'une confluence

4.3. Mesure par profileur à l'aval d'une confluence

Les écoulements au voisinage et à l'aval d'une jonction à 90° de canaux rectangulaires à surface libre ont été simulés avec différentes répartitions de débits entre les deux canaux en maintenant un débit total fixé à 4 l/s. Des erreurs très élevées peuvent être observées pour certains rapports de débits à l'aval immédiat de la jonction, mais la distance d'influence la plus longue correspond au cas où l'apport latéral Q_{yi} est égal au quart de l'apport total, avec une erreur de l'ordre de 15% à une distance égale à 8 fois la largeur du canal.

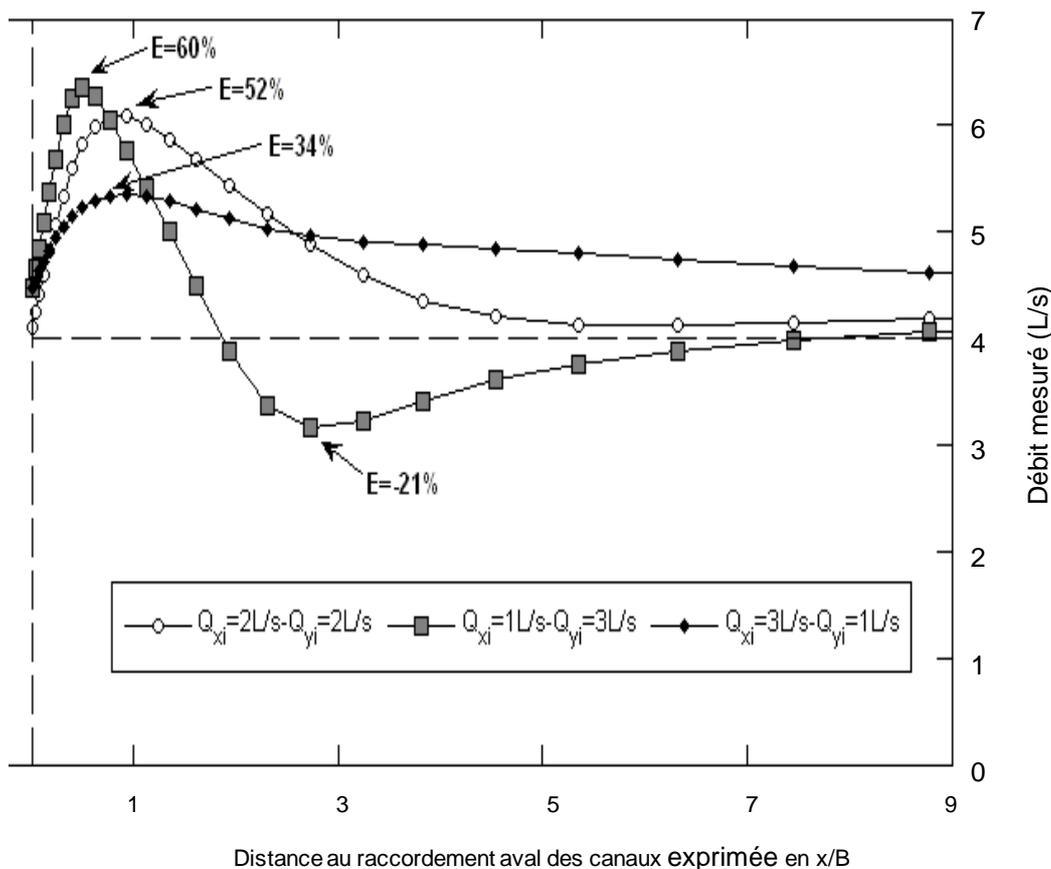


Figure 17. Valeurs apparentes mesurées pour un mesurande de 4 L/s en fonction de la distance du capteur à l'aval d'une jonction à 90° et de la répartition des débits amont (Mignot *et al.*, 2012).

5. VÉRIFICATION DE LA VITESSE MOYENNE

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. 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.

5.1. Exploration du champ de vitesses

Une manière relativement simple, tout au moins en terme de matériel à mettre en œuvre, consiste à échantillonner les vitesses locales dans l'ensemble de la section de mesure avec un courantomètre portable (Figure 18). 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. Il permet cependant de détecter de grosses anomalies dans le champ de vitesses, voire des erreurs de paramétrage du débitmètre à poste fixe.



Figure 18. Mise en œuvre d'un courantomètre pour l'exploration du champ de vitesses dans un collecteur

5.2. 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 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 :

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

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

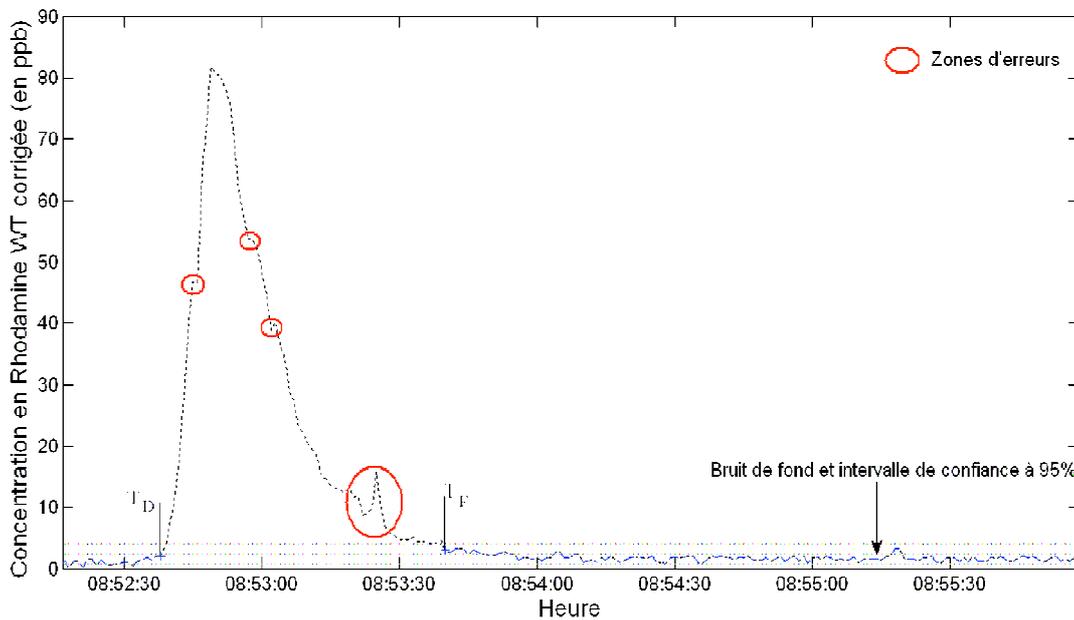


Figure 19. Exemple d'enregistrement d'une onde de concentration de traceur coloré (Rhodamine WT) dans un collecteur (Lepot *et al.*, 2009)

6. CONCLUSION

La vitesse moyenne d'un écoulement à surface libre n'est pas mesurée directement par les capteurs utilisés comme débitmètres. 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 facile à extrapoler pour 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 banquettes) 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. Mais la sensibilité des champs de vitesses à une influence aval n'a pas été étudiée.

Dans ce contexte les capteurs de vitesse sans contact présentent de nombreux avantages en termes de 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. Enfin les profileurs permettent aussi d'améliorer la représentativité de l'échantillonnage, en compensant l'effet géométrique d'atténuation par la distance.

Les singularités tels que coudes, chutes, confluences perturbent le champ de vitesses. Cela peut augmenter sensiblement l'incertitude des mesures qui seraient réalisées à l'aval, en particulier pour les faibles taux de remplissage de la conduite. Ce guide présente 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. Ces résultats montrent qu'un étalonnage (physique ou numérique) visant à corriger l'effet des singularités sur la mesure de vitesse serait souvent très lourde à mettre en œuvre.

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.

7. 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-Krajewsky 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.
- ISO, (2010), BS/ISO15769, *Hydrométrie - Lignes directrices pour l'application des compteurs acoustiques de vitesse utilisant l'effet Doppler et la corrélation d'échos*.
- 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*, ProcInstn. Engrs Water & Mar. Engng, 142, dec. 229-240.

Teledyne Isco, (2009), 2110 *Ultrasonic Flow Module and sensor*, Installation and operation guide.

