Vélocimétrie et débitmétrie : méthodes basées sur les ultrasons

Methods of flow speed measurements by use of ultrasonic devices

D. Renard	Ingénieur hydrologue, Direction régionale de l'Équipement d'Île-de-France
J. Gasnier	Ingénieur des Services techniques de la Ville de Paris — Service des barrages réservoirs.
A. Guillon	Ingénieur hydrologue — Service départemental d'assainissement de la Seine-St-Denis
Avec la collaboration de :	
M. Multon	Directeur technique de la Société Ultraflux

En premier lieu, les auteurs décrivent les objectifs et contraintes ayant conduit à l'emploi des ultrasons. Ils rappellent ensuite les principes et les principales technologies présente sur le marché français : capteurs, acquisition et traitement de la mesure. La seconde partie dresse une synthèse des expériences des services gestionnaires de réseaux de mesure tant en rivière qu'en assainissement : contraintes de site ou de nature d'écoulement, charges d'entretien, fiabilité des matériels.

En conclusion, l'exposé présente les perspectives de développement de cette méthode et la nécessité d'améliorer les connaissances sur la mesure de vitesse en tant que telle et sur l'extrapolation « vitesse corde vitesse moyenne dans la section d'écoulement ».

At first, the author describe the objects and the restraints that have justified the speed measure by use of ultrasounds; then, they recall the physical theories and technologies that are present on the french market : sensors and data processing. The second part synthesizes the experiences of networks managers in the field of rivers and of sewerages. In this perspective, it analyses the site characteristics, the maintenance costs and the equipments reliability.

To sum up, this paper presents the future possibilities of method developments and the necessity to improve knowledges about :

- speed measures realized on a chord*
 - extrapolation « chord speed-median speed in the runoff section ».*
-

1. Introduction [1] [7]

L'hydrométrie, et en particulier la mesure des débits, est un domaine dans lequel une masse très importante d'expériences a été accumulée depuis des siècles. Sans remonter jusqu'à Léonard de Vinci (1452-1519) qui avait pour principe de citer d'abord l'expérience et ensuite de démontrer pourquoi les corps sont forcés de se comporter de telle ou telle manière, nous pourrions avec profit relire les travaux de nos illustres prédécesseurs. Le Professeur

P. Boileau retrace brièvement cet historique dans son traité de la mesure des eaux courantes édité en ... 1854. Et pourtant, malgré son ancienneté, cette science progresse, et progresse d'autant plus vite actuellement que les progrès de la technologie apportent des solutions nouvelles et souvent satisfaisantes à certains cas limites qui ne pouvaient être antérieurement abordés par les techniques classiques : instabilité d'une courbe de tarage, influence de l'aval, non tolérance de pertes de charge inhérentes à certains dispositifs (seuils jaugeurs, écrans déversants...), inversion de courant...

Parmi les procédés de mesure des débits qui ont été développés récemment, certains semblent apporter *a priori* des solutions intéressantes à ces contraintes. C'est en particulier le cas des possibilités offertes par l'emploi des capteurs de vitesse, vélocimètres ou courantomètres, basés sur la technologie des ultrasons. Le calcul du débit s'effectue après mesures concomitantes de la hauteur et de la vitesse d'écoulement suivant la formule :

$$Q = S \cdot V$$

- la section mouillée S , se déduit de la hauteur d'eau et des caractéristiques géométriques de la section en travers du collecteur ou de la rivière au droit du point de mesure. Encore faut-il que cette loi soit biunivoque, hypothèse que l'on prendra soin de vérifier périodiquement, notamment dans les cas d'affouillements ou de dépôts dans le lit d'une rivière à la suite de crues ou d'évolution brutale ou progressive de l'ensablement d'un collecteur d'assainissement après curage.

- la vitesse moyenne V , dans cette même section se déduit de la (ou des) mesure(s) de vitesse dans une tranche d'eau horizontale ou verticale afin de tenir compte de la répartition des vitesses ponctuelles dans cette section. L'augmentation du nombre de tranches auscultées dans une section permet de déterminer l'incertitude liée à la distribution des vitesses propre à chaque site de mesure. Mais il faut alors prévoir plusieurs paires de sondes qui devront être auscultées cycliquement et non simultanément afin d'éviter des interférences entre signaux émis. Combien en disposer sur les berges ou sur les parois du collecteur pour atteindre une précision suffisante ? A partir de combien de paires de sondes, le gain en précision ne justifie-t-il plus l'investissement ?

2. Principe physique et principales technologies [3]

Le principe de la mesure des vitesses par ultrasons est basé sur les modifications apportées à la transmission d'une onde ultrasonore par l'écoulement du fluide traversé.

2.1. Rappels sur les ultrasons

Une onde ultrasonore est une vibration mécanique de fréquence élevée se propageant dans un milieu élastique. La plage de fréquence utilisée en débitmétrie est comprise entre 200 kHz et 5 MHz. Sa vitesse de propagation et son absorption sont des données caractéristiques du fluide traversé. De surcroît :

- la vitesse de propagation dans l'eau varie, pour un milieu donné, avec la température :

$$\text{Cm/s} = 1\,557 - 0,0245 (74 - t^{\circ}\text{C})^2$$

et pour un degré moindre avec la pression.

- l'absorption au sein d'un milieu homogène est proportionnelle au carré de la fréquence et à la viscosité du fluide. Elle peut être augmentée par la présence de particules solides (d'autant plus que la dimension des particules est grande par rapport à la longueur d'onde) ou gazeuses (proportionnelle aux écarts d'impédance acoustique). Ainsi des bulles d'air au sein du fluide mesuré

(effluent, rivière...) deviennent rapidement absorbantes. Si, de plus, leur taille se rapproche de la longueur d'onde émise, elles constituent rapidement un réflecteur parfait.

Ces ondes ultrasonores sont émises et/ou captées par des « céramiques » utilisant les propriétés piézoélectriques de certains corps qui, soumis à une contrainte mécanique, possèdent la propriété de se charger électriquement. Cet effet étant réversible, l'application d'un champ électrique provoque une déformation et l'émission d'une onde. Deux modes d'excitation de la céramique sont particulièrement utilisés en débitmétrie :

- application d'un signal électrique sinusoïdal en permanence ou par trains d'ondes successifs d'amplitude de quelques dizaines de volts.
- application d'une impulsion brève d'amplitude élevée (150 à 200 volts).

Différentes technologies sont utilisées pour appliquer les propriétés des ondes ultrasonores à la débitmétrie. Nous ne développerons que celles ayant reçu des applications dans le domaine des mesures en rivières ou réseaux d'assainissement pour des écoulements à surface libre.

2.2. Principe général de la technique basée sur la modification de la vitesse de propagation

La figure 1 présente le principe de la mesure de vitesse par ultrasons.

Soient deux émetteurs-récepteurs A et B immergés dans un fluide animé d'une vitesse v .

On appelle L la distance séparant A et B,

$v(l)$ la vitesse du fluide en chaque point de la ligne AB,
 θ l'angle formé par la direction de l'écoulement et la ligne AB,

C la vitesse de propagation du son dans le fluide au repos.

On suppose que les capteurs A et B sont alternativement émetteurs et récepteurs.

Soit T_{AB} le temps mis par un signal acoustique issu de A pour atteindre B :

$$T_{AB} = \int_L \frac{dl}{C + v(l) \cos \theta}$$

1. Principe général de mesure de vitesse par ultrasons.

Réciproquement :

$$T_{BA} = \int_l \frac{dl}{C - v(l) \cos \theta}$$

La différence des temps de parcours s'écrit donc :

$$\Delta T = T_{AB} - T_{BA} = \int_l \frac{2 v(l) \cos \theta}{C^2 - v^2(l) \cos^2 \theta} dl$$

Or, dans la plupart des cas $v(l)$ est petit devant C . L'expression peut donc s'écrire :

$$\Delta T = \int_l \frac{2 v(l) \cos \theta}{C^2} dl$$

Soit, en appelant $\bar{v}$ la vitesse moyenne sur le trajet AB

$$\Delta T = \frac{2 \bar{v} L \cos \theta}{C^2}$$

La mesure de cette différence de temps permet donc la connaissance de la vitesse moyenne le long de la ligne AB :

$$\bar{v} = \frac{C^2 \Delta T}{2 L \cos \theta}$$

Les technologies développées en France et à l'étranger, pour différents types de fluides (industriels, effluents, rivières...) et de conditions hydrauliques d'écoulement (en charge, à surface libre...) sont pratiquement toutes basées sur ce principe général (excepté celles utilisant l'effet Doppler ou les intercorrélations) et ne diffèrent que par les solutions retenues pour appréhender cette différence de temps ΔT :

- par mesure directe
 - appareils à mesure de temps de transit ou Leading edge.

Cette solution, retenue par les 2 constructeurs français CR2M et Ultraflux, est développée ci-après.

- par mesures indirectes
 - appareils à mesure de phase
 - appareils à verrouillage de phase
 - appareils à fréquence de relaxation au Sing around.

2.3. Technologie des appareils à mesure de temps de transit ou Leading Edge

La mesure de $\bar{v} = C^2 \cdot \Delta T / 2 \cdot L \cdot \cos \theta$ impose la mesure simultanée de ΔT et de C .

La mesure de ΔT s'effectue par comparaison des temps T_{AB} et T_{BA} (fig. 2). Afin d'obtenir une meilleure détermination de ces temps, il convient d'utiliser des capteurs de fréquence aussi élevée que possible (1 à 5 MHz). Les capteurs A et B sont alternativement émetteurs et récepteurs afin d'avoir toujours le même trajet acoustique. La fréquence de commutation se situe au voisinage de quelques centaines de Hertz. La mise en forme des signaux reçus par la sonde opposée demande beaucoup de précautions. Le déclenchement de la mesure s'effectue lorsque la première alternance de l'écho atteint une amplitude déterminée (seuil de déclenchement) et/ou sur le passage à zéro de l'alternance suivante (fig. 3). Les valeurs de ΔT à mesurer sont très faibles, de l'ordre de quelques cen-

taines de nanosecondes, comme le montre l'exemple ci-après :

conduite circulaire de diamètre : 1 m
sondes disposées à mi-hauteur
vitesse moyenne d'écoulement : 0,5 m/s
angle du faisceau : $\theta = 45^\circ$
fluide : effluent à 15°C $c = 1472$ m/s.

$$\Delta T = 2 \bar{v} L \cos \theta / C^2 = 2 \cdot 0,5 \cdot 1 / 1472^2 = 462 \cdot 10^{-2} \Delta.$$

Ce temps est très petit et sa mesure à 1 % près nécessite une résolution de l'horloge de 4,6 nanosecondes.

Ces valeurs sont prohibitives dans l'état actuel de la technologie et les constructeurs ont des « astuces » pour pallier cette insuffisance :

- méthode analogique de conversion temps-tension pour Ultraflux
- augmentation artificielle de la distance de mesure par bouclage du signal ultrasonore (n traversées successives) pour CR2M.

La distance L entre les capteurs A et B étant fixe, la mesure de C s'effectue par mesure du temps moyen de propagation; en effet

$$(T_{AB} + T_{BA})/2 = L/C$$

Les appareils à mesure directe du temps de transit répondent en général au schéma de la figure 4.

2.4. Traitement des données brutes

La donnée brute est la donnée originelle délivrée par le capteur sur la base d'un cycle unité de mesure :

- un train d'onde sur un aller-retour pour Ultraflux
- un train d'onde sur n traversées pour CR2M.

2. Exemple de différence de temps de transit.

3. Mise en forme de signaux dans la méthode de mesure de temps de transit.

$$\Delta T = 2 \sqrt{L \cos \theta} / c^2$$

$$\text{Temps moyen de propagation } T_m = L/c$$

$$d'v \frac{\Delta T}{T_m} = 2 \sqrt{L \cos \theta} / L = k \bar{v}$$

4. Appareil à mesure de temps de transit.

La mesure délivrée est une moyenne, mobile ou par pas de temps fixe, de mesures brutes instantanées; leur nombre est un compromis entre la durée de la mesure et le bruit admissible (ce dernier diminue si la moyenne est faite sur une durée plus longue).

Au niveau de l'électronique ou du processeur de mesure, lorsque des défauts (parasites, pertes déchos) provoquent le rejet de la mesure, la valeur de la mesure précédente est conservée; mais si ce phénomène persiste, la mesure est mise à zéro.

Des parasites peuvent provenir de diverses sources (radio, talkie-walkie...). S'ils ont une fréquence proche de celle des céramiques, on ne peut les éviter.

La précision des appareils est bonne de par leur principe. L'imprécision est plutôt due aux phénomènes hydrauliques mesurés (fluide anisotrope vis-à-vis des ultrasons, vecteur vitesse moyenne non parallèle à l'axe de la conduite, etc) et à l'incertitude de mesure de L et θ . La dérive du système dans le temps semble très limitée.

2.5. Mesure des débits pour des écoulements à surface libre

Dans ce cas, le calcul du débit s'effectue après mesures concomitantes de la hauteur et de la vitesse de l'écoulement suivant la formule :

$$Q = S \times V$$

Des électroniques supplémentaires ou des calculateurs sont alors associés aux courantomètres à ultrason. La méthode consiste à découper horizontalement la section de mesure en un certain nombre de tranches élémentaires de surface S_i . Une mesure de vitesse V_i est effectuée dans chacune des tranches (mesure simultanée ou séquentielle).

Parallèlement, la mesure de niveau h et un convertisseur hauteur/section permettent le calcul des sections élémentaires. Le débit s'obtient alors en calculant l'expression :

$$Q = \sum_{i=1}^n S_i \cdot V_i$$

La précision dépend du nombre de tranches élémentaires, de la connaissance de la section de mesure et de l'uniformité des vitesses dans chacune des tranches.

Afin de limiter le nombre de capteurs, il est possible également de calculer la vitesse dans l'une des tranches en appliquant, à la valeur mesurée dans la tranche la plus proche, un coefficient α , qui dépend de la géométrie de la conduite.

La principale source d'erreur provient de l'incertitude sur la valeur de ce coefficient.

A titre d'exemple, un système utilisant un découpage en 8 tranches, associées à 2 mesures de vitesses judicieusement placées dans la conduite, conduit à une précision globale de l'ordre de 5 à 10 %.

3. Synthèse des expériences

3.1. En réseau d'assainissement [2], [5], [6] et [7]

En réseau, il est souvent difficile de trouver un site où la loi « hauteur/débit » soit bi-univoque et il est souvent délicat de placer une section tarée entraînant une perte de charge supplémentaire, surtout si le réseau est déjà fréquemment saturé. Les mesures de débit « classiques » (jaugeage au moulinet) ne permettent que des mesures ponctuelles.

La mesure de vitesse par ultrasons semble permettre, enfin, de réaliser des mesures de débit en continu dans des écoulements variables. Dès le début des années 80, les premières sondes de mesure de vitesse par ultrasons furent implantées en réseau d'assainissement, principalement en Région parisienne.

De manière générale, en réseau d'assainissement l'application de cette méthode de mesure met en œuvre 1 à 2 paires de sondes, parfois plus, disposées de part et d'autre du collecteur. Les sondes sont souvent scellées dans le collecteur mais, lorsque la mise à sec est difficile, un gabarit porteur des sondes peut être mis en place.

La difficulté principale d'implantation réside dans la méconnaissance des conditions limites d'utilisation de cette méthode. En particulier, s'il est connu que la présence de bulles d'air perturbe la mesure, il n'est pas toujours évident de reconnaître sur le terrain si tel ou tel site présente trop de bulles d'air dans ses effluents (excepté pour les cas flagrants comme l'aval immédiat d'un déversoir, d'une chute ou d'un ouvrage singulier).

Lors de l'installation d'une station de mesure (basée sur la méthode des ultrasons), il est nécessaire de prendre les précautions d'usage d'implantation de matériel électronique afin de limiter les perturbations qui peuvent être nombreuses en environnement urbain.

L'obtention des débits nécessite l'acquisition de la section mouillée et de la vitesse :

- la section mouillée est obtenue à partir d'une mesure de hauteur. La section du collecteur peut être bien connue et doit rester constante sur la distance de mesure. Les principales erreurs dans le calcul de la section mouillée sont dues à l'ensablement du collecteur.

- pour la vitesse moyenne, 2 méthodes sont fréquemment utilisées.

* décomposition du collecteur en tranches pour lesquelles

des coefficients tirés de la littérature sont appliqués.

* utilisation directe de la vitesse mesurée, comme vitesse moyenne. Lorsqu'il y a plusieurs niveaux de sondes chaque vitesse mesurée est appliquée à la tranche d'eau lui correspondant.

La maintenance régulière de ce type de matériel est très réduite. Cependant un contrôle électronique doit être effectué 1 fois par an.

L'encrassement des sondes est lié au site. Lorsque les sondes sont facilement accessibles, leur nettoyage peut être effectué fréquemment. Si tel n'est pas le cas, l'encrassement peut être source de perturbations qui n'apparaissent toutefois qu'au bout d'une période assez longue (quelques années).

3.2. En rivière [4]

Dans ce domaine, la mise en application de cette technique peut varier selon les sujétions locales (largeur du cours d'eau, possibilité de poser un câble sur le fond...). De ce fait, on distingue 3 modes d'implantation illustrés par la figure 5 :

- le simple trajet, l'onde ultrasonique allant d'une rive à l'autre;
- le trajet croisé, l'onde parcourt un trajet en croix;
- le trajet triangulaire, l'onde parcourt 2 côtés d'un triangle.

L'obtention des débits nécessite la maîtrise de divers éléments et des problèmes qui leur sont liés :

La hauteur d'eau : Elle est obtenue à partir de tout système approprié (échelle, flotteur, sonde piezorésistive, ultrasons...), chaque méthode ayant ses avantages et ses inconvénients. L'exposé sur la limnimétrie traite de ce problème.

La section mouillée : Grâce à un relevé topographique, le profil en travers de la rivière au droit de la station peut être connu avec une assez grande précision. Néanmoins, trois difficultés sont à souligner.

Le profil en travers au droit de la station : Une certaine marge de manœuvre est laissée au gestionnaire du fait de la non-régularité des rivières (en plan et en profil).

Ainsi, à la station Alexandre III à Paris, la section droite de la Seine a été prise égale au produit de la section oblique par le cosinus de l'angle entre le courant et cette section : tandis qu'à Troyes, on a pris la moyenne des 3 sections mouillées au droit des sondes et du réflecteur.

L'évolution de la rivière : Une rivière est en évolution permanente. Les profils en travers et en long se modifient avec le temps. Ceci a deux conséquences fâcheuses : d'une part, le détarage de la station, d'autre part, la section mouillée à prendre en compte pour le calcul du débit est à modifier constamment.

La forme du profil en travers : Vis-à-vis des ultrasons, on peut classer la forme des sections des rivières en plusieurs catégories : celles où le fond est plus ou moins plat (sections rectangulaires, trapézoïdales...), celles où il n'y a qu'un simple thalweg (section triangulaire) et toutes les situations intermédiaires entre ces deux cas. Dans le premier cas, les sondes peuvent descendre jusqu'au fond de la rivière tandis que dans les autres situations c'est

SIMPLE TRAJET

TRAJET CROISE

TRAJET TRIANGULAIRE

REPONDEUR		SONDE
REFLECTEUR		DÉBITMÈTRE

5. Modes d'implantation des sondes.

impossible. Le gestionnaire est alors devant un choix difficile : si l'on veut prendre en compte toute la largeur de la rivière, les sondes doivent alors être proche de la surface, elles ne peuvent donc pas descendre profondément afin de mesurer par là même les tranches basses de la rivière. Au contraire, si on éloigne les sondes de la surface, les tranches basses peuvent être explorées, mais une partie seulement de la largeur est appréhendée. Le problème a été rencontré à Troyes : les très basses eaux ne peuvent y être mesurées.

La vitesse : La difficulté essentielle résulte du fait que la vitesse mesurée ne représente pas la vitesse moyenne. Pour remédier à cet inconvénient, plusieurs solutions sont possibles :

- pose de sondes supplémentaires (si la configuration de la rivière le permet);
- minoration systématique de toutes les mesures (solution choisie à Troyes). Cette solution ne peut être retenue, et le choix du coefficient de minoration ou de majoration arrêté, qu'après étalonnage de la relation vitesse (s) sur

une (ou des) corde(s) — Vitesse moyenne pour une gamme de débits suffisante; ceci nécessite de nombreux jaugeages d'étiage, de crue...

— dans le cas où la vitesse mesurée est comprise dans la marge d'erreur généralement admissible, la vitesse n'est pas modifiée (cas de la station Alexandre III).

Dans le domaine des rivières, canaux... la méthode est sujette à certains inconvénients :

L'influence de phénomènes perturbateurs : A Paris-Alexandre III, le passage des péniches perturbe le tracé des vitesses; en lisant les graphiques, pour une vitesse moyenne de 0,50 m/s on note des variations de l'ordre de $\pm 0,06$ m/s. A Troyes, sur les enregistrements on peut aisément caractériser les éclusées des petits moulins situés sur ce bras usinier de la Seine. A titre d'exemple, on a pu noter la durée entre 2 éclusées (1 heure et demie et des variations de hauteur de 4 cm et de vitesse de 0,16 m/s). Ces phénomènes sont toutefois généralement de faible amplitude et les écarts se compensent en moyenne après un certain laps de temps. La connaissance des débits instantanés s'avère donc critique, ce qui justifie la prise en compte d'un temps d'intégration qui devra être déterminé par l'exploitant après une certaine durée d'observation de la rivière, observation rendue possible grâce aux ultrasons.

L'encrassement des sondes : Il rend nécessaire des protections complémentaires et des nettoyages périodiques. A Troyes chaque sonde de vitesse est accrochée à une palplanche sur laquelle elle peut coulisser verticalement. A ce système, on associe une deuxième palplanche destinée à protéger la sonde des gros corps flottants qui pourraient l'endommager. On constate que l'encrassement des sondes est plus important en basses qu'en hautes eaux. En effet en basses eaux, le courant est généralement plus faible et les flottants ont davantage tendance à se déposer. De plus les sondes étant plus proches de la surface, les flottants s'y entassent préférentiellement. Le nettoyage périodique des sondes s'effectue soit à partir des rives, soit à partir de la rivière, en barque.

Tels sont brièvement résumés les inconvénients rencontrés pour la mesure des débits en rivière par les ultrasons. On notera en conclusion que plus la rivière est stable en profil et en plan, plus les ultrasons doivent être recommandés.

3.3. Etat du parc des stations à ultrasons

Le développement du parc de ces stations est relativement récent, du moins en France, mais s'accroîtra nettement dans les années à venir comme en témoignent divers projets.

Parc en France : A part les stations déjà citées à Paris-Alexandre III et Troyes, signalons 2 stations sur de petites rivières dans le Val-de-Marne : Le Réveillon et le Morbras et l'installation en cours par le Service de la Navigation de la Seine d'une station à Bazoches (comportant 2 paires de sondes à simple trajet).

Parc à l'étranger : L'implantation de systèmes à ultrasons est assez importante en Europe. Citons notamment les 2 stations suivantes en Allemagne.

— à Nierderfell sur la Moselle canalisée à une vingtaine de kilomètres de son confluent avec le Rhin à Coblenz.

La Moselle à cet endroit a une largeur de 110 mètres avec une profondeur de 7 mètres correspondant à la côte normale du bief de navigation. Les berges sont formées d'un perré vertical. Le règlement de la navigation interdit la pose d'un câble sur le fond du lit et l'absence de pont à proximité ne permet pas une solution simple. De ce fait le trajet croisé ou « cross-system » a été choisi. la mesure recherchée n'est ni le débit ni la vitesse instantanée mais une vitesse moyennée sur une minute.

— à Nortmoore sur la Jumme affluent de la Leder et sous-affluent de l'Ems. Cette station située en Frise à quelques kilomètres de la ville de Leer subit l'influence de la marée. La largeur de la rivière est d'environ 30 mètres, l'influence de la marée se traduit par un certain marnage avec inversion du courant. Le système à ultrasons est à simple trajet. D'après les exploitants, la vitesse mesurée fournit parfaitement la vitesse moyenne dans la section de mesure quelque soit le débit par l'emploi d'un seul coefficient traduisant le rapport : vitesse mesurée sur vitesse moyenne dans la section. L'installation a été mise en service vers 1974 et ne pose pas de problème depuis lors.

4. Perspectives

4.1. Développement du parc

Un rapide historique montre l'antériorité des mesures en rivières par rapport au domaine de l'assainissement.

Les premières stations ont vu le jour à l'étranger :

en 1964 en Allemagne

en 1971 aux U.S.A. sur la rivière Columbia

en 1973 en Angleterre sur la Tamise.

et cette méthode n'a été introduite en France que dans les années 1970

en 1972 le Service hydrologique centralisateur Nord Pas-de-Calais sur les canaux

en 1974 la Compagnie générale des eaux pour une station d'alerte de pollution sur la Marne à Gournay

en 1979 le Service de la navigation de la Seine et l'AFBSN sur la Seine à Paris-Alexandre III pour des débits sur les rivières canalisées (4).

Actuellement d'autres réalisations sont opérationnelles (Réveillon, Morbras, Troyes les Tauxelles) ou en projet (Bazoches...). Toutefois on n'observe pas de généralisation de cette méthode qui pourtant a fait ses preuves. Est-ce dû :

— à une méconnaissance technique du procédé ? Nous espérons alors avoir apporté quelques éléments d'information

— à une inadéquation des coûts et des crédits ? Une telle méthode peut apparaître plus coûteuse en frais d'investissement mais devrait s'avérer plus économique en exploitation courante (moins de jaugeages, archivage et calcul des débits pouvant être automatisé...)

— aux forces inertielles de l'habitude ?

Plus récemment cette méthode a été introduite dans le domaine de l'assainissement, dans la région parisienne principalement :

- en 1976 aux U.S.A. pour mémoire [8]
- en 1977 par la D.D.E. 92, SDA* environ 100 sites
- en 1979 par la D.D.E. 94, SDA* pour 11 sites
- en 1980 par la D.D.E. 93, SDA* pour 12 sites [10].
- plus récemment quelques expériences dans certaines collectivités : la Courly**, Syndicat de l'Orge [9], Marseille, Aulnay s/Bois, Bordeaux...

Dans ce domaine le bilan général est satisfaisant. Bien que le développement du parc ait parfois précédé la démonstration de l'efficacité, on assiste à une certaine généralisation de la méthode qui apparaît souvent comme le seul moyen « raisonnable » de réaliser des mesures en réseau.

4.2. Développement de la recherche [11]

L'état des connaissances actuelles est marqué par la diversité des démarches et des expériences réalisées par les différents services. Au sein de l'association R.E.S.E.A.U. d'Ile-de-France*** la Commission mesure des débits et vitesses a progressivement élaboré un programme de recherche articulé en 3 volets pour tenter de résoudre les problèmes soulevés.

1) La mesure de vitesse en tant que telle.

Une expérimentation en laboratoire devrait permettre de déterminer la précision, la fidélité, la linéarité, etc. et les paramètres influençant la mesure de vitesse sur une horizontale dans un écoulement.

Cette étape est absolument nécessaire pour déterminer la validité de la méthode.

2) Représentativité de la mesure de vitesse pour l'obtention des débits.

Une étude antérieure [7] a abordé ce problème mais a buté sur la validité des mesures de vitesse en tant que telle. Leur représentativité ne pourra donc être définie qu'après réalisation d'essais donc être définie qu'après réalisation d'essais en laboratoire concernant la mesure de vitesse elle-même.

3) Fiabilité des matériels.

Il s'agit d'étudier, principalement, la dérive de la mesure dans le temps, la durée de vie des matériels et l'éventuelle détérioration des sondes selon le milieu dans lequel elles se trouvent.

Cette étude devra être réalisée à partir d'observations sur des sites équipés depuis plusieurs années et sur différents types d'effluents.

4.3. Besoins de normalisation

L'effort de normalisation dans ce domaine est quasiment inexistant bien que les besoins soient pressants :

- sur les principes et les technologies
- sur la conception des stations, notamment sur les conditions limites d'utilisation.

Plusieurs projets de normes de l'AFNOR répondent encore mal à l'attente des utilisateurs :

Mesure de débit des liquides dans les canaux découverts

- ISO/DIS 6416 : Mesure de débit à l'aide de la méthode ultrasonique (avril 1982)
- ISO/DIS 6418 : Compteurs ultrasoniques de vitesse (1982)

Un effort important s'avère donc nécessaire pour guider les nouveaux utilisateurs et conforter, a posteriori, les services précurseurs en ce domaine. Cette action pourrait et devrait s'appuyer sur ces services pour étayer et rendre plus pertinentes les recommandations des projets de normes à venir.

Bibliographie

- [1] L.H.M., HEMAIN J.C., SERVAT E. — *Etude bibliographique dans le domaine de la mesure de la vitesse d'un effluent par la méthode des ultrasons*. D.D.E. de Seine-Saint-Denis et du Val-de-Marne. L.H.M. 13/1984 — 51 pages, août 1984.
- [2] D.D.E. 93 Service départemental d'assainissement, PAITRY A. — *Les mesures de vitesse par ultrasons. L'expérience d'un service opérationnel d'assainissement*. Département de Seine-Saint-Denis — A.F.B.S.N. 22 pages + 3 annexes, mai 1984.
- [3] MULTON F., Société ULTRAFLUX. — *Débitmètres à ultrasons. Techniques de l'ingénieur*. R 2265 13 pages, octobre 1984.
- [4] A.F.B.S.N., DARTOUT R. — *Station de jaugeage à ultrasons de Paris-Alexandre III. Note de présentation — Premiers résultats — Bilan d'un an de fonctionnement*, 33 pages, décembre 1980.
- [5] HOC J.P., D.D.E. 92. — *Mesures de vitesses et de débits par ultrasons dans les ouvrages d'eaux usées. Formation Continue E.N.P.C. Stage 5719. La mesure dans les systèmes d'assainissement*, 36 pages, 3-4-5 juin 1986.
- [6] BOURGEOIS A. — *Thèse de Docteur-Ingénieur. Conception et réalisation d'un compteur d'eaux usées. Application à la gestion informatisée d'un grand réseau d'assainissement*. E.N.P.C. 157 pages + 4 annexes, 9 décembre 1983.
- [7] L.R.O.P., RENARD D. — *Connaissance des débits d'effluent par la mesure des vitesses par ultrasons*. F.A.E.R. 1.08.06.1 56 pages, août 1984.
- [8] City of Milwaukee, ANDERSON R.J., Badger Meter Inc, BELL S.S., WANDER HEYDEN W.H., GENTHE W.K. — *Wastewater flow measurement in sewers using ultrasound*. E.P.A. - 600/2-76-243, 75 pages + annexes, novembre 1976.
- [9] C.E.R.G.R.E.N.E. — *Station expérimentale de mesure des débits à Villemoisson sur Orge*.
- [10] PAITRY A., RENARD D. — *La mesure des débits dans les collecteurs pluviaux. Les développements nouveaux. S.H.F. XVIII^e Journées de l'hydraulique. Question 1, Rapport n° 5*, septembre 1982.
- [11] Association R.E.S.E.A.U. Ile-de-France. — *Commission « Mesure des débits et vitesses ». Mesure de vitesse par ultrasons dans les écoulements à surface libre*. Synthèse, octobre 1986.

* SDA : Service départemental d'assainissement.

** COURLY : Communauté urbaine de Lyon.

*** RESEAU d'Ile de France : Association loi de 1901 (Recherche et expérimentation sur l'eau dans les aménagements urbains).

Discussion

Président : M. H. ANDRÉ

M. ANDRÉ. — Après avoir remercié les orateurs, souligne l'intérêt d'utiliser la méthode des ultrasons pour les mesures de vitesse, non seulement en conduite mais également en rivière et en réseau d'assainissement.

M. ANDRÉ souhaite, d'une part savoir si d'autres constructeurs que la Maison VOITH en Allemagne ont réussi à éliminer C (vitesse de propagation du son dans le fluide au repos) en se référant à une mesure de fréquence et non de temps, d'autre part avoir une idée des prix de ce type de matériel et une information sur la prise en compte de la vitesse des ions dans les circuits électroniques.

M. RENARD précise qu'il y a peu d'information sur le matériel allemand et anglais et rappelle que les constructeurs français Ultraflux et CR2M utilisent le même principe de mesure de différence de temps de transit.

M. MULTON. — La méthode de mesure de la fréquence présente des inconvénients étant donné la très faible différence de temps; pour obtenir la différence de fréquence on est obligé d'avoir des temps de couplage assez longs en amont et en aval. Les résultats dépendraient donc de la stabilité des débits pendant les deux phases de mesures.

Le problème du temps de propagation dans les câbles est évité en utilisant les circuits en différentiel; les temps de propagation sont ainsi éliminés dans les circuits électroniques.

M. GASNIER. — Dans le prix total, il faut distinguer le coût des sondes et du matériel électronique, le coût des travaux d'électricité, le coût d'un abri protecteur pour tout le matériel, le coût de la fourniture et du battage des palplanches dans la rivière..., le coût total est de l'ordre de 180 000 F., le prix du matériel à ultrasons proprement dit est de 55 000 F.

M. AUDINET désire connaître l'origine de l'écart systématique de 10 à 20 % signalé par M. GASNIER, entre, semble-t-il, une mesure de débit par la méthode des ultrasons et une autre approche : laquelle ?

Par ailleurs, quel est le coefficient utilisé pour passer de la vitesse moyenne sur l'horizontale de mesure à la vitesse moyenne dans la section ?

M. GASNIER. — Les débits ont été obtenus en comparant les débits déduits d'une courbe de tarage classique (par jaugeages) au débit obtenu par les ultrasons (produit de la vitesse mesurée par les ultrasons par la section mouillée). Cette dernière valeur est toujours supérieure de 20 % en moyenne par rapport à la première. Cette constatation s'explique par le fait que la vitesse au niveau des sondes est de 20 % supérieure à la vitesse moyenne de la rivière.

M. LESAVRE reprend l'idée que la vitesse devrait être connue dans plusieurs plans horizontaux pour obtenir une image fidèle de la vitesse moyenne.

M. RENARD précise qu'en réseau d'assainissement, 2 solutions sont habituellement utilisées :

1. mesure de vitesse sur une horizontale et découpage de la section mouillée en tranches S_i auxquelles sont affectés des coefficients α_i .

$$\alpha_i = \frac{\text{vitesse moyenne sur la tranche } i}{\text{vitesse mesurée sur la corde}}$$

d'où $V \text{ section} = \sum_i \alpha_i \cdot S_i \cdot V \text{ mesurée}$

Les valeurs utilisées des coefficients sont actuellement tirées de la littérature américaine. Des recherches sont en cours en France sur ce sujet.

2. mesures de vitesses sur plusieurs horizontales j : V mesurée j représentatives d'une tranche de section S_i

d'où $V \text{ section} = \sum_j V \text{ mesurée } j \times S_i$

M. AUGARDE rappelle qu'il existe une autre façon d'approcher la vitesse moyenne vraie (V_m), c'est de mesurer une vitesse moyenne dans le plan vertical de symétrie de la canalisation (désignée par V_v). Ce plan possède des propriétés géométriques et hydrauliques intéressantes : il coupe toutes les courbes d'isovitesse en leur centre de symétrie, c'est aussi le lieu géométrique des points dont la somme des vitesses est maximum.

Un prototype a été mis au point, comprenant un bras oscillant dans le plan de symétrie : deux sondes à ultrasons fixées aux extrémités du bras donnent V_v , une autre sonde fixée sur le fond (lest) donne le taux de remplissage (H/D).

La stabilité est assurée par un flotteur conique articulé qui permet également le glissement des matières filamenteuses ou flottantes. La présence du bras et de son support introduit une distorsion de 3 à 4 % dans la répartition des vitesses.

Un modèle mathématique spécialement étudié par la DER (EDF, Chatou) permet de relier V_m à V_v en fonction de H/D partiellement indépendante (à 2 % près) de la rugosité et de la pente. L'intérêt de ce système, par rapport à la technique classique des sondes fixes à une seule corde, serait : une meilleure précision des mesures, la possibilité de mesurer toute la gamme des débits, sa mobilité, l'appareil pouvant être rapidement déplacé en tout point convenable du réseau (section droite, sans dépôts).

M. ANDRÉ, pour clore la discussion, remercie les auteurs de la communication d'avoir en outre réalisé un inventaire exhaustif des systèmes par ultrasons existant en France.