

Le projet Hydre. Échantillonnage 2D des vitesses et des concentrations en collecteur d'assainissement

Frédérique LARRARTE*
Louis-Marie COTTINEAU
LCPC, Centre de Nantes, France

■ RÉSUMÉ

Les prescriptions réglementaires et les impératifs techniques nécessitent une bonne connaissance du fonctionnement réel des réseaux d'assainissement. Cette connaissance passe par celle de l'hydraulique d'une part, et par celle des polluants transportés d'autre part. Elle dépend de la capacité d'un point de mesure à donner des résultats représentatifs, et nécessite la définition de critères facilitant le choix de sites de mesure potentiels. Afin de définir ces paramètres, une méthodologie de qualification des sites de mesures fondée sur une modélisation générique est en cours de développement. Cela nécessite des données expérimentales pour valider la modélisation. Cet article présente un échantillonneur des champs de vitesses et de concentrations conçu, développé et utilisé pour acquérir ces données de terrain ainsi que les résultats qui ont été obtenus.

**The Hydre project: 2D sampling of velocities and concentrations
in sewer pipes**

■ ABSTRACT

Regulatory specifications and technical requirements require extensive knowledge of how sewer networks actually function. This knowledge entails an understanding of both hydraulics and pollutant transport mechanisms; it also depends on the capacity of a given measurement point to yield a set of representative results and implies defining criteria that facilitate the choice of potential measurement sites. To proceed with the definition of such parameters, a measurement site qualification methodology, based on a generic model, is being developed, an effort that has necessitated deriving an experimental data set in order to validate the modeling layout. This article will present a velocity and concentration field sampler, designed, developed and implemented for the purpose of acquiring these field data, in addition to discussing the results obtained.

* AUTEUR À CONTACTER :

Frédérique LARRARTE
frederique.larrarte@lcpc.fr

INTRODUCTION

Une des composantes principales de la gestion de l'eau dans les villes d'aujourd'hui et de demain [1] concerne les réseaux d'assainissement. Or leur fonctionnement est souvent assez éloigné des hypothèses déterminées lors de leur conception. Ainsi des mesures *in situ* doivent-elles être mises en œuvre pour appréhender, puis améliorer, le fonctionnement réel des réseaux d'assainissement qui prend son intérêt dans le cas d'un système de suivi en continu. D'ailleurs, un contexte réglementaire régi par un arrêté interministériel du 22 décembre 1994 et un encadrement par les normes NF EN 752-2, NF EN 752-7 et NF P 15-900-2 [2-4] demandent aux exploitants d'une façon de plus en plus précise de surveiller les réseaux, d'évaluer leurs performances, d'intervenir rapidement en cas de dysfonctionnements ponctuels et d'informer le maître d'ouvrage sur les aménagements souhaitables pour améliorer les performances afin d'augmenter la fiabilité de la collecte. Même si

la mise en place de capteurs est une pratique qui se généralise, elle est confrontée actuellement au manque de sites répondant à la fois aux normes de l'hydrométrie et aux exigences de sécurité pour le personnel et le matériel [5].

Pour concilier au mieux la qualité des mesures et les contraintes pratiques, une méthodologie de qualification des sites de mesures est en cours de développement [6]. Celle-ci doit permettre de :

- qualifier des sites de mesure ;
- définir les modalités d'implantation d'un capteur donné ;
- préciser les modalités d'exploitation des résultats issus des capteurs, permettant de passer des valeurs mesurées aux grandeurs physiques recherchées ;
- quantifier la précision des données fournies par des sites existants.

Ces travaux comportent une phase expérimentale utilisée pour valider les modèles sur lesquels s'appuie la méthodologie. Le choix a été fait d'effectuer des mesures *in situ* parce que, d'une part, les techniques développées pour les besoins de recherche sont susceptibles d'applications ultérieures dans le domaine opérationnel et que, d'autre part, les phénomènes présents en réseau sont nombreux et que leur représentation dans des essais de laboratoire n'est pas actuellement bien maîtrisée.

Cet article présente la conception et les résultats obtenus avec un dispositif mécanique d'exploration de la section transversale d'un écoulement en collecteur, utilisable dans une large gamme de contextes hydrauliques (y compris avec un fort taux de remplissage), permettant d'embarquer divers capteurs de vitesses ainsi que des dispositifs de prélèvement d'échantillons d'effluent.

CONCEPTION DE HYDRE

Larrarte et Cottineau [7] ont présenté deux échantillonneurs permettant d'étudier respectivement les champs de vitesses et de concentrations en matières en suspension. Ils ont ainsi montré qu'un préleveur monopoint permet d'obtenir une valeur représentative de la concentration moyenne dans un grand collecteur où les vitesses débitantes sont supérieures à $0,6 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ qui est la vitesse d'autocurage. Qui plus est, les vitesses et les concentrations ne pouvaient pas être mesurées dans un laps de temps court car il fallait démonter un échantillonneur avant de pouvoir utiliser l'autre et enfin les mesures n'étaient pas possibles au-dessus de la banquette. Un nouveau dispositif, appelé Hydre¹, a été développé pour surmonter les limites des précédents systèmes.

L'objectif est de pouvoir effectuer des mesures dans un collecteur d'assainissement, quel que soit le contexte météorologique et notamment par temps de pluie, alors que l'accès à l'intérieur du collecteur est prohibé et que le seul regard (dont le diamètre est typiquement de 0,6 m) permet de faire entrer ou sortir des objets. Par ailleurs, les contraintes de sécurité imposent que l'alimentation électrique soit en basse tension (inférieure ou égale à 24 V et que tout élément du dispositif installé en permanence dans le collecteur ne puisse en aucun cas provoquer d'embâcle, ni entraver l'écoulement.

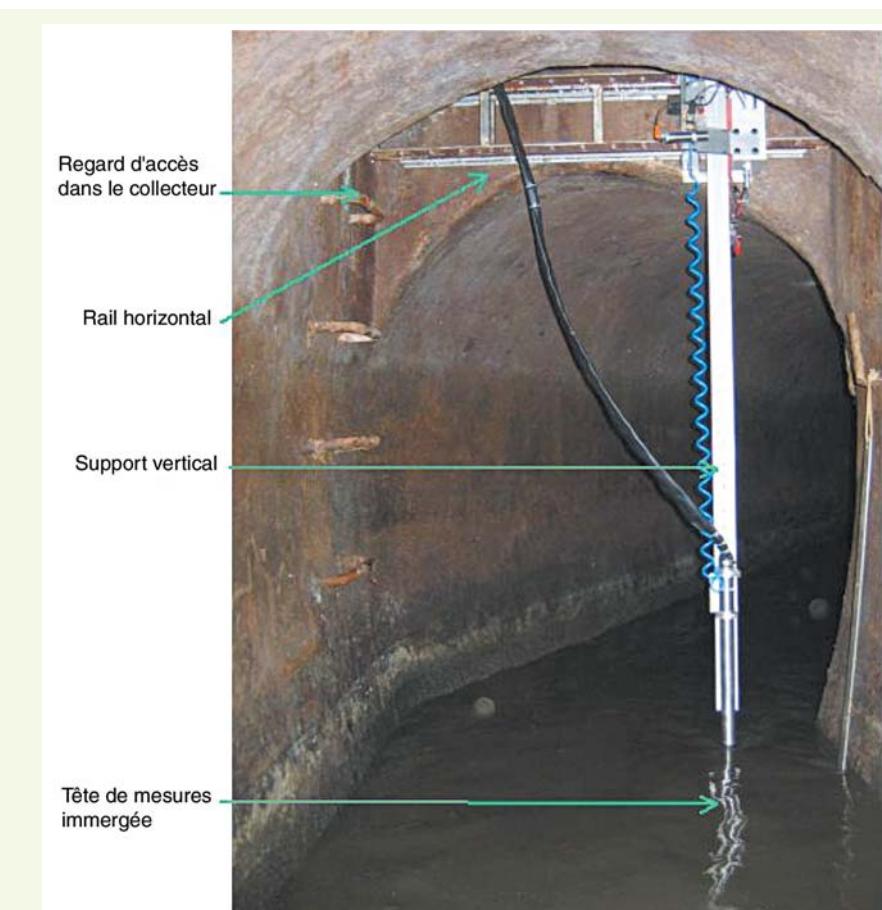
Compte tenu de l'expérience acquise au préalable [7], la conception a visé à satisfaire le cahier des charges suivant :

- mesurer les vitesses localement avec un pas, respectivement, de 0,10 m selon la verticale (de 0,10 à 1,50 m du radier) et de 0,20 m selon la transversale ;
- quantifier les concentrations en matières en suspension.

¹ Le projet Hydre a été nommé ainsi par référence à l'Hydre de Lerne. Celle-ci fut tué par Héraclès. Ce dernier avait aussi tué le frère, Cerbère, gardien des Enfers. L'échantillonneur Cerbère, comprenant trois têtes de mesures, avait été nommé ainsi par référence aux trois têtes du chien et faisait suite au projet Orphée. Ce poète légendaire grec, fils de la muse Calliope épousa la nymphe Eurydice. Mais la jeune femme mourut par un serpent. Armé de sa lyre, Orphée calma le féroce chien Cerbère, gardien des Enfers.

La photographie (**figure 1**) présente Hydre en configuration de mesure. Le dispositif est constitué d'un rail horizontal installé à demeure dans l'égout et d'un chariot automoteur pourvu d'un système d'exploration verticale actionné par des vérins. Le positionnement se fait par des capteurs de déplacement équipant chaque axe. Lors de l'installation, la partie mobile est positionnée et guidée le long du regard pour descendre sur le rail horizontal sans qu'un agent ait à pénétrer dans l'égout. Un vérin verrouille cette partie sur le rail et le système peut passer dans la phase de mesures. La tête de mesures (**figure 2**) est fixée sur le support vertical et est équipée de deux capteurs de mesure de vitesse et d'une buse de prélèvement. Afin d'éviter l'encrassement des têtes de mesure, des buses de soufflage sont disposées auprès de chaque capteur de vitesse ; de plus, le tuyau de prélèvement est nettoyé à l'air comprimé avant chaque prise d'échantillon.

figure 1
Hydre lors de mesures.



La mesure de vitesse est effectuée avec deux courantomètres à effet Doppler PVM-PD. Ces capteurs ont déjà été utilisés de manière très satisfaisante sur des montages précédents suivis par les auteurs. Ces courantomètres ont l'avantage de permettre d'effectuer soit des mesures instantanées, soit des mesures moyennes sur un intervalle de temps réglable, mais l'acquisition ne peut être automatisée et doit être déclenchée manuellement.

Le pilotage est effectué depuis la surface où un chariot est équipé du système de mise en bouteille, des deux boîtiers de mesure de vitesse, ainsi que des différents matériels nécessaires au fonctionnement de l'ensemble (**figure 3**). L'acquisition et le contrôle font largement appel à des dispositifs déportés d'entrées et de sorties reliés par une interface série de type RS485. Ceci permet en outre de limiter le câblage introduit dans l'égout. Un logiciel, écrit sous LabVIEW, permet de réaliser les séquences de mesures suivant une matrice de points définie dans un fichier créé au préalable. Lorsque le point est atteint, la mesure de vitesse est déclenchée par l'opérateur chargé des vitesses. Ensuite, s'il le désire, une séquence de prélèvement est réalisée.

figure 2
Tête de mesure.

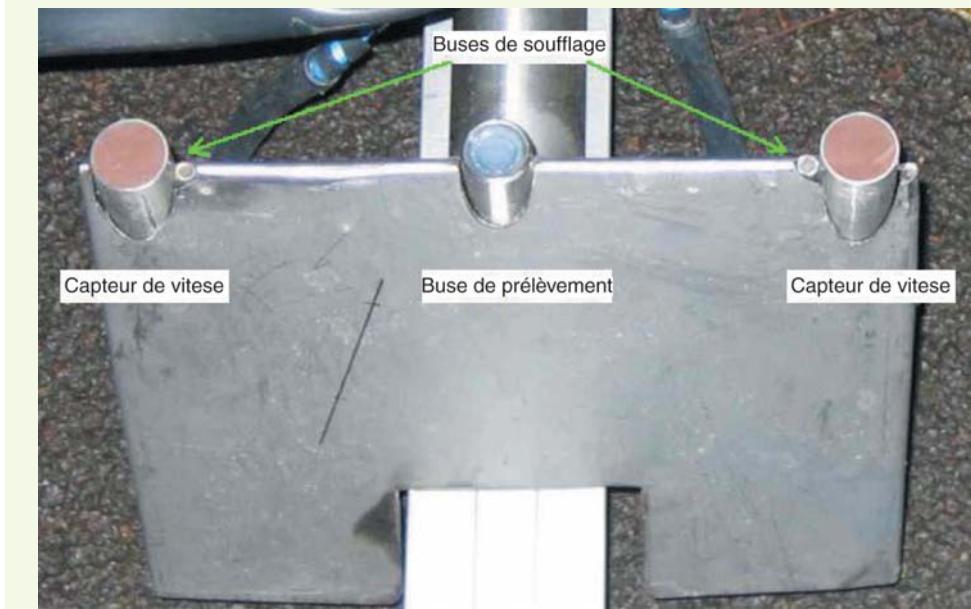
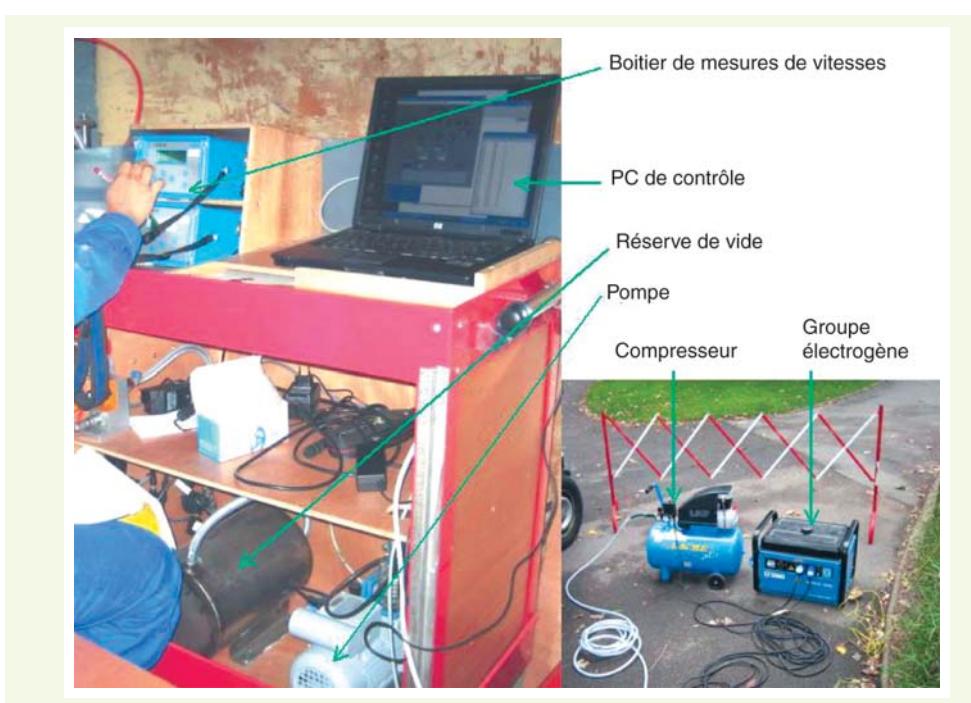


figure 3
Poste de pilotage.



Pour caractériser les flux polluants, les concentrations en matières en suspension sont déterminées à partir de prélèvements d'effluents réalisés avec un tuyau dont le diamètre interne est de 0,01 m, respectant ainsi la norme ISO 5667-10 [8]. Les prélèvements sont faits un par un. Cette séquence automatique commence par la fermeture de la bouteille par la tête d'aspiration, suivie d'un nettoyage par soufflage du tuyau d'aspiration. Ensuite le prélèvement par le vide est déclenché et la bouteille se remplit jusqu'à la hauteur d'un détecteur. La tête d'aspiration est alors remontée et la bouteille peut être dégagée par l'opérateur chargé des prélèvements. Dans le même temps, la tête de mesure va immédiatement au point suivant inscrit dans le fichier. Par souci de sécurité le dispositif est caréné (**figure 4**) pour éviter les projections de morceaux de verre en cas de rupture d'une bouteille, comme cela est arrivé lors des tests. La **figure 5** montre l'interface utilisateur.

figure 4

Bouteille et carénage du dispositif d'aspiration par le vide.

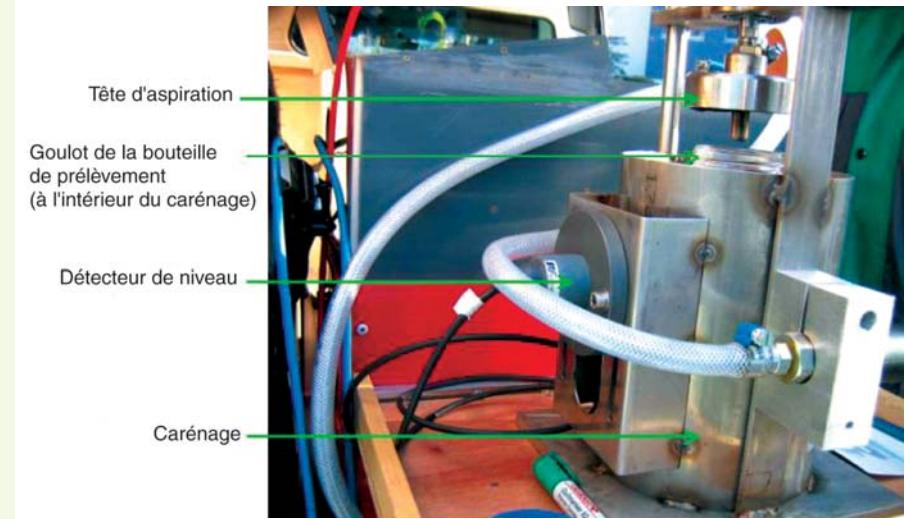
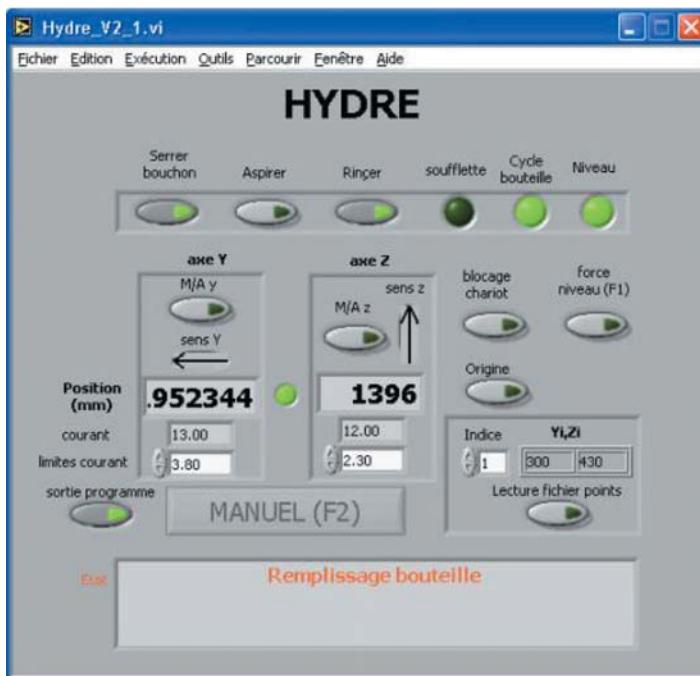


figure 5

Interface utilisateur du logiciel.



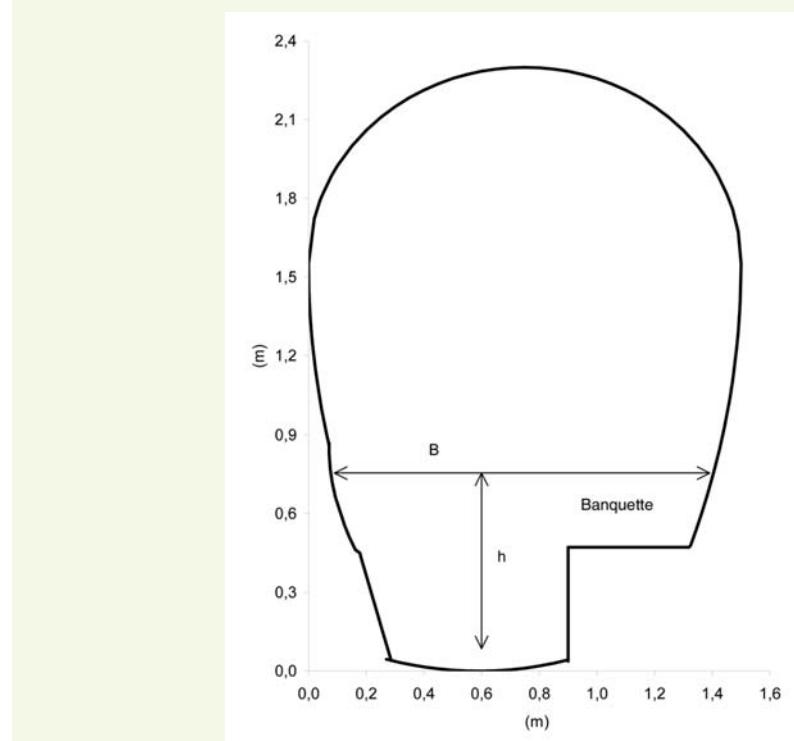
SITE EXPÉRIMENTAL

Afin d'enrichir la connaissance des champs de vitesses et de concentrations présents dans les collecteurs d'assainissement urbain, et compte tenu des travaux déjà réalisés [7] sur un site du réseau d'assainissement nantais, il a été décidé de travailler sur un site expérimental présentant des vitesses d'écoulement plus faibles.

Le site de mesure dit du Jardin des Plantes est situé dans un collecteur ovoïde à banquette qui fait partie du réseau unitaire. La section transversale du collecteur (**figure 6**) est définie par la hauteur maximale D qui est égale à 2,30 m, la hauteur d'eau h , la largeur à la surface libre B . La largeur maximale y_{max} égale à 1,50 m, se trouve à une hauteur z_{max} égale à 1,50 m. Le collecteur est en béton de bonne qualité avec un coefficient de Manning Strickler évalué à $70 \text{ m}^{1/3} \cdot \text{s}^{-1}$. La banquette est constituée d'une marche horizontale de 0,40 m de large située à droite quand on regarde vers l'amont. La largeur de cette banquette représente 27 % de la largeur maximale du collecteur. Enfin, un dépôt intermittent a été observé au niveau du radier du collecteur.

figure 6

Géométrie de la section du Jardin des Plantes. Vue vers l'amont.



Ce site n'est pas équipé de dispositifs de mesures en continu mais la direction de l'assainissement de Nantes Métropole dispose d'un site de mesures (Duchesse Anne), situé à 600 m en aval. Seulement trois égouts élémentaires sont raccordés au collecteur entre Duchesse Anne et Jardin des Plantes. Ces apports locaux ont été considérés comme négligeables devant les effluents de 150 000 équivalents habitants transitant au point Duchesse Anne. En utilisant des données acquises en continu, on a pu déterminer les déciles des hauteurs mesurées par temps sec et les vitesses associées (**tableau 1**). Ceci met en évidence que le rapport de la médiane (ou 5^e décile) de hauteur d'eau à la dimension verticale maximale D du collecteur est égal à 0,30 par temps sec.

tableau 1
Caractéristiques du site.

	Hauteur (m)	Vitesse (m·s ⁻¹)
Temps sec : 1 ^{er} décile	0,50	0,38
Temps sec : 5 ^e décile	0,69	0,46
Temps sec : 9 ^e décile	0,80	0,57

Par temps de pluie, les hauteurs et les vitesses varient très rapidement (**figure 7**). Compte tenu de la présence d'un déversoir d'orage à Duchesse Anne et d'un autre à 2 km en amont du Jardin des Plantes, la notion de couple caractéristique n'a pas de sens. Les agents de salubrité ont confirmé la grande réactivité du réseau aux événements pluvieux au niveau du Jardin des Plantes.

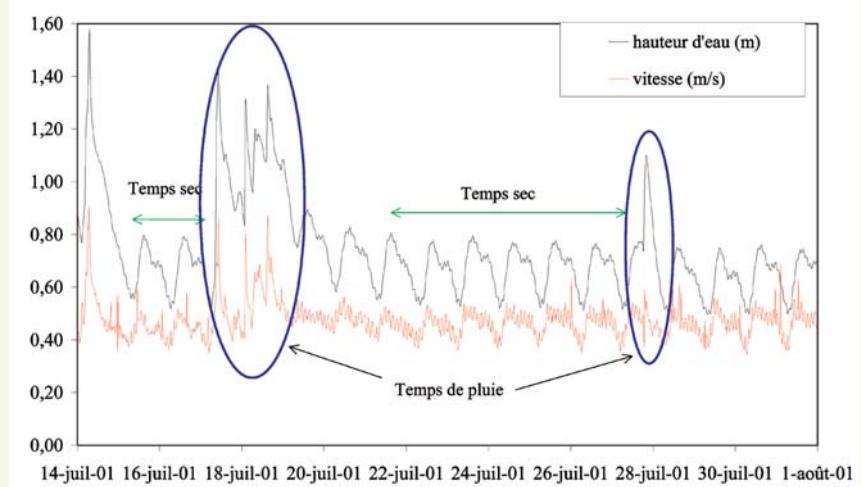
RÉSULTATS

L'écoulement est turbulent sous critique avec des nombres de Reynolds $R_e = \frac{UR_h}{v}$ supérieurs à 10^5 et des nombres de Froude $F_r = \frac{U}{\sqrt{gR_h}}$ compris entre 0,25 et 0,50, où R_h est le rayon hydraulique,

U la vitesse de l'écoulement, g l'accélération de la pesanteur, v la viscosité cinétique de l'eau.

figure 7

Exemple de gammes de hauteurs, vitesses, débits rencontrées sur le site expérimental.



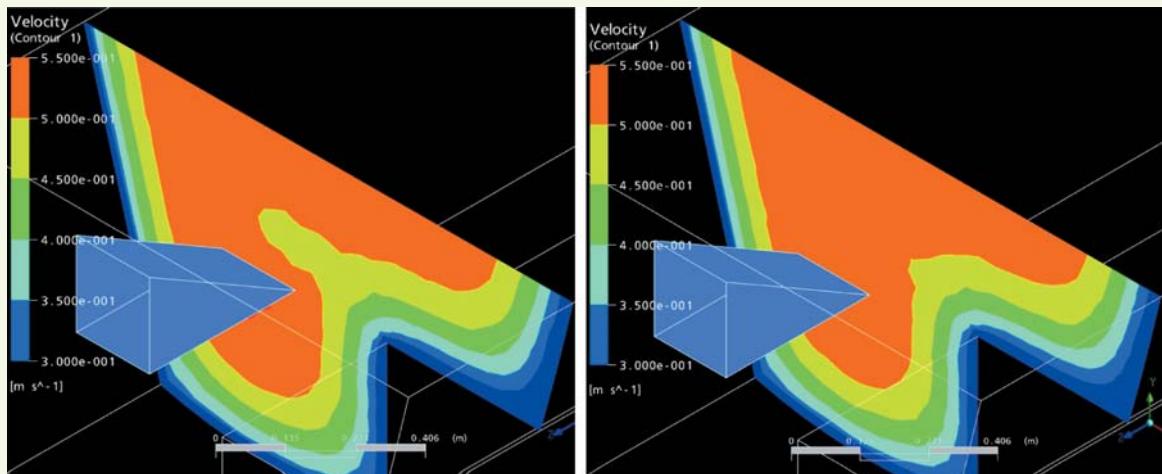
Jaumouillié [9] a montré que la viscosité des eaux usées est la même que celle de l'eau issue du réseau d'adduction d'eau potable.

On a pu noter précédemment (figure 1) que l'échantillonneur Hydre est intrusif puisque tant la tête de mesure que le support vertical sont dans l'écoulement. On a étudié numériquement l'influence de Hydre sur le champ de vitesses. On constate (figure 8) que dès 0,10 m en amont des capteurs cette influence est négligeable. Sachant que des tests en laboratoire ont montré que les capteurs de vitesses focalisent les mesures 0,10 m en amont des transducteurs proprement dits.

figure 8

Influence de Hydre sur le champ de vitesses en amont des capteurs.
a : 0,05 m en amont
b : 0,10 m en amont

a | b

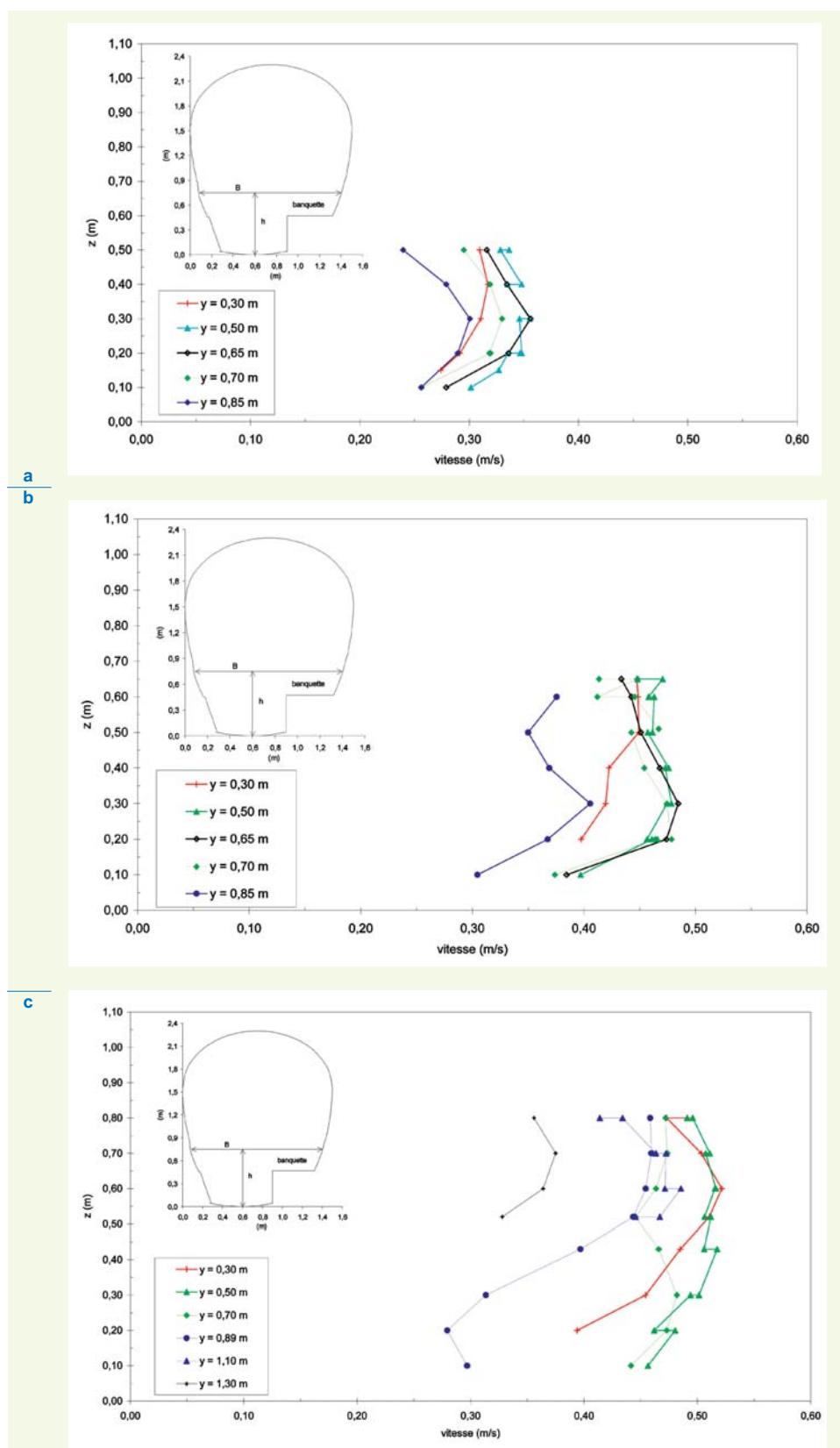


En chaque point la mesure de vitesse est effectuée deux fois, et chaque mesure est la moyenne des vitesses instantanées enregistrées pendant 10 s. Ce temps d'exposition est conforme aux préconisations de la norme NF EN ISO 748 [10] pour les courantomètres électromagnétiques. Si l'écart entre ces deux mesures est supérieur à $0,05 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ les capteurs sont nettoyés. La section mouillée est balayée par profils verticaux qui peuvent être utilisés pour déterminer les frottements pariétaux.

Après un an d'utilisation, la gamme des situations rencontrées va du temps très sec en été aux fortes pluies avec cependant toujours une banquette immergée. Étant donné que les mesures sont faites sur un collecteur du réseau urbain et non en laboratoire, il est impossible de maîtriser les conditions hydrauliques. Ceci se traduit notamment par le fait que la vitesse et la hauteur d'eau évoluent entre

la première et la dernière des mesures faites pour scruter le champ des vitesses dans la section étudiée. La **figure 9** présente les profils verticaux mesurés pour différents taux de remplissage. Les **figures 9a** et **9b** correspondent à 2 jours de temps sec. La **figure 9c** présente les profils obtenus lors d'un événement pluvieux courant : il est tombé 0,003 m de pluie sur Nantes ce jour-là et les

figure 9
Profils de vitesses en l'absence de déversement à proximité.
a : taux de remplissage de 24 %
b : taux de remplissage augmentant de 28 à 32 %
c : taux de remplissage augmentant de 44 %

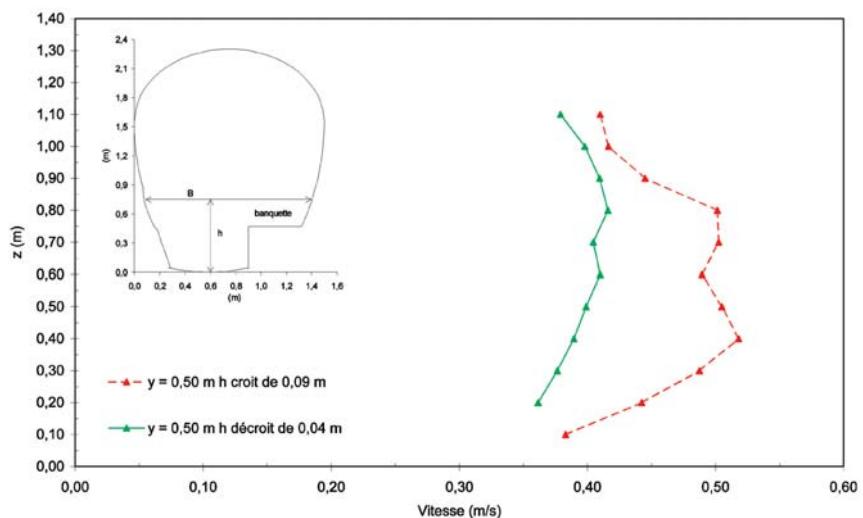


déversoirs d'orage situés à proximité n'ont pas fonctionné, ce qui est normal pour un événement courant. Comme on pouvait s'y attendre dans ces situations de canaux étroits (caractérisés par le fait que le coefficient d'aspect Ar entre la largeur à la surface libre B et la hauteur d'eau maximale h_{max} lors des mesures est inférieur à 5), la vitesse maximale est située en dessous de la surface. Il convient d'insister sur le fait que l'écoulement dans ces canaux est tridimensionnel et les profils ne respectent pas la loi de Coles. Il faut donc utiliser avec circonspection les préconisations de la norme NF EN ISO 748 [10] qui permettent de calculer la vitesse moyenne en fonction de la vitesse à la surface libre. On remarque (**figures 9b et 9c**), à proximité de la paroi verticale de la banquette, la forme particulière des profils de mesures des vitesses au-dessus de la banquette et le fort gradient transversal des vitesses sous l'effet des frottements pariétaux. Au-dessus de la banquette, les variations locales observées sont de l'ordre de $0,03 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$.

La **figure 10** montre la difficulté d'obtenir des mesures pour les contextes de forte pluie. Ces profils ont été obtenus dans un contexte orageux avec $0,23 \text{ m}$ de précipitation en moyenne à Nantes ce jour-là. Lors de la première série de mesure, la hauteur d'eau augmentait très vite (variations de $0,09 \text{ m}$ en 15 min) jusqu'à atteindre les seuils des déversoirs situés à proximité. Dans le même temps, on a observé de fortes rafales de vent et de forts tourbillons dans l'écoulement. Lors de la seconde série de mesures la hauteur d'eau a diminué de $0,04 \text{ m}$ en 20 min, le rythme des mesures était ralenti par de nombreux prélèvements infructueux qui se sont avérés dus à une obstruction de la buse.

figure 10

Influence de l'évolution de la hauteur d'eau sur les profils de vitesses par temps orageux.



On peut noter que les profils adimensionnés par la vitesse maximale dans la section sont quasiment superposés (**figure 11**).

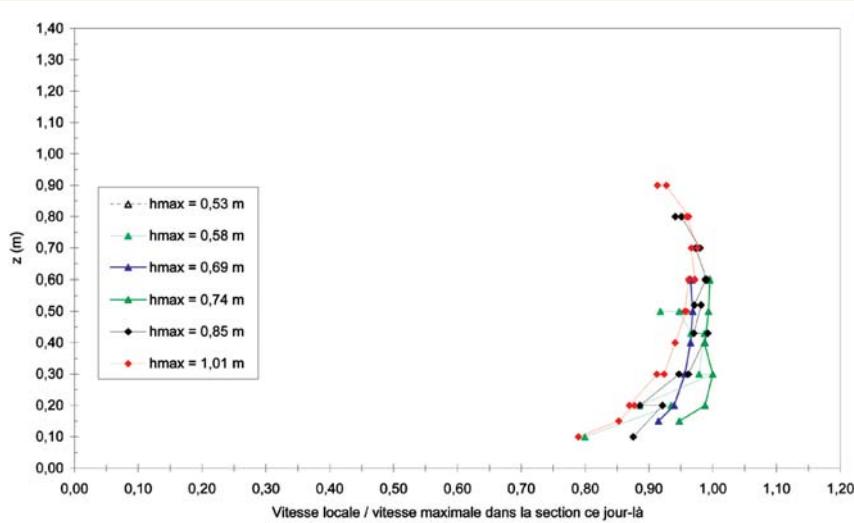
Du point de vue des polluants, chaque échantillon d'eaux usées est analysé, en double, en laboratoire en accord avec la norme NF EN 872. Ces analyses permettent de caractériser la concentration en particules inférieures à $2 \cdot 10^{-3}$ et $125 \cdot 10^{-6} \text{ m}$ dans les matières en suspension ainsi que les teneurs en matières organiques associées. La précision de ces analyses a été évaluée à $10 \text{ mg} \cdot \text{l}^{-1}$. On a ainsi plus de 500 résultats de concentrations par temps sec et presque 200 pour les événements pluvieux. On montre (**figure 12**) que la concentration en matières en suspension reste généralement comprise entre 150 et $350 \text{ mg} \cdot \text{l}^{-1}$, soit la même gamme de concentrations que lors des mesures par temps sec sur le site de Cordon Bleu situé 5 km en aval [7]. On constate, par contre, que les concentrations par temps de pluie au Jardin des Plantes sont légèrement plus faibles : 66% des concentrations inférieures à $200 \text{ mg} \cdot \text{l}^{-1}$, contre seulement 55% par temps sec.

Les courbes (**figure 13**) montrent des exemples de profil de concentrations par temps sec. On remarque qu'il existe des fluctuations verticales de la concentration locale mais pas de gradient. Pourtant,

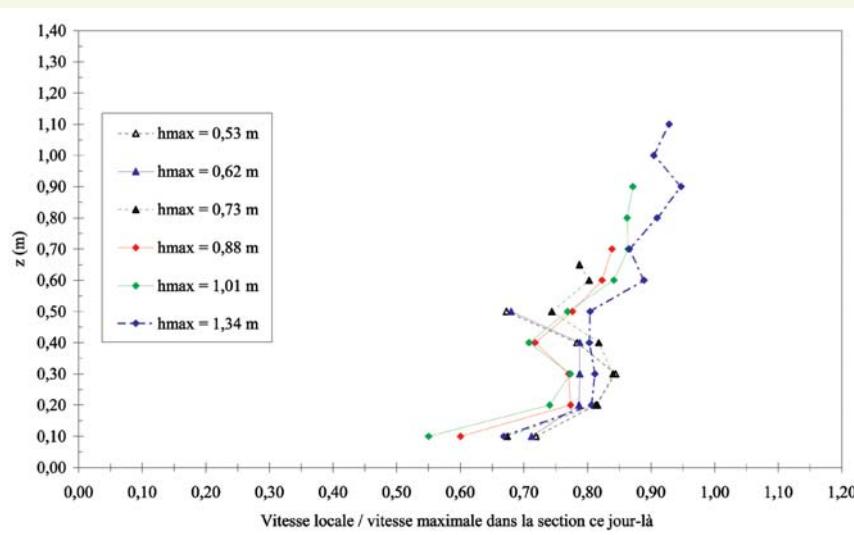
figure 11

Évolution des profils verticaux adimensionnels en fonction du taux de remplissage.

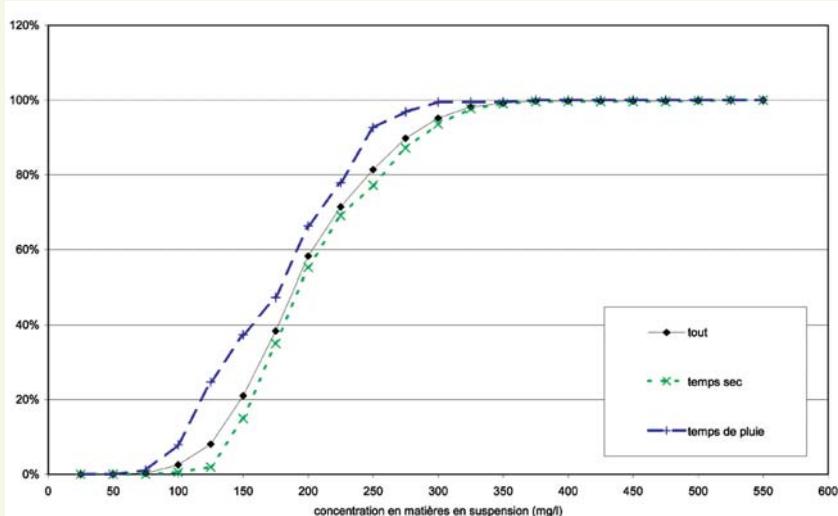
a : en $y = 0,50\text{ m}$
b : en $y = 0,89\text{ m}$



a
b

**figure 12**

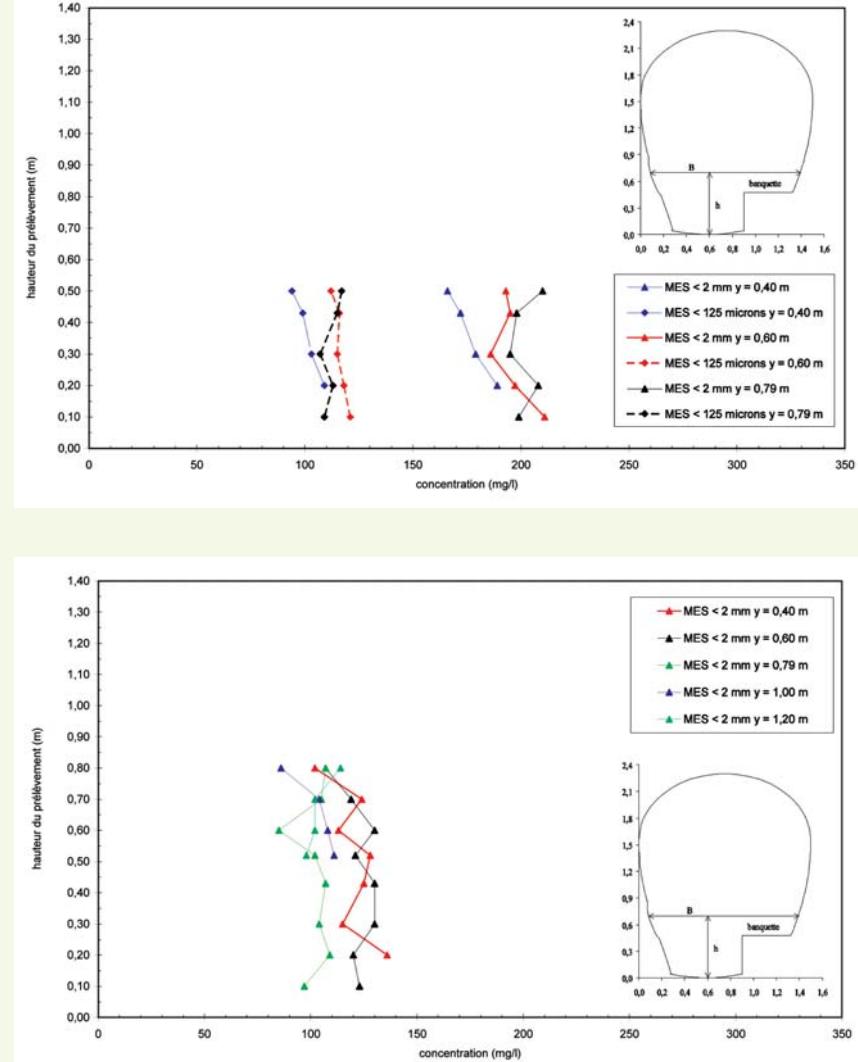
Évolution des concentrations avec la hauteur d'eau dans la section.



lors de la journée de temps sec, la vitesse moyenne dans la section mouillée était de $0,37 \text{ m.s}^{-1}$, un dépôt sableux de $0,02 \text{ m}$ de haut était présent au niveau du prélevageur et son épaisseur augmentait vers l'amont pour atteindre $0,04 \text{ m}$ à 12 m en amont. Cela nous conduit à attirer l'attention sur la notion de gradients verticaux de concentrations tels que ceux présentés par Wohrle et Brombach en 1991 [11], le pic situé près du fond relève pour nous du prélèvement dans le dépôt. Enfin il faut noter que :

- les refus de tamisage à $0,002 \text{ m}$ sont négligeables ;
- les particules fines représentent en moyenne 58 % des particules en suspension lors de la journée de temps sec et 67 % lors de la journée de temps de pluie (précipitations pluvieuses de $0,01 \text{ m}$ dans les six heures précédant les mesures).

figure 13
Exemple de profil de concentrations.
a : temps sec, taux de remplissage de 25 %
b : temps de pluie, taux de remplissage de 44 %



CONCLUSION

Afin de valider les modèles utilisés dans le cadre du développement d'une méthodologie de qualification des sites de mesures, on a conçu et fabriqué un échantillonneur bidimensionnel permettant de mesurer les champs de vitesses et de matières en suspension dans une section droite de collecteur d'égout. Ce dispositif, baptisé Hydre, a permis d'acquérir des données sur le terrain pour des contextes hydrauliques variés.

Les résultats expérimentaux obtenus montrent que, pour ce collecteur étroit, la vitesse maximale est située en dessous de la surface libre, et que les profils de vitesses adimensionnés par la vitesse maximale sont superposables. Ces résultats confirment les observations faites par Larrarte et Cottineau [7] sur le site de Cordon Bleu. Ces travaux ont permis par ailleurs de proposer une loi pour les profils verticaux de vitesse [12].

Pour ce qui concerne les solides transportés en suspension, on a pu observer à nouveau l'absence de gradients verticaux de concentrations alors même qu'il y avait, certains jours, un dépôt sédimentaire de quelques centimètres. Ceci nous conduit à attirer l'attention sur les pics observés parfois près du fond qui relèvent pour nous du prélèvement dans le dépôt.

Les mesures de terrain vont se poursuivre afin d'étoffer la gamme de résultats expérimentaux notamment par temps de pluie et permettre la validation des résultats numériques sur le transport solide.

NOMENCLATURE

$Ar = \frac{B}{h_{\max}}$	coefficient d'aspect	
B	largeur à la surface libre	m
D	plus grande dimension verticale du collecteur	m
$F_r = \frac{U}{\sqrt{gR_h}}$	nombre de Froude	
g	accélération de la gravité	$m \cdot s^{-2}$
h	hauteur d'eau	m
h_{\max}	hauteur d'eau maximale lors des mesures	m
R_h	rayon hydraulique	m
$R_e = \frac{UR_h}{v}$	nombre de Reynolds	
U	vitesse de l'écoulement	$m \cdot s^{-1}$
ν	viscosité de l'eau	$m^2 \cdot s^{-1}$
y_{\max}	largeur maximale du collecteur	m
z_{\max}	hauteur au point de largeur maximale	m

REMERCIEMENTS

Les auteurs remercient les agents des divisions Eau et Environnement et Métrologie et Instrumentation sans lesquels ce projet n'aurait pu être mené à bien. Ils remercient également le personnel de la direction de l'Assainissement de Nantes Métropole pour leur soutien lors des actions sur le terrain.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- 1 MOUCHET J.-M., DEUTSCH J.-C., CHEBBO G., ANDRIEU H., DE GOUVELLO B., DIAB Y., L'hydrologie urbaine, une source pour la ville, *La Recherche-Ville et mobilité durables*, 2006, 398, pp 32-34.
- 2 AFNOR, Norme NF EN 752-2, 1996, 25 pages.
- 3 AFNOR, Norme NF EN 752-7, 1998, 35 pages.
- 4 AFNOR, Norme NF P15-900-2, 2001, 44 pages.
- 5 LECLERC P., BATTAGLIA Ph., Recommandations pratiques pour la conception de stations de mesure de débit, *revue Techniques Sciences Méthodes TSM*, 2001, 2, pp 45-56.
- 6 BONAKDARI H., Modélisation des écoulements en collecteur d'assainissement – Application à la conception de points de mesures, thèse de doctorat, université de Caen – Basse Normandie, 2006, 263 pages.
- 7 LARRARTE F., COTTINEAU L.-M., Nouveaux instruments pour connaître les champs de vitesses et de concentrations, *Revue Européenne de Génie Civil*, 2005, volume 9/7-8, pp. 963-978.
- 8 AFNOR, Norme ISO 5667-10, 1992, 20 pages.
- 9 JAUMOUILLÉ P., Hétérogénéités des vitesses et des concentrations dans les collecteurs d'assainissement : application à la mesure des flux polluants, thèse de doctorat, université de Bordeaux 1, 2003, 233 pages.
- 10 AFNOR, Norme NF EN ISO 748, 2002, 44 pages.
- 11 WOHRLE C., BROMBACH H., Probenahme im abwasserkanal, *Wasserwirtschaft*, 1991, volume 81.
- 12 BONAKDARI H., LARRARTE F., JOANNIS C., Turbulent velocity profile in fully-developed open channel flows, *Environmental Fluid Mechanics*, 2008, volume 8, 1, pp. 1-17.