



HAL
open science

Étude expérimentale d'écoulements dans un quartier de ville

Céline Lalanne

► **To cite this version:**

Céline Lalanne. Étude expérimentale d'écoulements dans un quartier de ville. Sciences de l'environnement. 2017. hal-02606514

HAL Id: hal-02606514

<https://hal.inrae.fr/hal-02606514>

Submitted on 16 May 2020

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



Rapport de stage

Étude expérimentale d'écoulements
dans un quartier de ville

Cécile Lalanne

Irstea, centre de Lyon-Villeurbanne
Encadrants : André Paquier, Sébastien Proust et Fabien
Thollet

Master 1 de Mécanique des Fluides (MF2A) - C.M.I
Université Pierre et Marie Curie, Paris

Remerciements

Ce stage n'aurait pas été aussi enrichissant et intéressant sans l'aide et le soutien de mes trois encadrants d'Irstea. Tout d'abord, André Paquier, directeur adjoint du centre Irstea de Lyon-Villeurbanne et directeur de l'unité Hydrologie Hydraulique (HH), que je remercie pour le temps qu'il m'a accordé et pour ses conseils tout au long de l'avancement de mon stage.

Ensuite, je suis ravie d'avoir pu échanger avec Sébastien Proust, chercheur en hydrodynamique des rivières et membre de l'unité HH. Son enthousiasme pour le sujet de mon stage m'a poussé à m'investir entièrement dans mes recherches. Sa pédagogie m'a permis d'avancer sur mes problématiques et de compléter mes compétences en hydraulique.

Enfin, ce fut un plaisir de travailler avec Fabien Thollet, membre de l'équipe métrologie, pendant ces quatre mois. Il m'a aidé à mettre en place mes expériences, toujours avec une bonne humeur communicative, et m'a transmis ses connaissances sur la maquette pour que je puisse manipuler en autonomie par la suite. J'ai également pu découvrir des aspects de son travail qui sortaient du cadre de mon stage, à travers une sortie sur le terrain ou des rencontres avec des industriels.

Durant mon stage, j'ai été amenée à échanger avec d'autres personnes d'Irstea : j'ai appris beaucoup, dans une ambiance de travail agréable et entraînante. Je tiens donc à tous les remercier pour ces moments passés en leur compagnie.

Je souhaite aussi remercier plus particulièrement Alexis Buffet, membre de l'équipe métrologie, avec qui j'ai passé beaucoup de temps pour préparer mes expériences. Il a toujours été disponible pour m'aider et a fait en sorte que je travaille dans les meilleures conditions possibles. Merci pour tout et pour les coups de main lorsque j'inondais vraiment la maquette !

L'Irstea collabore régulièrement avec le Laboratoire de Mécanique des Fluides et d'Acoustique (LMFA), situé sur le campus de l'INSA Lyon. Je voudrais remercier Emmanuel Mignot et Nicolas Rivière pour l'intérêt qu'ils ont manifesté durant mon stage : cela a été très instructif d'échanger avec eux, de découvrir leur laboratoire et leurs activités de recherche. Ils m'ont donné de nombreuses pistes pour orienter mon travail, leurs remarques m'ont fait avancer et ils ont fait grandir ma curiosité scientifique.

Résumé

Pour combler le déficit de connaissance sur la compréhension fine des inondations en zone urbaine et l'évaluation de leur influence sur l'estimation du risque, le centre Irstea de Lyon-Villeurbanne a acquis une maquette, nommée *MURI* (Maquette Urbaine pour étudier le Risque d'Inondation).

La maquette mesure 5,4 m de long et 3,8 m de large : elle représente un réseau de 6 rues avec un réseau d'assainissement et des bâtis.

L'objectif de mon stage était de tester ce modèle urbain dans une configuration simple, soit en étudiant uniquement les rues, sans les égouts. Dans un premier temps, j'ai cherché à comprendre le fonctionnement du dispositif, pour pouvoir compléter son instrumentation et de déterminer le type de mesures envisageables pour la suite. Dans un second temps, j'ai réalisé deux séries d'expériences avec différents types d'écoulements : en considérant une seule rue dans la maquette puis en considérant le croisement de deux rues perpendiculaires.

Pour mener mes expériences, j'ai utilisé trois capteurs : un capteur ultrasons (US) pour évaluer les hauteurs d'eau, un Vélocimètre Acoustique Doppler (ADV) pour mesurer la vitesse de l'écoulement et un limnimètre électronique pour obtenir les hauteurs d'eau lorsque la surface libre de l'écoulement était très perturbée.

La série d'expériences en rue simple a permis de déterminer la rugosité caractéristique de la maquette, grâce aux mesures de lignes d'eau avec des régimes d'écoulement graduellement variés, et de mettre en évidence la présence de courants secondaires. En effet, des mesures de vitesse sur une demi-section de l'écoulement révèlent des cellules de mouvements transverses à la direction de l'écoulement. Je me suis aussi intéressée à la symétrie de l'écoulement et à l'intensité turbulente, avec pour comparaison les travaux de Nezu[1] mais il faudra envisager des tests plus spécifiques pour compléter et confirmer mes premiers résultats et comprendre plus précisément les phénomènes.

La seconde étude expérimentale, considérant cette fois-ci le carrefour de deux écoulements uniformes identiques, a montré une symétrie en terme de répartition de débit et de hauteur d'eau en aval du croisement. La surface libre indique une structure tri-dimensionnelle et il serait intéressant de poursuivre les mesures dans cette configuration, avec des capteurs différents, pour observer plus finement les processus.

Abstract

During this fourth-month internship at the Institute Irstea in Lyon-Villeurbanne, I did some experimental studies about flows in an urban area. I used a recent model acquired by the hydraulic laboratory (HHLab), called *MURI* which is 5,4 meters long and 3,8 meters large and which represents six streets of an urban neighbourhood with a sewer network and some buildings. *MURI* is a useful tool to improve our knowledge about urban floods and to help us understand all the different phenomena involved.

The aim of my intership was to study *MURI* in a simple configuration by considering only the streets and not the sewer network. My first goal was to understand how the model works, to complete its measurement instrumentation and to determine which experiments and physical quantities I should consider next. My second goal was consequently to proceed to those experiments and to study different types of flows, to obtain data about urban floods.

I did two series of tests : first, I considered only one isolated street of the model. Then, I considered two perpendicular streets and I particularly studied the flows at the level of the crossroads and after.

To do my experiments, I used three sensors : an Ultrasonic Sensor (US) to evaluate the water level in the model, an Acoustic Doppler Velocimeter (ADV) which allows to measure the three components of the flow velocity and finally an electronic stream gauge to complete my measurements of the water level when the free surface of the flow was really disturbed.

The first series of experiments with only one street provided information about the equivalent grain size roughness of *MURI* through the measurement of the water surface profiles of different gradually varied flow regimes. A test with a uniform regime underscored the presence of secondary currents : indeed, the transversal and the vertical velocities are non-zero values. The turbulence was also an interesting characteristic of the flow and I was able to compare my results with those of Nezu[1]. The crossroads was a really complex configuration. I decided to study a symmetrical case, with the intersection of two similar flows. I highlighted the symmetry in terms of flow rates and in terms of water level.

More tests should be conducted to complete and confirm my results : the model *MURI* allows to do a host of different experiments and to modelize extremes floods to improve our grasp about those processes.

Table des matières

1	Introduction	7
2	Irstea	8
2.1	L'institut	8
2.2	Le centre Irstea de Lyon-Villeurbanne	9
3	Dispositif expérimental	11
3.1	Maquette <i>MURI</i>	11
3.2	Techniques de mesure	12
3.2.1	Capteur à ultrasons	12
3.2.2	Limnimètre	13
3.2.3	Vélocimètre Acoustique Doppler	13
4	Théorie	15
4.1	Couche limite turbulente	15
4.1.1	Décomposition de Reynolds	15
4.1.2	Couche limite et courants secondaires	15
4.1.3	Définition de la rugosité	16
4.2	Régimes d'écoulement	17
4.2.1	Régime uniforme	18
4.2.2	Régime graduellement varié	19
4.3	Régimes fluvial et torrentiel	19
5	Caractérisation de la maquette	21
5.1	Topographie de la maquette	21
5.2	Conservation du débit	22
5.3	Similitudes géométriques et cinématiques	24
5.4	Configurations étudiées	26
6	Résultats	29
6.1	Configuration en rue simple	29
6.1.1	Détermination de la rugosité du fond en régime graduellement varié	29
6.1.2	Régime uniforme et développement de la couche limite	32
6.2	Configuration en carrefour	37
6.2.1	Croisement de deux régimes uniformes identiques	37
6.2.2	Croisement de deux régimes différents	41
7	Conclusions et perspectives	42
8	Annexes	43
	Bibliographie	50

Liste des abréviations, des sigles et des symboles

$\langle \rangle$	Notation désignant la double moyenne spatiale
$\langle \rangle_x$	Notation désignant la moyenne spatiale selon x
$\langle \rangle_y$	Notation désignant la moyenne spatiale selon y
$\langle \rangle_z$	Notation désignant la moyenne spatiale selon z
$-$	Notation désignant une moyenne temporelle
Δt	Pas de temps pour les mesures (s)
Δx	Pas d'espace dans la direction x pour les maillages (m)
Δy	Pas d'espace dans la direction y pour les maillages (m)
ϵ	Taille des rugosités d'un matériau (m)
ϵ_p	Taille des rugosités pour le PVC (m)
ν	Viscosité cinématique (m^2/s)
b	Largeur des rues de <i>MURI</i> (m)
b_p	Largeur standard moyenne d'une rue du prototype (m)
b_r	Échelle géométrique
E	Énergie ($m^2/s^2/Hz$)
f	Coefficient de perte de charge de Darcy, traduisant le frottement
Fr	Nombre de Froude
Fr_p	Nombre de Froude du prototype
g	Accélération gravitationnelle (m/s^2)
H	Hauteur des bâtiments bordant les rues de <i>MURI</i> (m)
h	Hauteur d'eau dans la maquette (m)
H_p	Hauteur des bâtiments dans le prototype
h_p	Hauteur moyenne de l'inondation dans le prototype (m)
k_s	Rugosité équivalente de sable (m)
k'_s	Grandeur adimensionnelle traduisant l'effet des rugosités
L	Longueur des rues longitudinales dans <i>MURI</i> (m)
L_p	Longueur des rues dans le prototype
Q	Débit (m^3/s)
Q_p	Débit dans le prototype (m^3/s)
Q_r	Échelle des débits

Q_{in}	Débit entrant (L/s)
Q_{out}	Débit sortant (L/s)
R_h	Rayon hydraulique (m)
Re	Nombre de Reynolds
S_f	Pente de friction (%)
S_o	Pente du fond dans la direction longitudinale (%)
u_*	Vitesse de frottement (m/s)
u_D	Vitesse débitante (m/s)
u_i	Vitesse instantanée selon la direction i (m/s)
u'_i	Fluctuations de la vitesse selon la direction i (m/s)
u_p	Vitesse de l'écoulement lors d'une inondation dans le prototype (m/s)
u_r	Échelle de vitesse
x	Direction longitudinale
y	Direction transverse
Z	Altitude de la sonde ADV (m)
z	Direction verticale
$z_b(x, y)$	Tirant d'air mesuré à vide, soit la côte du fond en un point (m)
z_r	Échelle géométrique selon z pour le modèle distordu

1 Introduction

Dans le cadre de ma première année en Master de Mécanique des Fluides (MF2A) à l'UPMC, j'ai été amenée à effectuer un stage de quatre mois dans le centre Irstea de Lyon-Villeurbanne. Le sujet sur lequel j'ai travaillé s'intitule "étude expérimentale d'écoulements dans un quartier de ville".

Après un stage sur les inondations urbaines à l'Institut Jean Le Rond D'Alembert (IJLRDA) qui m'avait grandement intéressée, j'ai décidé de poursuivre dans ce domaine. L'aspect expérimental et plus précisément la maquette *MURI* récemment acquise par l'Irstea, ont retenu mon attention lorsque je recherchais un stage.

Les inondations constituent l'un des principaux risques naturels en France et causent de nombreux dégâts. Les crues brutales (crues-éclair) peuvent endommager violemment les villes et les infrastructures, comme par exemple à Nîmes en 1988, et sont des épisodes difficiles à prévoir. Dans la littérature, on trouve beaucoup de recherches sur le cas d'une seule rue ou d'un croisement de rues, l'étude à l'échelle d'une ville entière étant très complexe.

La maquette *MURI* représente un quartier de ville et va permettre de mener des expériences nouvelles pour mieux appréhender les phénomènes de crues urbaines.

Les intérêts de la modélisation physique et de l'expérimentation en laboratoire sont grands. En effet, les seules données dont les chercheurs disposent sur le terrain après une crue sont les laisses, soient les marques laissées par le niveau d'eau sur les infrastructures. Or ces marques ne suffisent pas à analyser correctement les processus et présentent une grande incertitude puisqu'elles renseignent uniquement sur une hauteur d'eau ponctuelle et dépendent fortement du chargement de l'eau en sédiments et de la durée de la crue.

Pour combler le déficit de connaissance sur la compréhension fine de ces processus et l'évaluation de leur influence sur l'estimation du risque, l'Irstea commence, à travers mon stage, à récolter des données sur les inondations urbaines.

Mon stage avait pour but de tester la maquette en considérant uniquement les rues (soit sans les égouts) et d'explorer plusieurs configurations en terme d'entrées et de sorties d'eau. Il fallait pour cela déterminer le type de mesures envisageables avec les appareils disponibles et faire des compléments d'instrumentation. Pour chaque expérience, l'objectif était de comprendre le comportement des écoulements, en comparant avec la théorie de l'hydraulique à surface libre.

Avant de vous présenter mes résultats, je passerais par une brève présentation de l'institut où j'ai été accueillie et une description du dispositif expérimental avec lequel j'ai travaillé. Une partie théorique suivra : j'y ferais référence par la suite pour interpréter mes résultats. Ensuite, je présenterais la première étape de mon travail, la caractérisation de la maquette : ce sont des tests et des premières mesures qui m'ont permis de cibler les configurations à explorer durant mon stage. Ceci amènera à mes résultats : j'ai choisi de me focaliser sur ceux qui me semblaient les plus pertinents, mais l'ensemble de mon travail est disponible en Annexe.

2 Irstea

2.1 L'institut

L'Irstea (Institut national de recherche en sciences et technologies pour l'environnement et l'agriculture) est un organisme de recherche, labellisé «Institut Carnot» depuis 2006, qui travaille sur les enjeux majeurs d'une agriculture responsable et de l'aménagement durable des territoires, la gestion de l'eau et les risques associés (sécheresse, crues, inondations), l'étude des écosystèmes complexes et de la biodiversité dans leurs interrelations avec les activités humaines. L'Irstea est un Etablissement Public Scientifique et Technologique (EPST) au même titre, par exemple, que le CNRS, l'INRA ou l'IFSTTAR, qui est sous la double tutelle des Ministères de la recherche et de l'agriculture.



En 1955, le "Centre National d'Études et d'Expérimentations du Machinisme Agricole" (CNEEMA) est créé pour répondre aux problématiques sur l'équipement de l'agriculture française et la mécanisation agricole, en plein développement à cette époque.

Parallèlement, un autre centre, le "Centre National d'Études techniques et de Recherches technologiques pour l'Agriculture, les Forêts et l'Équipement Rural" (CERAFER) est créé pour étudier des domaines très variés comme l'agriculture en montagne, le suivi des innovations techniques ou les problèmes liés à l'utilisation et la maîtrise de l'eau. En 1973, ce centre devient le "Centre Technique du Génie Rural des Eaux et des Forêts" (CTGREF).

En 1981, le CTGREF et le CNEEMA fusionnent pour donner naissance au "centre national du machinisme agricole du génie rural, des eaux et des forêts" (Cemagref). Le Cemagref devient Irstea en novembre 2011, afin de faire coïncider son nom avec la réalité actuelle de ses recherches, qui ont évolué en 30 ans, des problèmes de mécanisation et d'aménagement rural vers des questions agro-environnementales.

L'Irstea compte 1550 collaborateurs statutaires et contractuels dont 1100 chercheurs, ingénieurs, doctorants et post-doctorants. Ces personnes sont réparties sur l'ensemble du territoire national (Figure 1) à travers 9 centres et une implantation hors centre (Strasbourg).

La recherche est répartie selon trois départements, qui se divisent ensuite dans chaque centre en Unités de Recherche (UR), elles-mêmes séparées en plusieurs équipes. Les trois départements sont les suivants :

- **Eaux** : disponibilité de la ressource en eau, pollutions, écosystèmes aquatiques, risques naturels, irrigation, pêche, aménagements.

- **Ecotechnologies** : les entreprises sont confrontées au défi de concilier productivité et respect de l'environnement. La mise au point d'écotechnologies privilégie une approche globale (de leur conception à leur fin de vie) et une approche multicritères (composantes environnementales, économiques et sociales). Les domaines d'applications des recherches concernent les secteurs agro-industriels : agriculture et agroalimentaire, gestion et stockage des déchets, épuration, nouvelles technologies.
- **Territoires** : à l'échelle des territoires ruraux et périurbains, le développement durable dépend fortement de la manière dont sont gérées les relations entre milieu naturel et activités humaines. Des approches pluridisciplinaires associant écologie, télédétection et sciences humaines sont particulièrement adaptées pour étudier ce processus de développement durable et aborder le territoire dans ses diverses dimensions.



FIGURE 1 – Répartition des centres à travers la France

2.2 Le centre Irstea de Lyon-Villeurbanne

Le centre de Lyon-Villeurbanne conduit des études expérimentales sur le terrain (bassins versants instrumentés de l'Yzeron, de la Morcille, de l'Arc) et dans deux laboratoires, l'un dédié à l'hydraulique, l'autre à l'épuration des eaux usées. Les équipes construisent des modèles, produisent des outils de diagnostic et développent des concepts et méthodes.

La densité des partenariats avec les universités et écoles, les organismes de recherche et leurs groupements régionaux, le nouvel Institut des Sciences Analytiques - ISA, les collectivités locales, les entreprises et plusieurs laboratoires étrangers, permet de construire des programmes de recherche très diversifiés.

Le site de Lyon-Villeurbanne comprend trois unités de recherche (UR), dont une délocalisée à Strasbourg (Figure 2).

Dans le cadre de mon stage, j'ai fait partie de l'UR Hydrologie-Hydraulique (HH) qui mène des recherches et des activités d'appui technique sur les bassins versants, afin de mieux gérer les ressources en eau et les risques liés aux inondations et aux sécheresses.

Cette unité se scinde en trois équipes scientifiques : Hydraulique des rivières, Hydrologie des bassins versants et Météorologie. Le sujet de mon stage s'inscrit dans les problématiques de l'équipe Hydraulique des rivières, comptant une vingtaine de personnes, mais j'ai également été amenée à travailler avec l'équipe Météorologie lors de mes expériences.

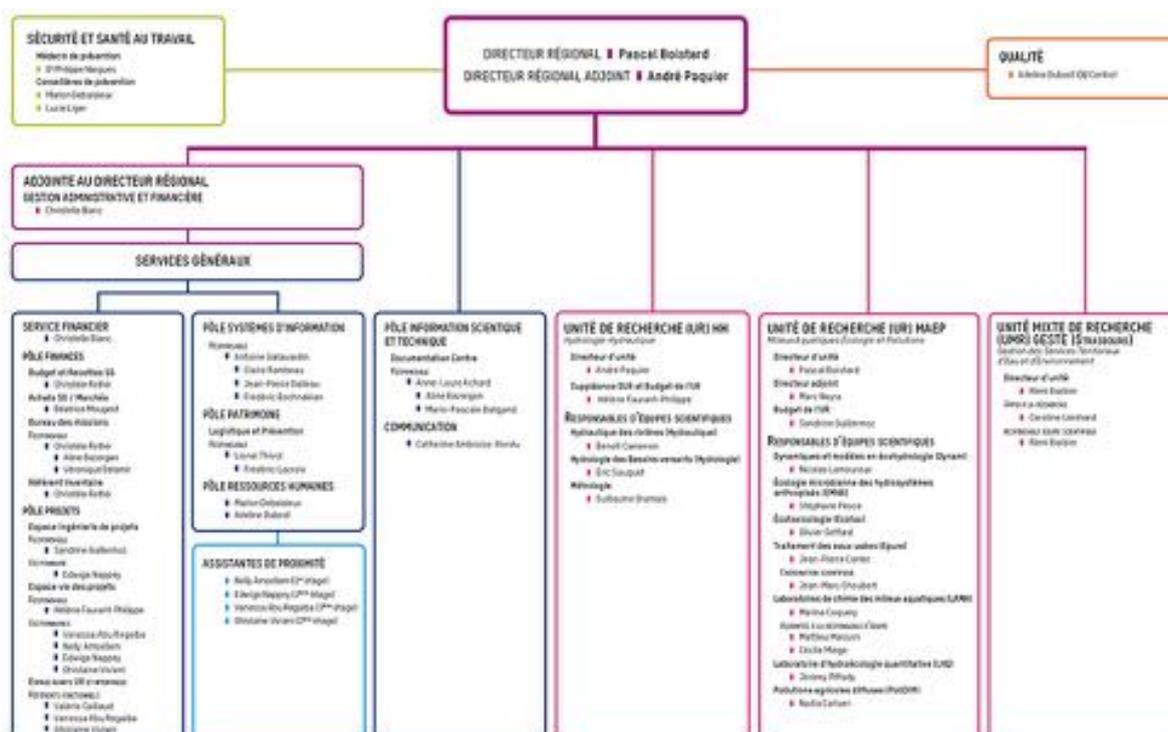


FIGURE 2 – Organigramme du centre Irstea de Lyon-Villeurbanne

Lors de mon stage, comprenant une partie expérimentale, j'ai beaucoup travaillé dans le laboratoire d'Hydraulique, d'hydromorphologie et d'étude des transferts (HHLab), où se trouvent trois maquettes :

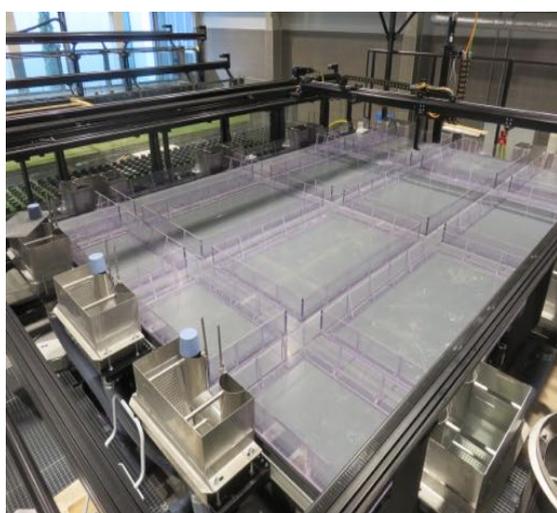
- Un canal inclinable, de 1 m de large, 18 m de long et 0.8 m de profondeur, avec une pente maximale de 5%, conçu pour l'étude du transport sédimentaire.
- Un canal, dit "canal large", de 3 m de large, 18 m de long et 0.8 m de profondeur, avec une pente fixe de 1/1000. Il permet, par exemple, d'étudier l'effet de différents types de rugosités en plaine d'inondation (prairie, arbre) sur un écoulement en lit composé ou l'étude d'écoulement autour d'obstacles (type maisons).
- Un modèle urbain, la maquette *MURI* sur laquelle j'ai travaillé, destiné à étudier les inondations urbaines.

3 Dispositif expérimental

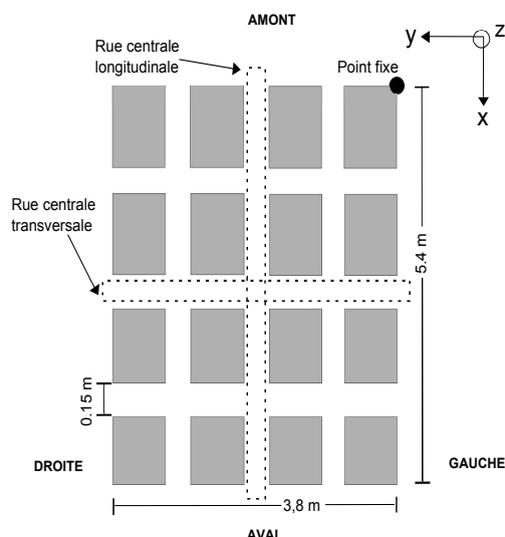
3.1 Maquette *MURI*

La maquette *MURI* (Maquette Urbaine pour étudier les Risques d’Inondation) représente un réseau de six rues (Figure 3) : trois rues suivant la direction longitudinale x (de l’amont vers l’aval) croisant trois autres rues orientées dans la direction transversale y (de la rive gauche vers la rive droite).

A chaque extrémité de rue, on trouve une cuve pouvant alimenter et/ou évacuer l’eau : à l’amont, se trouvent des cuves d’alimentation et à l’aval, des cuves d’évacuation. Sur les deux rives, les cuves sont mixtes (entrée ou sortie). Il faut cependant noter que sur une même rive, toutes les cuves doivent être configurées de la même façon, soit toutes en alimentation, soit toutes en réception d’eau. Chaque cuve possède un seuil réglable (Figure 34) pour jouer sur le niveau d’eau dans la rue et se placer en régime fluvial ou torrentiel. Du nid d’abeille (Figure 34) a été ajouté sur les cuves d’alimentation (Figure 33) pour diriger l’écoulement.



(a)



(b)

FIGURE 3 – Photo de *MURI* dans le HHLab (a) et vue schématique en plan du réseau de rues (b).

Pour contrôler les débits dans les cuves et vérifier la conservation du débit, des débitmètres électromagnétiques (DEM) et des vannes manuelles ou motorisées (Figure 33) sont installés et peuvent être pilotés depuis le poste informatique lié à *MURI*.

Le réseau de rues est appelé l’étage 2, l’étage 1 correspond au réseau d’égout (présentant 6 connexions avec l’étage 2, réparties dans les différentes rues : les connexions peuvent être bouchées et on peut en ajouter pour varier les configurations) et l’étage 0 désigne le sol du laboratoire. La plateforme de l’étage 2 fait 5.4 m de long et 3.8 m de large et chaque rue fait 0.15 m de large et 0.15 m de haut. Cette plateforme

est en PVC et les bâtiments sont en PETG.

MURI peut être inclinée dans les deux directions, longitudinale et transversale, de 5% maximum vers l'aval et de 5% maximum vers la droite.

La maquette est également équipée d'un simulateur de rivière (pour contrôler et maintenir le niveau d'eau constant dans l'étage 1), d'un simulateur de pluie et d'un portique de déplacement automatique (étage 3), sur lequel sont fixés les différents capteurs. Le portique (Figure 35) se déplace grâce à deux rails situés le long de *MURI*, parallèles entre eux et par rapport au plancher de l'étage 1.

3.2 Techniques de mesure

Toutes les coordonnées données dans la suite de ce rapport correspondent aux coordonnées renseignées pour le déplacement automatique et les maillages : ce ne sont donc pas les positions réelles des capteurs car ceux-ci sont déportés par rapport au point de référence du portique de mesure.

3.2.1 Capteur à ultrasons

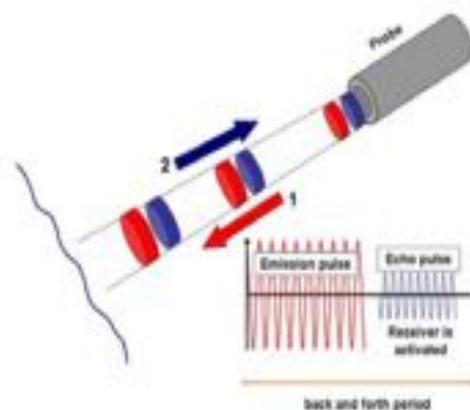
Pour mesurer les hauteurs d'eau dans la maquette, on utilise un capteur à ultrasons (US) (Figure 4). Le fournisseur indique une erreur standard inférieure ou égale à 0.3 mm. D'après les caractéristiques du capteur, la mesure se fait sur un disque d'environ 10 mm de diamètre autour du point souhaité : les points de mesure seront donc espacés de 20 mm pour éviter les recouvrements.

L'US est commandé par un programme LabVIEW depuis le poste informatique de *MURI*. Il mesure des tirants d'air (entre le capteur et la surface libre de l'eau) d'où la nécessité d'effectuer un relevé topographique de la maquette à vide pour le calcul des hauteurs d'eau (voir Section 5.1).

Le capteur est fixé sur le portique de mesure, à une altitude Z : on utilise donc les coordonnées x et y pour repérer sa position.



(a)



(b)

FIGURE 4 – Photo du capteur à ultrasons (a) et son schéma de fonctionnement[2] (b).

3.2.2 Limnimètre

Dès que la surface libre est perturbée, les mesures avec le capteur US sont faussées. En effet, l'US envoie un signal sur une portion de la surface de l'eau et récupère le signal réfléchi dans sa direction pour calculer une moyenne spatiale. Lorsque la surface n'est pas plane ou si elle n'est orientée vers l'US, une grande partie du signal renvoyé est perdue et le capteur ne peut pas calculer une valeur cohérente de tirant d'air.

Pour compléter les mesures, j'ai donc utilisé un limnimètre électronique (Figure 5).

Le principe du limnimètre est simple : en positionnant la pointe de la tige au fond de la rue, on marque le zéro puis il suffit de remonter la pointe jusqu'à ce qu'elle touche la surface de l'eau et de lire la valeur correspondant à la hauteur d'eau sur l'appareil. Les mesures avec cet appareil sont moins précises car elles sont manuelles : il y a donc de grandes incertitudes sur celles-ci, mais elles sont suffisantes pour caractériser, dans un premier temps, un écoulement en terme de hauteur d'eau.

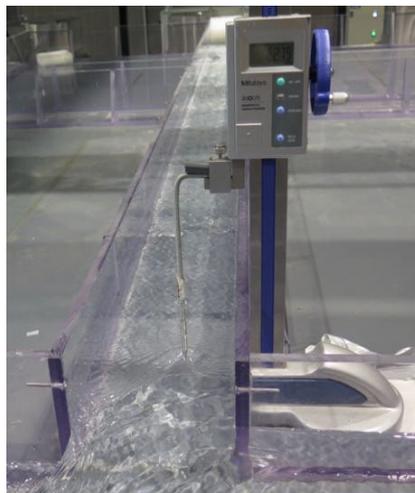
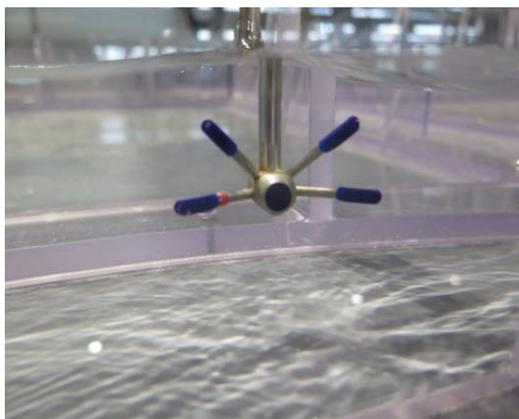


FIGURE 5 – Limnimètre électronique.

3.2.3 Vélocimètre Acoustique Doppler

Un Vélocimètre Acoustique Doppler (ADV) a également été installé sur le portique : dans notre cas, on utilise une sonde ADV "side-looking"¹ (Figure 6).



(a)



(b)

FIGURE 6 – Photo de la sonde ADV "side-looking" (a) et montage des capteurs sur le portique de mesure (b).

1. Cela évite que les mesures de vitesse soient perturbées par le sillage de l'appareil.

Ce capteur utilise l'effet Doppler pour mesurer la vitesse de l'écoulement, qu'on considère égale à celle des particules contenues dans l'eau. Il mesure la vitesse dans un volume de diamètre 6.6 mm et de longueur réglable de 3 à 15 mm, déporté de 55 mm sur le côté par rapport à l'émetteur.

Pour obtenir des données fiables, soit un rapport signal/bruit supérieur ou égal à 20, il est nécessaire d'ensemencer l'écoulement avec des particules², à l'aide d'un système de pompe péristaltique et d'agitateur (Figure 35). Lors des essais, il faut aussi vérifier que la corrélation du signal de mesure soit supérieure à 70%.

J'ai utilisé le logiciel Vectrino+ pour observer les évolutions des composantes de la vitesse et enregistrer des fichiers de données, puis le logiciel WinADV pour les analyser avant de tracer des graphiques sur Matlab.

On repère la position du capteur grâce aux trois coordonnées x, y, z : l'ADV doit être aligné avec la maquette pour que les valeurs des trois composantes de vitesse soient correctes. Pour m'assurer du bon positionnement de mon capteur, j'ai mesuré la vitesse selon y sur une paroi d'une rue : par la condition d'imperméabilité, elle doit être nulle. J'ai obtenu des valeurs très faibles mais non nulles, significatives d'un biais. J'ai donc appliqué une matrice de rotation à mes mesures. Cette correction n'a aucun effet sur les valeurs selon x et z, mais est indispensable pour avoir des résultats physiques selon y.

2. Particules creuses sphériques de verre de diamètre 10 μm utilisées pour une autre expérience menée dans le HHLab.

4 Théorie

4.1 Couche limite turbulente

4.1.1 Décomposition de Reynolds

La turbulence[3] est définie comme des fluctuations aléatoires de la vitesse et doit donc être traitée avec une approche statistique. La décomposition de Reynolds des quantités instantanées (Équation 1) est une méthode qui consiste à séparer ces quantités en une valeur moyennée temporellement et une valeur fluctuante autour de cette moyenne. Par exemple, la vitesse u_i se décompose en \bar{u}_i , la vitesse moyenne temporelle et u'_i , les fluctuations temporelles.

$$u_i = \bar{u}_i + u'_i \quad (1)$$

Dans les études qui suivront, je me baserai sur cette approche et j'analyserai séparément les vitesses moyennes et les fluctuations.

4.1.2 Couche limite et courants secondaires

Les observations de Tennekes et Lumley[3] concernant les couches limites turbulentes sur paroi permettent de distinguer trois régions (Figure 7) :

- La sous couche visqueuse : dans cette zone très mince et très proche de la paroi, les effets de la viscosité moléculaire sont prépondérants devant les effets des forces d'inertie.
- La sous couche inertielle : c'est une couche intermédiaire où se mélangent la sous couche visqueuse et le reste de la zone interne. Dans cette région, les effets visqueux et turbulents coexistent. On retiendra surtout qu'il s'agit de la zone où le profil vertical de vitesse longitudinale moyenne est logarithmique.
- La couche externe : dans cette zone, les effets turbulents sont prépondérants par rapport aux effets moléculaires.

Les différentes caractéristiques des couches limites turbulentes que j'ai évoquées ici découlent toutes d'une hypothèse faite sur l'invariance selon y de l'écoulement moyen. Or, généralement, dans les canaux rectilignes, l'écoulement n'est pas parallèle en moyenne. La présence de parois latérales implique nécessairement une anisotropie non uniforme de la turbulence, et génère, d'après des observations de Nezu[1], des courants secondaires.

Selon Hinze[4], ces derniers se forment lorsque la condition de paroi le long de la section transverse d'une conduite, circulaire ou rectangulaire, n'est pas uniforme, soit en raison de sa géométrie, soit en raison de la non-uniformité de la rugosité à la paroi. Il existe deux types de courants secondaires : je m'intéresserai uniquement aux courants secondaires du second type qui se produisent dans les canaux rectilignes non circulaires.

Lorsque l'écoulement moyen développe des courants secondaires, la couche limite devient tridimensionnelle. En particulier, la loi logarithmique du profil de vitesse

longitudinale va changer et l'allure du profil va être modifiée (Figure 7). On observe un décalage sous la surface libre du maximum de vitesse longitudinale : c'est un phénomène spécifique aux canaux étroits. Les rues de *MURI* se comportent comme des canaux étroits car le rapport d'aspect, défini par b/h , est inférieur à 5. D'après Nezu et Rodi[5], dans ce cas, les courants secondaires de coin sont générés et s'étendent sur la totalité de la demi-largeur du canal. Je m'intéresserai à ces phénomènes lors de mes expériences.

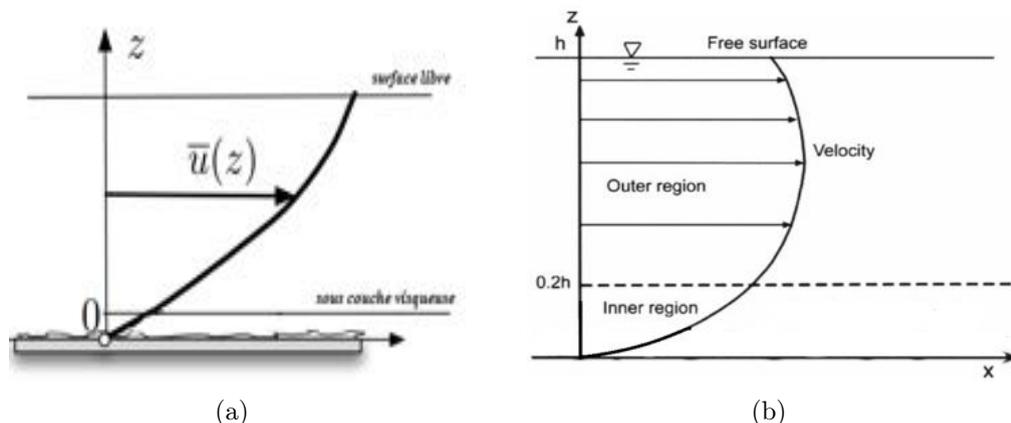


FIGURE 7 – Profils de vitesse dans le cas d'une couche limite 2D[6] (a) et dans le cas d'une couche limite 3D avec des courants secondaires[7] (b)

4.1.3 Définition de la rugosité

Dans la réalité comme en laboratoire, les écoulements ne se font jamais sur une paroi parfaitement lisse. Le fond d'une rivière est souvent composé de sables et roches de toutes tailles, et lors d'une inondation en zone urbaine, la lame d'eau va rencontrer des maisons, des immeubles ou autres infrastructures. Même dans une conduite ou dans la maquette expérimentale *MURI*, les parois comportent toujours des rugosités plus ou moins visibles à l'oeil nu. Lors de l'achat d'un matériau, le constructeur spécifie la taille des rugosités ϵ : c'est une donnée physique qui caractérise le matériau. Par exemple, pour du PVC, ϵ_p est d'environ $1.1 \cdot 10^{-5}$ m. Cette valeur varie avec l'état du matériau, ce qui explique qu'il est compliqué de trouver une valeur unique.

Cependant, dans mon cas, la rugosité n'est pas une question d'aspect de surface, mais une propriété liée à la dynamique de l'écoulement : elle traduit l'intensité du frottement généré à la paroi.

Les rugosités, ou aspérités, du fond vont être des obstacles à l'écoulement proche paroi. La présence de ces aspérités va donc entraîner l'apparition d'une nouvelle échelle de longueur que Nikuradse définit comme une "rugosité équivalente de sable" (equivalent sand grain size), notée k_s . Ce n'est donc pas une hauteur physique des aspérités mais une grandeur qui dépend des paramètres de l'écoulement. Dans la suite, je considérerai cette variable pour caractériser la rugosité.

Dans le cadre de l'étude d'un écoulement turbulent uniforme d'une rivière, on utilise la définition suivante³ pour la vitesse de frottement u^* :

$$u^* = \sqrt{g \cdot R_h \cdot S_o} \quad (2)$$

Avec u^* , on peut construire la valeur adimensionnelle k'_s qui traduit l'effet des rugosités sur l'écoulement[8] :

$$k'_s = \frac{k_s \cdot u^*}{\nu} \quad (3)$$

k'_s permet de définir plusieurs types de fond :

- Lisse, soit $k'_s < 5$: la taille des aspérités est inférieure à l'épaisseur de la sous-couche visqueuse.
- Transition lisse/rugueux, soit $5 < k'_s < 70$: les rugosités peuvent sortir de la sous-couche visqueuse et faire intervenir de nouveaux effets, sans pour autant prendre le dessus sur les effets visqueux.
- Rugueux, soit $k'_s > 70$: les effets visqueux deviennent négligeables devant les effets liés aux aspérités, qui dépassent largement la sous-couche visqueuse.

Si on fait les calculs avec la taille de rugosité, soit ϵ_p et les valeurs théoriques d'un des régimes étudiés par la suite (Tableau 2), on trouve $k'_s < 5$. La maquette *MURI* présente donc un fond lisse.

4.2 Régimes d'écoulement

Les écoulements dans les canaux naturels (rivière) et artificiels (irrigation, assainissement) sont, dans la plupart des cas, des écoulements à surface libre : la surface libre est l'interface entre l'air et l'eau.

On peut définir les écoulements suivant la variabilité des caractéristiques hydrauliques tels que le tirant d'eau et la vitesse, en fonction du temps et de l'espace.

Le mouvement est dit stationnaire (ou permanent) si les vitesses et la profondeur ne varient pas dans le temps en intensité et en direction. Dans la réalité, les écoulements dans les canaux sont rarement permanents. Néanmoins les variations temporelles sont, dans certains cas, suffisamment lentes pour que l'écoulement puisse être considéré comme une succession de régime permanent. On peut alors définir ainsi le régime quasi-permanent. Pour mes expériences, qui se déroulent en laboratoire et dont je contrôle les paramètres, je considère un régime permanent même s'il y a de petites fluctuations temporelles (voir Section 5.2).

La variabilité ou non dans l'espace d'un écoulement donne lieu à deux types d'écoulements, les écoulements uniformes et les écoulements variés, que je vais maintenant détailler.

3. Les grandeurs utilisées sont définies plus loin dans le rapport.

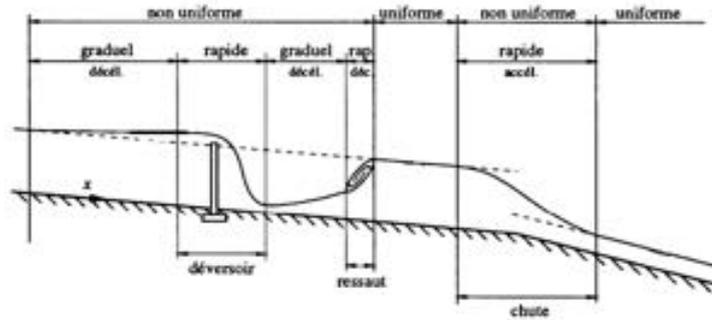


FIGURE 8 – Régimes d'écoulement[9]

4.2.1 Régime uniforme

Le mouvement est uniforme si les paramètres caractérisant l'écoulement restent invariables dans les diverses sections du canal (Figure 8) : on aura donc une hauteur d'eau et une vitesse constantes. La pente du fond, S_o , la pente de friction, S_f , et la ligne de la surface libre sont parallèles. C'est un régime intéressant pour étudier le développement de la couche limite et les courants secondaires, mais il est compliqué à mettre en place expérimentalement : pour y arriver, il est nécessaire de faire quelques calculs théoriques, d'après French[10], afin de trouver les bons paramètres.

On choisit comme données de départ le débit de la cuve amont, Q , la largeur de la rue centrale de *MURI*, b , et la hauteur d'eau voulue pour l'écoulement uniforme, h . Pour chaque valeur de débit, on déduit la vitesse :

$$u = \frac{Q}{b \cdot h} \quad (4)$$

On calcule le rayon hydraulique qui permet de faire des calculs similaires à ceux d'un tube circulaire :

$$R_h = \frac{b \cdot h}{b + 2h} \quad (5)$$

On en déduit le nombre de Reynolds, Re et le nombre de Froude, Fr :

$$Re = \frac{u \cdot 4R_h}{\nu} \quad \text{et} \quad Fr = \frac{u}{\sqrt{g \cdot h}} \quad (6)$$

À ce stade, le coefficient de perte de charge de la maquette f est inconnu. On utilise donc la formule de Colebrook pour trouver f :

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \log \left(\frac{k_s}{12R_h} + \frac{2.5}{Re\sqrt{f}} \right) \quad (7)$$

Dans un tableur, on crée une fonction $F(f)=0$ à résoudre pour trouver f .

Cette formulation est très souvent employée à l'aide du diagramme de Moody (Figure 41), présenté sous la forme d'une abaque qui prend en entrée la rugosité et le nombre

de Reynolds afin d'obtenir le coefficient de frottement correspondant. D'après mes paramètres, j'en déduis que les écoulements que j'étudie appartiennent à la zone de transition entre le laminaire et le turbulent.

Après cela, on peut calculer la pente longitudinale à appliquer à notre maquette (égale à la pente de friction puisque le régime est uniforme) :

$$S_f = S_o = \frac{f}{4R_h} \cdot \frac{u^2}{2g} \quad (8)$$

En connaissant les gammes de vitesse et de débit à tester dans *MURI* pour effectuer une modélisation la plus réaliste possible (voir Section 5.3), je pourrai me servir des formules énoncées ci-dessus pour caractériser les régimes uniformes potentiels. Je présenterai donc un peu plus tard l'application des calculs et le régime uniforme choisi finalement pour les expériences.

4.2.2 Régime graduellement varié

Un écoulement non-uniforme peut être accéléré ou décéléré suivant que la vitesse croît ou décroît dans le sens du mouvement. Il existe plusieurs types d'écoulement non-uniforme :

- Lorsque le mouvement est dit graduellement varié, la profondeur ainsi que les autres paramètres varient lentement d'une section à l'autre.
- Lorsque le mouvement est dit rapidement varié, les paramètres caractérisant l'écoulement changent brusquement, parfois avec des discontinuités. Cela se manifeste en général au voisinage d'une singularité, telle qu'un seuil, un rétrécissement, un ressaut hydraulique ou une chute brusque.

L'avantage de ce type de régime est la facilité de mise en place : en effet, il suffit d'alimenter en amont la maquette et de laisser l'écoulement s'établir pour obtenir des régimes variés dans les rues longitudinales. Je peux rapidement instaurer un régime graduellement varié : il suffit d'avoir une pente nulle et de garder les seuils avals baissés. Il n'y a alors pas de changement brusque dans l'écoulement tout au long de la rue et la hauteur d'eau varie lentement.

J'ai choisi d'étudier pour mes prochaines expériences deux régimes graduellement variés (notés Tests **1** et **2** par la suite), avec des débits différents, $3L/s$ et $6L/s$, pour parcourir la gamme de débits de *MURI*.

Le test avec un régime varié va permettre dans un premier temps de déterminer la valeur exacte de la rugosité équivalente de sable k_s pour la maquette : le protocole sera détaillé dans la partie dédiée.

4.3 Régimes fluvial et torrentiel

Pour caractériser un écoulement, on utilise le nombre de Froude (Équation 6). C'est un nombre sans dimension qui caractérise dans un fluide l'importance relative

de l'énergie cinétique de ses particules par rapport à son énergie potentielle gravitationnelle. Il me permettra de caractériser mes régimes dans la suite.

On distingue ainsi trois cas :

- Le régime fluvial ou régime subcritique quand $Fr < 1$: cela correspond à de faibles vitesses et une perturbation locale à l'aval de l'écoulement peut influencer l'amont.
- Le régime critique quand $Fr = 1$: cela correspond au minimum de charge spécifique dans une section donnée, auquel est associée une hauteur d'eau unique appelée hauteur critique.
- Le régime torrentiel ou régime supercritique quand $Fr > 1$: cela correspond à de fortes vitesses et une perturbation locale à l'aval de l'écoulement ne va pas influencer l'amont.

Cette partie théorique permet de bien définir le cadre de mes expériences et de cerner les types d'écoulements que je vais observer. Dans la suite, je pourrais confronter mes résultats à la théorie afin d'analyser les phénomènes présents dans la maquette *MURI* et ainsi comprendre comment elle se comporte.

5 Caractérisation de la maquette

5.1 Topographie de la maquette

Une première étape dans la caractérisation de la maquette concerne la topographie. J'ai effectué dans les deux rues où j'ai été amenée à travailler des relevés topographiques à vide et sur un plan d'eau. Je présente ici le protocole appliqué à la rue centrale longitudinale : il sera répété pour les autres rues.

La topographie de la rue centrale a été réalisée, avec un maillage assez fin ($\Delta x=100$ mm et $\Delta y=20$ mm) et avec un temps de mesure de $\Delta t=10$ s. Je ne peux pas m'approcher trop près des seuils pour les mesures en raison de l'installation des capteurs sur le portique (Figure 9).

En chaque point du maillage, je mesure un tirant d'air : cela correspond à la côte du fond de la maquette, $z_b(x, y)$, pour le cas à vide ou au niveau d'eau pour le cas du plan d'eau (il faudra retrancher $z_b(x, y)$ à ce niveau pour obtenir la hauteur d'eau). Je moyenne ensuite mes résultats sur mon temps de mesure pour obtenir des valeurs plus fiables.

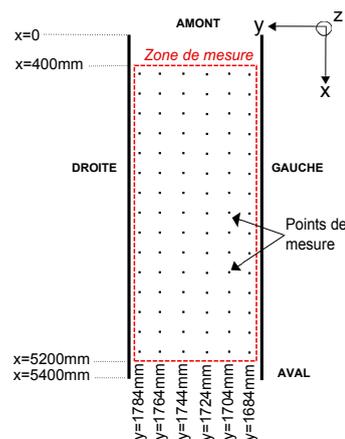


FIGURE 9 – Zone de mesure.

La mesure du tirant d'air avec le capteur US au dessus d'un plan d'eau permet de rendre compte des oscillations liées aux rails du portique de mesure (Figure 10). On s'attendait ici à des profils constants : les rails ne sont donc pas parfaitement parallèles au fond de *MURI*. J'ai ainsi calculé les corrections (écart entre la hauteur d'eau moyenne dans la rue et la hauteur d'eau locale) à appliquer lors du post-traitement de mes futures mesures pour annuler ces erreurs liées au positionnement des rails.

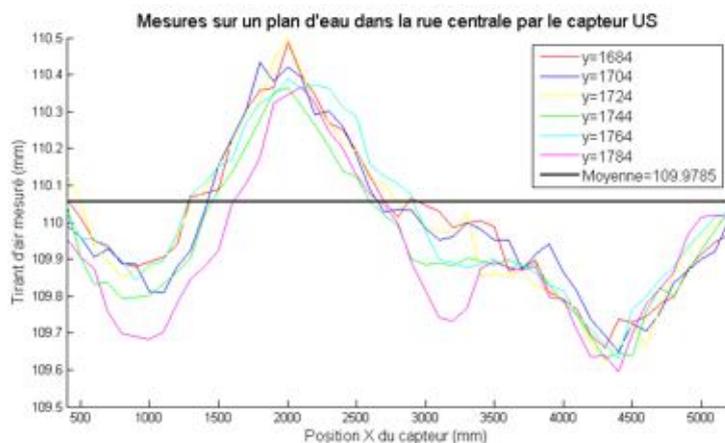


FIGURE 10 – Mesure de niveau d'un plan d'eau : oscillations des rails.

La relevé topographique fait à vide, en prenant les corrections trouvées précédemment, met en évidence les irrégularités du fond de la maquette. Comme pour les rails, j'ai calculé les corrections (écarts entre la côte moyenne $\langle z_b \rangle$ et la côte locale $\bar{z}_b(x, y)$) à prendre en compte pour se ramener à un fond plat.

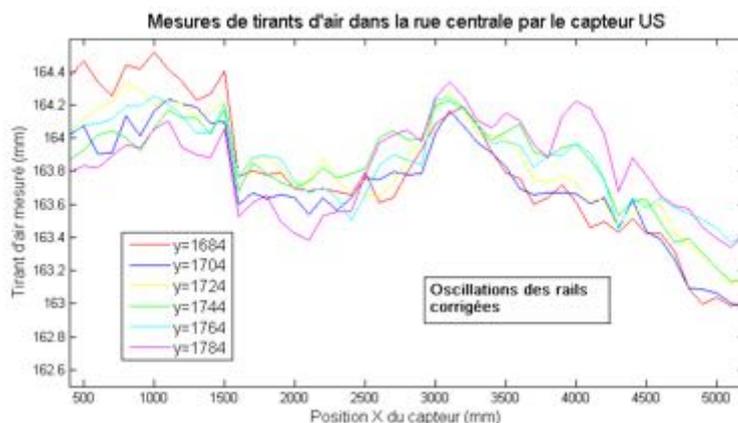


FIGURE 11 – Mesures à vide : variations de la côte du fond.

En appliquant les deux séries de corrections à mes mesures, je retrouve bien des profils constants pour le cas du plan d'eau et celui à vide. Ainsi, pour les prochaines expériences, les résultats présentés auront été corrigés pour enlever les erreurs liées au fond et aux rails.

5.2 Conservation du débit

Une étape importante avant de passer aux expériences est de vérifier la conservation du débit dans la maquette : j'ai testé deux à deux chaque cuve. Pour régler les débits dans la maquette depuis le poste informatique, il y a deux possibilités :

- le mode automatique : on renseigne directement la valeur de débit souhaité dans chacune des cuves.
- le mode manuel : on renseigne le pourcentage d'ouverture de chaque vanne correspondant à chaque cuve. Une fois que l'on a déterminé (après quelques essais) la valeur d'ouverture donnant le débit voulu, la vanne est fixée pour toute la durée de l'expérience.

Les débitmètres à l'amont et à l'aval de chaque rue permettent de connaître les débits entrant et sortant et leurs évolutions.

La Figure 12 montre que les débits ne sont pas constants au cours du temps. C'est un problème qui peut être facilement corrigé : en effet, ces tests ont été effectués en commandant les débits en mode automatique. Ce mode simple d'utilisation n'est finalement pas très précis car pour satisfaire la valeur exacte de consigne la vanne va s'ajuster en permanence et donc le débit va fluctuer. L'autre mode, dit manuel, permet de réduire les fluctuations et d'avoir un débit d'entrée assez stable durant

plusieurs heures de manipulation car une fois la consigne atteinte, le système ne va plus bouger.

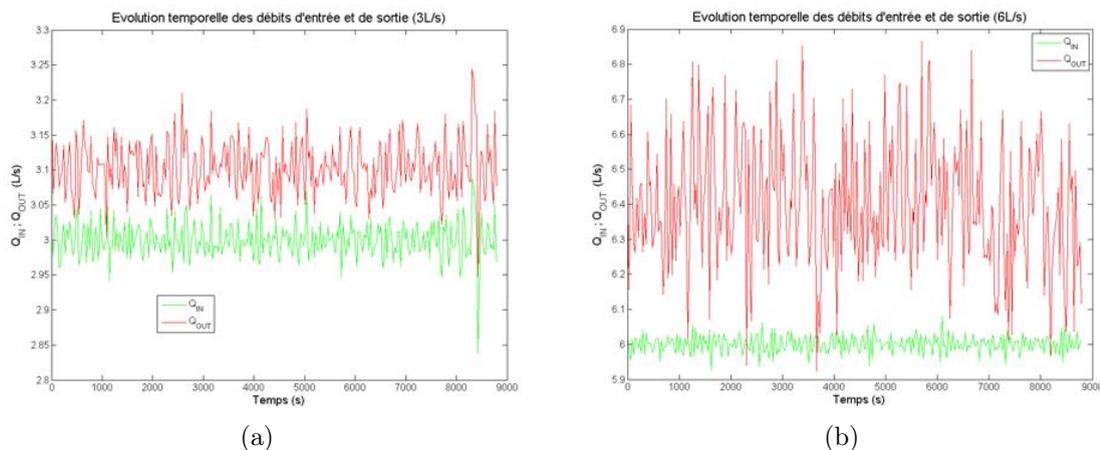


FIGURE 12 – Débits d'entrée et de sortie pour les deux régimes graduellement variés dans la rue centrale : (a) régime 3L/s et (b) régime 6L/s.

De plus, on remarque que le débit sortant est plus important que le débit entrant. L'écart est assez important et pratiquement constant sur toute l'expérience : ceci est confirmé quelque soit la gamme choisie. La piste privilégiée pour expliquer cet écart suppose que des bulles d'air sont entraînées à la sortie dans le tuyau d'évacuation. Le débitmètre mesure alors un débit plus grand en comptabilisant l'air qui passe en plus de l'eau.

C'est une théorie plausible car en réalisant à nouveau les tests avec les cuves latérales ouvertes à seulement 40% en configuration de sortie, la conservation des débits est vérifiée (Figure 13). Ceci permet d'augmenter la charge dans le tuyau d'évacuation et donc de chasser l'air qui aurait pu s'infiltrer par la cuve de sortie.

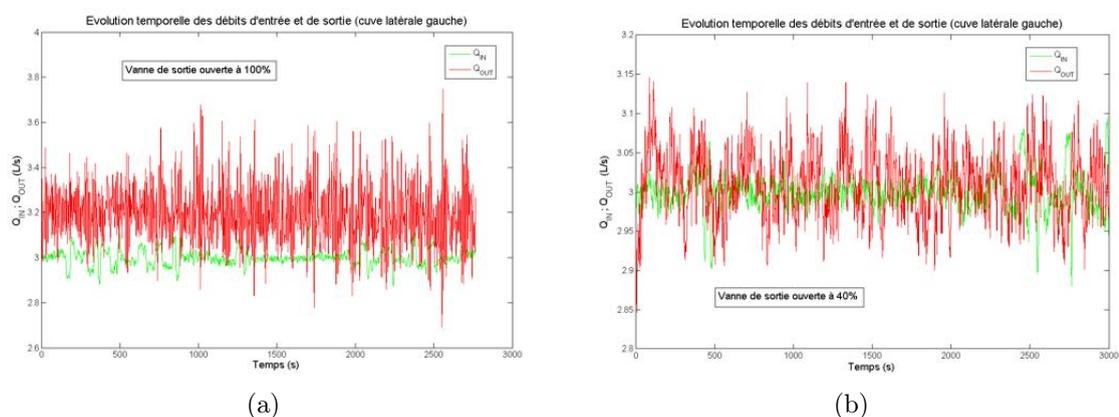


FIGURE 13 – Débits d'entrée et de sortie pour $Q_1 = 3L/s$: vanne latérale de sortie ouverte à 100% (a) et vanne latérale de sortie ouverte à 40% (b)

5.3 Similitudes géométriques et cinématiques

Cette partie va me permettre de déterminer les gammes de paramètres à utiliser pour modéliser fidèlement une inondation dans un quartier de ville avec *MURI*. Je dispose des données ci-dessous pour le modèle *MURI* :

- Largeur des rues : $b=0.15\text{m}$.
- Longueur de rues : $L=5.4\text{m}$.
- Hauteur des bâtiments bordant les rues : $H=0.15\text{m}$.

Je considère les données suivantes moyennes⁴ pour le prototype représentatif d'un quartier urbain où se produirait une inondation :

- Largeur des rues du prototype : $b_p=5\text{m}$.
- Vitesse d'écoulement dans le prototype : u_p entre 1 et 5m/s.
- Hauteur de l'inondation dans les rues du prototype : $h_p=1\text{m}$.

L'échelle de largeur qui garantie une similarité géométrique entre mon modèle urbain, *MURI*, et la réalité, soit le prototype, est :

$$b_r = \frac{b_p}{b} = 33.3 \quad (9)$$

Par simplicité, je considère un modèle non distordu, possédant la même échelle géométrique dans les trois directions de l'espace. J'en déduis donc :

$$L_p = 180\text{m} \quad H_p = 5\text{m} \quad h = 0.03\text{m} \quad (10)$$

Ces valeurs paraissent réalistes pour un quartier urbain. Il faudra rester vigilant sur la hauteur de l'inondation dans la maquette : elle est assez faible et cela pourrait entraîner des difficultés pour les mesures.

Pour modéliser les écoulements à surface libre, d'après Chanson[11], on utilise la similitude de Froude (Équation 11), à condition qu'il y ait peu de frottement, et qu'on ait des cas très turbulents ($Re > 5000$).

$$Fr_p = Fr \quad (11)$$

Ici, la gravité est la même dans le cas réel et dans la maquette donc la relation suivante donne l'échelle de vitesse, u_r , et assure la similarité cinématique :

$$u_r = \frac{u_p}{u} = \sqrt{b_r} = 5.77 \quad (12)$$

En multipliant u_p par u_r , je déduis donc la gamme de vitesse d'écoulement à tester dans *MURI* pour représenter un cas de terrain type, soit u entre 0.17 et 0.87 m/s.

En ce qui concerne les débits, la relation $Q_r = b_r^{5/2}$ donne la gamme à tester :

- Q entre 0.78 et 3.9 L/s.
- Q_p entre 5000 et 25000 L/s.

4. D'après des études suite à l'inondation de Cannes (France) en octobre 2015.

Pour tester dans *MURI* des hauteurs d'eau plus importantes, de l'ordre de 0.07 m (soit la rue inondée à mi-hauteur), je considère maintenant un modèle distordu dans les directions x et z

Par analogie avec le cas du modèle non-distordu, je reprend la même échelle de longueur, b_r , dans les directions x et y . Dans la direction z , j'introduis une autre échelle : $z_r=14.29$. La similitude de Froude donne les relations suivantes :

$$u_r = \sqrt{z_r} = 3.78 \quad (13)$$

$$Q_r = z_r^{3/2} \cdot b_r = 1798 \quad (14)$$

Après calculs, je trouve pour la maquette :

- u allant de 0.26 à 1.32 m/s.
- Q allant de 2.8 à 14 L/s.

Cette caractérisation théorique permet d'avoir des indications sur les gammes des paramètres expérimentaux de débit et hauteur d'eau à choisir pour représenter le plus fidèlement une inondation en zone urbaine type.

Dans un tableur, j'ai donc fixé mes paramètres d'entrée : le débit, la viscosité, l'accélération gravitationnelle, la valeur physique de rugosité du PVC ϵ , la largeur de la rue et la hauteur d'eau souhaitée. Avec les relations de la partie théorique (Section 4.2.1), j'ai pu établir une liste des régimes d'écoulement uniformes pouvant être testés (Tableaux 1 et 2), parmi lesquels je choisirais mes cas d'étude.

Régimes	Q ($L.s^{-1}$)	S_o %	u ($m.s^{-1}$)	h (mm)	Fr	Re
Régime 1	0.78	0.29	0.173	30	0.32	14754
Régime 2	1.30	0.42	0.289	30	0.53	24590
Régime 3	1.82	0.55	0.404	30	0.75	34426
Régime 4	2.34	0.66	0.502	30	0.96	44262
Régime 5	2.86	0.78	0.636	30	1.17	54098
Régime 6	3.39	0.89	0.753	30	1.39	64123

Tableau 1 – Paramètres hydrauliques des régimes uniformes pour le modèle non-distordu

Parmi tous ces régimes, j'ai choisi de n'étudier qu'un seul régime uniforme (surligné dans le Tableau 2) : en effet, cela me permettra d'avoir suffisamment d'informations sur la vitesse et la turbulence dans la maquette.

La mise en place expérimentale d'un régime uniforme est une opération délicate et longue. Il faut régler correctement le seuil aval et mesurer la ligne d'eau avec le capteur US pour voir si la ligne d'eau est constante dans la rue. Il faut faire plusieurs essais avant de trouver la bonne hauteur de seuil.

Ce choix de régime uniforme (noté Test 4 par la suite) se justifie aussi car la hauteur d'eau sera assez importante et permettra d'avoir plus de points de mesure avec l'ADV pour réaliser des profils de vitesse verticaux.

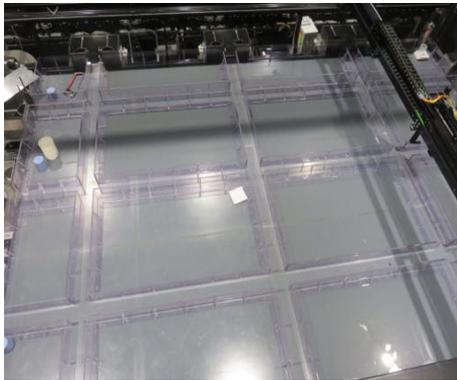
Régimes	Q ($L.s^{-1}$)	S_o %	u ($m.s^{-1}$)	h (mm)	Fr	Re
Régime 1	2.48	0.06	0.267	70	0.32	38352.22
Régime 2	3.48	0.10	0.362	70	0.44	52049.45
Régime 3	4.48	0.14	0.457	70	0.55	65746.67
Régime 4	5.48	0.20	0.552	70	0.67	79443.89
Régime 5	6.48	0.27	0.648	70	0.78	93141.12

Tableau 2 – Paramètres hydrauliques des régimes uniformes pour le modèle distordu

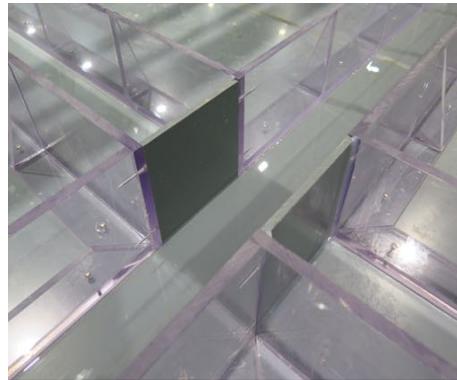
5.4 Configurations étudiées

Le but de mon stage est de caractériser la maquette *MURI* et de tester plusieurs configurations (Tableau 3) afin d’avoir des données expérimentales sur les inondations urbaines. Le choix des configurations s’est fait en concertation avec mes maîtres de stage, en fonction de leurs attentes vis-à-vis de *MURI* ou d’expériences déjà menées sur d’autres bancs d’essai. Pour les tests (Tableau 3) concernant chaque configuration, j’ai proposé des jeux de paramètres, compris dans les gammes déterminées juste avant, validés ensuite par mes encadrants.

La maquette ayant été reçue seulement un mois avant le début de mon stage, j’ai commencé par la configuration la plus simple possible, soit une seule rue, la rue centrale dans le sens longitudinal (Figure 3). Pour cela, il a fallu boucher les communications avec les autres rues : pour ne pas modifier les paramètres physiques de la maquette, on a choisit de poser des plaques de PVC (Figure 15). Du silicone a été ajouté pour fixer les plaques et pour limiter les fuites. Cette technique sera appliquée à chaque changement de configuration : cela permet de créer de nombreux cas d’étude différents sans apporter de modification permanente à la maquette d’origine.



(a)



(b)

FIGURE 14 – Photos de la maquette *MURI* dans sa configuration d’origine (a) et des plaques de PVC ajoutées pour isoler certaines rues (b).

Dans cette configuration de rue unique, j'ai étudié les deux régimes graduellement variés cités plus haut (Tests **1** et **2**). J'ai fait des expériences à pente nulle pour ces deux premiers tests : ils m'ont principalement servi à prendre en main les capteurs, les logiciels et la maquette, à élaborer mes protocoles expérimentaux et à déterminer la rugosité.

Ensuite, j'ai testé à nouveau le régime du Test **2** mais en ajoutant une pente transversale afin d'étudier l'effet de cette pente sur le régime : j'ai montré qu'avec une pente transversale de 0.14%, les hauteurs d'eau dans la rue n'étaient pas affectées (Figure 36). Ceci permettra de négliger la pente transversale dans la seconde configuration.

Puis, j'ai mis en place le régime uniforme déterminé plus haut (Test **4**), avec une pente longitudinale, pour étudier le développement de la couche limite turbulente.

Les pentes que j'ai utilisées lors de mes expériences restent relativement faibles par rapport aux possibilités de la maquette. De plus, je n'ai pas eu l'occasion de cumuler les pentes longitudinale et transversale mais ce sont des cas d'étude à considérer pour de futures manipulations.

Ces quatre régimes seront réutilisés dans la seconde configuration plus complexe : en effet, les tests en configuration d'une seule rue serviront de références pour les expériences à venir.

Configuration	Test	Régime	$Q(L/s)$	S_o selon x	S_o selon y
Rue unique	1	G. varié	3	0%	0%
Rue unique	2	G. varié	6	0%	0%
Rue unique	3	G. varié	6	0%	0.14%
Rue unique	4	Uniforme	4.48	0.14%	0%
Carrefour	5	Uniforme selon x	4.48	0.14%	0.14%
		Uniforme selon y	4.48	0.14%	0.14%
Carrefour	6	Uniforme selon x	4.48	0.14%	0%
		G. varié selon y	6	0.14%	0%

Tableau 3 – Configurations et tests effectués avec la maquette *MURI*.

La seconde configuration choisie est un carrefour, soit le croisement de deux rues perpendiculaires, la rue centrale dans le sens longitudinal étudiée en tant que rue simple et la rue centrale dans le sens transversal (Figure 3).

Tout d'abord, j'ai testé le croisement de deux mêmes régimes (Test **5**), et j'ai pour cela repris le régime uniforme (Test **4**) étudié en rue simple. Ceci permet d'évaluer la répartition des débits et de vérifier une certaine similitude entre les différentes rues de *MURI*.

Enfin pour mon dernier test, j'ai utilisé un régime uniforme et un régime graduellement varié, pour voir les perturbations engendrées par leur rencontre (Test **6**), par rapport aux données de référence collectées en rue simple. J'ai été limitée ici par mes capteurs : ceci sera détaillé dans la partie consacrée à mes résultats.

Cette partie de caractérisation de la maquette *MURI* m'a permis de préparer et de déterminer les expériences à réaliser par la suite. Les configurations et les tests choisis me permettent de balayer le plus de cas possibles pendant la durée de mon stage. Je vais pouvoir mesurer différents paramètres selon le régime et ainsi obtenir un maximum d'informations sur les inondations urbaines.

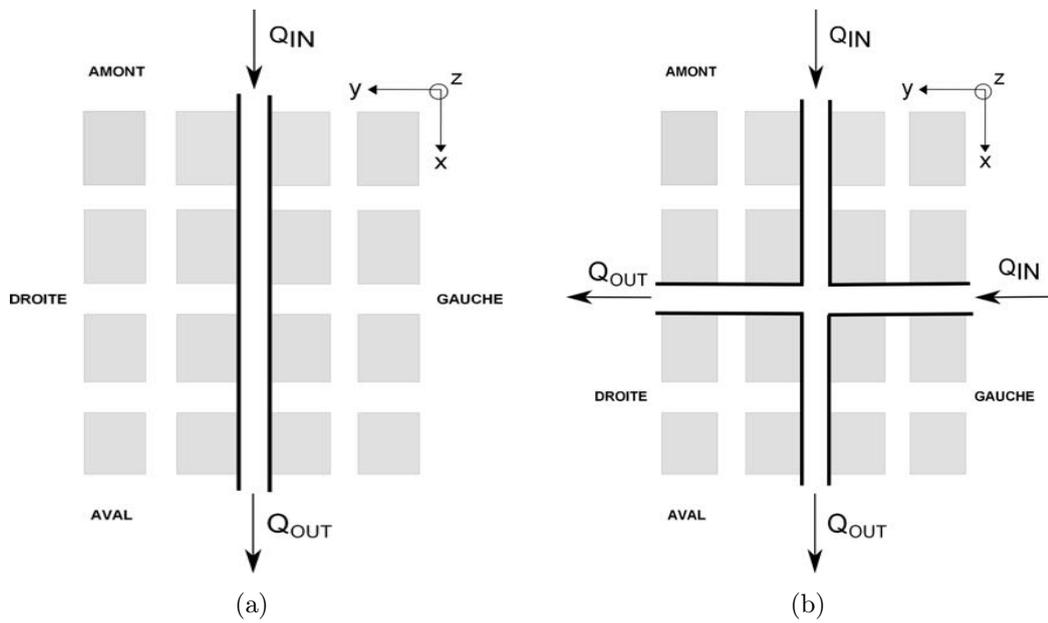


FIGURE 15 – Schéma des deux configurations mises en place : la rue simple (a) et le carrefour (b).

6 Résultats

6.1 Configuration en rue simple

6.1.1 Détermination de la rugosité du fond en régime graduellement varié

Pour caractériser la rugosité du fond des rues de la maquette *MURI*, on cherche à déterminer la rugosité équivalente de sable, k_s . Avec une comparaison entre les lignes d'eau théorique et expérimentale, on va pouvoir trouver k_s . Cette valeur caractéristique de la rugosité pourra ensuite être définie comme un paramètre géométrique de notre maquette, notamment lors de modélisations numériques.

Pour définir une ligne d'eau théorique, on utilise le protocole suivant. Si on est en régime fluvial⁵, on commence par relever la hauteur d'eau en aval mesurée par l'US, qui sera la condition limite aval pour le cas théorique. On peut en déduire la pente de friction S_f (Équation 8, attention ici $S_o \neq S_f, S_o = 0$).

D'après l'Équation 15, on peut retrouver la hauteur d'eau théorique en chaque point de la rue, $h(x)$ en remontant vers l'amont.

$$\frac{dh}{dx} = \frac{h(x+dx) - h(x)}{dx} = \frac{S_o - S_f}{1 - Fr^2} \quad (15)$$

On exprime S_f avec f , que l'on calcule avec la formule de Colebrook (Équation 7) comme détaillé dans la Section 4.2.1.

J'utilise un code de calcul Matlab⁶ pour résoudre, de proche en proche, le système 16 et déterminer la ligne d'eau théorique :

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{dh}{dx} = \frac{8g(bh)^3 S_o - Q^2 f(b+2h)}{8b(gb^2 h^3 - Q^2)} \\ \frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \log \left(\frac{k_s}{12R_h} + \frac{2.5}{Re\sqrt{f}} \right) \end{array} \right. \quad (16)$$

On peut ainsi tracer la ligne d'eau théorique et la comparer avec les valeurs de hauteur d'eau expérimentales, $h_{exp}(x)$.

Dans le code, k_s est un paramètre que l'utilisateur doit définir : la valeur de k_s permettant d'approcher au mieux les points expérimentaux avec la courbe théorique est la valeur cherchée, dite valeur de calage de la rugosité.

La recherche de la valeur optimale pour k_s se fait en calculant l'écart quadratique moyen, $EQM(k_s)$:

$$EQM(k_s) = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n (h_{exp}(x_i) - h(x_i))^2 \quad (17)$$

J'ai d'abord testé (Test 1) un régime graduellement varié (cf Tableau 3) qui correspond à un écoulement fluvial sur pratiquement toute la longueur de la rue

5. Si on est en régime torrentiel, on suivra le même protocole de résolution mais on partira simplement de la hauteur d'eau amont puis on calculera pas à pas vers l'aval.

6. Code de calcul élaboré par E.Mignot lors de précédents travaux.

centrale longitudinale (on atteint la hauteur critique un peu avant le seuil aval, mais j'ai restreint ma zone de mesure au régime fluvial pour simplifier les calculs).

Avec le capteur US, j'ai mesuré les hauteurs d'eau dans toute la longueur de la rue. J'ai effectué plusieurs mesures en fixant six différentes valeurs pour la coordonnée y : j'ai calculé la moyenne de ces profils longitudinaux de hauteur d'eau pour avoir une ligne d'eau moyennée selon y pour la rue.

En testant plusieurs valeurs de k_s et en calculant à chaque fois $EQM(k_s)$, j'ai trouvé que $k_s = 1.4 \cdot 10^{-4} m$ permettait d'avoir la valeur minimale d'écart quadratique moyen et donc la courbe théorique la plus proche possible de mes points expérimentaux (Figure 16).

Au début du profil expérimental, on observe des oscillations assez marquées, vraisemblablement dues à l'installation du nid d'abeille sur la cuve amont (Figure 34). Ayant une incertitude inférieure ou égale à $0.3 mm$ liée au capteur US, je vais plutôt considérer un intervalle autour de la valeur trouvée : $k_s \in [8.4 \cdot 10^{-5} m ; 3.4 \cdot 10^{-4} m]$.

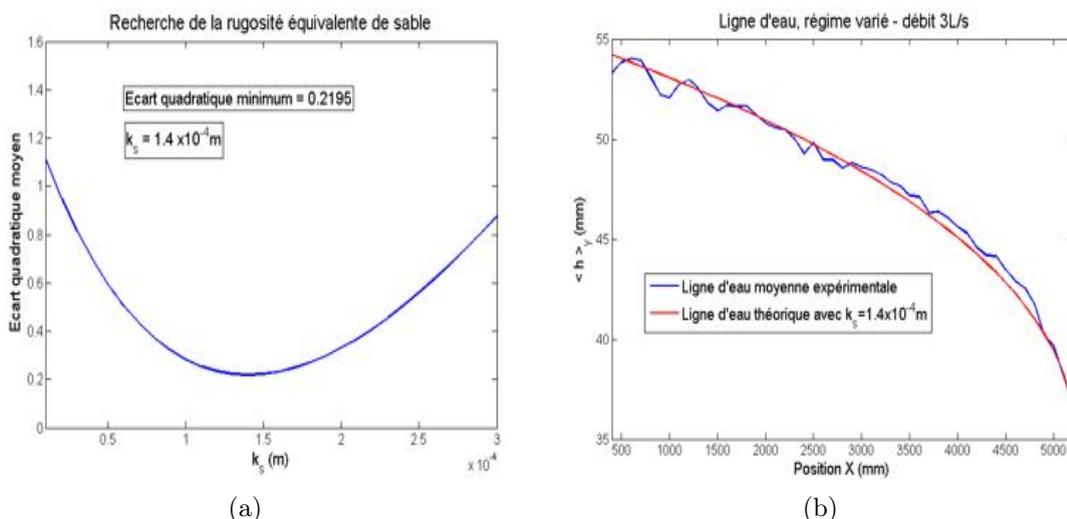
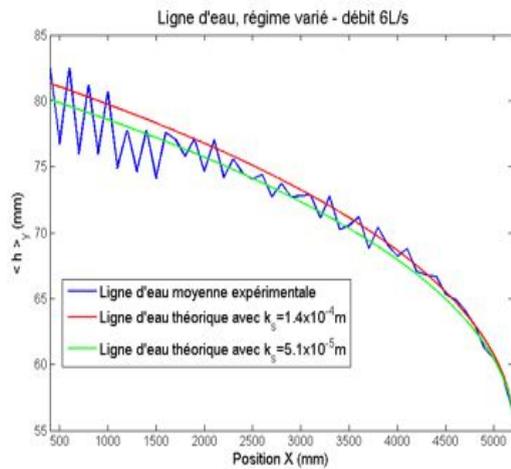


FIGURE 16 – Évolution de $EQM(k_s)$ (a) et comparaison des lignes d'eau avec la valeur optimale de k_s (b) pour le Test 1.

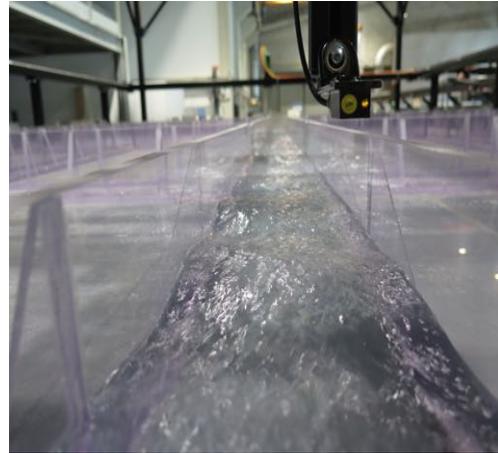
Pour confirmer ce résultat, j'ai réalisé un deuxième essai (Test 2) avec l'autre régime graduellement varié (cf Tableau 3). Le calcul de l'écart quadratique moyen suggère que la valeur optimale pour k_s est $5.1 \cdot 10^{-5} m$ pour ce cas d'étude, ce qui ne rentre pas dans l'intervalle trouvé juste avant.

En observant la ligne d'eau expérimentale (Figure 17), on remarque à nouveau de fortes oscillations de la surface libre à l'amont de la rue pour le profil expérimental ce qui pourrait expliquer la modification de la valeur de k_s et fausser le calcul. Le nid d'abeille provoque un ressaut puis des perturbations de la surface libre sur près de la moitié de la longueur de la rue.

Pour atténuer ces oscillations, on peut envisager plusieurs options (changer de nid d'abeille, ajouter du grillage à poule) mais le plus simple est d'essayer de positionner différemment le nid d'abeille.



(a)



(b)

FIGURE 17 – Comparaison des lignes d'eau théoriques, avec la valeur de k_s calée avec le Test 1 et avec la valeur de k_s calée avec le 2, et de la ligne d'eau expérimentale pour le Test 2 (a) et photo des oscillations de la surface libre. (b)

Pour conclure sur la détermination de k_s , j'ai fait un dernier test (Test 3) (Figure 18) avec le régime graduellement varié en pente transversale (cf Tableau 3) après correction des oscillations de la surface libre. Le minimum pour $EQM(k_s)$ est atteint pour $k_s = 9.5 \cdot 10^{-5} m$, valeur comprise dans l'intervalle défini lors du premier test. Cet intervalle pour la valeur de k_s est donc validé. Mes expériences avec des régimes graduellement variés ont renseigné sur la valeur de rugosité du fond de la maquette *MURI*, aux incertitudes de mesure près : pour caractériser le comportement des écoulements dans la maquette, je vais maintenant étudier un régime uniforme.

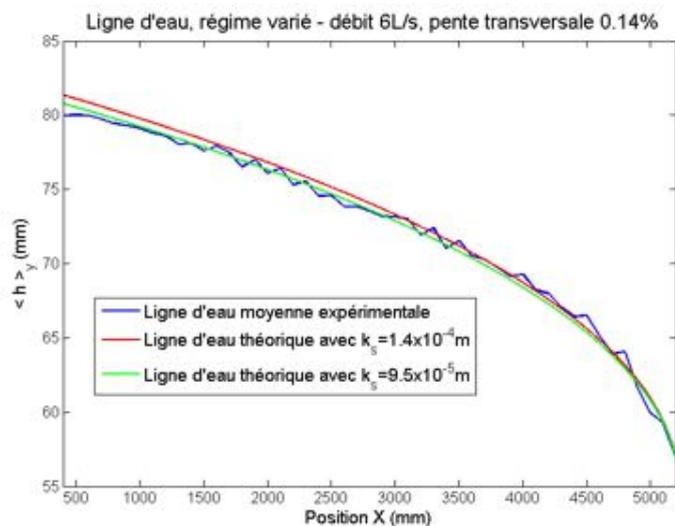


FIGURE 18 – Comparaison des lignes d'eau, avec la valeur de k_s calée avec le Test 1 et avec la valeur de k_s calée avec le Test 3, et de la ligne d'eau expérimentale pour le Test 3.

6.1.2 Régime uniforme et développement de la couche limite

Pour étudier le développement de la couche limite et de la turbulence dans la rue, j'ai fait des expériences avec le régime uniforme (Test 4) (cf Tableau 3).

Comme dit dans la partie théorique, un régime uniforme est caractérisé par une hauteur d'eau constante selon x , et d'après le Tableau 2, je connais les valeurs de pente, de débit et de hauteur de seuil aval (15.4 cm) à utiliser pour le générer dans la maquette.

Il n'est pas évident d'obtenir une ligne d'eau constante sur toute la longueur de la rue : j'ai considéré une tolérance de plus ou moins un millimètre autour de la valeur à atteindre. En effet, il y a toujours des petites perturbations de la surface libre et des erreurs liées à l'appareil de mesure. Il a fallu une douzaine d'essais pour arriver au régime uniforme voulu (Figure 42).

Pour observer le développement du régime et de la couche limite, j'ai effectué des mesures de vitesse avec l'ADV dans toute la rue, à chaque fois au centre de la rue, et ainsi obtenu des profils verticaux pour les vitesses moyennes et les fluctuations turbulentes.

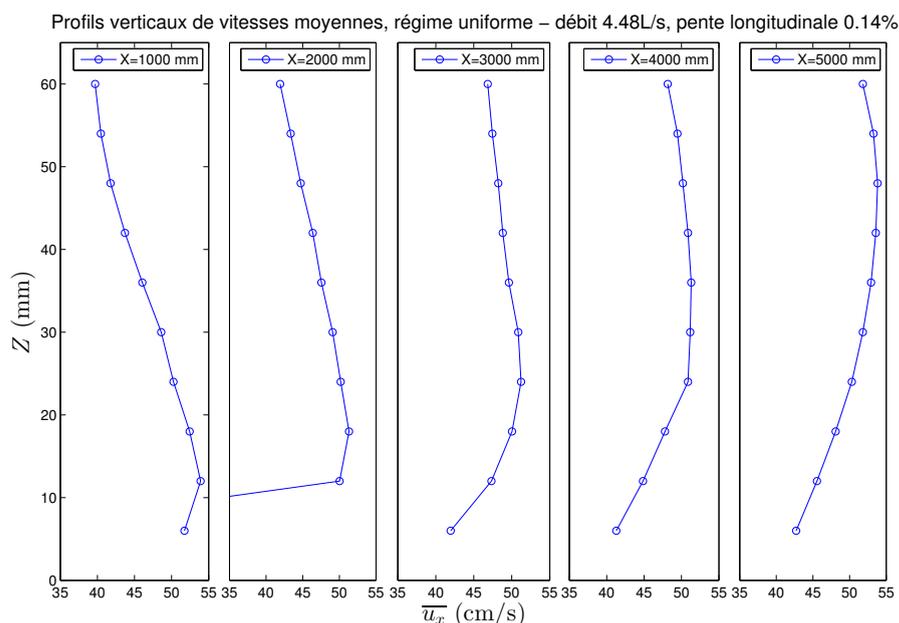


FIGURE 19 – Profils verticaux pour la vitesse longitudinale moyenne.

La Figure 19 montre le développement, dans la direction x , du profil vertical de vitesse longitudinale moyenne. Ceci montre que le régime uniforme n'est pas obtenu dans toute la rue mais seulement dans une partie car il faut une distance d'établissement. Les mesures qui suivront seront faites dans cette zone bien uniforme.

On remarque qu'à l'amont on a un pic de vitesse au fond : l'écoulement étant perturbé en sortie de cuve puis par le nid d'abeille.

À mesure que l'écoulement avance dans la rue, le profil de vitesse se redresse et

apparaît comme celui attendu dans le cas d'un régime uniforme : le profil en aval (à droite sur la Figure 19) rappelle la structure verticale théorique d'une couche limite sur fond lisse (Figure 7). La vitesse atteint sa valeur maximale avant la surface puis décroît jusqu'à celle-ci : c'est une caractéristique des écoulements en canal étroit qu'on s'attendait à retrouver. Ce décalage du maximum de vitesse sous la surface libre est dû aux courants secondaires : en effet, les caractéristiques géométriques de la maquette *MURI* entraînent leur développement.

Le frottement à la paroi ralentit l'écoulement en bas du profil et on distingue bien les parties interne et externe de la couche limite.

D'après la théorie des courants secondaires[5], comme le régime est uniforme, les valeurs de \overline{u}_y mesurées ici devraient être nulles, car les courants sont supposés symétriques par rapport au centre de la rue.

La Figure 20 montre que le centre de la rue n'est pas un axe de symétrie car on a des valeurs de vitesse transversale moyenne non-nulles. Les valeurs de \overline{u}_z sont négatives puis nulles proche du fond : cela amène à penser que du fluide plonge au centre de la rue.

Les profils de vitesses moyennes adimensionnés (Figure 43) permettent d'avoir des indications sur la force des courants secondaires : ils ont une intensité de l'ordre de 2% de u_D , ce qui reste assez faible et cohérent.

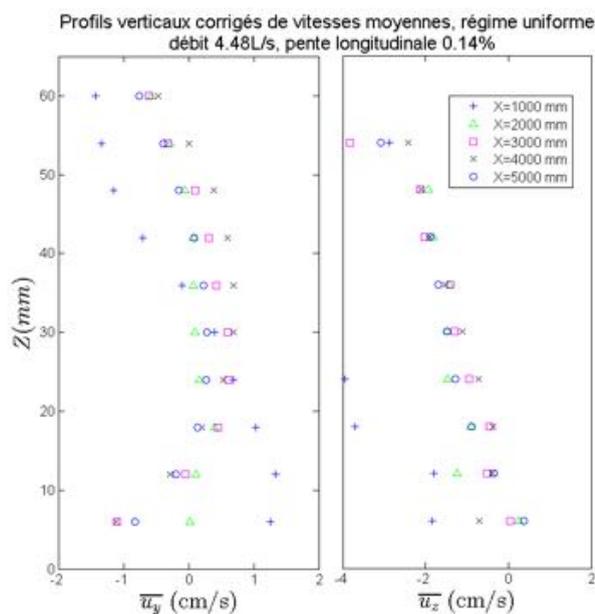


FIGURE 20 – Profils verticaux de vitesses moyennes selon les directions y et z.

Pour mieux comprendre ces résultats et pouvoir caractériser plus précisément les courants secondaires, j'ai mesuré les vitesses dans toute une demi-section de la rue, en $x = 4000\text{mm}$, soit bien dans la partie où le régime d'écoulement est uniforme. J'ai fait huit profils verticaux du centre de la rue à la paroi droite.

Dans un premier temps, j'ai tracé les contours pour la vitesse moyenne longitudinale, \overline{u}_x , pour avoir une idée de la structure de l'écoulement. On s'attend à une répartition symétrique des vitesses selon le centre de la rue.

Les contours (Figure 21) indiquent des vitesses faibles proche des parois (on a quelques valeurs fortes aberrantes sur le fond) ce qui est cohérent. Les isolignes ne sont pas horizontales au centre de la rue et mettent en évidence un flux de fluide plus lent qui remonte. C'est dans la partie centrale de la rue que \overline{u}_x est maximale et dans la partie haute de l'écoulement (les mesures ne vont pas jusqu'à la surface libre, à l'approche de laquelle \overline{u}_x décroît).

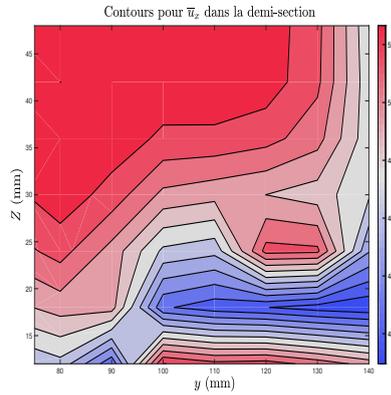


FIGURE 15 – Contours pour la vitesse u_x dans le plan (yz) pour une demi-section de l'écoulement uniforme.

Les contours de \overline{u}_y dans la demi-section (Figure 16) sont cohérents avec les profils de vitesse mesurés dans la rue : la vitesse moyenne transversale n'est pas nulle au centre de la rue. La vitesse est assez faible proche des parois (en dehors de quelques valeurs peu fiables) ce qui était attendu.

Il y a comme deux flux dirigés vers la gauche ($-y$), un proche du fond et un proche de la surface libre, et un flux vers la droite (y), au centre. Cela fait penser à deux cellules pour la vitesse transversale (Figure 16).

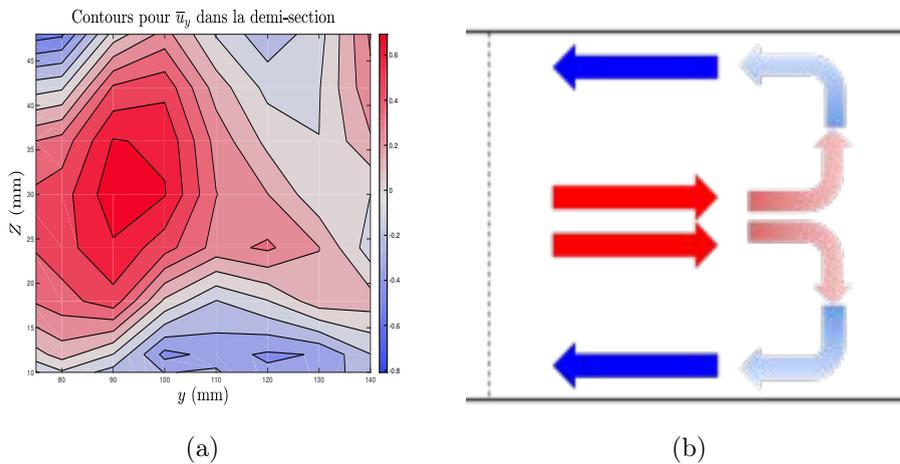


FIGURE 16 – Contours pour la vitesse u_y dans le plan (yz) pour une demi-section de l'écoulement uniforme (a) et cellules supposées pour la vitesse transversale (b).

En traçant les contours pour la vitesse moyenne verticale, \overline{u}_z , puis le champ de vecteurs (Figure 17) dans le plan (yz) , je remarque de fortes valeurs négatives sur le fond, ce qui est anormal. On ne distingue pas de mouvement cohérent. Les résultats concernant \overline{u}_z avec l'ADV sont délicats à traiter car ils sont peu fiables proche des parois ou de la surface libre. Il faut se placer à plus de 8 mm des bords pour avoir

des valeurs correctes : or, ici la section que j'étudie est étroite et entourée de parois. Un quart de la section est donc inexploitable à cause des restrictions de l'appareil de mesure. C'est quelque chose qui avait déjà posé problème lors d'autres expériences dans la laboratoire.

De plus, la sonde ADV présente une erreur de 0.5% : cependant, le constructeur ne donne pas d'indication concernant la répercussion de cette erreur sur les valeurs moyennes ou de fluctuations mesurées. Des recherches sont en cours à Irstea afin de déterminer l'incertitude sur chacune des grandeurs. Il est donc compliqué d'avoir confiance en mes résultats pour la vitesse verticale, je ne les exploiterai pas d'avantage dans la suite de mes expériences.

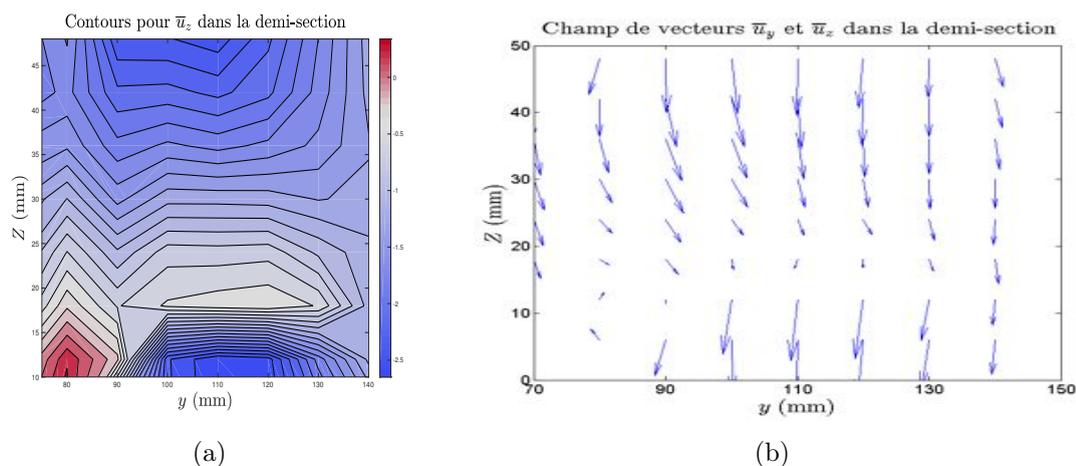


FIGURE 23 – Contours pour la vitesse u_z dans le plan (yz) pour une demi-section de l'écoulement uniforme (a) et champ de vecteurs vitesses (b).

Pour vérifier la qualité de mes mesures, j'ai tracé les spectres d'énergie (Figure 24) pour chacune des composantes de la vitesse instantanée à l'aide d'un programme Matlab⁷. Les spectres d'énergie montrent la répartition de l'énergie en fonction de la fréquence : la fréquence étant caractéristique de la taille des structures turbulentes (les basses fréquences correspondent aux grandes échelles et les hautes fréquences correspondent aux petites échelles), les spectres renseignent sur l'énergie liée à chaque échelle.

Ceci repose sur la première hypothèse de Kolmogorov[12], dite d'équilibre universel : la notion d'équilibre vient du fait que le temps caractéristique des structures dissipatives est très petit devant celui de la décroissance énergétique ; le caractère universel signifie que cet équilibre ne dépend pas des conditions particulières de l'écoulement. La tendance universelle des écoulements turbulents s'observe sur les spectres : ces derniers ont une forme particulière et respectent une loi en puissance de 5/3 pour leur pente. Mes spectres suivent la théorie, mais on peut voir que le niveau de bruit pour la composante selon z est plus importante que pour les deux autres composantes, ce qui pourraient expliquer certains de mes résultats précédents.

7. Code de calcul élaboré par E. Mignot lors de précédents travaux

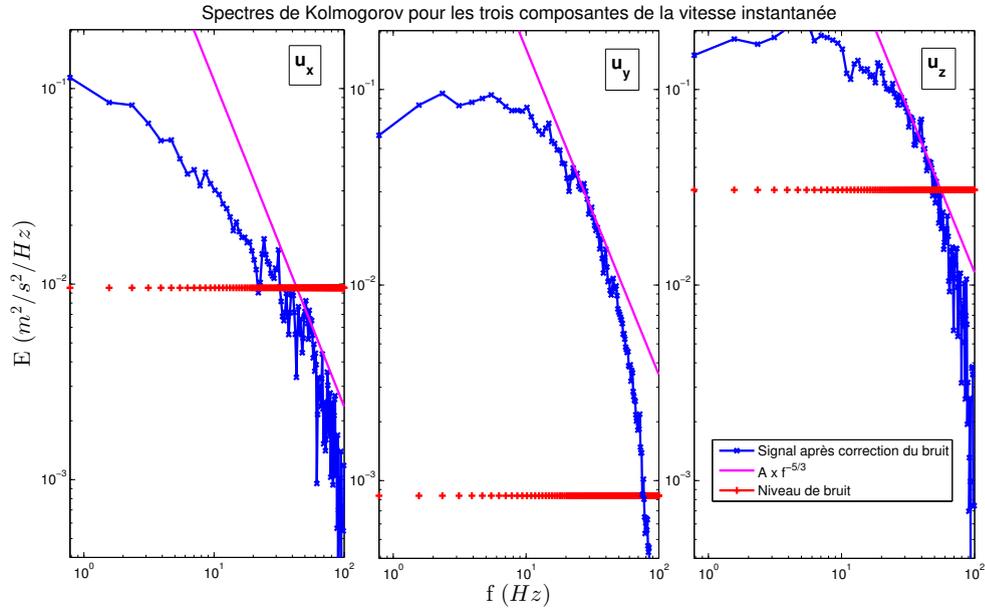


FIGURE 24 – Spectres d’énergie pour la vitesse.

Pour caractériser encore plus cet écoulement, on peut également regarder les fluctuations turbulentes caractéristiques. J’ai choisi de m’intéresser plus particulièrement à u'_x et de l’adimensionner afin de comparer mes résultats à ceux de Nezu[1] (Figure 25).

Le régime que j’ai testé présente un nombre de Reynolds plus élevé et un nombre de Froude plus bas que ceux testés par Nezu. Il a montré que plus le nombre de Reynolds augmentait, plus u'_x/u_D diminuait près de la paroi et que l’effet du nombre de Reynolds s’atténuait après $Z/h > 0.15$. Mes résultats sont donc cohérents avec sa théorie, je retrouve bien l’allure attendue.

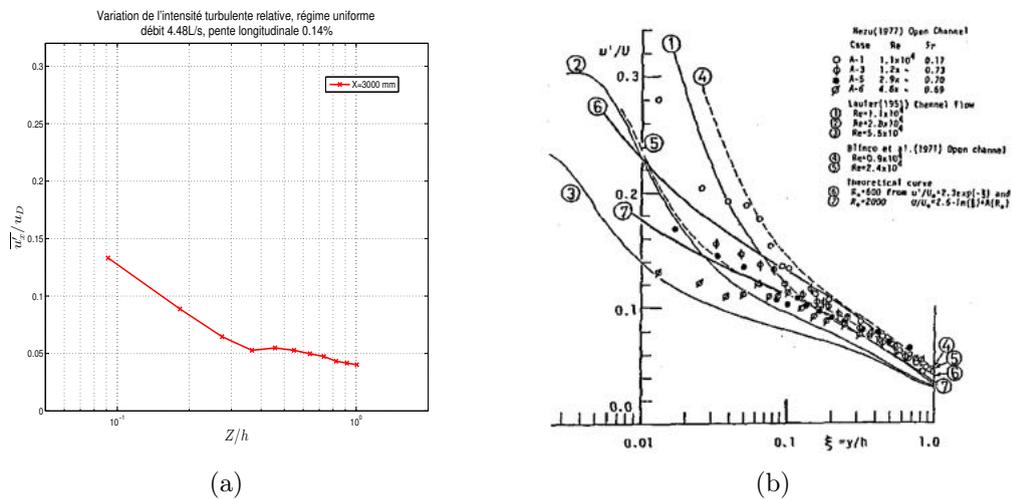


FIGURE 25 – Variation de l’intensité turbulente relative selon la direction x : profil expérimental (a) et profils théoriques de Nezu[1] (b).

Les tests en rue simple ont permis de retrouver la valeur de rugosité caractérisant la maquette *MURI* et d'étudier les courants secondaires. J'ai choisi de détailler plus particulièrement ici les résultats sur les vitesses du régime uniforme car ils soulèvent plusieurs questions et indiquent qu'il faudra poursuivre les expériences pour mieux comprendre les phénomènes physiques. Cependant, les résultats concernant les autres régimes restent intéressants et sont disponibles en Annexe.

De nouvelles séries de mesure sur des sections complètes et à différentes positions x dans la rue (tout en restant dans la région uniforme de l'écoulement) permettraient de caractériser plus précisément les courants secondaires et de déterminer les symétries de l'écoulement.

6.2 Configuration en carrefour

6.2.1 Croisement de deux régimes uniformes identiques

Pour ce premier test dans la configuration en carrefour (Test 5), j'ai choisi d'étudier le croisement de deux régimes uniformes parfaitement identiques.

Cette expérience va me permettre d'observer la répartition des débits : en effet, on s'attend à avoir des débits de sortie égaux car les écoulements et les rues présentent les mêmes caractéristiques. En analysant le débit sortant par la cuve latérale droite (celui de la cuve centrale avale étant fortement faussé, voir Section 5.2) pendant une dizaine de minutes (Figure 26), on remarque que le débit sortant est très proche du

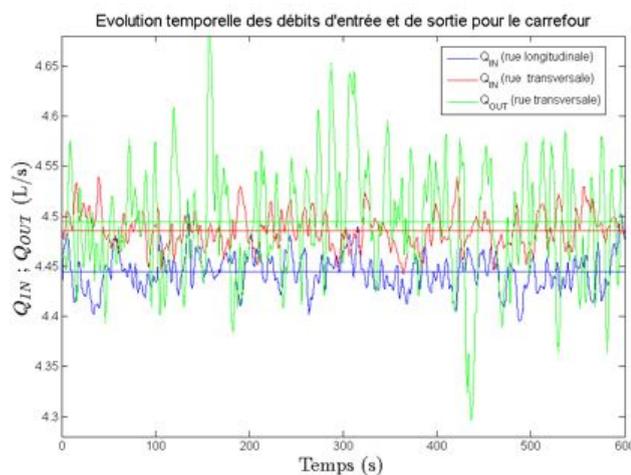


FIGURE 26 – Répartition des débits pour le croisement de deux régimes uniformes identiques (Test 5), avec un débit de 4.48 L/s chacun.

débit entrant dans la rue transverse⁸. Ceci indique donc que les débits sont répartis de façon équivalente dans les deux rues après le carrefour.

Après m'être intéressée aux débits, je me suis focalisée sur l'écoulement au niveau du carrefour et après celui-ci.

Dans un premier temps, j'ai pris des photos de l'écoulement (Figure 27). La surface libre est très perturbée ce qui suggère que l'écoulement est tri-dimensionnel. En regardant les photos, l'écoulement semble symétrique en terme de hauteur d'eau dans les branches avales.

8. Les fluctuations du débit sortant sont dues au passage de quelques bulles d'air dans les tuyau malgré la fermeture partielle de la vanne.

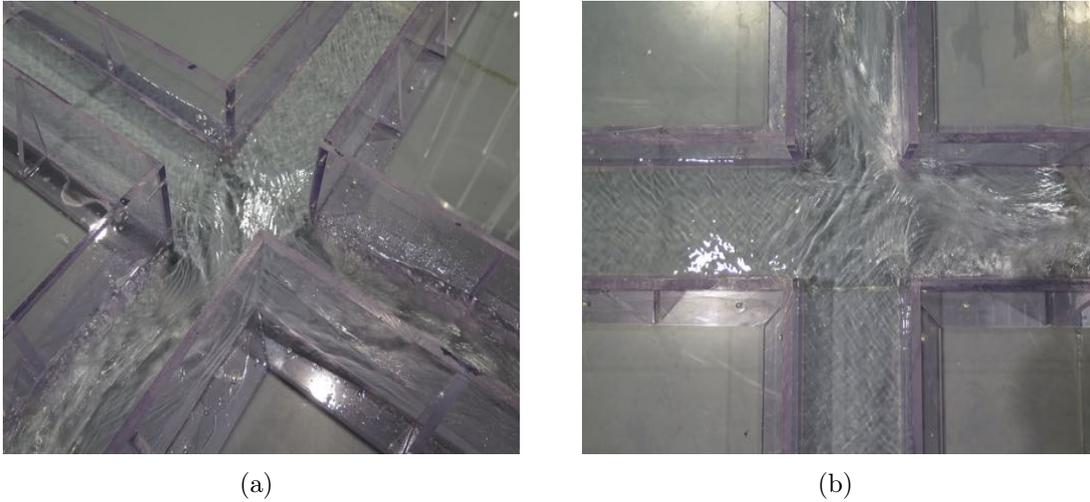


FIGURE 27 – Photos du croisement de deux écoulements uniformes identiques : vue de l’aval droit (a) et vue de dessus (b).

Dans un second temps, j’ai mesuré les lignes d’eau dans chacune des rues (Figure 28) afin de les comparer entre elles et avec mes données en rue simple. J’ai choisi ici de garder les lignes d’eau mesurées en différents y et de ne pas faire une ligne d’eau moyenne, afin de décrire au mieux l’écoulement.

On remarque immédiatement que les mesures sont peu réalistes. Au niveau du carrefour (à environ $x=3000$ mm pour la rue longitudinale et $y=1644$ mm pour la rue transversale), les valeurs de hauteur d’eau mesurées par le capteur US varient brutalement : elles deviennent négatives ou très élevées, ce qui ne représente évidemment pas la réalité.

Pour le cas de la rue longitudinale, la hauteur d’eau en amont et en aval du carrefour est équivalente à celle du test en rue simple (Test 4) : le croisement avec un autre écoulement ne perturberait donc que localement la ligne d’eau.

Pour le cas de la rue transversale, la hauteur d’eau dans la branche amont est beaucoup plus importante que lors du Test 4 : le carrefour agirait comme un contrôle aval sur l’écoulement. Dans la branche avale, la hauteur d’eau est plus proche de celle attendue.

Il est difficile d’analyser ces résultats car une grande partie des mesures n’est pas fiable. Les valeurs de niveau d’eau en dehors du carrefour sont correctes, mais dès que la surface libre est perturbée, les mesures sont faussées.

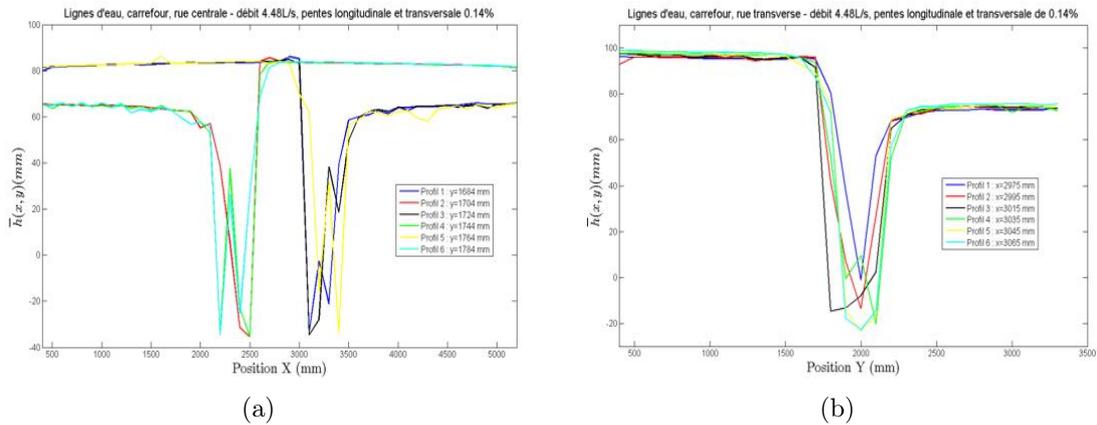


FIGURE 22 – Lignes d'eau dans la rue centrale longitudinale (a) et dans la rue centrale transversale (b) dans la configuration en carrefour.

Pour avoir des mesures plus réalistes de hauteur d'eau malgré la surface libre perturbée, j'ai utilisé un autre instrument, un limnimètre électronique (Figure ??). J'ai ainsi relevé à la main quelques valeurs de hauteur d'eau : j'ai pris cinq lignes d'eau pour chaque rue pour couvrir ma zone d'étude au maximum (Figure 23). Il était compliqué de déterminer le point exact de la surface car il y a des battements au niveau du carrefour, donc les mesures présentent une incertitude. Avec les données, j'ai tracé les contours de hauteur d'eau et les surfaces sur Matlab (Figures 23 et 24) pour vérifier l'hypothèse de symétrie et avoir un résultat visuel. Les contours montrent les gradients de hauteur d'eau. Ils permettent d'avoir des informations sur les pentes de la surface libre (les données suivantes sont valables pour la rue transversale ; pour la rue longitudinale, il faut juste inverser les directions x et y) : $dh/dx \approx 0,81$, soit une pente de 81% selon x , et $dh/dy \approx 0,4$, soit une pente de 40% selon y .

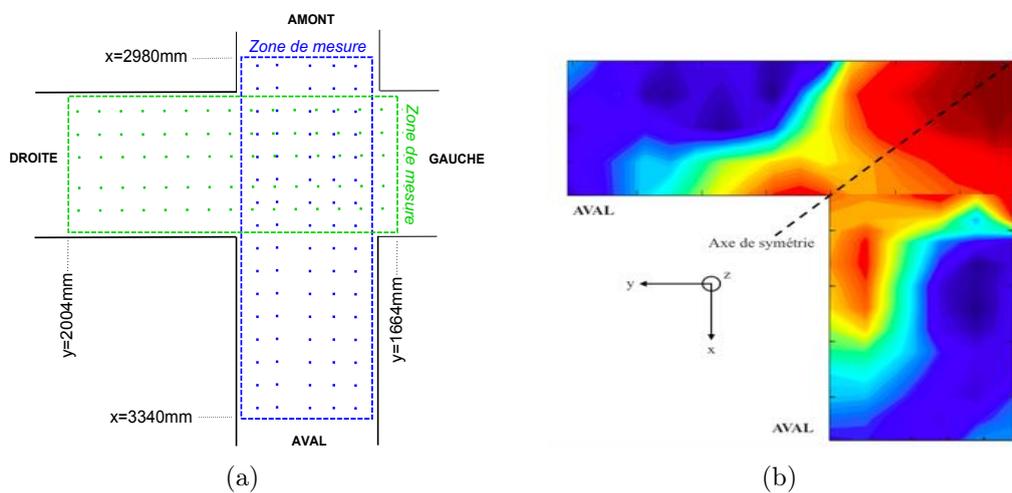


FIGURE 23 – Zone de mesure avec le limnimètre autour du carrefour pour le croisement de deux régimes uniformes identiques (a) et hauteurs d'eau mesurées (b).

Ce sont des valeurs de pente assez fortes qui rendent bien compte d'une surface libre très perturbée et d'écoulements assez complexes.

Si on s'intéresse maintenant aux surfaces dans les rues de la maquette *MURI* (Figure 30), en comparant les deux courbes, on retrouve la même allure et des valeurs de hauteurs d'eau assez proches. Après le carrefour, dans chaque branche on observe un creux et une bosse. On visualise clairement la structure tri-dimensionnelle de la surface libre sur ces courbes.

Ces mesures de hauteur d'eau et les différentes courbes mettent en évidence la symétrie de l'écoulement pour ce croisement de deux régimes identiques : l'axe de symétrie va du coin amont gauche du carrefour au coin aval droit.

Pour préciser ce travail, avec un peu plus de temps, il faudrait refaire les mesures avec le limnimètre plusieurs fois afin d'avoir des valeurs de hauteur d'eau moyennes et bien évidemment faire des mesures plus resserrées spatialement pour mieux caractériser les variations de la surface libre.

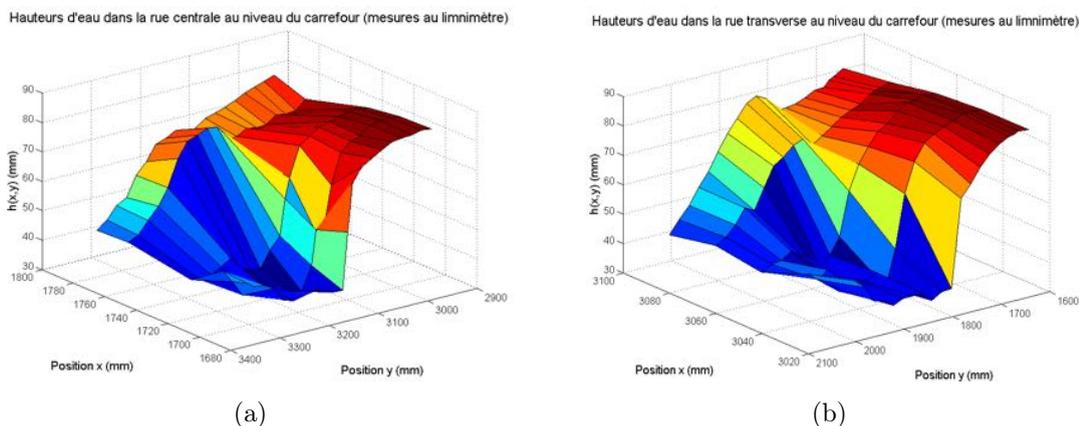


FIGURE 30 – Surfaces des écoulements dans la rue longitudinale (a) et dans la rue transversale (b) dans la configuration en carrefour.

Pour finir cette étude, dans la rue longitudinale, j'ai mesuré des profils de vitesse verticaux (Figures 45 et 46). Afin de faire une comparaison avec le cas de la rue simple, j'ai repris les mêmes points de mesure et j'ai choisi d'adimensionner chaque profil par la vitesse moyennée sur la verticale, $\langle u \rangle_z$, car les hauteurs d'eau sont différentes pour les deux expériences et je ne veux pas que cela influence ma comparaison. J'ai choisi les profils en $x = 4000$ mm (Figure 31) pour observer l'influence du croisement.

Les formes des profils sont différentes entre le cas en rue simple et le carrefour. Les vitesses, selon les trois composantes, dans la configuration carrefour sont plus fortes que pour la rue simple. Selon y , on remarque pour le cas du carrefour, un courant secondaire plus intense : ceci semble logique car l'intersection impacte directement selon y l'écoulement dans la rue centrale.

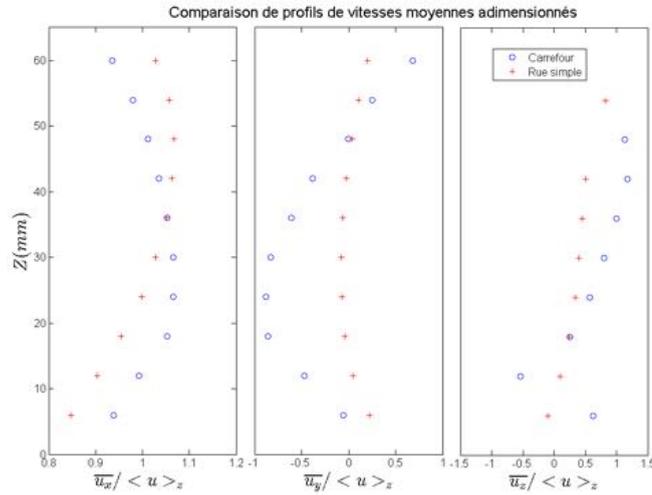


FIGURE 31 – Comparaison de profils de vitesses adimensionnés entre les configurations rue simple et carrefour.

6.2.2 Croisement de deux régimes différents

Pour le deuxième et dernier test en carrefour (Test 6), j'ai réutilisé deux écoulements testés en rue simple pour réaliser le croisement d'un régime graduellement varié et d'un régime uniforme (Tests 3 et 4). Ceci donne lieu à des phénomènes très complexes : en effet, au niveau du carrefour les écoulements passent dans le régime torrentiel et on observe des ressauts dans les branches avalées signifiant le retour à un régime fluvial. De la même manière que pour le cas précédent, les mesures avec le capteur US (Figure 32) donnent des résultats peu exploitables : je n'ai pas eu le temps de faire des mesures avec le limnimètre. Il faudra envisager de le faire par la suite ou de remplacer l'US par un autre capteur plus précis et plus adapté à des écoulements avec de forts gradients de hauteur d'eau. Lors de mon stage, j'ai pu assister à deux démonstrations d'industriels pour présenter de nouveaux capteurs destinés aux mesures de niveau d'eau, mais qui finalement ne convenaient pas pour la maquette : des recherches sont toujours en cours.

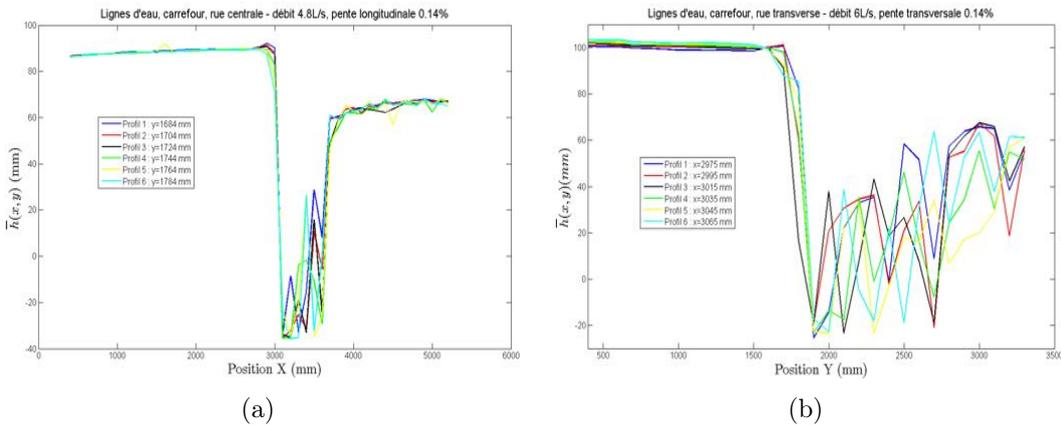


FIGURE 32 – Lignes d'eau dans les rues longitudinale (a) et transversale (b).

7 Conclusions et perspectives

Durant ce stage au sein d'Irstea, j'ai pu mener plusieurs expériences avec la maquette *MURI* dans le but d'améliorer la compréhension des phénomènes présents lors des inondations urbaines.

Mon travail a permis de tester le modèle et ses fonctionnalités : l'étude de la conservation du débit a mis en évidence un problème au niveau de l'évacuation de l'eau qu'il faudra résoudre pour obtenir des mesures plus précises par la suite ; mes relevés topographiques ont montré les écarts sur le positionnement des rails ou les irrégularités du fond de *MURI* dont il faut tenir compte pour les mesures de hauteur d'eau. Mes résultats sont les premiers collectés avec la maquette : ils seront complétés rapidement pour constituer un jeu de données complet sur les crues urbaines. Un travail de modélisation numérique a également été réalisé et se poursuit.

L'étude du régime uniforme sur lequel je me suis majoritairement focalisée a donné des informations sur le comportement des écoulements dans une rue de *MURI*. On retrouve bien la structure verticale théorique d'une couche limite comme décrit dans la littérature (Figure 7). Concernant les courants secondaires, j'ai mis en évidence leur présence mais je n'ai pas pu les décrire précisément : en effet, mes mesures n'étaient pas très fiables et il faudrait faire d'avantage de séries de mesures pour comprendre entièrement ces phénomènes. Un capteur plus performant pour les mesures de vitesse verticale améliorerait probablement les résultats : cependant, à ce jour, Irstea n'en n'a pas trouvé d'adapté pour compléter l'instrumentation de *MURI*.

Le cas du carrefour, avec le croisement de deux rues a révélé la symétrie en terme de débit et de hauteur d'eau pour une configuration avec deux régimes identiques. La surface libre très perturbée a compliqué les mesures mais renseigne sur la structure tri-dimensionnelle des écoulements au niveau de l'intersection.

Beaucoup d'autres configurations restent à explorer après mon stage, en prenant notamment en compte le réseau d'assainissement pour étudier les échanges de celui-ci avec les rues de la maquette et son impact sur les écoulements lors d'une inondation.

Ce stage a été une expérience professionnelle très enrichissante et m'a permis de m'immerger dans le travail de recherche expérimentale. Il s'inscrivait parfaitement dans mon cursus de mécanique des fluides puisque j'ai pu mettre en pratique des notions apprises au cours de l'année, concernant par exemple la turbulence ou les écoulements naturels.

Mon projet professionnel s'est précisé durant ces quelques mois et mon intérêt pour l'hydraulique et les études sur le risque d'inondation en zone urbaine s'est confirmé. Le contact avec les chercheurs et les doctorants m'a permis d'en apprendre plus sur le travail de thèse et m'a donné envie de considérer sérieusement cette option pour la poursuite de mes études après mon master.

8 Annexes

Photographies du dispositif expérimental

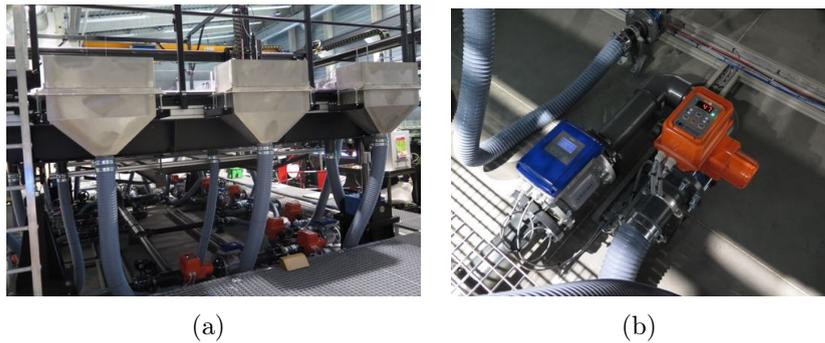


FIGURE 33 – Cuves d'alimentation ou d'évacuation en eau (a) et vanne avec débitmètre reliés à chacune des cuves (b).



FIGURE 34 – Nid d'abeille en sortie des cuves d'alimentation et tuyau d'ensemencement (a) et seuil réglable en sortie des rues pour contrôler le niveau d'eau (b).

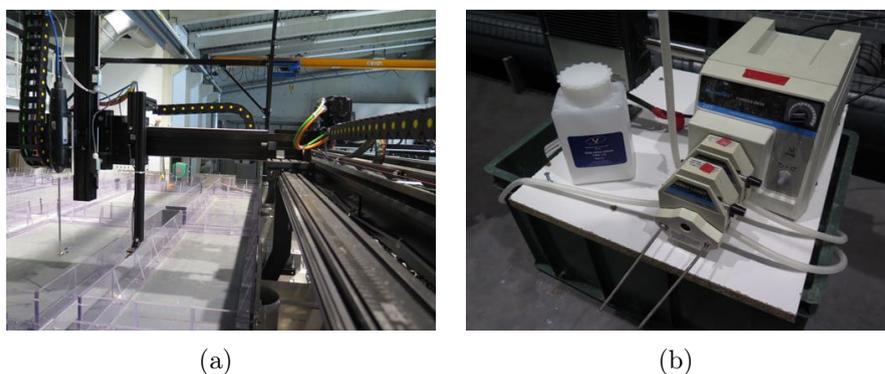


FIGURE 35 – Rails pour le déplacement du portique de mesure (a) et dispositif d'ensemencement : pompe péristaltique, cuve, agitateur et particules (b).

Résultats complémentaires pour les régimes graduellement variés

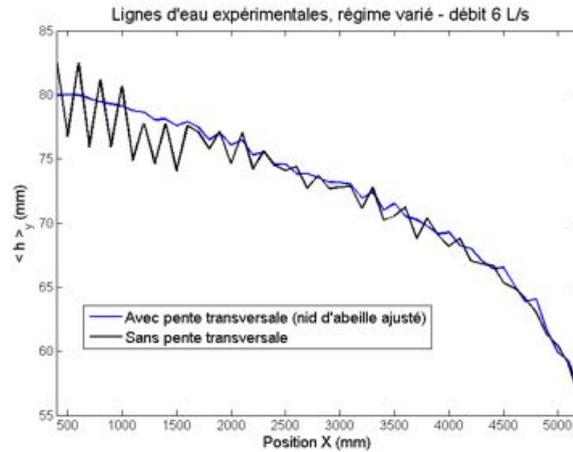


FIGURE 36 – Comparaison de la ligne d'eau pour un même régime graduellement varié, avec ou sans pente transversale.

Les vitesses moyennes selon x et y n'ont pas été corrigées avec une matrice de rotation pour ce cas : c'est pour cela que la moyenne selon la verticale des profils selon y n'est pas nulle. Comme pour le test du régime uniforme, les vitesses selon z sont toutes négatives : ceci confirme que les mesures de la composante verticale de la vitesse de l'écoulement avec l'ADV sont peu fiables.

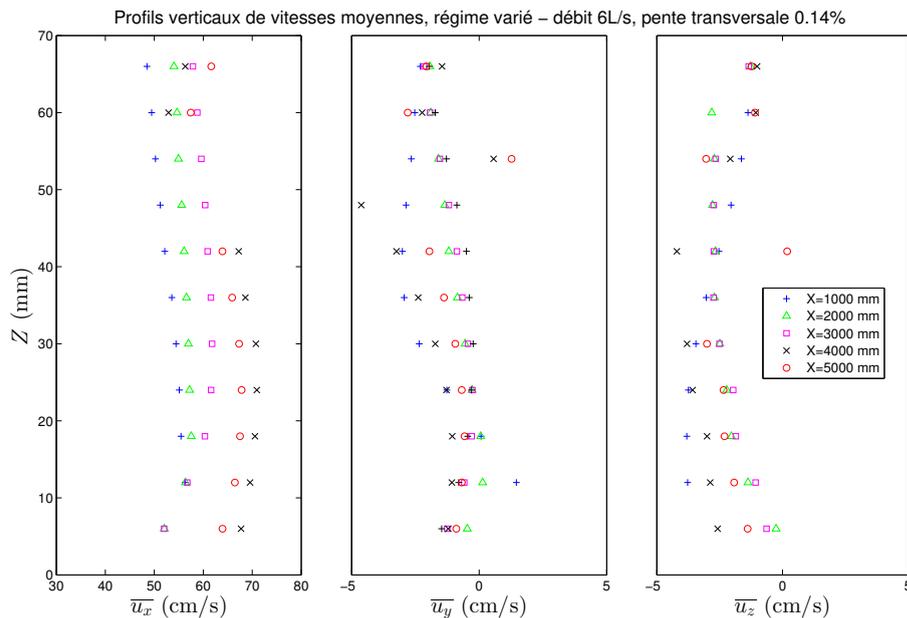


FIGURE 37 – Profils verticaux de vitesses moyennes

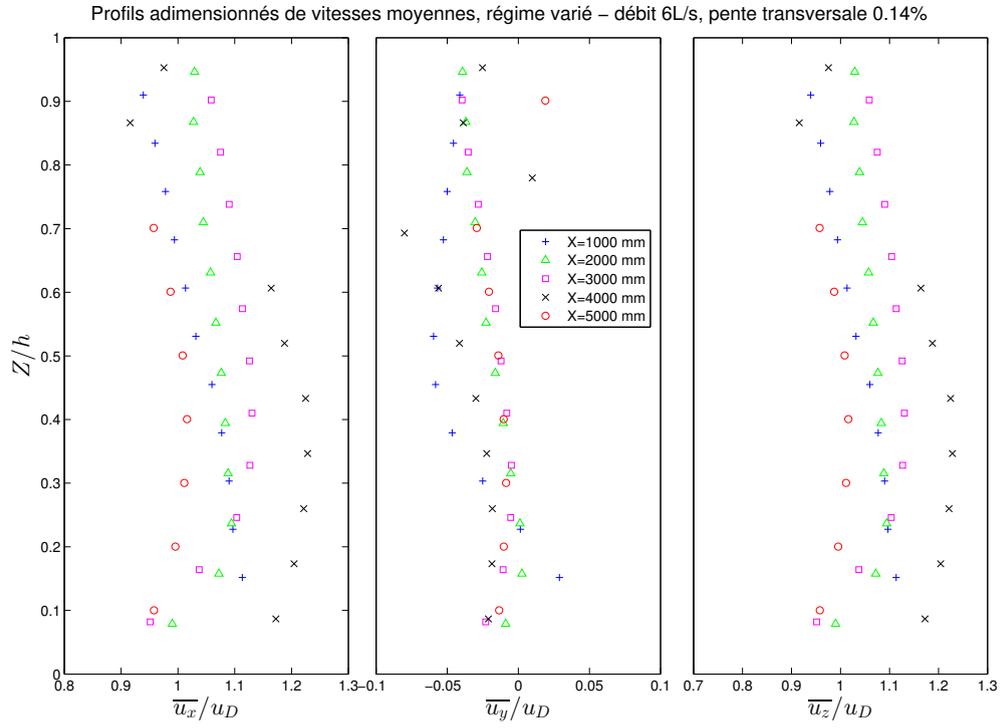


FIGURE 38 – Profils verticaux de vitesses moyennes avec grandeurs normalisées.

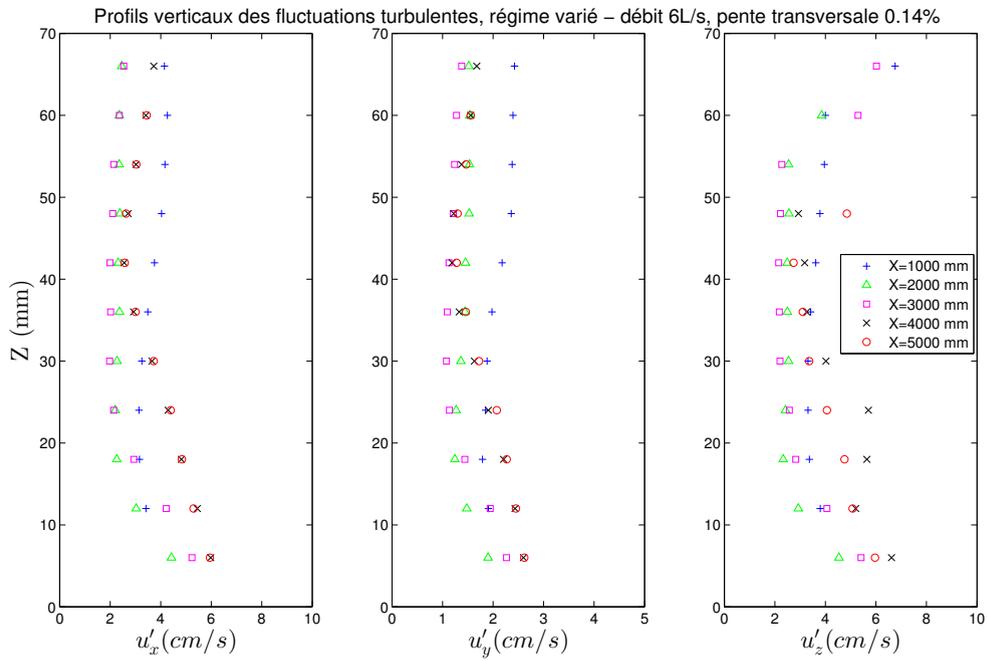


FIGURE 39 – Profils verticaux de fluctuations.

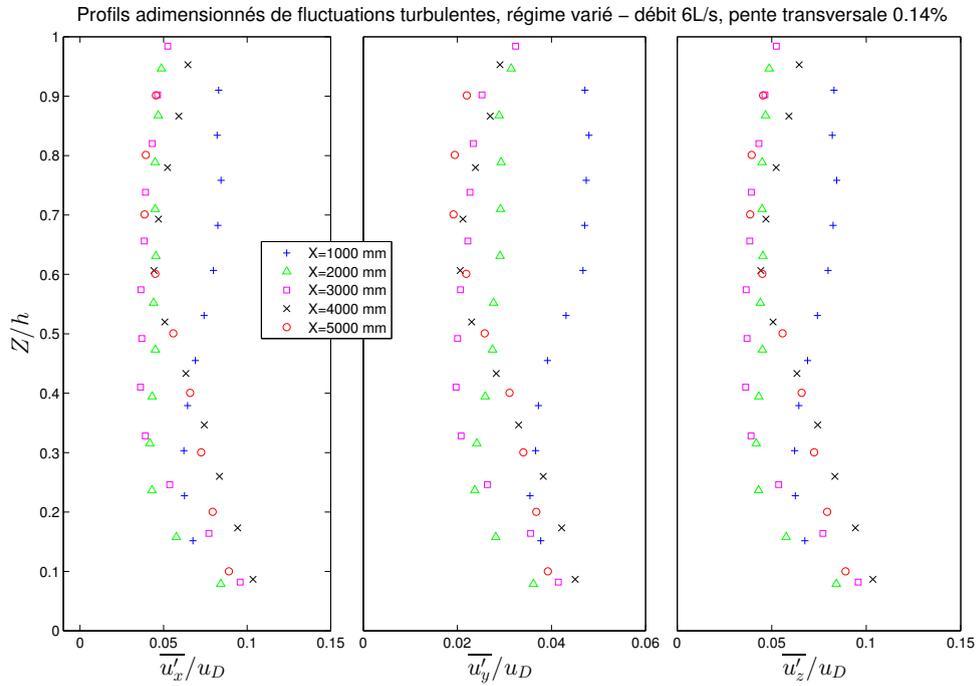


FIGURE 40 – Profils verticaux de fluctuations avec grandeurs normalisées.

Résultats complémentaires pour le régime uniforme

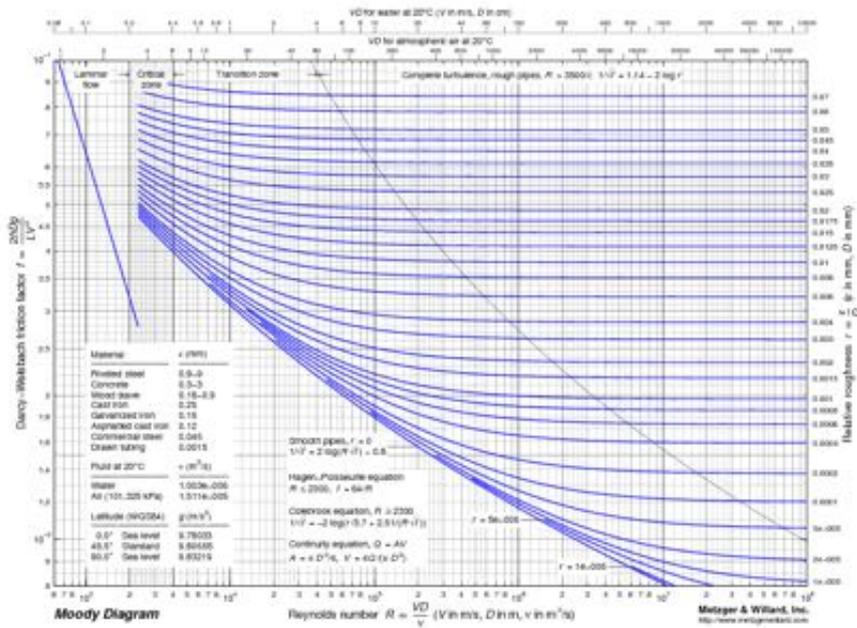


FIGURE 41 – Diagramme de Moody

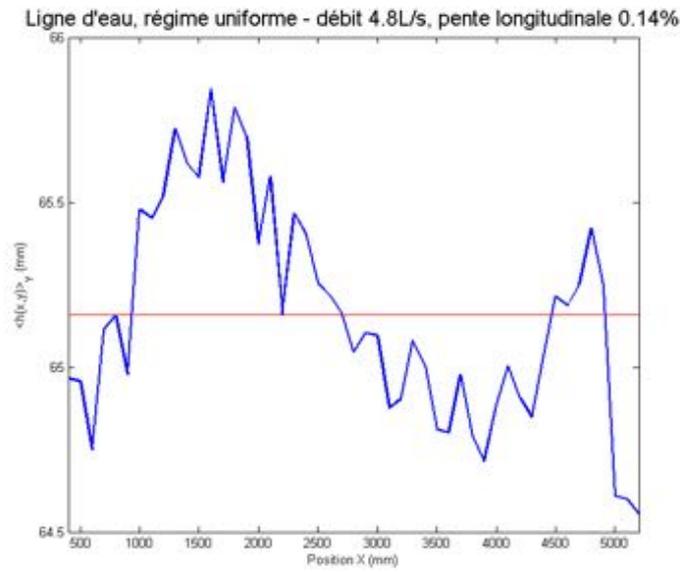


FIGURE 42 – Ligne d'eau pour le régime uniforme avec une tolérance de plus ou moins un millimètre autour de la valeur moyenne de hauteur d'eau.

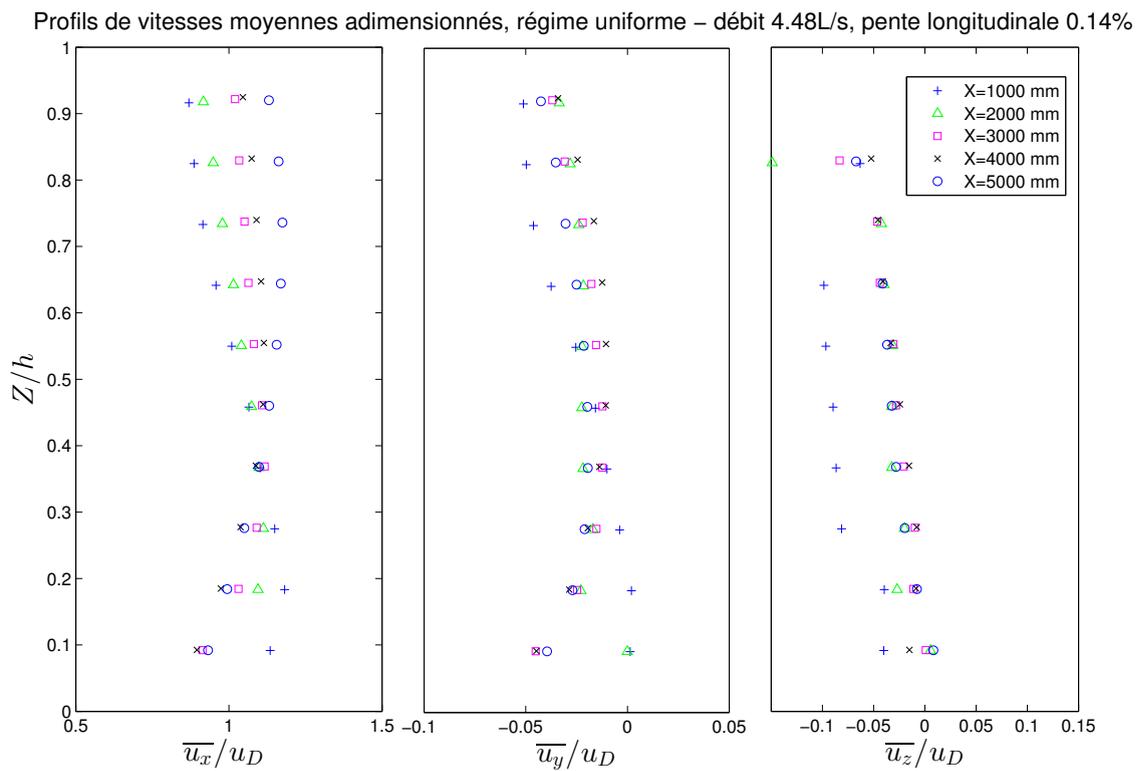


FIGURE 43 – Profils verticaux de vitesses moyennes avec grandeurs normalisées..

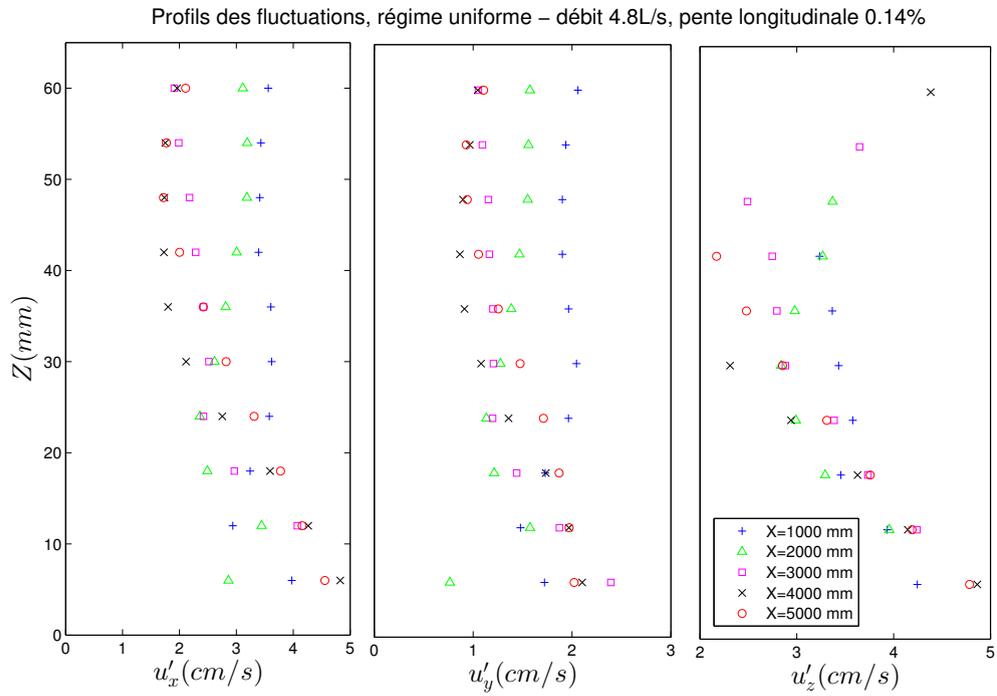


FIGURE 44 – Profils verticaux de fluctuations.

Résultats complémentaires pour le carrefour

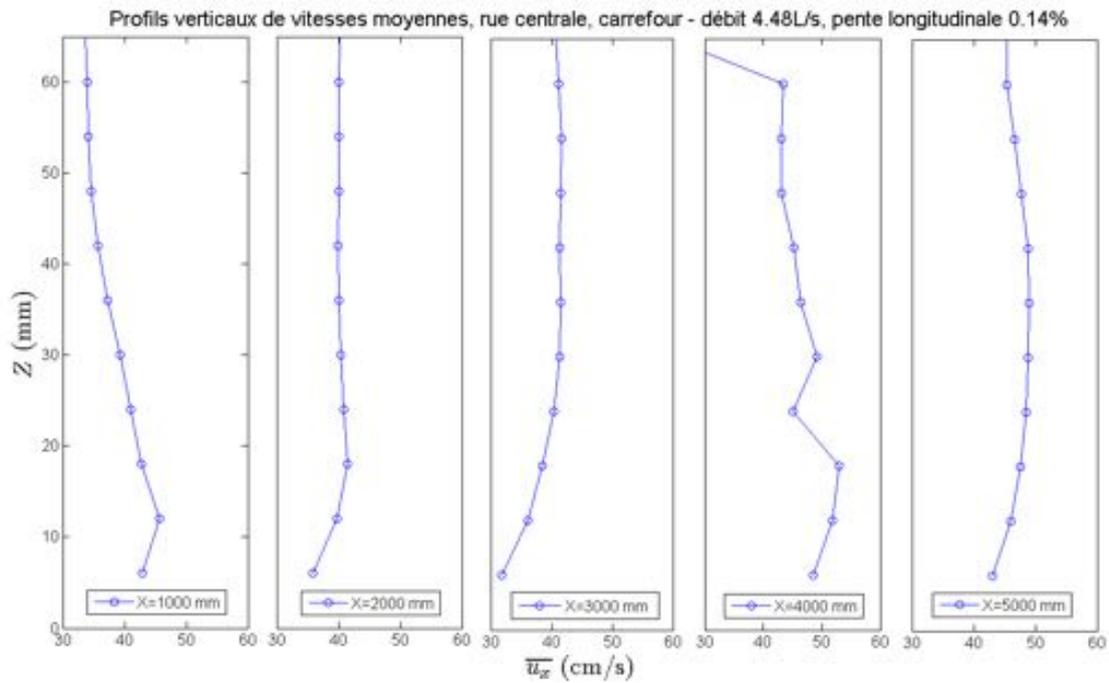


FIGURE 45 – Profils verticaux de vitesse moyenne u_x tout au long de la rue centrale.

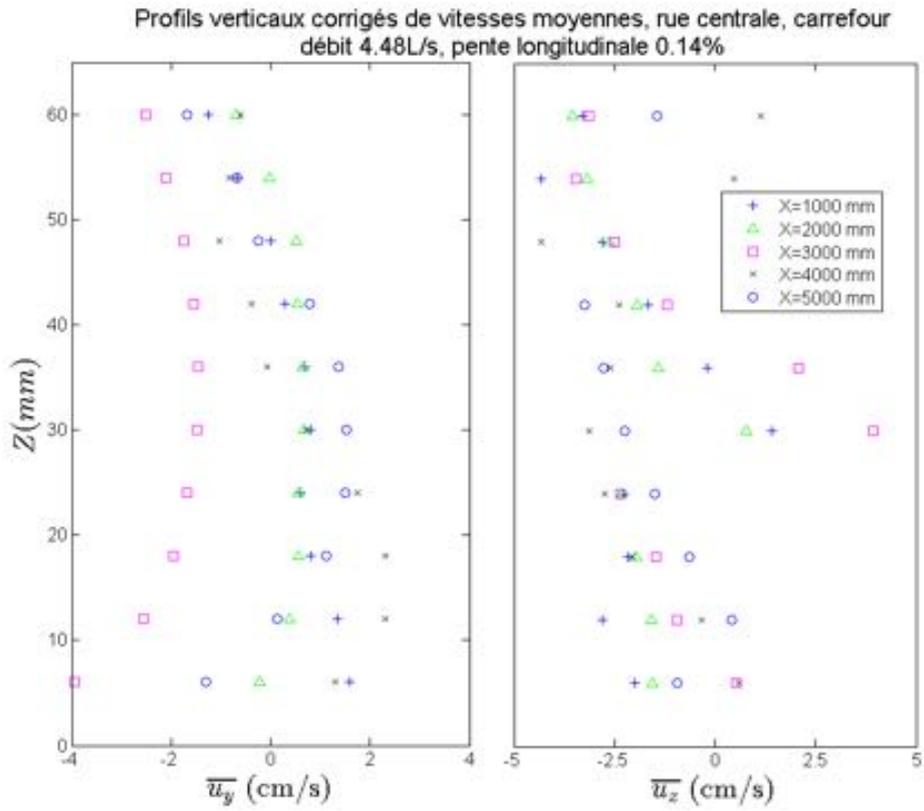


FIGURE 46 – Profils verticaux de vitesses moyennes u_y et u_z .

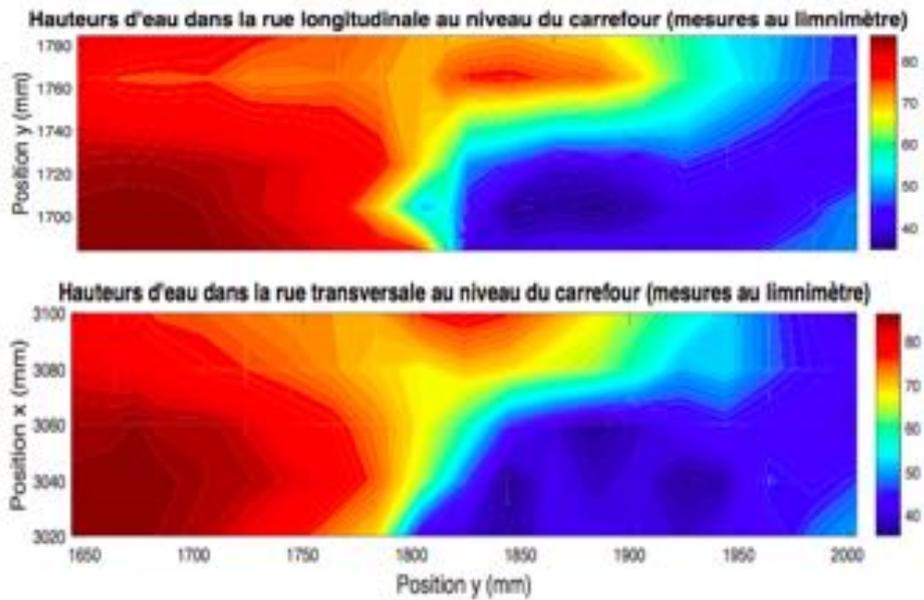


FIGURE 47 – Comparaison des hauteurs d'eau dans les rues longitudinale (en haut) et transversale (en bas).

Références

- [1] I. NEZU, « Turbulence in open-channel flows », 1993.
- [2] Y. PELTIER, « Modélisation physique des écoulements débordants en présence d'un épi placé dans la plaine d'inondation », thèse de doct., Lyon 1, 2011.
- [3] H. TENNEKES et J. L. LUMLEY, *A first course in turbulence*. MIT press, 1972.
- [4] J. HINZE, « Secondary currents in wall turbulence », *The Physics of Fluids*, t. 10, n° 9, S122–S125, 1967.
- [5] I. NEZU, « Experimental study on secondary currents in open-channel flow », in *21st Congress of IAHR, Melbourne, Australia*, t. 2, 1985, p. 114–119.
- [6] O. THUAL, *Hydrodynamique de l'environnement*. Ecole polytechnique, 2010.
- [7] H. BONAKDARI, F. LARRARTE, L. LASSABATERE et C. JOANNIS, « Turbulent velocity profile in fully-developed open channel flows », *Environmental Fluid Mechanics*, t. 8, n° 1, p. 1–17, 2008.
- [8] E. FLORENS, « Couche limite turbulente dans les écoulements à surface libre : étude expérimentale d'effets de macro-rugosités », thèse de doct., Université de Toulouse, Université Toulouse III-Paul Sabatier, 2010.
- [9] J. VAZQUEZ, *Systemes hydrauliques urbains*.
- [10] R. H. FRENCH, *Open-channel hydraulics*. McGraw-Hill New York, 1985.
- [11] H. CHANSON, *The hydraulics of open channel flow : an introduction. physical modelling of hydraulics*. Butterworth-Heinemann, 1999.
- [12] P. CHASSAING, *Turbulence en mécanique des fluides : analyse du phénomène en vue de sa modélisation à l'usage de l'ingénieur*, édité par cépadués. 2000, t. 255.