

L'influence des formes urbaines sur l'écoulement d'inondation en milieu urbain : analyse expérimentale et numérique

Auteur : Scheen, Valentin

Promoteur(s) : Dewals, Benjamin; Erpicum, Sebastien

Faculté : Faculté des Sciences appliquées

Diplôme : Master en ingénieur civil des constructions, à finalité spécialisée en "civil engineering"

Année académique : 2020-2021

URI/URL : <http://hdl.handle.net/2268.2/11460>

Avertissement à l'attention des usagers :

Tous les documents placés en accès ouvert sur le site le site MatheO sont protégés par le droit d'auteur. Conformément aux principes énoncés par la "Budapest Open Access Initiative"(BOAI, 2002), l'utilisateur du site peut lire, télécharger, copier, transmettre, imprimer, chercher ou faire un lien vers le texte intégral de ces documents, les disséquer pour les indexer, s'en servir de données pour un logiciel, ou s'en servir à toute autre fin légale (ou prévue par la réglementation relative au droit d'auteur). Toute utilisation du document à des fins commerciales est strictement interdite.

Par ailleurs, l'utilisateur s'engage à respecter les droits moraux de l'auteur, principalement le droit à l'intégrité de l'oeuvre et le droit de paternité et ce dans toute utilisation que l'utilisateur entreprend. Ainsi, à titre d'exemple, lorsqu'il reproduira un document par extrait ou dans son intégralité, l'utilisateur citera de manière complète les sources telles que mentionnées ci-dessus. Toute utilisation non explicitement autorisée ci-avant (telle que par exemple, la modification du document ou son résumé) nécessite l'autorisation préalable et expresse des auteurs ou de leurs ayants droit.



Université de Liège - Faculté des sciences appliquées

**Travail de fin d'études réalisé en vue
de l'obtention du grade de master
"Ingénieur Civil en Construction"**

L'influence des formes urbaines sur
l'écoulement d'inondation en milieu urbain :
analyse expérimentale et numérique

Promoteur : B. DEWALS

Co-promoteur : S. ERPICUM

Composition du jury : P. ARCHAMBEAU, B. DEWALS,
S. ERPICUM et E. MIGNOT

Etudiant : V. SCHEEN

Année académique 2020-2021

Remerciements

Je tiens tout d'abord à exprimer mes remerciements à mon promoteur Prof. B. Dewals ainsi qu'à mon co-promoteur Dr. S. Erpicum de m'avoir donné l'opportunité d'étudier ce sujet très intéressant et de m'avoir dirigé dans mon travail.

Je remercie également Mme X. Li pour son aide très précieuse dans la compréhension et l'utilisation des différents outils employés mais également pour ses remarques constructives en tant que spécialiste du sujet.

J'exprime ma reconnaissance vis-à-vis des membres de l'équipe du Laboratoire d'Hydraulique à savoir M. M. Mathieu, M. G. Thonard pour leur soutien lors de la réalisation de mes expériences.

Enfin, je tiens à remercier mes proches qui m'ont soutenu et encouragé tout au long de la réalisation de ce travail.

Résumé

Ce travail a été mené dans le cadre de l'étude des écoulements d'inondation en milieu urbain et plus particulièrement de l'influence des formes urbaines sur ces écoulements. Les enjeux liés aux événements d'inondations urbaines sont grandissants et des données de validation des modèles numériques sont essentielles.

La littérature existante se focalise principalement sur l'influence des formes urbaines à l'échelle de quartiers entiers. En revanche, la caractérisation des phénomènes d'écoulement à l'échelle d'un nombre limité de rues et d'intersections est pauvre. Ce travail consiste donc à produire et à analyser des données numériques et expérimentales dans le but de caractériser l'influence d'un paramètre des formes urbaines, dans la lignée de Li et al., 2021.

La particularité des formes étudiées dans ce travail est la présence d'un espace libre, sans bâtiment dont la position varie d'une configuration à l'autre. L'objectif est d'analyser l'influence de cette caractéristique urbaine sur différentes variables d'écoulements comme les hauteurs d'eau en amont, la répartition du débit en sortie et les champs de vitesse. Les trois configurations étudiées ont fait l'objet de simulations numériques dans trois scénarios d'écoulement et ont également été testées en laboratoire pour deux des scénarios d'écoulement simulés numériquement.

Les données expérimentales ont permis de valider les résultats moyens des hauteurs d'eau en amont, des répartitions de débit en sortie ainsi que des champs de vitesse calculés par le modèle numérique. Les valeurs moyennes des variables d'écoulement indiquent clairement que la présence d'un espace libre au début du domaine étudié engendre des hauteurs d'eau plus importantes en amont. D'un autre côté, le positionnement amont de l'espace libre permet une répartition de débit plus équitable entre les sorties. L'inverse est observé lorsque l'espace libre se situe plus en aval.

L'étude temporelle des variables d'écoulement a révélé que le modèle numérique ne prédit pas de manière fiable le comportement oscillatoire de l'écoulement. Ce comportement est observé et caractérisé dans chaque configuration pour les deux scénarios d'écoulement lors des essais expérimentaux. Par contre, le modèle numérique prédit ce comportement uniquement dans certaines combinaisons "configuration-scénario d'écoulement". Par conséquent, des recherches supplémentaires sont nécessaires afin de déterminer si une amélioration du modèle numérique est requise pour pallier cette lacune ou si d'autres paramètres du modèle numérique influence la simulation du comportement oscillatoire.

Abstract

This work was carried out within the framework of the study of flood flows in urban areas and more precisely the influence of urban forms on these flows. The challenges related to urban flooding events are increasing and validation data for numerical models are necessary.

The existing literature focuses mainly on the influence of urban form at the scale of entire district. On the other hand, the characterisation of flow phenomena at the scale of a limited number of streets and intersections is poor. This work therefore consists in producing and analysing numerical and experimental data with the aim of characterising the influence of a parameter of urban forms, in the line of LI et al., 2021.

The particularity of the urban forms studied in this work is the presence of an open space, without building, whose position varies from one configuration to another. The objective is to analyse the influence of this urban characterisitc on different flow variables such as upstream water depths, outlet flow distributions and velocity fields. The three configurations studied were numerically simulated in three flow scenarios and were also tested in the laboratory for two of the numerically simulatyed flow scenarios.

The experimental data validated the average results of the upstream water depths, the outlet flow distributions and the velocity fields calculated by the model. The mean values of the flow variables clearly indicate that the presence of a free space at the beginning of the study area results in higher upstream water depths. On the other hand, the upstream positioning of the open space allows a more equitable distribution of the flow between the outlets. The opposite is observed when the open space is located further downstream.

The temporal study of the flow variables revealed that the numerical model does not reliably predict the oscillatory behaviour of the flow. This behaviour is observed and characterised in each configuration for both experimentally tested flow scenarios. However, the numerical model predicts this behaviour only in certain "configuration-flow scenario" combinations. Therefore, furhter investigation is required to determine if an improvement of the numerical model is necessary to overcome this shortcoming or if some other parameters play a role in the simulation of the oscillatory behaviour of the flow.

Table des matières

1	Introduction	1
1	Mise en contexte	1
2	Etat de l'art	2
2.1	Données de terrain	2
2.2	Données expérimentales	3
2.3	Distorsion géométrique	4
2.4	Etudes des formes urbaines	5
3	Objectifs	6
2	Méthodologie	7
1	Nouvelles configurations urbaines	7
1.1	Caractéristiques urbaines	7
1.2	Configurations imaginées	8
1.3	Configurations retenues	11
2	Modèle numérique	13
2.1	Maillage	13
2.2	Limiteur de viscosité	14
2.3	Paramètres de frottement	14
2.4	Schéma d'intégration temporelle	14
2.5	Nombre de Courant	14
3	Modèle physique	15
3.1	Description du modèle	15
3.2	Techniques de mesures	15
4	Echelle horizontale, échelle verticale et distorsion	18
5	Scénarios d'écoulement	21
5.1	Nombre de Froude	21
5.2	Conditions limites	21

3	Résultats des simulations numériques	23
1	Hauteurs d'eau en entrée	24
2	Répartition du débit en sortie	27
3	Oscillations de la hauteur d'eau aux entrées	29
4	Oscillations de l'écoulement aux sorties	30
5	Sources des différences	31
5.1	Etude des hauteurs d'eau locales et des valeurs locales du nombre de Froude	31
5.2	Bilan de puissance	32
6	Vitesses d'écoulement	35
7	Conclusion	39
4	Résultats expérimentaux et validation du modèle numérique	40
1	Hauteurs d'eau en entrée	40
2	Répartition de débit	44
3	Etude des variations temporelles des hauteurs d'eau	48
3.1	Entrées	48
3.2	Sorties	51
3.3	Conclusion	53
4	Comparaison des champs de vitesses	54
4.1	Scénario d'écoulement <i>lent</i>	54
4.2	Scénario d'écoulement <i>modéré</i>	56
4.3	Fonction de distribution cumulative	58
4.4	Conclusion	59
5	Comportement oscillatoire des vitesses de surface	60
5.1	Ecart-types des vitesses de surface	60
5.2	Exemples de vitesses de surface moyennées sur une demi-période	64
5.3	Conclusion	69
6	Différences des conditions limites	70
6.1	Hauteurs d'eau en entrée	70
6.2	Répartition de débit	71
6.3	Variations temporelles des hauteurs d'eau	71
6.4	Ecart-types des vitesses moyennées sur la hauteur d'eau	74
6.5	Conclusion	74
7	Conclusion	75
5	Discussion des résultats	77
1	Influence des formes urbaines	77
2	Formation des oscillations	78
3	Analyse LSPIV	78

6	Conclusions	82
	Bibliographie	85
	Annexes	89
1	Nouvelles configurations urbaines	89
1.1	Configurations imaginées	89
2	Déroulement des simulations numériques	96
3	Configurations simples	97
4	Résultats numériques	98
4.1	Oscillations des hauteurs d'eau en entrée	98
4.2	Oscillations des débits sortants	99
4.3	Sources des différences	100
4.4	Vitesses d'écoulement	103
5	Comparaisons des résultats numériques et des résultats expérimentaux	104
5.1	Hauteurs d'eau en entrée	104
5.2	Répartition de débit	104
5.3	Comparaison des champs de vitesses	105
6	Simulations numériques avec CL expérimentales	106
6.1	Hauteurs d'eau en entrée	106
6.2	Répartition de débit	106
6.3	Variations temporelles des hauteurs d'eau	107
7	Discussion	108
7.1	Analyse LSPIV	108
8	Mode d'emploi du modèle physique - Model instruction manual	112

Chapitre 1

Introduction

1 Mise en contexte

Une des principales préoccupations mondiales à ce jour est le changement climatique. Une des conséquences du dérèglement climatique est l'accroissement des catastrophes naturelles, tant au niveau de leur fréquence d'apparition qu'au niveau de leur ampleur. Les inondations représentent le type de catastrophes naturelles le plus fréquent. Le phénomène d'urbanisation est un paramètre important du problème puisqu'il engendre la création de routes, trottoirs et autres surfaces imperméables. L'infiltration d'eau dans le sol est alors nulle ou fortement réduite. Le phénomène d'urbanisation, en perpétuelle croissance, rend le risque lié aux inondations particulièrement élevé (Chen et al., 2015 ; National Academies of Sciences Engineering and Medicine, 2019). Par conséquent, la gestion du risque d'inondations est devenu une priorité pour les gouvernements surtout en milieu urbain (Fang, 2016) ainsi que l'amélioration de la résilience aux inondations (Liu et al., 2018 ; Zhou et al., 2018).

Dans ce but, des outils numériques sont développés afin de prévoir, prédire les risques. Ces prédictions sont ensuite utilisées afin d'élaborer des mesures d'atténuation des conséquences et du risque ainsi que d'augmenter la résilience (Demonceau et Dewals , 2020). Il est dès lors essentiel de s'assurer que les résultats fournis par le(s) modèle(s) numérique(s) sont fiables. En effet, des vies humaines, des biens matériels et des aspects sociaux sont en jeu mais également des montants économiques importants. Certes le modèle ne doit pas sous-estimer les caractéristiques des écoulements afin que les mesures appliquées soient efficaces. D'un autre côté, il ne faut pas que le modèle sur-estime de manière trop importante ces caractéristiques sinon des mesures d'atténuation trop fortes par rapport au risque réel seraient mises en place. En conséquence, des sommes d'argent plus importantes que nécessaires seraient dépensées, situation à éviter car cet argent pourrait être utilisé de façon plus judicieuse à d'autres endroits.

Afin de valider les modèles numériques, des données de terrain ou d'essais expérimentaux sont nécessaires. Ces données doivent bien évidemment être issues de conditions d'écoulement identiques ou tout du moins similaires à celles simulées par le modèle numérique. Les modèles numériques dans le milieu des écoulements d'inondation ne cessent d'évoluer et le besoin en données expérimentales de validation croît.

Ce travail consiste à déterminer l'influence d'un nombre limité de configurations urbaines sur les variables d'écoulements d'inondation. La stratégie employée consiste à réaliser des simulations numériques afin de prédire les valeurs des variables d'écoulement. Ensuite, les configurations urbaines sont testées expérimentalement sur un modèle physique afin d'obtenir des données de référence. Ces mesures expérimentales serviront à valider le modèle numérique et ainsi à tirer des conclusions sur les écoulements observés.

La première étape du travail présente l'état actuel de l'étude des écoulements d'inondation ainsi que les objectifs de ce travail. Le chapitre sur la méthodologie introduit le modèle physique et le modèle numérique. C'est également dans ce chapitre que les paramètres principaux sont décrits ainsi que les paramètres de simulations numériques. Le processus de sélection des configurations urbaines étudiées est également détaillé dans ce chapitre. Les résultats numériques sont présentés et analysés dans le troisième chapitre. Ensuite, les résultats expérimentaux sont exposés et comparés avec les résultats numériques afin de valider le modèle numérique. La validation du modèle numérique est suivie par une discussion des résultats qui permettra de dégager l'influence des configurations urbaines étudiées. Enfin, les conclusions sont résumées dans le dernier chapitre ainsi que les limitations et perspectives liées à ce travail.

2 Etat de l'art

2.1 Données de terrain

Le développement de nouveaux modèles numériques et l'amélioration des modèles existants sont nécessaires afin de réduire le risque mais il est essentiel de valider les modèles numériques et les résultats qu'ils fournissent. Pour ce faire, des données réelles des caractéristiques des écoulements d'inondation sont requises. Le modèle numérique est validé en comparant les résultats obtenus avec les données de terrains récoltées. Cependant, les données de terrains sont compliquées à obtenir et résultent souvent d'observations tirées après l'événement. Elles comportent généralement des mesures du niveau d'eau observé sur des bâtiments (Li et al., 2019), parfois des mesures de vitesse ponctuelles (Brown et Chanson, 2012 ; Brown et Chanson, 2013). Ces données sont assez rares et lorsqu'elles sont disponibles, leur faible répartition, leur résolution spatio-temporelle ne permet pas de valider le modèle (Leitão et al., 2018). Il est dès lors impossible de déterminer les principales caractéristiques des écoulements d'inondation comme l'instant du pic de débit et du pic de hauteur d'eau (Li et al., 2020). De nouvelles méthodes apparaissent pour obtenir des données de terrains comme l'usage des vidéos des caméras routières ou de surveillance (Macchione et al., 2019 ; Moy de Vitry et al., 2017) ou l'usage de drones (Perks et al., 2016). L'emploi d'appareils de mesures conventionnels fixes n'est pas recommandé car ceux-ci ne posséderaient pas une durée de vie très importante au vu du risque de vandalisme et des coûts d'entretien qu'ils exigeraient (Leitão et al., 2018). De plus, les conditions limites d'un événement ainsi que la distribution de vitesse sur la hauteur d'eau sont inconnues ou du moins entachées de grosses incertitudes (Li et al., 2020).

2.2 Données expérimentales

Dès lors, un autre moyen pour obtenir des données de validation était nécessaire et la solution est venue des essais expérimentaux réalisés en laboratoire. Les essais réalisés en laboratoire sur les écoulements d'inondations fournissent des résultats fiables à condition d'employer les paramètres appropriés comme la mise à l'échelle et les conditions d'écoulement (Mignot et al., 2019). Les modèles physiques en laboratoire permettent de réaliser un grand nombre d'expériences et donc de récolter un grand nombre de résultats, de mesures dans des délais relativement courts, dans des conditions d'écoulement connues et de manière plus aisée que les mesures de terrain. Ces modèles sont des répliques à plus petite échelle (appelé *modèle*) du site étudié (appelé *prototype*). Le rapport entre la longueur caractéristique du prototype (L_P) et la longueur caractéristique équivalente à l'échelle du modèle (L_m) définit le facteur d'échelle ("Scale factor" S_F) (Novak, 1984) : $S_F = \frac{L_P}{L_m}$

La réalisation de modèle physique se base sur la théorie de la similitude afin que certaines caractéristiques du prototype soient conservées à l'échelle du modèle. Concernant les écoulements à surface libre, c'est la similitude de Froude qui est respectée. Le respect de cette dernière assure que le rapport des forces d'inertie par rapport aux forces de gravité est conservé. Dès lors, la similitude de Reynolds, rapport des forces d'inertie par rapport aux forces visqueuses, n'est pas respectée, engendrant des "effets d'échelle" qui entachent les résultats expérimentaux. Une manière de limiter ces effets d'échelle est de conserver un nombre de Reynolds suffisamment élevé à l'échelle du prototype et du modèle (Li et al., 2019).

Un des avantages majeurs des modèles physiques est la quantité de mesures réalisables. En effet, un plus grand nombre de caractéristiques d'écoulement sont mesurables comme les hauteurs d'eau et les débits mais également les répartition de débits entre les rues ainsi que les champs de vitesses 2D et 3D. Mignot et al. (2019) a d'ailleurs regroupé les essais expérimentaux en fonction des types d'écoulement étudiés : l'écoulement à des intersections de rues (e.g. Créëlle et al., 2018 ; Mignot et al., 2013 ; Rivière et al., 2011), les échanges entre le réseau d'égouttage et les écoulements de surface (e.g. Lopes et al., 2017 ; Martins et al., 2017 ; Rubinato et al., 2017), les écoulements à travers des obstacles, des bâtiments (e.g. Testa et al., 2007 ; Velickovic et al., 2017) et l'écoulement à travers des quartiers urbains réalistes (e.g. Finaud-Guyot et al., 2018 ; Güney et al., 2014 ; Smith et al., 2016).

D'autres caractéristiques de ces essais sont également reprises dans Mignot et al. (2019) telles que l'origine de l'inondation, le type de données récoltées, le nombre de configurations testées, les dimensions du modèle physique et le facteur d'échelle. Les dimensions des modèles et les facteurs d'échelles sont très variés. Des modèles très grands ont été réalisés (jusqu'à 45 m de long pour Tomiczek et al. (2016) avec un facteur d'échelle de 1/20) comme des très petits (0,6 m pour Lopes et al. (2017) ; Romagnoli et al. (2013) avec un facteur d'échelle de 1). Concernant l'origine de l'inondation, cinq causes sont référencées à savoir le ruissellement provenant de l'amont, le débordement de rivière, le débordement du réseau d'égouttage, la pluie directe et les tsunamis. Les types de données récoltées ont déjà été mentionnés. Il a toutefois été remarqué que la nature des données récoltées dépend de l'échelle du modèle physique. En effet, pour les modèles locaux, dont le facteur d'échelle est grand, des données plus précises sont obtenues comme les champs de vitesse 3D. En revanche, pour les modèles représentatifs de plus grandes zones, seul le débit est déterminé, couplé à des mesures ponctuelles de hauteur d'eau et du champ de vitesse (Mignot et al., 2019). Dans la même idée, le nombre de configurations testées dépend fortement de l'échelle du modèle. Effectivement, il a été observé que dans les modèles locaux un faible nombre de configurations est testé tandis qu'un grand nombre de configurations est expérimenté sur les modèles avec un plus grand facteur d'échelle (Mignot et al., 2019). Ceci est lié aux nombres et aux types de mesures réalisées pour chaque configuration.

2.3 Distorsion géométrique

Lors d'inondations en milieu urbain, les échelles horizontales et verticales sont très différentes. En effet, les dimensions d'un quartier urbain sont de l'ordre de 10^2 à 10^4 m tandis que les hauteurs d'eau observées sont de l'ordre de 10^{-2} à 1 m (Li et al., 2019). Dès lors, employer un même facteur d'échelle pour la mise à l'échelle horizontale et la mise à l'échelle verticale n'est pas adéquat. Le facteur d'échelle employé sera très grand afin d'obtenir un modèle suffisamment petit pour rentrer dans un laboratoire. En conséquence, les hauteurs d'eau à l'échelle du modèle seront très faibles, de l'ordre du millimètre. De très faibles hauteurs d'eau engendrent des difficultés de mesures puisque les sondes et autres appareils de mesures possèdent des tolérances qui sont souvent proches du millimètre. Des plus, des effets visqueux et de capillarité indésirables apparaîtront (Ishigaki et al., 2003).

Une solution à ce problème est l'emploi de facteurs d'échelle horizontale et verticale différents. Cette différence entre l'échelle horizontale et l'échelle verticale engendre une distorsion géométrique du modèle. La distorsion est caractérisée par le rapport des deux échelles :

$$d = \frac{\text{échelle horizontale}}{\text{échelle verticale}} \quad (1.1)$$

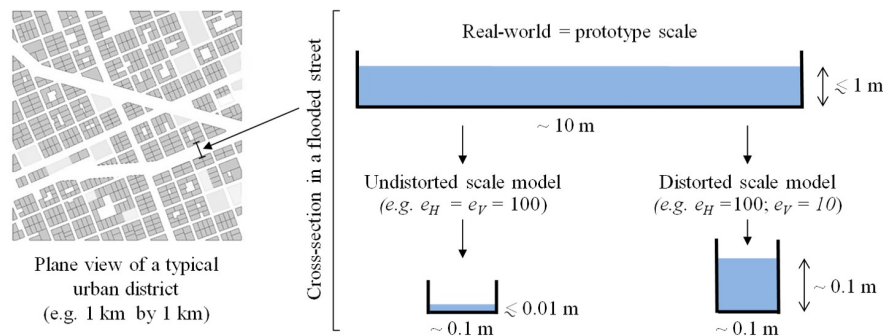


FIGURE 1.1 – Principe de distorsion géométrique Li et al., 2021b.

La distorsion géométrique a pour but d'améliorer la précision et la représentativité des mesures effectuées (Arndt et al., 2000; Li et al., 2019). En effet, cette technique devrait réduire les imprécisions de mesures et permettre de conserver un nombre de Reynolds suffisamment haut afin de négliger les effets visqueux. Il est d'ailleurs possible de respecter la similitude de Froude et la similitude de Reynolds (Finaud-Guyot et al., 2018).

La distorsion géométrique de modèles physiques a déjà été employée pour des modèles en milieu urbain comme Finaud-Guyot et al. (2018), Güney et al. (2014) ou encore Smith et al. (2016). Cependant, ces études ne caractérisent pas les effets de la distorsion géométrique du modèle. Li et al. (2019) et Li et al. (2020) sont les deux premières études entièrement dédiées aux effets de la distorsion géométrique de modèles d'inondations urbaines.

2.4 Etudes des formes urbaines

Les inondations urbaines sont un phénomène qui a été étudié de manière intense ces dernières années (e. g. Mignot et al., 2019 ; Tesema et Abebe, 2020). Cependant, le nombre d'analyses caractérisant l'influence des arrangements urbains sur les inondations reste limité. Une liste des études numériques et expérimentales menées sur les impacts des configurations urbaines a été rédigée par Li et al. (2021a). Chaque étude vise à analyser, comprendre et parfois quantifier les impacts d'un ou plusieurs paramètres des formes urbaines sur les variables d'écoulement.

Le principal paramètre étudié est la densité de bâtiments. Des études numériques (Bruwier et al., 2018 ; Bruwier et al., 2020) et/ou expérimentales (e.g. Cea et al., 2010) ont été réalisées. D'autres paramètres ont fait l'objet d'analyses numériques et expérimentales comme l'orientation des rues et des bâtiments (e.g. Soares-Frazão et Zech, 2008 ; Velickovic et al., 2017), la largeur des rues (e.g. Velickovic et al., 2017 ; Li et al., 2021a) ou encore la position des bâtiments (alignés ou éparpillés) (Testa et al., 2007 ; Cea et al., 2010 ; Isidoro et al., 2013).

Les effets des changements de paramètres opérés sont généralement quantifiés pour les hauteurs d'eau en amont du quartier, indiquant ainsi l'effet de blocage, de rétention que la forme urbaine engendre. En revanche, le champ de vitesse et la répartition du débit ne sont pas toujours déterminés (Li et al., 2021a). Différentes origines d'inondation ont été étudiées comme le débordement de rivière, le ruissellement provenant de l'amont, une rupture de barrage, un tsunami ou simplement la pluie directement sur le domaine étudié.

Il est également important de noter que les études uniquement numériques permettent d'étudier un très grand nombre de configurations urbaines comme Bruwier et al. (2018) qui ont analysé 2000 configurations. En revanche, les études expérimentales étudient un nombre limité de configurations à cause du temps nécessaire pour réaliser les essais en laboratoire. Par conséquent, les conclusions tirées restent limitées (Li et al., 2021a).

L'influence de l'orientation des rues sur les hauteurs d'eau a été étudiée par Velickovic et al. (2017) grâce à un modèle expérimental. Cinq configurations pour lesquelles la direction des rues par rapport à la direction principale de l'écoulement entrant varie ont été testées. Dans la même idée, Testa et al. (2007) ont mesuré les hauteurs d'eau à des endroits précis pour des configurations de blocs alignés ou éparpillés. Cea et al. (2010) et Isidoro et al. (2013) se sont focalisés sur les inondations pluviales en milieu urbain. Les premiers avaient pour objectif de valider deux modèles numériques 2D prédisant le phénomène de précipitation-ruissellement en milieu urbain. Pour ce faire, huit configurations ont été testées en laboratoire afin de mesurer l'hydrogramme en sortie du domaine. Isidoro et al. (2013) ont étudié la connectivité des toits et leur influence sur l'évolution temporelle des débits.

Ces études indiquent que l'influence des paramètres des configurations urbaines sur les variables d'écoulement varient fortement en fonction des configurations étudiées et du type d'inondations simulé. Ces études caractérisent les effets des variations des configurations urbaines à l'échelle d'un quartier urbain entier. Cependant, les caractéristiques d'écoulement observées et mesurées à cette échelle sont dans certains cas trop complexes. C'est notamment le cas pour Bruwier et al. (2018) qui n'ont pas pu interpréter physiquement les phénomènes d'écoulement. Des études à plus petite échelle, sur un nombre plus restreint de bâtiments et de rues sont nécessaires afin de pouvoir interpréter la physique des écoulements en milieu urbain avec précision. Le travail de Li et al. (2021a) s'est dès lors concentré sur l'analyse de 19 configurations urbaines se limitant à quatre rues principales et un nombre de paramètres géométriques plus restreint. Plus précisément, quatre paramètres ont été étudiés à savoir la porosité de transport dans les deux directions principales et le nombre de rues dans ces deux directions. La géométrie du modèle est un peu particulière puisqu'elle favorise l'écoulement dans une des deux directions. Les hauteurs d'eau, la répartition de débit et le champ de vitesse ont été analysés numériquement et

expérimentalement. L'étude a été réalisée en conditions stationnaires suggérant que l'inondation urbaine est issue d'un débordement de rivière ou de ruissellement de l'amont. Il ressort que la porosité de transport dans la direction d'écoulement principale possède une influence largement supérieure à celle des autres paramètres. Les mesures auront par ailleurs permis de valider le modèle numérique employé pour estimer les variables étudiées.

3 Objectifs

Ce travail combine des analyses numériques et des analyses expérimentales afin de mieux comprendre les écoulements d'inondation en zone fortement urbanisée.

Ce travail s'inscrit dans le cadre du mémoire de Li X. qui a étudié les effets de la distorsion sur les écoulements d'inondation en milieu urbain ainsi que la caractérisation des formes urbaines sur les écoulements d'inondation. Cette étude vise donc à apporter un supplément de données de validation pour les modèles numériques et à caractériser l'influence de la présence d'un espace libre ("open-space") dans les formes urbaines sur base de trois configurations différentes. Ces trois configurations seront étudiées en conditions stationnaires typiquement rencontrées lors d'un événement d'inondation urbaine d'origine fluviale.

Les objectifs sont dès lors la réalisation des simulations numériques en deux dimensions, des essais expérimentaux en laboratoire de manière autonome ainsi que la récolte et l'analyse des résultats. Les simulations numériques sont réalisées pour trois scénarios d'écoulement alors que le modèle physique permet la réalisation des essais uniquement pour deux d'entre eux. Parmi les résultats souhaités figurent les hauteurs d'eau aux bornes du domaine d'écoulement, les répartitions de débits ainsi que les champs de vitesse 2D en surface. Les champs de vitesse sont étudiés à l'aide d'une technique appelée "Large Scale Particle Image Velocimetry" (*LSPIV*), plus précisément à l'aide du logiciel de traitement d'image FUDAA-LSPIV. Ces résultats permettront de tirer des conclusions sur l'influence des formes urbaines étudiées. L'influence sur les hauteurs d'eau en amont ainsi que sur la répartition du débit sont caractérisées ainsi que le comportement oscillatoire de l'écoulement.

Le chapitre 2 présente la méthodologie suivie. Le troisième chapitre expose les résultats numériques tandis que les résultats expérimentaux et la validation du modèle numérique sont présentées dans le quatrième chapitre. Les discussions sont menées dans le chapitre 5 et les conclusions sont adressées dans le chapitre 6.

Chapitre 2

Méthodologie

Premièrement, le choix des nouvelles configurations a été réalisé. Ensuite, les nouvelles configurations urbaines retenues ont fait l'objet de simulations numériques et ont été testées dans le modèle physique du laboratoire. Il a été décidé de simuler ces configurations numériquement afin de déterminer si elles présentaient un réel intérêt, comme espéré lors de leur choix. Les résultats numériques et les résultats expérimentaux seront comparés afin de déterminer si les prédictions numériques sont fiables. Enfin, les résultats sont interprétés et des conclusions sont tirées.

1 Nouvelles configurations urbaines

La toute première étape de mon travail consistait à imaginer de "nouvelles" formes urbaines. Nous entendons par "nouvelles", des agencements de blocs urbains qui n'ont pas encore été testés numériquement ni expérimentalement. Le but est d'imaginer, de trouver des configurations urbaines qui présenteraient des résultats différents des formes urbaines étudiées par Li et al. (2021a) afin d'alimenter l'étude des écoulements d'inondation en milieu urbain.

Ces configurations urbaines doivent toutefois être représentatives de la réalité. Mahbub (2017a) étudie en détails les formes urbaines d'un grand nombre de villes dans le monde avec différents outils. Les cartes des rues ainsi que les cartes des blocs urbains des villes sont notamment employées et une zone représentative, souvent le centre de la ville, est reprise dans son ouvrage. Ces cartes ont été une source d'inspiration pour les configurations imaginées.

1.1 Caractéristiques urbaines

Mahbub (2017a) définit trois types principaux de réseaux de rues. Chacun des trois types de réseaux de rues est illustré par un exemple représentatif à la figure 2.1. Le premier est constitué de rues continues et rectilignes. Ces réseaux de rues sont souvent constitués de rues parallèles et perpendiculaires les unes aux autres, formant ainsi un damier régulier (figure 2.1a). Un deuxième type de réseaux également constitué de rues rectilignes trace en damier discontinu (figure 2.1b). Contrairement au premier type, les rues ne sont pas continues de bout en bout. Elles s'arrêtent et forment des carrefours en "T" ou en "L" lorsqu'elles se croisent. Viennent ensuite les réseaux de rues non-rectilignes, présentant des courbes (figure 2.1c). Les culs-de sacs sont une caractéristique commune du deuxième et du troisième types de réseaux de rues.



(a) Buenos Aires (Argentine).

(b) Bangkok (Thaïlande).

(c) Algiers (Algérie).

FIGURE 2.1 – Exemples de réseaux de rues (tirés de Mahbub (2017b)).

Les caractéristiques des blocs urbains sont également étudiées par Mahbub (2017a). Il en ressort que les caractéristiques des blocs varient en fonction des villes mais également de l'emplacement des blocs au sein des villes et évoluent avec le temps. Par exemple, les blocs des centres-villes, souvent très denses, ont tendance à former des réseaux de circulation similaires malgré leurs différences en formes et en tailles. Dans les nouvelles périphéries urbaines, les blocs sont plus hétérogènes et plus grands qu'au centre-ville. Enfin, les "open spaces" sont non négligeables et engendrent des impacts divers.

1.2 Configurations imaginées

Les cartes et les observations mentionnées ont permis l'élaboration de huit séries de nouvelles formes urbaines. Pour chacune de ces séries, un exemple est présenté et les autres sont repris à l'annexe 1.1 excepté pour les configurations retenues qui sont présentées à la section suivante.

Notons que trois types de blocs sont disponibles au laboratoire (figure 2.2). Ces trois tailles de blocs sont celles employées par Li et al. (2021a). Il était dès lors plus intéressant d'élaborer des configurations en employant ces trois tailles de blocs afin de faciliter les essais expérimentaux.

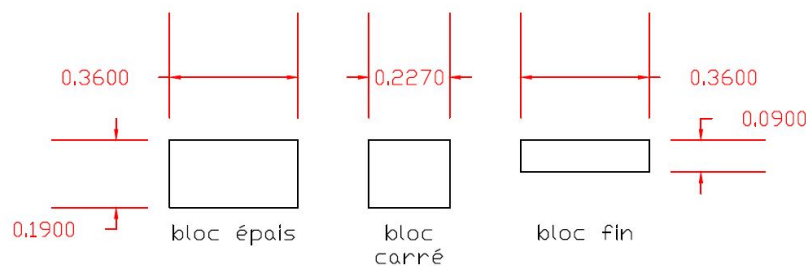


FIGURE 2.2 – Différents blocs disponibles.

La première série de configurations imaginées est principalement constituée des blocs épais. Ceux-ci sont disposés afin de créer un réseau de ruelles discontinues. Pour ce faire, certains blocs sont perpendiculaires aux autres. Nous remarquons sur la figure 2.3 que le bloc au centre

coupe la ruelle horizontale en deux. Trois autres configurations reprenant la même idée sont illustrées à la figure 6.1 (annexe 1.1).

La deuxième série caractérise toujours la même idée de réseau de rues discontinu mais en mettant en oeuvre les blocs fins et les blocs carrés. Nous avons dès lors une ruelle principale très large qui est coupée à une ou plusieurs reprises par un bloc carré. La première configuration de cette série est reprise à la figure 2.4.

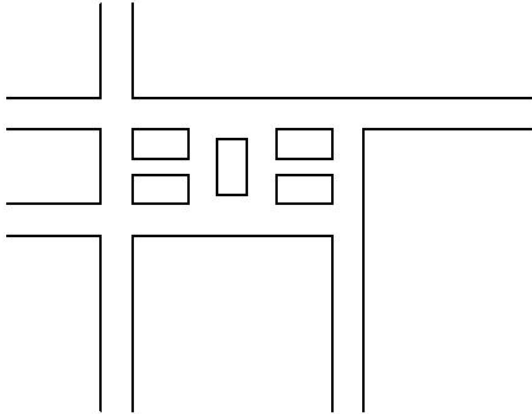


FIGURE 2.3 – Configuration 1 a).

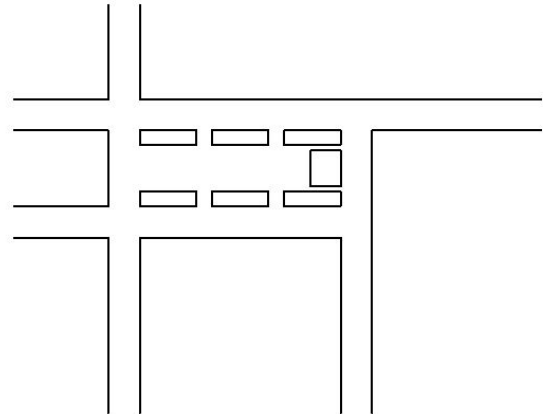


FIGURE 2.4 – Configuration 2 a).

La troisième série de configurations consiste à placer les blocs de manière à former un triangle. Les blocs utilisés sont majoritairement les blocs fins. La figure 2.5 reprend la première configuration de la série.

La série 4 a été imaginée dans la même optique. Cependant, au lieu de placer les blocs de manière à former un triangle, deux blocs de forme triangulaire ont été imaginés. Plusieurs combinaisons avec les autres blocs ont alors été dessinées. Leurs différences résultent principalement de la position et de l'orientation des blocs triangulaires. La première combinaison est reprise à la figure 2.6.

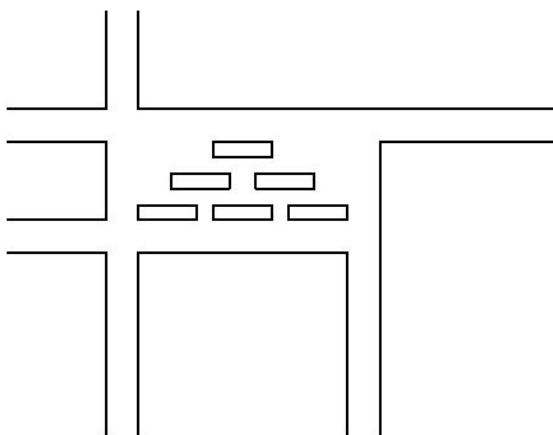


FIGURE 2.5 – Configuration 3 a).

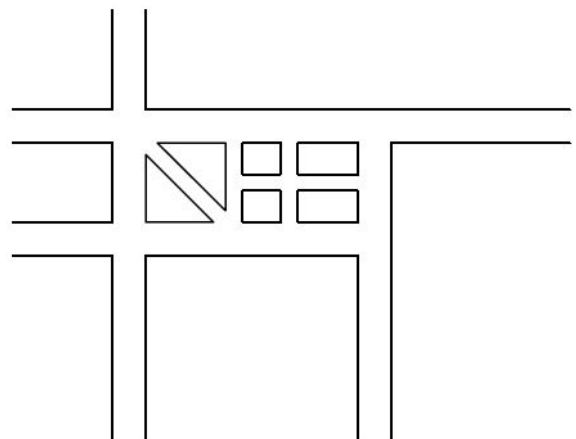


FIGURE 2.6 – Configuration 4 a).

La série numéro 5 est constituée de configurations employant les blocs fins et les blocs épais. Ces blocs sont placés de manière à varier le nombre de ruelles horizontales ou la largeur de la ruelle horizontale. La figure 2.7 illustre la première configuration de cette série.

Les configurations de la sixième série sont munies de blocs inclinés comme illustré à la figure 2.8. Les blocs ne sont donc plus disposés parallèlement ou perpendiculairement aux entrées et aux sorties. Les différentes configurations possèdent différents types de blocs ou un nombre différent de blocs. L'inclinaison des blocs est également un degré de liberté qui a été exploré avec des angles par rapport à l'horizontale de 30, 45 et 60 degrés.

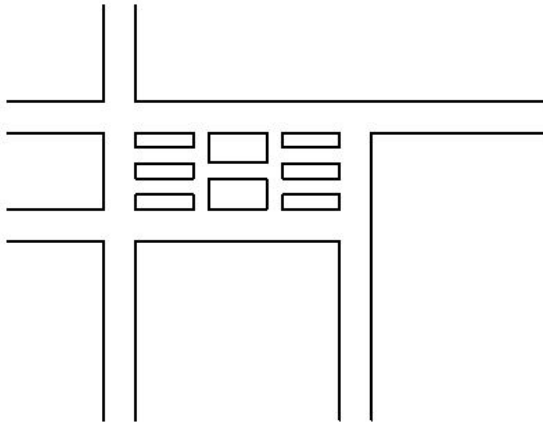


FIGURE 2.7 – Configuration 5 a).

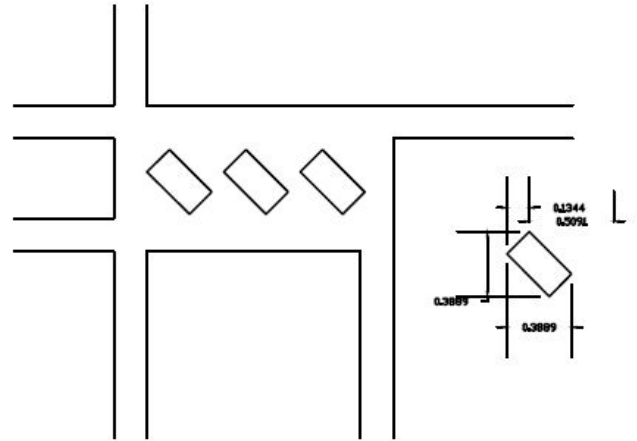


FIGURE 2.8 – Configuration 6 a).

La série 7 est constituée de configurations présentant un "open space", une place libre, sans bloc. Ces espaces libres peuvent représenter une petite place publique, un square ou des places de parking. Il est important de mentionner que dans cette étude nous ne tenons pas compte des aménagements urbains ainsi que des potentiels véhicules présents dans les rues. La configuration composée de blocs fins et d'un espace libre au centre est illustrée à la figure 2.9.

Enfin, la huitième série caractérise la présence d'un cul-de-sac. Les différentes configurations montrent les différentes possibilités qui s'offraient à nous avec les blocs dont nous disposions. Un exemple est repris à la figure 2.10.

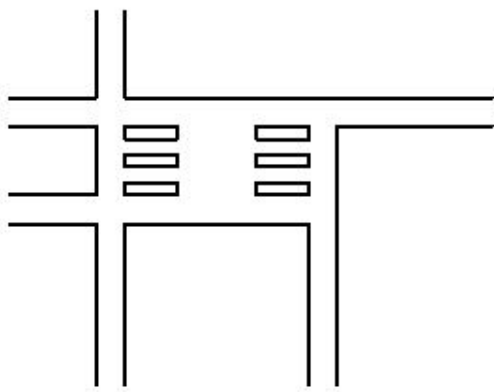


FIGURE 2.9 – Configuration 7 a).

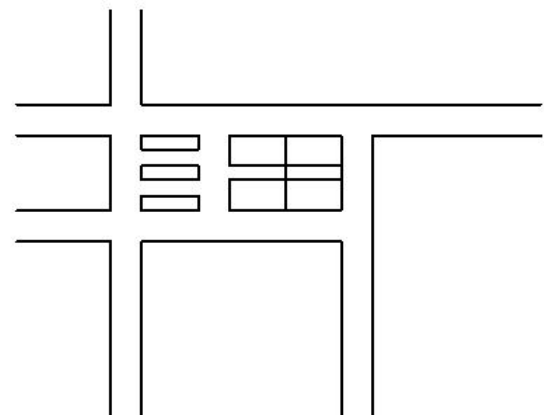


FIGURE 2.10 – Configuration 8 a).

1.3 Configurations retenues

Une première étape de sélection a discerné les séries 6 et 7 comme potentiellement intéressantes. Plusieurs arguments pour ces choix sont avancés. Premièrement, il était essentiel de rester dans des configurations assez simples afin de comprendre les résultats que nous obtiendrions dans le temps imparti. Ensuite, la série 4 nécessitait la réalisation de nouveaux blocs pour les essais expérimentaux et nous ne savions pas si cela serait réalisable dans les temps voulus. Enfin, la présence d'un espace libre a été jugé comme intéressant et représentatif de nombreuses configurations urbaines réelles. Il est certain que les choix des configurations qui sont étudiées dans ce travail sont subjectifs mais ceux-ci ont été réalisés sur base de l'expérience et le jugement de M. B. Dewals ainsi que Mme X. Li.

Finalement, les trois seules configurations retenues sont issues de la septième série, dédiée aux "open spaces", espaces libres. Ce sont précisément les configurations 7g, 7h et 7i qui sont étudiées dans ce travail de fin d'études. Ces trois configurations sont présentées à la figure 2.11. Celles-ci sont constituées des six blocs fins présentés précédemment. Rappelons que ces blocs mesurent 0,36 m de longueur et 0,09 m de largeur pour une hauteur de 0,15 m. L'emploi des blocs fins permet l'organisation des blocs sur trois rangées, une différence supplémentaire par rapport aux configurations étudiées par Li et al. (2021a). Notons que la largeur des rues principales d'écoulement a été conservée à 0,2 m (échelle du modèle).

Dans la configuration 7g, ces blocs fins sont placés en deux colonnes de trois blocs de manière à garder un "open space" au centre. La figure 2.11a illustre cette configuration. La distance verticale entre les blocs est de 0,105 m et la distance entre les deux colonnes de blocs et donc la largeur de l'espace libre est de 0,56 m. Toutes ces valeurs sont à l'échelle du modèle.

Dans la configuration 7h, l'espace libre se situe dans la partie aval de la zone centrale. Les deux colonnes de blocs sont donc placées au début de la zone centrale, comme illustré à la figure 2.11b. L'espacement vertical des blocs est toujours de 0,105 m et l'espacement horizontal entre les deux colonnes est de 0,1 m.

Dans la configuration 7i, l'espace vide est à l'amont comme illustré sur le schéma 2.11c. Les blocs sont placés plus en aval en gardant une largeur de rue de 0,2 m dans le prolongement de la branche de sortie 2. Les espacements des blocs sont identiques à ceux présentés à la configuration 7h, seule la position horizontale des blocs dans la zone centrale différent.

Par conséquent, la seule différence entre les trois configurations étudiées est l'emplacement des blocs autrement dit de l'emplacement de l'espace vide.

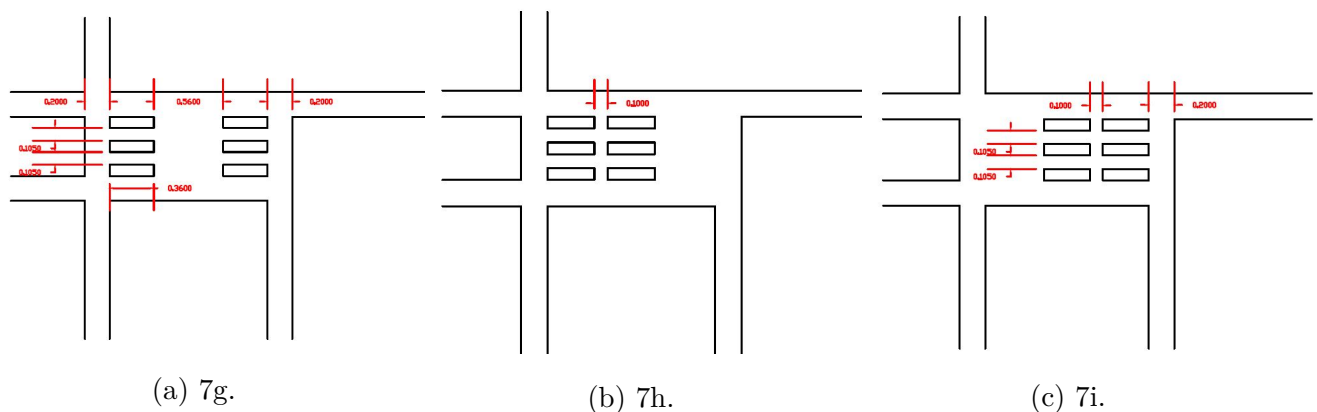


FIGURE 2.11 – Configurations urbaines retenues.

Afin d'améliorer la compréhension dans la suite de ce travail, chaque rue et chaque ruelle formée par les blocs a été nommée. Leur dénomination relate de leur orientation (H pour horizontale et V pour verticale). Les rues horizontales ont ensuite été nommées avec une seconde lettre en référence à l'entrée du domaine qui débute la rue. Le nom des rues verticales contient en chiffre faisant allusion à la sortie de domaine d'écoulement qui termine la rue. Concernant les ruelles, leur nom est dans la continuité des rues possédant la même orientation. Les noms des rues sont reprises sur la figure 2.12. Notons que sur cette figure, 9 blocs sont présents, ceci afin d'illustrer toutes les ruelles formées par les trois configurations urbaines étudiées.

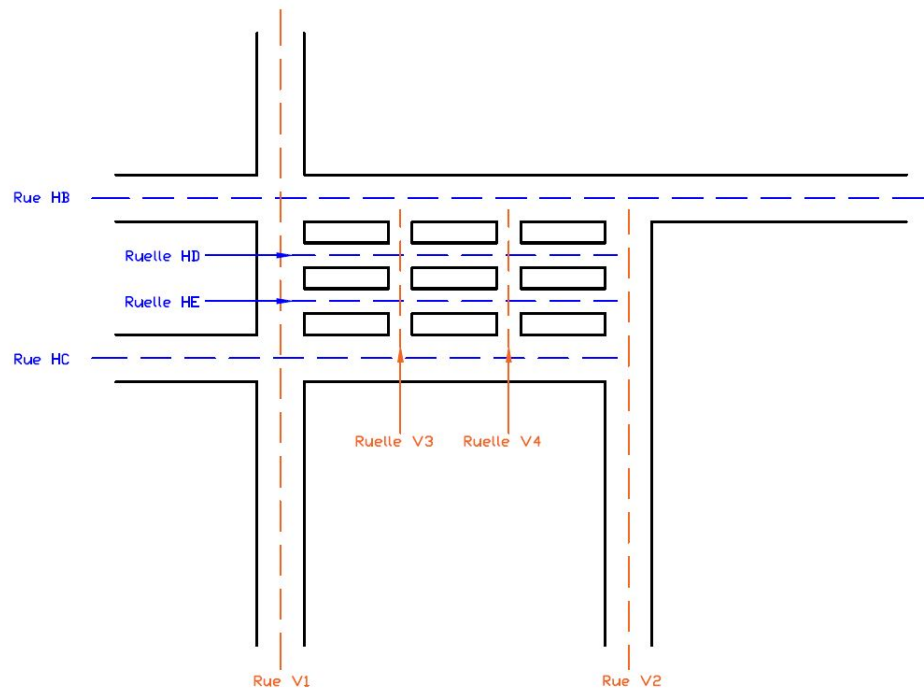


FIGURE 2.12 – Dénomination des rues et ruelles.

2 Modèle numérique

Les simulations numériques ont été réalisées à l'aide du logiciel *WOLF* (Epicum et al., 2009). Ce logiciel, développé par l'Université de Liège, résout les équations de Saint-Venant en 2D mais permet également d'autres types de calculs comme une résolution 1D. Ce logiciel a déjà été employé à de nombreuses reprises afin de simuler les écoulements en milieu urbain (Arrault et al., 2016; Bruwier et al., 2017; Li et al., 2020). Plus d'explications sur les paramètres de simulation sont données dans cette section. Les différentes étapes des simulations numériques sont détaillées à l'annexe 2.

2.1 Maillage

Lors des simulations, le maillage employé possédait des mailles de 5 mm de côté. L'influence de la taille du maillage a été étudiée par Li et al. (2020). L'étude du maillage a mis en évidence que l'emploi de mailles plus fines (Δx de 2 mm) engendrait des résultats similaires concernant les hauteurs d'eau en entrée et la répartition du débit en sortie. La figure 2.13 reprend ces deux types de résultats pour les deux maillages étudiés. Nous observons sur cette figure que la différence de résultats est minime. Les valeurs des hauteurs adimensionnalisées en entrée ainsi que de la répartition du débit en sortie sont reprises au tableau 2.1. Ce tableau contient également les différences entre les valeurs obtenues pour chaque entrée et chaque sortie. Grâce à la figure 2.13 et au tableau 2.1, nous observons effectivement que les résultats obtenus avec les deux maillages sont très proches. Concernant les hauteurs d'eau (adimensionnalisées) en entrée, la différence est inférieure à $3 \cdot 10^{-4}$, soit une erreur relative, calculée selon la hauteur d'eau obtenue avec le maillage de 2 mm, de 0,05% (entrée A). Concernant la répartition du débit, la différence de portion de débit passant par la sortie 1 entre l'emploi des deux maillages est de 0,01%. Pour les sorties 2 et 3, la différence est légèrement supérieure avec respectivement 0,43% et 0,44%.

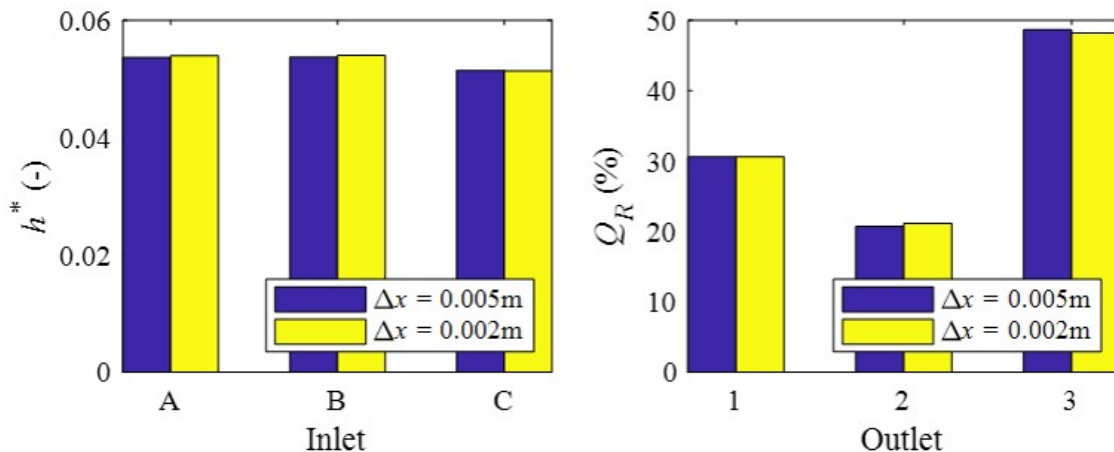


FIGURE 2.13 – Influence du maillage sur les résultats pour la configuration Nx4 (Li et al., 2021a).

	$h^* [-]$			$Q_R [\%]$		
	IN A	IN B	IN C	OUT 1	OUT 2	OUT 3
0,005 m	0,0537	0,0538	0,05147	30,6	20,72	48,67
0,002 m	0,054	0,054	0,05141	30,61	21,15	48,23
Différence	3,00E-04	2,00E-04	6E-05	0,01	0,43	0,44

TABLE 2.1 – Valeurs des hauteurs adimensionnelles aux entrées et de la répartition du débit en sortie pour les deux maillages ainsi que la différence en valeurs absolues pour chaque entrée et chaque sortie.

2.2 Limiteur de viscosité

Le limiteur de viscosité 2D est fixé à 0,01. Il était auparavant fixé à 0,001 mais les résultats de la viscosité turbulente 2D dépassaient 0,002. Ces valeurs étant supérieures à la valeur limite, les simulations mettant en jeu de la turbulence ont dû être recommencées avec une limite plus grande, prise à 0,01 cette fois.

2.3 Paramètres de frottement

Concernant le frottement, la formule de Colebrook-White est employée (Li et al., 2020). Le coefficient de rugosité du fond, k_s , vaut 5×10^{-5} m. Concernant les parois, la case du coefficient "n" pour le frottement latéral est implémentée à 5×10^{-5} m également. Ces valeurs sont très petites car les parois et le fond sont respectivement en PVC et plexiglas. Ces matériaux sont très lisses et n'induisent par conséquent que très peu de frottement.

2.4 Schéma d'intégration temporelle

Le schéma d'intégration temporelle employé est le schéma dit *RK21*. Cette abréviation signifie que c'est une méthode de Runge-Kutta à deux pas mais du premier ordre. Cette méthode est une méthode de discrétisation explicite et recommandée pour l'étude en régime stationnaire. Lorsque des oscillations ont été détectées, il a été nécessaire d'employer un autre schéma d'intégration temporelle. Le schéma *RK22* a alors été choisi. Celui-ci est également une méthode de Runge-Kutta à deux pas mais du second ordre.

2.5 Nombre de Courant

Le nombre de Courant, aussi appelé CFL, dépend du rapport entre le pas de discrétisation temporelle et le pas de discrétisation spatiale. Le pas de discrétisation spatiale est fixé à 5 mm comme expliqué à la section 2.1 de ce chapitre-ci. Le pas de discrétisation temporelle n'est quant à lui pas explicitement indiqué. Le logiciel *WOLF* permet de fixer un "nombre de Courant souhaité". Ce dernier a été fixé à 0,25. Le logiciel adapte alors le pas de discrétisation temporelle afin de respecter au mieux la valeur du nombre de Courant souhaité.

3 Modèle physique

3.1 Description du modèle

Le modèle physique élaboré au laboratoire représente une zone urbaine possédant trois entrées et trois sorties. Les entrées (A, B et C) ainsi que les sorties (1, 2 et 3) sont indiquées sur la figure 2.14. Des blocs de différents formats présentés précédemment peuvent être placés dans la zone centrale afin de tester différentes configurations urbaines. C'est donc dans cette zone que les blocs fins seront placés afin de tester les configurations choisies. Le modèle a été réalisé de manière à respecter une échelle horizontale de 1/50. Nous émettons l'hypothèse que la largeur des rues (aux entrées et sorties) est de 10 m à l'échelle du prototype (b_p). Par conséquent, la largeur des rues à l'échelle du modèle physique est de : $b_m = b_p/e_H = 10/50 = 0,2$ m.

Une description plus détaillée de la maquette ainsi que la marche à suivre pour réaliser un essai sont fournies dans le mode d'emploi du modèle (*Model Instruction Manual*).

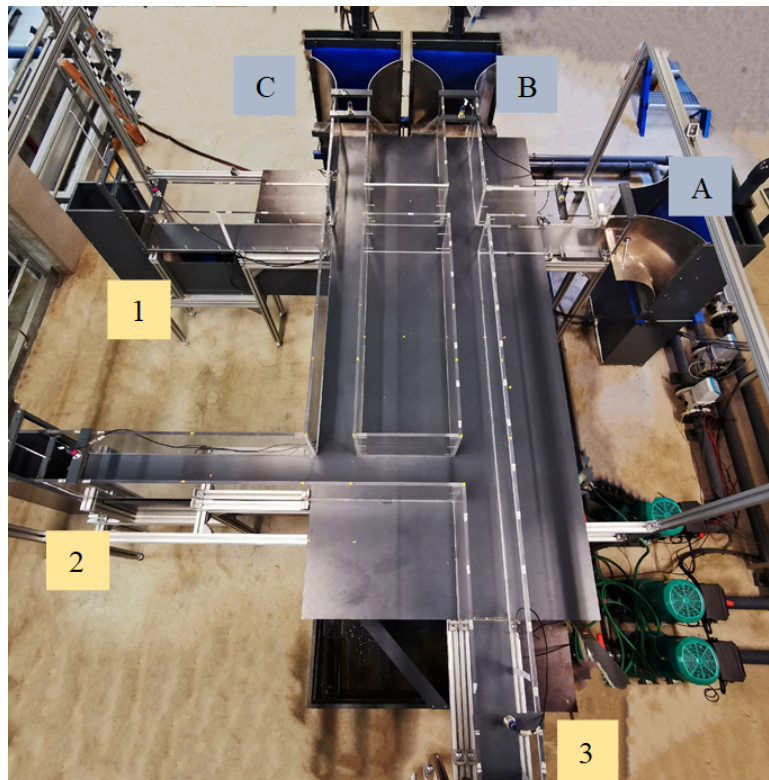


FIGURE 2.14 – Vue générale du modèle expérimental (Li et al., 2021b).

3.2 Techniques de mesures

Lors des essais expérimentaux, différentes mesures sont effectuées. Les débits entrants sont contrôlés à l'aide de débitmètres (SIMENS-MAG 5100W) possédant une précision de 0,5 %. Les hauteurs d'eau aux entrées sont mesurées par des sondes ultrasoniques avec une précision de 1 mm et à une fréquence de 100 Hz. Des sondes ultrasoniques sont également placées aux sorties afin de régler les conditions limites aval ainsi que dans les canaux de mesure. Ces canaux de mesure sont placés sous les sorties et possèdent un déversoir triangulaire. Les mesures des hauteurs d'eau dans ces canaux permettent de déterminer les débits sortant par l'intermédiaire de courbes de tarage des déversoirs triangulaires. Cette pratique est expliquée par Li et al. (2021b) et l'incertitude liée à ces calculs est comprise entre 0,5% et 1,5%.

Pour chaque essai, deux ou trois mesures de trois minutes sont réalisées. Le nombre de mesures permet d'assurer leur représentativité. La durée de trois minutes est nécessaire afin de déterminer des valeurs moyennes fiables, de distinguer les écarts-types et de caractériser les fluctuations temporelles des mesures. Notons également que les signaux des différents appareils de mesures sont filtrés afin de négliger les valeurs aberrantes.

Les champs de vitesse de surface ont été mesurés à l'aide d'une technique appelée "Large-Scale Particle Image Velocimetry" (LSPIV). Cette technique permet de déterminer les vitesses de surface d'un écoulement de manière non-intrusive, que ce soit sur le terrain ou en laboratoire (e.g. Peltier et al., 2014). Dans notre cas, le traceur employé est de la sciure de bois dont le diamètre des particules est compris entre 1 mm et 3 mm. Ce type de traceur a été choisi car sa couleur claire contraste avec le fond foncé du modèle (Li et al., 2021a). Par conséquent, les particules ressortent mieux sur les images. Une caméra LUMIX-GH4 possédant une résolution de 1920x1080 pixels et une fréquence d'enregistrement de 25 images par seconde a été placée à une hauteur de 2 m au-dessus du modèle physique afin d'enregistrer les mouvements des particules de sciure. La durée des enregistrements varie en fonction du scénario d'écoulement (*confer* section 5.1 de ce chapitre). Pour les essais en écoulement *lent*, la durée des vidéos est de 50 secondes minimum. En revanche, en scénario d'écoulement *modéré*, les capacités du modèle physique nous empêchent de réaliser des essais dont la durée est supérieure à 45 secondes. La durée d'enregistrement comportant des images exploitables se situe donc entre 30 et 40 secondes. Le domaine a été découpé en sous-domaine pour l'enregistrement vidéo de l'écoulement. En effet, la taille du modèle, la résolution de la caméra, l'angle de capture de celle-ci et la qualité d'image requise ne permettaient pas l'enregistrement de l'ensemble du domaine en un seul enregistrement. La division du domaine est présentée à la figure 2.15. Les points noirs représentent les trois positions d'enregistrement de la caméra. La jonction des vidéos pour obtenir les résultats sur l'ensemble du domaine induit des zones de recouvrement c'est-à-dire des zones qui ont été filmées par deux points de prise différents, représentées en mauve sur la figure. Les valeurs dans ces zones sont donc moyennées linéairement.

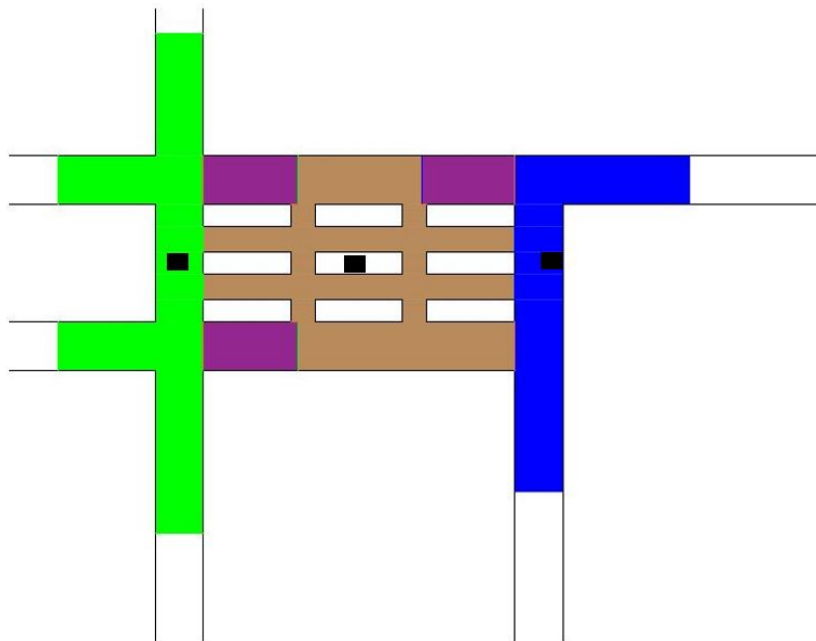


FIGURE 2.15 – Division du domaine pour l'enregistrement vidéo.

Les images enregistrées lors des essais sont ensuite traitées à l'aide du logiciel FUDAA-LSPIV (Le Coz et al., 2014). Ce logiciel a déjà été employé pour d'autres études (e.g. Li et al., 2021a ; Legout et al., 2012). Trois étapes principales sont à suivre : l'orthorectification 3D des images sur base de 10 à 20 points de référence possédant au moins trois élévations différentes ; le calcul des vitesses de surface brutes en suivant les mouvements des particules de traceur et le post-traitement de ces vitesses brutes. La deuxième étape est réalisée en indiquant au logiciel une "zone initiale d'interrogation" ("Interrogation Area") et une zone de recherche ("Search Area"). La zone d'interrogation a été fixée à 20 pixels et la zone de recherche est adaptée en fonction de la portion du domaine étudiée et des vitesses d'écoulement estimées (e.g. Legout et al., 2012 ; Li et al., 2021a). Le maillage des points de calculs possède une taille de maille de 10 pixels soit 0,01 m. Enfin, le post-traitement consiste à filtrer les vitesses brutes et ensuite à moyenner ces vitesses filtrées pour obtenir un champ de vitesses de surface moyennées. Les filtres se basent sur des bornes de valeurs pour la norme, pour les composantes des vecteurs et/ou pour le coefficient de corrélation (Jodeau et al., 2020). Dans cette étude, les vitesses brutes ont été filtrées en imposant des bornes sur la norme des vecteurs, sur leurs composantes et sur le coefficient de corrélation. La valeur maximale de la norme et les valeurs extrêmes des composantes de vitesse sont déterminées en arrondissant les valeurs brutes maximales vers le bas et en gardant uniquement une décimale. Concernant le coefficient de corrélation, ses bornes valent $[0,8 ; 0,98]$. Cet intervalle a été choisi car la sciure est considérée comme un traceur non déformable (Jodeau et al., 2020). Notons que les vitesses calculées le long des parois ne sont pas toujours fiables car les particules ont tendance à être ralenties au contact des parois (Li et al., 2021a).

4 Echelle horizontale, échelle verticale et distorsion

L'échelle horizontale est fixée à 1/50 puisque le modèle physique a été conçu avec cette échelle horizontale. Par conséquent, dans une optique de cohérence, il est logique de garder cette même échelle pour les simulations numériques.

Concernant l'échelle verticale, la valeur retenue est de 1/5. Cette différence entre l'échelle horizontale et l'échelle verticale engendre une distorsion comme présenté précédemment. Le facteur de distorsion est caractérisé par le rapport des deux échelles et vaut dans ce cas-ci :

$$d = \frac{\text{échelle horizontale}}{\text{échelle verticale}} = \frac{50}{5} = 10 \quad (2.1)$$

Rappelons que si l'échelle verticale avait été choisie égale à l'échelle horizontale, la hauteur d'eau dans le modèle physique aurait été très faible. Des effets parasites dus à la trop faible hauteur d'eau auraient alors pu fausser les résultats. Grâce au principe de distorsion, ces phénomènes peuvent être évités ou du moins négligés. Pour s'en assurer, une étude a été menée par Li et al. (2021b) sur l'influence de la distorsion sur les résultats. Il en est ressorti que l'incertitude sur la hauteur d'eau, lors des essais expérimentaux, est plus grande lorsque la distorsion est faible (inférieure à 5). Cette mise en évidence est visible sur la figure 2.16.

En effet, les écarts sur les mesures observés lors des essais expérimentaux sont importants pour les essais présentant une faible distorsion. Ensuite, ces écarts diminuent avec l'augmentation du facteur de distorsion. Ces conclusions sont valides pour les trois configurations testées à savoir la jonction, la bifurcation et le quartier. Ces trois configurations sont illustrées à la figure 6.11 à l'annexe 3.

Examinons à présent l'influence de la distorsion sur la répartition du débit. La figure 2.17 reprend les résultats d'essais expérimentaux et de simulations numériques effectués sur les configurations de bifurcation et de quartier par Li et al. (2021b). Les résultats obtenus à partir de deux nombres de Froude caractéristiques (*confer* section 5.1 de ce chapitre-ci) différents sont comparés pour chacune des deux configurations. Les résultats de la bifurcation à partir d'un nombre de Froude de 0,2 et d'un nombre de Froude de 0,3 sont comparés, tandis que ceux du quartier ont été obtenus avec un nombre de Froude de 0,2 et 0,6. Les zones colorées représentent la gamme de résultats obtenus lorsque la condition limite aval, la hauteur d'eau, est changée de +/- 1 mm. Il est indéniable que ces gammes sont plus restreintes lorsque le facteur de distorsion est grand et donc que les résultats obtenus par simulation numérique sont de moins en moins sensibles avec l'augmentation de ce facteur. De plus, ces zones colorées sont plus étroites dans les cas comportant un nombre de Froude plus élevé. En effet, nous observons pour la bifurcation comme pour le quartier que les variations des résultats numériques sont plus faibles avec le nombre de Froude le plus élevé (respectivement 0,3 et 0,6). Notons également que la répartition du débit peut être impactée par la distorsion selon la géométrie du modèle. En effet, il a été observé par Li et al. (2021b) que le modèle de bifurcation est plus sensible à la distorsion que le modèle de quartier. Cette tendance est d'ailleurs visible sur la figure 2.17. L'aire des zones colorées ainsi que la différence au niveau de l'échelle de l'axe des ordonnées sont des preuves de cette observation.

Au niveau des résultats expérimentaux, les écarts-types ne semblent pas se réduire avec l'augmentation de la distorsion. Il semblerait d'ailleurs que les résultats dans la configuration de quartier sont plus variables avec le nombre de Froude caractéristique de 0,6 qu'avec celui de 0,2. Cependant, l'axe vertical présente une échelle plus précise. Afin de déterminer si les valeurs sont supérieures ou non avec un Froude de 0,6, la valeur maximale et la moyenne pour chaque sortie et pour les deux nombres de Froude étudiés sont reprises dans le tableau 2.2. Concernant

la sortie 1, le maximum est plus grand pour un nombre de Froude de 0,2. Cependant, la valeur moyenne est la même pour les deux valeurs du nombre de Froude. Concernant les deux autres sorties, le maximum et la moyenne sont plus faibles dans le cas d'un nombre de Froude inférieur. Nous concluons dès lors que les écarts-types sont légèrement plus grands pour un nombre de Froude caractéristique de 0,6 dans la configuration de quartier.

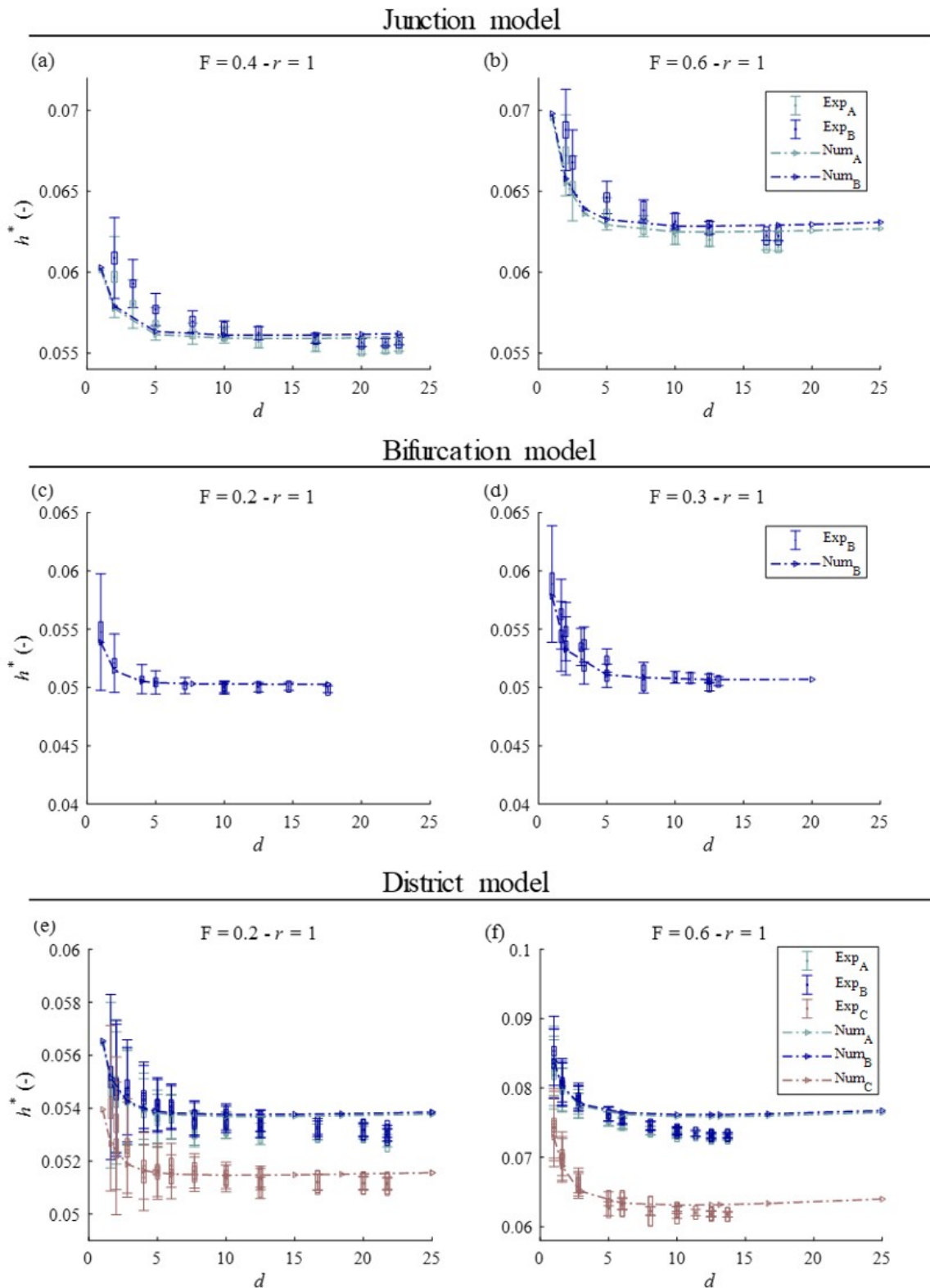


FIGURE 2.16 – Influence de la distorsion sur les hauteurs d'eau pour les configurations de base (Li et al., 2021b).

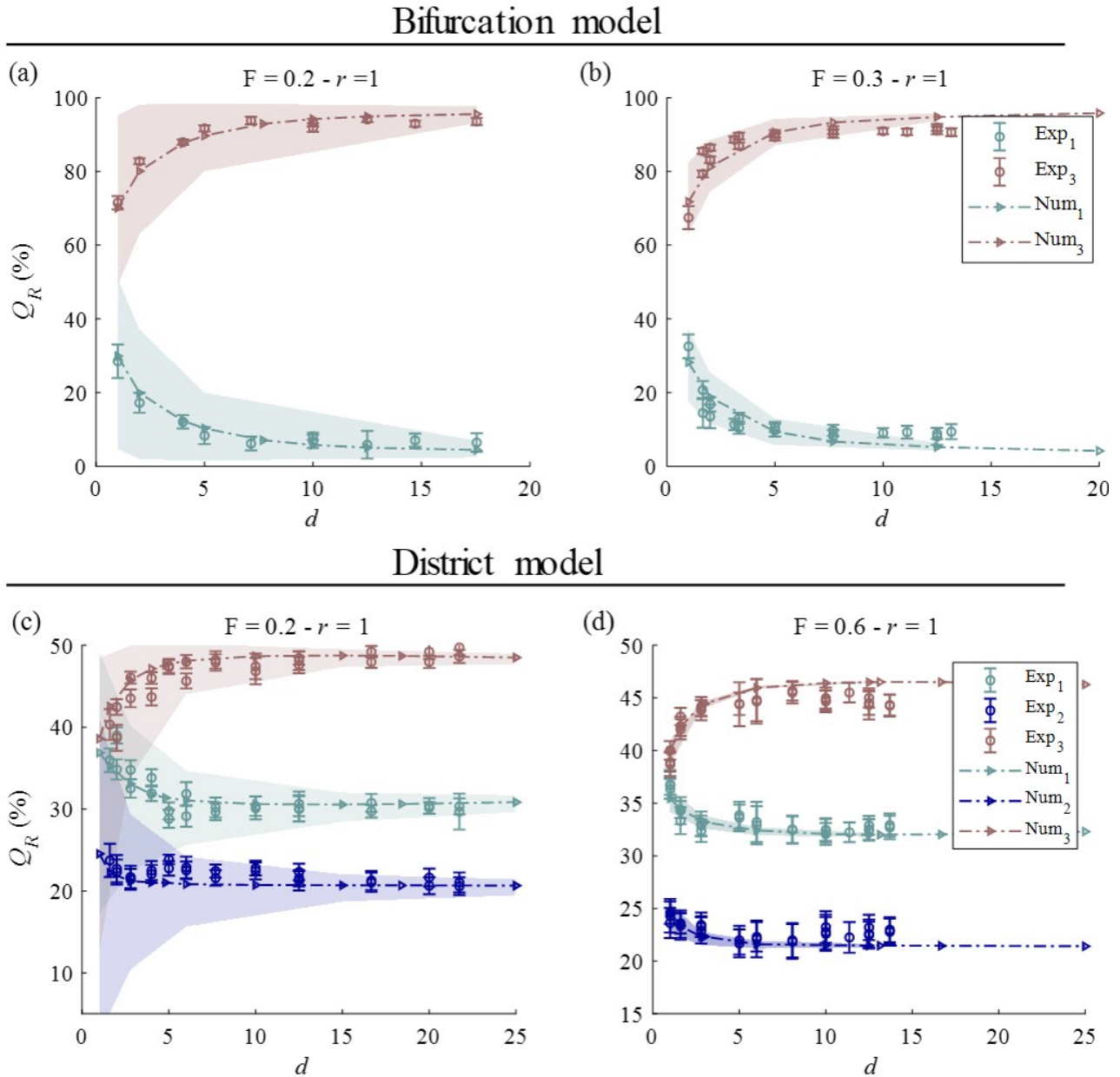


FIGURE 2.17 – Influence de la distorsion sur la répartition du débit pour les configurations de base (Li et al., 2021b).

	Fr 0,2		Fr 0,6	
	Maximum	Moyenne	Maximum	Moyenne
Sortie 1	2.22	1.19	1.88	1.19
Sortie 2	1.33	1.03	1.77	1.35
Sortie 3	1.63	0.94	2.18	1.18

TABLE 2.2 – Valeurs maximales et moyennes des écarts-types de la répartition du débit pour la configuration de quartier.

Au vu des résultats de l'étude de Li et al. (2021b), nous concluons tout de même qu'au-delà d'un facteur de distorsion de 5, les résultats numériques et expérimentaux sont stables et présentent une bonne correspondance. Il a dès lors été décidé d'opter pour une distorsion de 10 pour les simulations et les essais expérimentaux des nouvelles configurations retenues.

5 Scénarios d'écoulement

Définissons à présent les scénarios d'écoulement simulés numériquement et testés expérimentalement pour chaque configuration étudiée. Ces scénarios dépendent principalement du nombre de Froude qui caractérise la vitesse d'écoulement ainsi que des conditions limites.

5.1 Nombre de Froude

Il est évident que la valeur du nombre de Froude n'est pas uniforme sur l'ensemble du domaine de simulation. C'est pourquoi, il a été suggéré par Li et al. (2021b) de choisir une valeur caractéristique du nombre de Froude. Ensuite, une valeur caractéristique du débit sortant est calculée de manière à observer ce nombre de Froude à la sortie du modèle par la formule suivante (Li et al., 2021a) :

$$Q_{p,i}^{out} = F b_p \sqrt{g} (h_{p,i})^{3/2} \quad (2.2)$$

où

- F représente le nombre de Froude ;
- b_p est la largeur de la rue à l'échelle du prototype ;
- $h_{p,i}$ est la hauteur d'eau à l'échelle du prototype.

Concernant les simulations étudiées, la largeur de la rue à l'échelle du prototype est de 10 m et la hauteur d'eau à l'échelle du prototype a été choisie à 0,5 m (Li et al., 2021b).

Concernant les simulations numériques, chaque configuration urbaine étudiée a été simulée avec trois valeurs différentes pour le nombre de Froude caractéristique à savoir 0,2, 0,4 et 0,6. De cette manière, trois écoulements présentant une vitesse caractéristique, générale différente sont simulés. Nous les qualifierons respectivement d'écoulement *lent*, d'écoulement *modéré* et d'écoulement *rapide*.

En revanche, les essais expérimentaux sont effectués uniquement pour l'écoulement *lent* et l'écoulement *modéré*. En effet, il a été décidé de ne pas réaliser les essais expérimentaux pour un écoulement *rapide* car la limite verticale du modèle physique (15 cm) pourrait être dépassée. Il sera mis en évidence par la suite qu'un nombre de Froude caractéristique de 0,6 combinée à une condition limite aval de $h = 10 \text{ cm}$ (*confer* section 5.2 de ce chapitre) engendre des hauteurs d'eau parfois supérieures à 15 cm à l'échelle du modèle. Les essais expérimentaux avec ces paramètres engendreraient donc des débordements, rendant les expériences non valides.

5.2 Conditions limites

Le logiciel *WOLF* résout les équations de Saint-Venant en 2D. Pour que la résolution puisse s'effectuer, trois conditions limites sont nécessaires.

La première est la hauteur d'eau à la sortie du système. Nous nommerons cette condition limite, la "condition limite aval". Elle est fixée, comme mentionné précédemment à 10 cm à l'échelle du modèle physique. Cette valeur provient du choix de l'échelle verticale (1/5) et de la hauteur d'eau choisie à l'échelle du prototype à savoir 0,5 m. Cette valeur a été choisie assez arbitrairement mais elle représente néanmoins une hauteur d'eau plausible en cas d'inondation sévère. Par conséquent, nous obtenons $h_{m,out} = 0,5/5 = 0,1\text{m}$. Cette condition limite aval est identique pour toutes les sorties.

Les deux autres conditions limites concernent le débit normal et le débit tangentiel à chaque entrée. Le débit tangentiel est considéré nul à chaque entrée car nous désirons induire un

écoulement unidirectionnel dans les branches des entrées. Par conséquent, la valeur du débit normal est celle qui nous préoccupe. Nous nommerons ainsi cette condition limite, la "condition limite amont". Sa valeur est constante et est déterminée par équilibre de masse avec le débit sortant calculé à l'aide de l'équation 2.2. A l'échelle du modèle, l'équation du débit entrant dans chaque rue a été écrite par Li et al. (2021b) :

$$Q_m^{in} = \frac{1}{N_{in}} F b_m \sqrt{g} \sum_{i=1}^{N_{out}} (h_{m,i})^{3/2} \quad (2.3)$$

où

- N_{in} représente le nombre d'entrées ;
- b_m indique la largeur des rues à l'échelle du modèle physique ;
- N_{out} représente le nombre de sorties ;
- $h_{m,i}$ représente la condition limite aval c'est-à-dire la hauteur d'eau à la sortie i à l'échelle du modèle.

Etant donné que les configurations étudiées présentent 3 entrées et 3 sorties, N_{in} et N_{out} valent tous les deux 3. Enfin, comme mentionné ci-dessus, $h_{m,i}$ vaut 10 cm pour toutes les sorties.

Le tableau ci-dessous (Table 2.3) indique la valeur de la condition limite amont en fonction du nombre de Froude sélectionné. Ce tableau reprend par conséquent les caractéristiques des trois scénarios d'écoulement étudiés.

Fr	q [m ² /s] (simulations)	Q [m ³ /h] (modèle)
0,2	0,02	14,263
0,4	0,04	28,525
0,6	0,059	42,788

TABLE 2.3 – Valeurs des conditions limites amont en fonction du nombre de Froude.

Chapitre 3

Résultats des simulations numériques

Les premiers résultats présentés ci-dessous sont le fruit des simulations numériques réalisées avec les trois nombres de Froude caractéristiques (0,2, 0,4 et 0,6) pour chaque configuration. Les résultats avancés ci-dessous sont issus de la troisième et de la dernière étape de simulation, employant une reconstruction linéaire avec turbulence.

La configuration *Px5* est notre configuration de référence. Cette dernière est constituée de blocs fins c'est-à-dire les mêmes que ceux présents dans les configurations retenues. Ceux-ci sont disposés sur deux lignes, comme présentés sur la figure 3.1 ci-dessous.

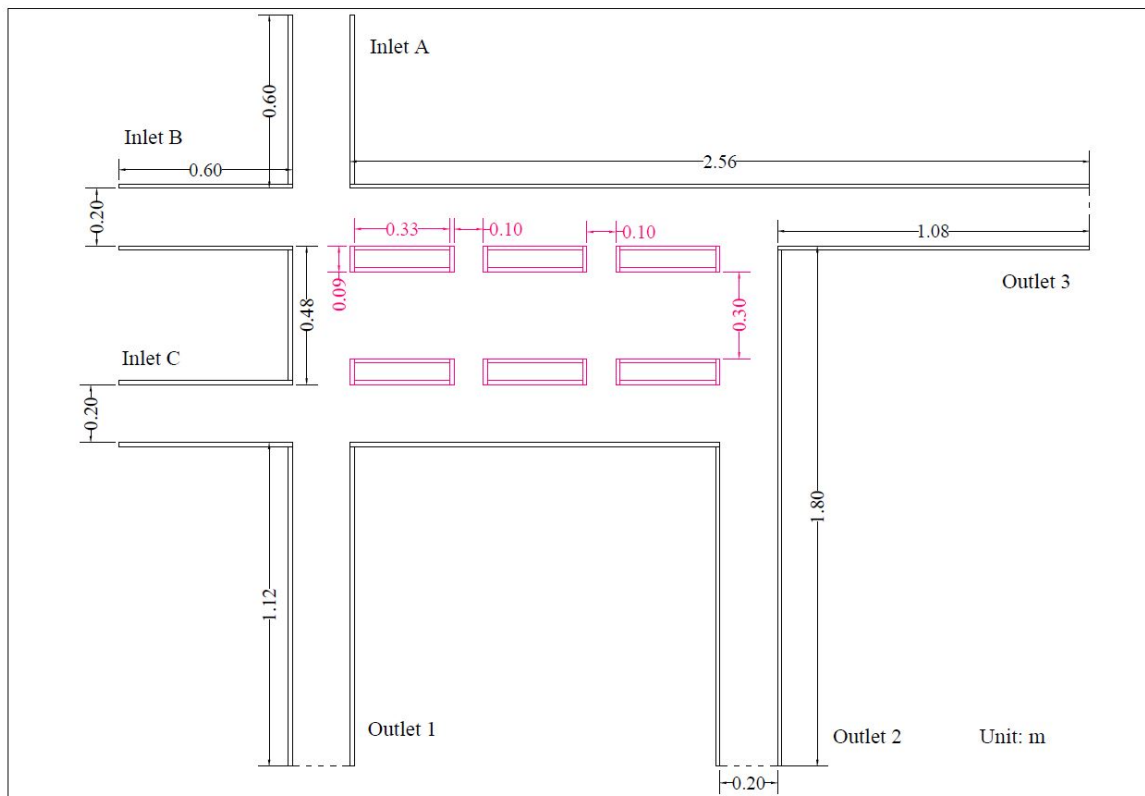


FIGURE 3.1 – Configuration Px5.

1 Hauteurs d'eau en entrée

Chaque graphique de la figure 3.2 ci-dessous reprend les valeurs moyennes des hauteurs d'eau pour la configuration de référence ainsi que pour les trois nouvelles configurations étudiées pour un type d'écoulement. Ces valeurs moyennes sont présentées sous forme de diagramme en bâtonnets. Les résultats sont regroupés par entrée afin de mieux les comparer. Les traits rouges représentent l'écart-type des hauteurs d'eau, aussi indiqué pour chaque entrée de chaque configuration.

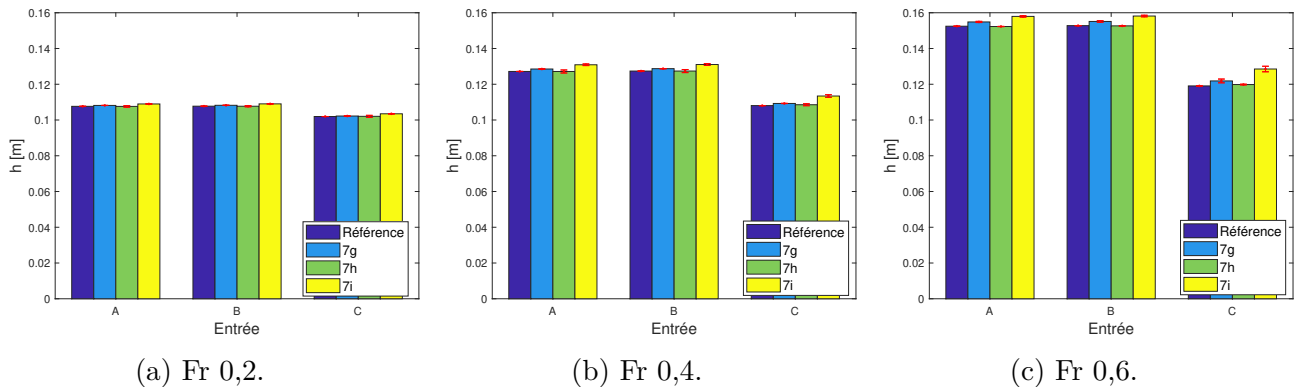


FIGURE 3.2 – Hauteurs d'eau moyennes aux entrées [m].

Dans l'ensemble, nous observons sur cette figure 3.2 que les hauteurs d'eau calculées pour les nouvelles configurations sont très proches de celles calculées pour la configuration de référence. Nous remarquons en effet très peu de différence entre les bâtonnets. La configuration $7h$ est particulièrement proche de la configuration de référence dans les trois scénarios et pour les trois entrées. Concernant les écarts-types, ils semblent très faibles.

Nous remarquons que les hauteurs d'eau aux entrées A et B sont supérieures à 15 cm pour le scénario d'écoulement *rapide*. C'est la raison pour laquelle ce scénario n'est pas testé expérimentalement.

Afin de mieux visualiser les différences entre les résultats, les graphiques de la figure 3.3 ont été réalisés. Sur cette dernière, les différences de hauteurs d'eau entre les nouvelles configurations étudiées et la configuration de référence sont affichées. Les écarts-types y ont également été rapportés.

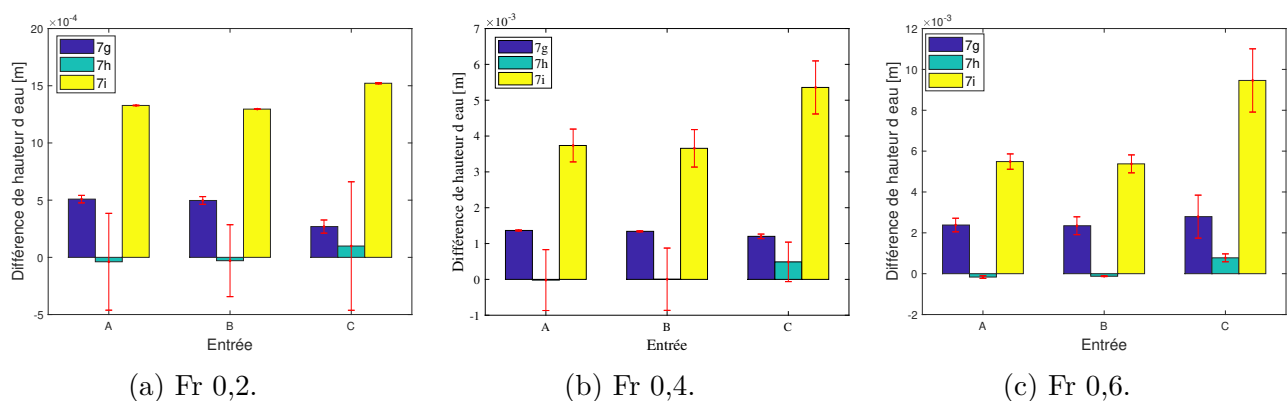


FIGURE 3.3 – Différences de hauteurs d'eau moyennes aux entrées [m].

Nous observons que les hauteurs d'eau moyennes pour les configurations $7g$ et $7i$ sont supérieures à celles de la configuration de référence pour chaque entrée et pour chaque scénario d'écoulement. La tendance est plus forte pour la configuration $7i$. Concernant la configuration $7h$, la hauteur d'eau moyenne est supérieure à l'entrée C mais inférieure aux entrées A et B en comparaison avec la configuration de référence. Nous remarquons également que les différences augmentent avec le nombre de Froude. En effet, les différences sont de l'ordre de 1 à $10 \cdot 10^{-4}$ m pour l'écoulement *lent* tandis qu'elles valent, en valeurs absolues, entre 1 et $10 \cdot 10^{-3}$ m pour l'écoulement *rapide*.

Concernant les écarts-types, ils sont très faibles pour un écoulement *lent* ($2 \cdot 10^{-6}$ à $5 \cdot 10^{-4}$ m) mais ils augmentent avec le nombre de Froude caractéristique et donc avec la vitesse générale d'écoulement (jusqu'à $1,5 \cdot 10^{-3}$ m pour l'écoulement *rapide*). Nous remarquons que ce n'est pas la même configuration urbaine qui présente les plus grands écarts-types pour les trois scénarios d'écoulement simulés. En effet, pour le scénario d'écoulement *lent*, les écarts-types de la configuration $7h$ sont un à deux ordres de grandeur plus grands en comparaison avec ceux des deux autres configurations. Pour l'écoulement *modéré*, les configurations $7h$ et $7i$ possèdent des écarts-types dix fois plus grands que ceux de la configuration $7g$. Enfin, les simulations en scénario *rapide* révèlent des écarts-types plus importants pour les configurations $7g$ et $7i$. Ces derniers atteignent le millimètre à l'entrée C .

Les valeurs des hauteurs d'eau moyennes, les valeurs des différences par rapport à la configuration de référence ainsi que les écarts-types sont repris dans les tableaux 3.1, 3.2 et 3.3.

		référence	7g	7h	7i
Entrée A	H [m]	0,1076	0,1082	0,1076	0,109
	Différence [m]		0,0006	0	0,0014
	Ecart-type [m]	4,2E-6	3,3E-5	4,2E-4	2,6E-6
Entrée B	H [m]	0,1077	0,1082	0,1077	0,109
	Différence [m]		0,0005	0	0,0013
	Ecart-type [m]	5,3E-6	3,4E-5	3,1E-4	2,8E-6
Entrée C	H [m]	0,102	0,1022	0,1021	0,1035
	Différence [m]		0,0002	0,0001	0,0015
	Ecart-type [m]	8,6E-6	5,8E-5	5,6E-4	5,6E-6

TABLE 3.1 – Hauteurs d'eau moyennes aux entrées, différences et écarts-types en écoulement *lent*.

		référence	7g	7h	7i
Entrée A	H [m]	0,1272	0,1285	0,1271	0,1309
	Différence [m]		0,0013	-0,0001	0,0037
	Ecart-type [m]	4,1E-6	1,3E-5	8,5E-4	4,6E-4
Entrée B	H [m]	0,1274	0,1287	0,1274	0,131
	Différence [m]		0,0013	0	0,0037
	Ecart-type [m]	3,1E-6	1,5E-5	8,7E-4	5,2E-4
Entrée C	H [m]	0,1081	0,1093	0,1085	0,1134
	Différence [m]		0,0012	0,0005	0,0053
	Ecart-type [m]	7,1E-6	6,4E-5	5,5E-4	7,4E-4

TABLE 3.2 – Hauteurs d'eau moyennes aux entrées, différences et écarts-types en écoulement *modéré*.

		référence	7g	7h	7i
Entrée A	H [m]	0,1525	0,1549	0,1523	0,158
	Différence [m]		0,0024	-0,0002	0,0055
	Ecart-type [m]	2,7E-05	3,3E-04	6,5E-05	3,8E-04
Entrée B	H [m]	0,1528	0,1551	0,1527	0,1582
	Différence [m]		0,0023	-0,0001	0,0054
	Ecart-type [m]	2,4E-05	4,4E-04	1,8E-05	4,4E-04
Entrée C	H [m]	0,1191	0,1219	0,1198	0,1285
	Différence [m]		0,0028	0,0008	0,0095
	Ecart-type [m]	8,8E-05	1,1E-03	1,9E-04	1,6E-03

TABLE 3.3 – Hauteurs d'eau moyennes aux entrées, différences et écarts-types en écoulement *rapide*.

2 Répartition du débit en sortie

Etudions à présent la figure 3.4. Les trois graphiques de cette figure présentent la répartition du débit en sortie de la même façon que les hauteurs d'eau en entrée c'est-à-dire sous forme de diagrammes en bâtonnets, regroupés par sortie avec les écarts-types en rouge.

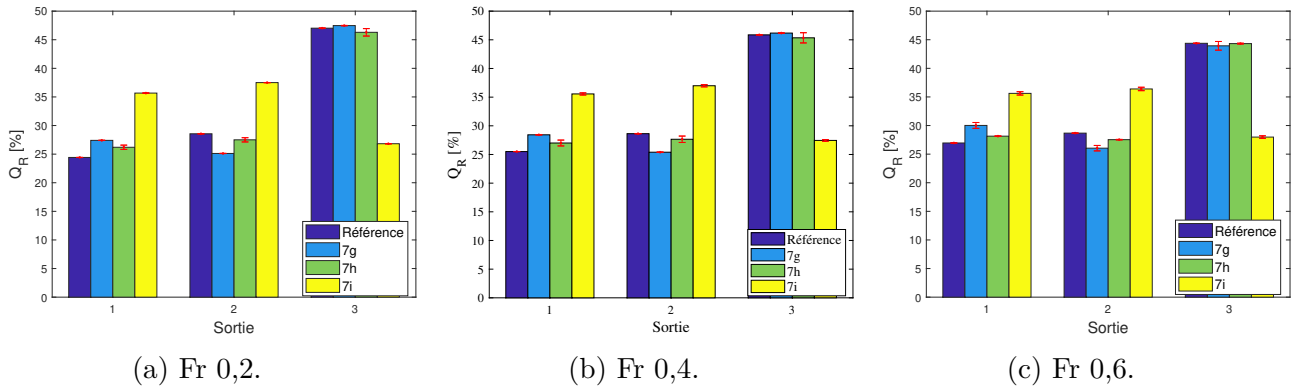


FIGURE 3.4 – Répartition du débit en sortie [%].

Ces résultats présentent une plus grande variabilité que les hauteurs d'eau en entrée. Effectivement, les valeurs moyennes des répartitions de débit diffèrent plus que celles des hauteurs d'eau en entrée. Les différences par rapport à la configuration de référence sont reprises dans les tableaux 3.4, 3.5 et 3.6. Les plus grandes différences sont observées pour la configuration 7i avec un maximum de 20,2 pp en valeur absolue pour la sortie 3 dans le scénario d'écoulement *lent*. Les deux autres configurations (7g et 7h) présentent une distribution du débit de sortie relativement proche de celle proposée par la configuration de référence dans les trois scénarios. La configuration 7g se distingue toutefois aux sorties 1 et 2.

En observant les résultats d'un scénario à un autre, nous nous rendons compte que les répartitions de débit ne semblent presque pas influencées par le scénario d'écoulement. En effet, les différences, pour une même configuration, sont de 3 pp au maximum.

Concernant les écarts-types, dont les valeurs sont également reprises dans les tableaux 3.4, 3.5 et 3.6, nous observons les mêmes tendances que celles tirées des hauteurs d'eau en entrée. En écoulement *lent*, la configuration 7h présente les écarts-types les plus importants. En scénario *modéré*, les configurations 7h et 7i possèdent des écarts-types un à deux ordres de grandeur plus grands que les écarts-types de la configuration 7g. Enfin, concernant le scénario d'écoulement *rapide*, ce sont les configurations 7g et 7i qui possèdent les plus grands écarts-types. Les observations sont donc identiques pour les hauteurs d'eau en entrée et les répartitions de débit en sortie.

Les écarts-types faibles signifient que les résultats obtenus sont stables. En revanche, les valeurs plus élevées des écarts-types indiquent que les hauteurs d'eau en entrée ainsi que les répartitions du débit et donc les débits en sortie fluctuent. Il a dès lors été décidé d'explorer les variations temporelles des hauteurs d'eau en entrée et des débits sortants pour les configurations présentant des écarts-types importants dans les scénarios concernés.

		référence	7g	7h	7i
Sortie 1	Q_R [%]	24,4	27,4	26,2	35,7
	Différence [pp]		3	1,8	11,3
	Ecart-type [%]	0,002	0,02	0,39	0,003
Sortie 2	Q_R [%]	28,6	25,1	27,6	37,5
	Différence [pp]		-3,5	-1	8,9
	Ecart-type [%]	0,003	0,02	0,38	0,003
Sortie 3	Q_R [%]	47	47,5	46,2	26,8
	Différence [pp]		0,5	-0,8	-20,2
	Ecart-type [%]	0,004	0,03	0,63	0,002

TABLE 3.4 – Proportions de débit, différences et écarts-types en écoulement *lent*.

		référence	7g	7h	7i
Sortie 1	Q_R [%]	25,5	28,4	27	35,6
	Différence [pp]		2,9	1,5	10,1
	Ecart-type [%]	1,9E-3	8,5E-3	0,51	0,19
Sortie 2	Q_R [%]	28,6	25,4	27,7	37
	Différence [pp]		-3,2	-0,9	8,4
	Ecart-type [%]	2,1E-3	7,6E-3	0,56	0,19
Sortie 3	Q_R [%]	45,9	46,2	45,4	27,5
	Différence [pp]		0,3	-0,5	-18,4
	Ecart-type [%]	3,4E-3	0,014	0,89	0,15

TABLE 3.5 – Proportions de débit, différences et écarts-types en écoulement *modéré*.

		référence	7g	7h	7i
Sortie 1	Q_R [%]	27	30	28,1	35,6
	Différence [pp]		3	1,1	8,6
	Ecart-type [%]	0,008	0,51	0,04	0,29
Sortie 2	Q_R [%]	28,7	26	27,5	36,4
	Différence [pp]		-2,7	-1,2	7,7
	Ecart-type [%]	0,008	0,48	0,04	0,3
Sortie 3	Q_R [%]	44,4	43,9	44,3	28
	Différence [pp]		-0,5	-0,1	-16,4
	Ecart-type [%]	0,013	0,76	0,07	0,22

TABLE 3.6 – Proportions de débit, différences et écarts-types en écoulement *rapide*.

3 Oscillations de la hauteur d'eau aux entrées

Ci-dessous sont présentées les variations temporelles des hauteurs d'eau en entrée pour la configuration *7h* dans le scénario d'écoulement *lent*. Les graphiques des autres configurations concernées par de potentielles oscillations (configurations *7h* et *7i* en écoulement *modéré* ; configurations *7g* et *7i* en écoulement *rapide*) sont présentés à l'annexe 4.1. Ces hauteurs d'eau sont moyennées sur la largeur de l'entrée. Les valeurs sont celles obtenues à chaque entrée au cours des dix secondes de la quatrième étape de simulation.

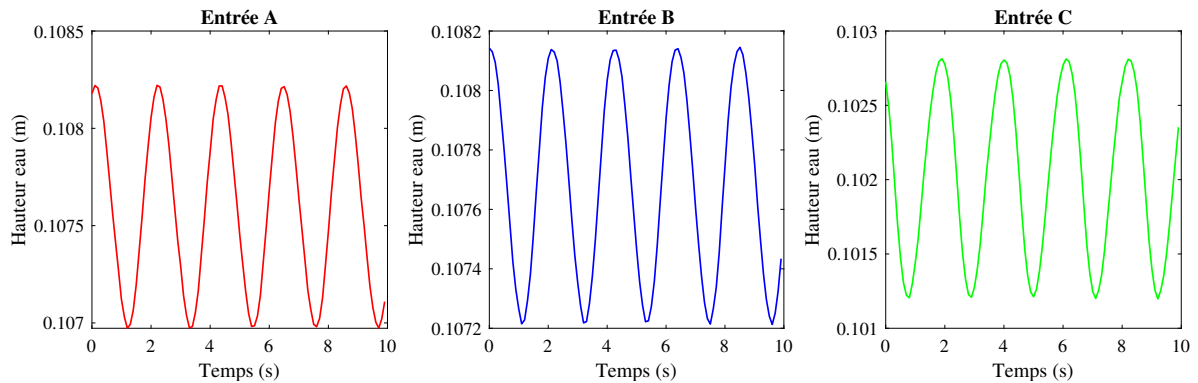


FIGURE 3.5 – Hauteurs d'eau moyennées sur la largeur de l'entrée en fonction du temps (écoulement *lent* - configuration *7h*).

Nous observons clairement sur la figure 3.5 que les hauteurs d'eau oscillent périodiquement sans signe d'atténuation. L'amplitude des oscillations vaut approximativement 1,5 mm pour les entrées *A* et *C*. Pour l'entrée *B*, l'amplitude est plus faible et vaut environ 1 mm. Concernant la fréquence d'oscillation, elle vaut 0,47 Hz pour les trois entrées.

En observant les graphiques à l'annexe 4.1, nous remarquons que ces simulations présentent toutes des oscillations. Pour un même cas d'étude (une combinaison "configuration - scénario d'écoulement"), les oscillations possèdent la même fréquence à toutes les entrées et l'amplitude est constante. Toutefois, les graphiques issus de la simulation de la configuration *7i* en écoulement *modéré* présentent des oscillations avec des différences d'amplitude (*confer* figure 6.13 à l'annexe 4.1). Deux fréquences distinctes sont dès lors mesurées : 0,55 Hz et 1,1 Hz.

Nous en concluons que le comportement oscillatoire est avéré pour les cinq simulations concernées. Les fréquences et les amplitudes de ces oscillations sont récapitulées dans le tableau 3.7.

Configuration	Froude	Fréquence [Hz]	Amplitudes [m]
7h	0,2	0,47	0,001 à 0,0015
7h	0,4	0,73	0,002
7i	0,4	0,55 et 1,1	0,0005 à 0,002
7g	0,6	1,3	0,001 à 0,003
7i	0,6	0,8	0,001 à 0,005

TABLE 3.7 – Fréquences et amplitudes des oscillations des hauteurs d'eau en entrée.

4 Oscillations de l'écoulement aux sorties

Les valeurs des débits sortants de la configuration *7h* dans le scénario *lent*, moyennées sur la largeur d'écoulement, sont reprises à la figure 3.6. L'amplitude des oscillations des débits sortants est de l'ordre de $2,5 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$ pour les sorties *1* et *2* mais vaut approximativement $4,5 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$ pour la sortie *3*. Ces valeurs semblent faibles mais elles représentent entre 7,6% et 8,2% du débit moyen pour chaque sortie. Concernant la fréquence, elle est semblable pour les trois sorties et vaut 0,47 Hz. La fréquence des variations des hauteurs d'eau en entrée et des débits sortants est donc identique.

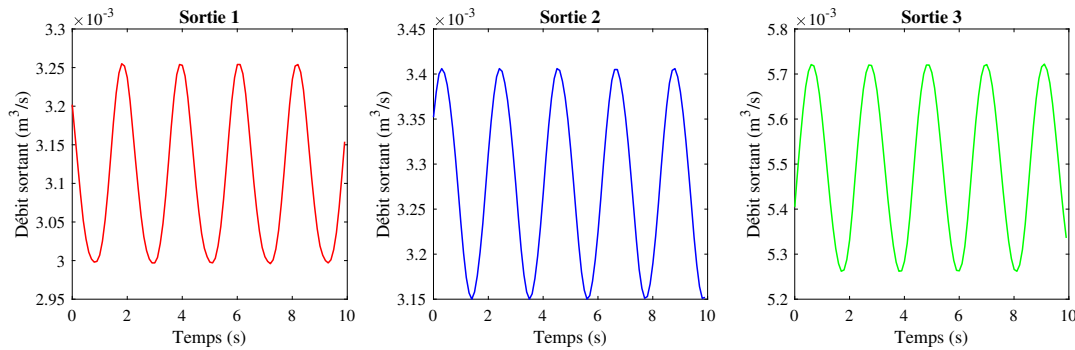


FIGURE 3.6 – Débits sortant moyennés sur la largeur de la sortie en fonction du temps (écoulement *lent* - configuration *7h*).

Les graphiques des autres configurations suspectées de comportement oscillatoire sont présentés à l'annexe 4.2. Ces graphiques montrent également des variations périodiques sans atténuation. Cependant, comme pour les hauteurs d'eau en entrée, la configuration *7i* en écoulement *modéré* montre des variations d'amplitude, comme un double pic supérieur (confer figure 6.17). Ces variations d'amplitude apparaissent aux sorties *1* et *2* mais pas à la sortie *3*. La fréquence des oscillations est identique pour les trois sorties dans chaque cas et elle est quasiment égale à la fréquence observée aux entrées.

Les résultats sont retranscrits dans le tableau 3.8.

Configuration	Froude	Fréquence [Hz]	Amplitudes [m^3/s]	Amplitudes [%]
7h	0,2	0,47	2,5E-04 à 4,5E-04	7,6 à 8,2
7h	0,4	0,74	2,5E-04 à 8E-04	3,9 à 7,6
7i	0,4	0,55	1,5E-04 à 4E-04	1,8 à 4,5
7g	0,6	1,3	5E-04 à 1,5E-03	4,7 à 10,8
7i	0,6	0,8	1,5E-04 à 6E-04	1,5 à 4,7

TABLE 3.8 – Fréquences et amplitudes des oscillations des débits sortants.

Nous concluons que l'écoulement présente effectivement un comportement oscillatoire en scénario *lent* pour la configuration *7h*, en scénario *modéré* pour les configurations *7h* et *7i* et en scénario *rapide* pour les configurations *7g* et *7i*. L'amplitude des oscillations est relativement importante puisqu'elle varie entre 1,5% et 10,8% selon le cas étudié.

5 Sources des différences

5.1 Etude des hauteurs d'eau locales et des valeurs locales du nombre de Froude

Déterminons à présent la provenance des différences de hauteurs en entrée entre les différentes configurations. La figure 3.7 illustre les hauteurs d'eau obtenues à la dernière itération du processus de calcul numérique pour le scénario *lent*. Afin de mieux comparer les résultats, l'échelle est identique pour les trois configurations. La figure 3.8 reprend les valeurs locales du nombre de Froude pour le scénario *lent* également. Des figures similaires sont présentées à l'annexe 4.3.1 pour les deux autres scénarios.

La première observation que nous tirons de ces images est la différence importante entre la configuration *7i* et les deux autres configurations. Effectivement, nous remarquons pour la configuration *7i* que les hauteurs d'eau aux entrées ainsi que dans la zone centrale sont plus grandes de manière générale par rapport aux configurations *7g* et *7h*. Cette tendance est également remarquée lors des scénarios *modéré* et *rapide*.

Ensuite, nous remarquons des changements brusques de hauteurs d'eau à l'entrée des trois branches de sortie pour la configuration *7i*. Ces variations brusques sont moins visibles et donc moins importantes dans les deux autres configurations. Ces changements brusques sont des diminutions de hauteur d'eau, de l'amont vers l'aval. Ces diminutions de hauteur d'eau indiquent une accélération locale de l'écoulement. Nous notons par ailleurs que ces variations brusques sont plus marquées du côté gauche (pour les sorties 1 et 2) et du côté inférieur (pour la sortie 3) de la branche d'écoulement. Ces sauts locaux de hauteur sont en fait l'indication d'une recirculation et d'une contraction de l'écoulement à l'entrée des branches de sortie. Les contractions et recirculations sont des phénomènes qui engendrent des pertes de charge locales.

De plus, des augmentations brusques de hauteur d'eau sont visibles dans les trois branches de sortie de la configuration *7i* ainsi que dans la branche de la sortie 1 des configurations *7g* et *7h* pour le scénario *rapide* (*confer* figure 6.22 à l'annexe 4.3.1). Ces augmentations de hauteur d'eau indiquent la présence de ressauts hydrauliques. Les variations du nombre de Froude passant d'une valeur supérieure à l'unité à une valeur inférieure à l'unité sont d'ailleurs visibles à la figure 6.23. Les ressauts hydrauliques sont également responsables de pertes de charge locales.

Nous observons également une diminution brusque de hauteur d'eau à l'intersection des entrées *A* et *B* pour la configuration *7i*. La rencontre des deux flux d'entrée engendre un écoulement diagonal intense vers la sortie 2. La particularité de la configuration *7i* est la présence de la place sans blocs dans la partie amont de la zone centrale. Par conséquent, cet écoulement diagonal, préférentiel, observé initialement par Li et al. (2021a) pour la configuration sans bloc dans la zone centrale, possède l'espace nécessaire pour se développer. Dès lors, des zones de recirculation apparaissent au début de la partie centrale dans l'espace vide. Ces zones sont mieux visibles sur la figure 3.8 représentant les valeurs locales du nombre de Froude. Nous remarquons notamment une grande zone de recirculation dans la rue *A1* et la partie inférieure de la place sans bloc. Cette zone "morte" est liée à l'écoulement diagonal ainsi qu'à l'entrée *C*. Ensuite, cet écoulement préférentiel rencontre les blocs. L'écoulement se sépare alors pour entrer dans les différentes ruelles. Nous observons d'ailleurs des recirculations-contractions dans la ruelle *HE* et dans la rue *HC*, en dessous de la première colonne de blocs. Nous observons également de plus petites zones de contraction et recirculation dans la ruelle verticale *V4* et la rue verticale *V2*. En revanche, dans les configurations *7g* et *7h*, cet écoulement diagonal n'a pas la possibilité de se développer puisque les flux entrants rencontrent directement les blocs. Certes une diminution de hauteur est présente à l'intersection des entrées *A* et *B* mais elle

est bien plus faible que celle observée dans la configuration γ_i . L'écoulement entre alors dans les rues $V1$ et HB ainsi que dans les ruelles HD et HE en créant des zones de contraction et de recirculation. Une zone de contraction et de recirculation peut également être décernée au début de la rue HC . Nous remarquons enfin que la place sans bloc présente dans les deux cas une grande zone calme.

Notons que les différences de hauteur et les zones de contraction et de recirculation détectées semblent plus importantes dans les simulations avec un nombre de Froude caractéristique plus élevé.

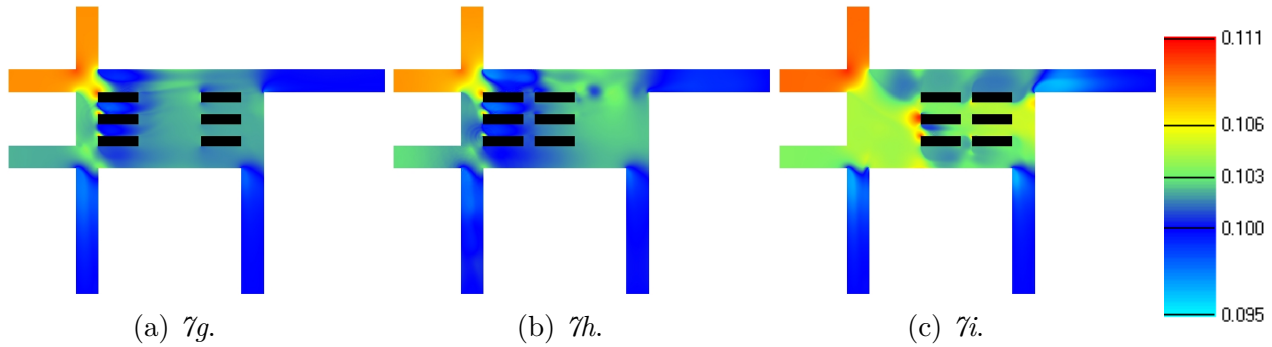


FIGURE 3.7 – Hauteurs d'eau au dernier pas de temps de la simulation (scénario *lent*) [m].

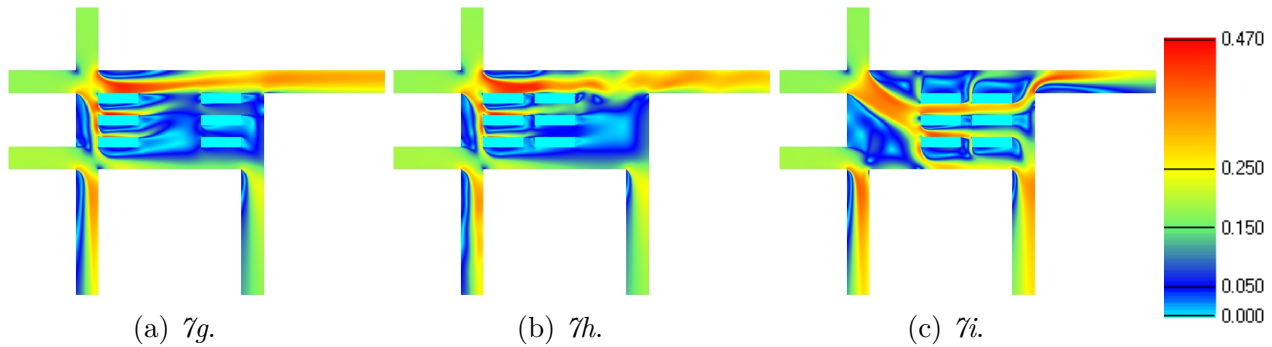


FIGURE 3.8 – Valeurs locales du nombre de Froude au dernier pas de temps de la simulation (scénario *lent*) [-].

5.2 Bilan de puissance

D'après nos observations tirées des figures ci-dessus, les pertes locales engendrées par les zones de contraction et de recirculation sont relativement nombreuses par rapport à la taille du domaine étudié. Ces pertes de charge semblent plus importantes pour la configuration γ_i que pour les deux autres configurations urbaines. Il a aussi été remarqué que les phénomènes engendrant des pertes de charge locales sont plus nombreux et semblent plus conséquents lorsque le nombre de Froude caractéristique augmente. Cependant, nos observations ne nous permettent pas de quantifier ces pertes de charge locales et de les comparer avec les pertes dues au frottement.

Dans l'optique de définir les origines des différences de hauteurs d'eau et de répartitions de débit, une analyse sur base d'un bilan de puissance pour une configuration de quartier simple avec différentes valeurs de distorsion géométrique a été développée par Li et al. (2020). Il a donc été décidé d'appliquer cette analyse se basant sur un bilan de puissance dans ce travail. Le bilan de puissance est défini par Li et al. (2020) et consiste à calculer la différence de puissance entre

les entrées et les sorties. Cette différence correspond dès lors à la dissipation de puissance sur le domaine d'écoulement, ϕ . Cette dissipation est caractérisée par deux termes. Le premier traduit les pertes par frottement du fond et des parois. Ces pertes sont donc principalement induites par cisaillement vertical, c'est pourquoi il sera désigné par ϕ_V . Le second terme tient compte de la dissipation induite par le cisaillement horizontal, ϕ_H . Ce dernier provient des gradients horizontaux des variables d'écoulement et donc des pertes locales (Li et al., 2020). L'étude du bilan de puissance et plus précisément de l'importance relative des deux contributions de dissipation de puissance nous permettra ainsi de déterminer quel type de pertes (frottements ou locales) est prépondérant.

Les hypothèses émises afin de formuler ces équations sont les suivantes :

- fluide incompressible ;
- absence d'effets thermiques ;
- état stationnaire ;
- distribution de pression hydrostatique ;
- coefficient de Boussinesq unitaire ;
- pente de fond nulle ;
- approximation du terme de dissipation de puissance due au cisaillement vertical par le produit vectoriel des contraintes de cisaillement du fond et du vecteur de vitesse horizontale moyenné sur la hauteur (Li et al., 2020).

L'équation 3.1 ci-dessous est celle du bilan de puissance susmentionné.

$$P_{out} - P_{in} = -\phi = -(\phi_H + \phi_V) \quad (3.1)$$

Les autres équations nécessaires au calcul du bilan de puissance sont reprises à l'annexe 4.3.2.

Les résultats obtenus pour la proportion de puissance dissipée par rapport à la puissance totale en entrée pour le scénario d'écoulement *lent* sont repris à la figure 3.9. La figure 3.10 illustre quant à elle les contributions relatives des deux composantes de dissipation de puissance dans ce même scénario. Les figures des résultats des deux autres scénarios sont reprises à l'annexe 4.3.3.

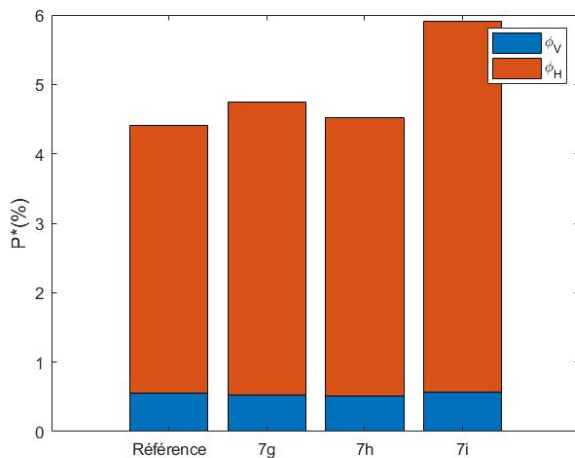


FIGURE 3.9 – Proportions de puissance dissipée (écoulement *lent*).

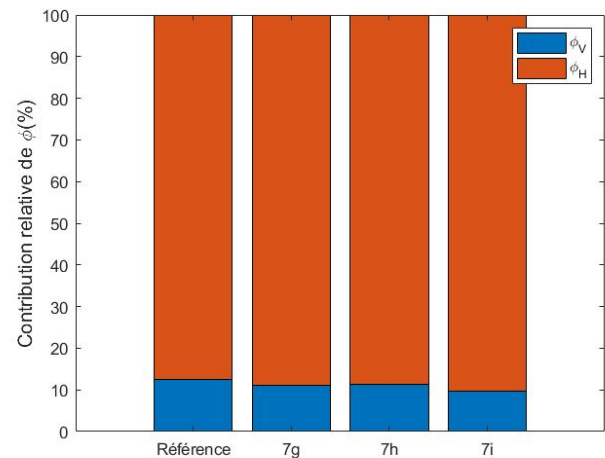


FIGURE 3.10 – Contributions relatives de la dissipation de puissance (écoulement *lent*).

L'allure du diagramme en bâtonnets de la figure 3.9 correspond parfaitement à l'allure détectée précédemment sur base des différences de hauteurs d'eau en entrée. Nous observons sur cette figure que la dissipation de puissance est la plus importante pour la configuration *7i* et que la configuration *7h* produit le résultat le plus proche de celui de la configuration de référence. Cette tendance est également visible sur les diagrammes obtenus pour les scénarios d'écoulement *modéré* et *rapide*. Nous remarquons grâce aux graphiques 6.24 et 6.26 que la dissipation de puissance augmente avec le nombre de Froude caractéristique. Les valeurs obtenues en écoulement *rapide* sont quatre fois plus élevées que celles de l'écoulement *lent*.

Nous notons, grâce aux figures 3.10, 6.25 et 6.27 que la contribution de dissipation de puissance liée au cisaillement vertical représente approximativement 10% de la dissipation totale de puissance, pour la configuration de référence et pour les trois nouvelles configurations étudiées. Ce sont dès lors les recirculations et contractions d'écoulement qui gouvernent la mise en charge de l'écoulement puisque les pertes locales représentent environ 90% de la dissipation totale de puissance. Nous savons par Li et al. (2020) que cette tendance est liée à la distorsion géométrique du modèle. Toutefois, l'importance relative des pertes de charges dues au frottement est encore plus faible que celle observée par Li et al. (2020) pour une distorsion de 10. En effet, les valeurs observées sur les figures 3.10, 6.25 et 6.27 ne dépassent pas 12,93 % alors que Li et al. (2020) ont obtenu des valeurs proches de 20%.

Nous nous attendions probablement à une augmentation de la proportion des pertes locales avec l'augmentation du nombre de Froude caractéristique. Cependant, en comparant les résultats, l'importance relative de ϕ_H est similaire dans les trois scénarios voire légèrement inférieure pour le dernier. Les valeurs de la proportion de puissance dissipée ainsi que de la contribution du cisaillement vertical sont reprises dans le tableau 3.9.

Configuration	Scénario					
	lent		modéré		rapide	
	P*(%)	ϕ_V (%)	P*(%)	ϕ_V (%)	P*(%)	ϕ_V (%)
Référence	4,42	12,44	12,42	12,46	18,52	12,93
7g	4,75	11,03	13,15	11,14	19,83	11,09
7h	4,52	11,37	12,73	11,51	18,72	12,43
7i	5,91	9,67	15,96	9,58	20,72	10,61

TABLE 3.9 – Proportion de puissance dissipée et contribution du cisaillement vertical.

Nous concluons dès lors que la mise en charge résulte principalement des pertes de charges locales induites par la présence des blocs, indépendamment du scénario d'écoulement. La configuration *7i* présente la dissipation de puissance la plus importante et la configuration *7h* celle la plus proche de la configuration de référence.

6 Vitesses d'écoulement

La présence d'oscillations en scénario *lent* pour la configuration *7h*, en scénario *modéré* pour les configurations *7h* et *7i* et en scénario *rapide* pour les configurations *7g* et *7i* a été confirmée lors de l'étude temporelle des hauteurs d'eau en entrée et des débits sortants. Déterminons à présent où ces oscillations ont lieu dans le champ de vitesse.

La vidéo *Vitesses écoulements lent et modéré* reprend les six vidéos (trois configurations, scénarios *lent* et *modéré*) de vitesses d'écoulement réalisées grâce aux simulations numériques. La vidéo *Vitesses écoulements lent et rapide* reprend les vidéos de vitesses en écoulement *lent* ainsi que celles en écoulement *rapide* comme son nom l'indique.

Afin de faciliter la compréhension, les observations tirées de ces vidéos sont reprises dans le tableau 3.10.

Froude	Configuration		
	7g	7h	7i
0,2	Aucune oscillation	Oscillations importantes dans la rue <i>HB</i>	Aucune oscillation
0,4	Aucune oscillation	Oscillations importantes dans la rue <i>HB</i>	Oscillations modérées sur l'ensemble du domaine
0,6	Oscillations importantes dans la rue <i>HB</i>	Aucune oscillation	Oscillations modérées sur l'ensemble du domaine

TABLE 3.10 – Observations générales tirées des vidéos pour les trois scénarios d'écoulement.

Premièrement, aucune oscillation est observée dans les configurations *7g* et *7i* en écoulement *lent* ni dans la configuration *7g* en scénario *modéré* ni dans la configuration *7h* en écoulement *rapide*. Cette absence d'oscillations correspond aux observations et conclusions tirées précédemment.

Etudions plus en détails les oscillations observées dans ces vidéos en commençant par la configuration *7g* en écoulement *lent*. Dans ce but, les écarts-types du champ de vitesse ont été calculés et sont représentés à la figure 3.11. Sur cette figure, nous remarquons très clairement une zone avec des écarts-types plus importants dans la rue *HB*. Grâce aux vidéos, nous savons que c'est dans cette zone que les oscillations se développent. Les écarts-types plus importants en aval de la première ligne de blocs sont le signe de détachements tourbillonnaires. La figure 3.13 illustre un détachement tourbillonnaire en trois étapes à cet endroit précis. Les images sont issues de la quatrième étape de simulation et donc de la vidéo. Le tourbillon lâché est particulièrement visible sur la deuxième image.

Cette même configuration urbaine en scénario *modéré* présente des écarts-types importants dans la même zone du domaine d'écoulement (*confer* figure 3.12). Ces derniers sont quasiment deux fois plus importants que dans le scénario d'écoulement *lent*. Un détachement tourbillonnaire est également observé au même endroit (*confer* figure 6.28 à l'annexe 4.4).

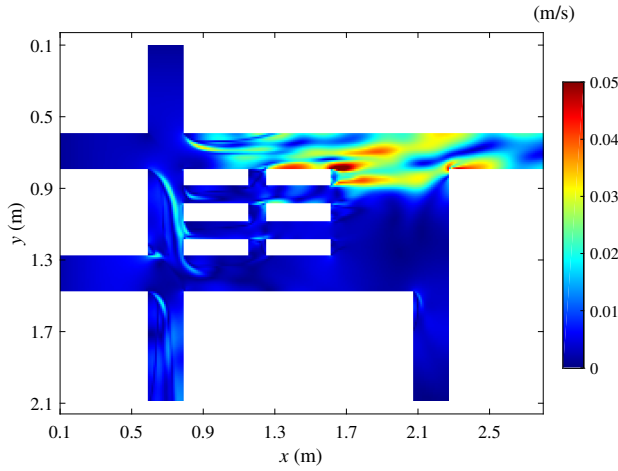


FIGURE 3.11 – Écart-types du champ de vitesse numérique (configuration 7h - écoulement *lent*).

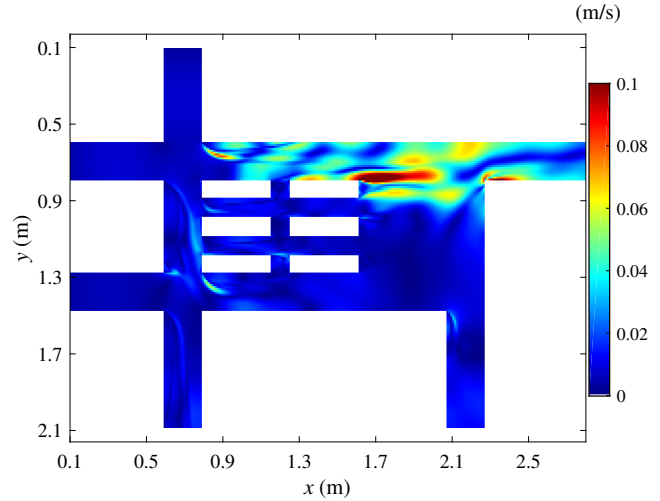


FIGURE 3.12 – Écart-types du champ de vitesse numérique (configuration 7h - écoulement *modéré*).

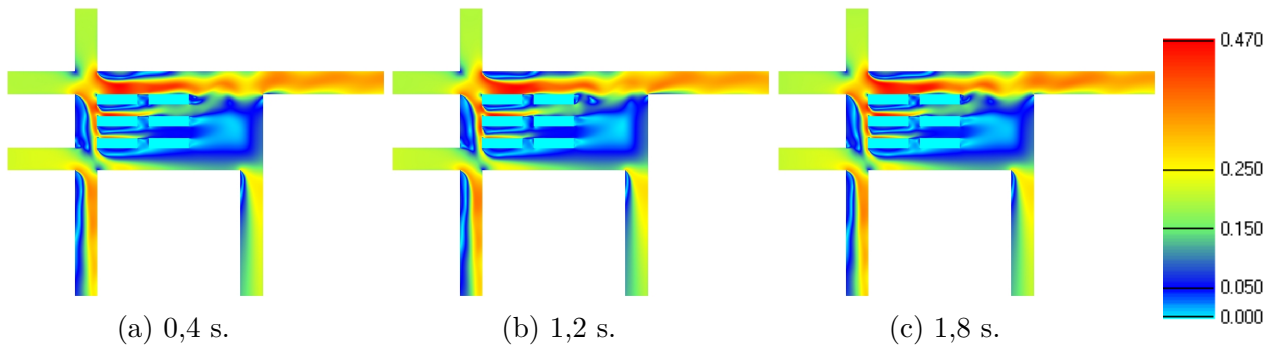


FIGURE 3.13 – Détachement tourbillonnaire en aval de la ligne de blocs supérieure (configuration 7h - scénario *lent*) [m/s].

Concernant la configuration 7i en écoulement *modéré*, les variations de vitesses sont observées sur l'ensemble du domaine d'écoulement. Notons toutefois que les oscillations sont particulièrement visibles dans l'espace vide ainsi qu'au lieu de rencontre de l'écoulement diagonal avec les blocs mentionné à la section 5.1 de ce chapitre. Par ailleurs, nous observons sur la figure 3.14 que le champ de vitesse présente des variations dans la rue *HC*, en dessous des deux colonnes de blocs. Des variations plus légères sont aussi relevées dans l'espace vide. En écoulement *rapide*, nous constatons sur la figure 3.15 que cette configuration urbaine engendre des écarts-types de vitesse plus importants dans ces deux zones. Ce sont par ailleurs à ces positions que les oscillations sont les plus visibles. De plus, la valeur des écarts-types est plus importante le long et à l'aval des blocs. Nous remarquons également une petite zone avec des écarts-types élevés dans chaque branche de sortie. Ces dernières sont situées au niveau des ressauts hydrauliques mis en lumière à la section 5.1 de ce chapitre.

Cette configuration urbaine n'engendre pas de détachement tourbillonnaire comme observé dans la configuration 7h. Cependant, la figure 3.16 permet de visualiser la séparation de l'écoulement préférentiel à l'amont du premier bloc de la ligne inférieure de blocs. Les oscillations observées sont donc des oscillations d'intensité de vitesse.

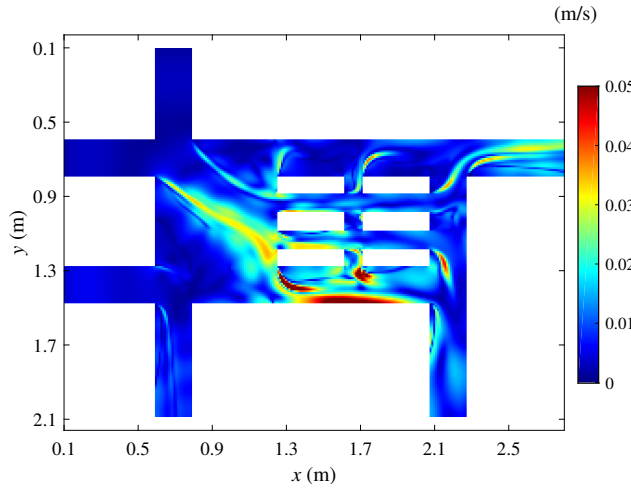


FIGURE 3.14 – Écart-types du champ de vitesse numérique (configuration $7i$ - écoulement *modéré*).

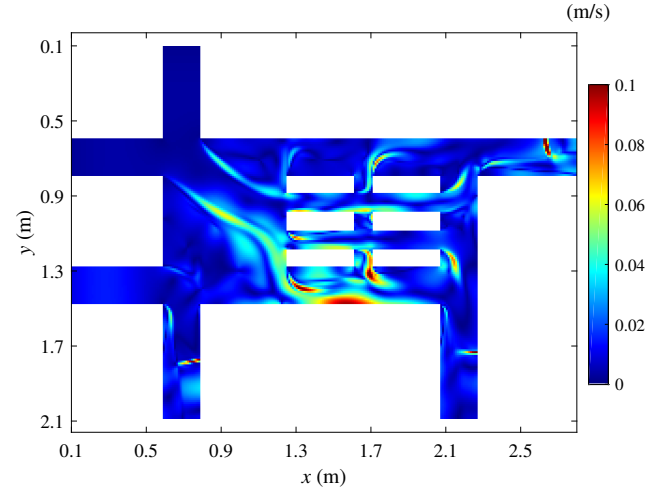


FIGURE 3.15 – Écart-types du champ de vitesse numérique (configuration $7i$ - écoulement *rapide*).

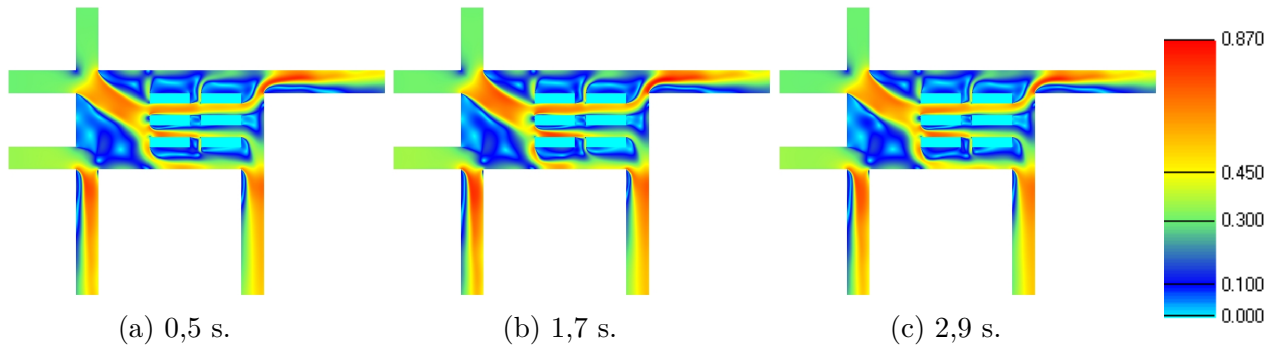


FIGURE 3.16 – Séparation d'écoulement en amont de la ligne inférieure de blocs (configuration $7h$ - scénario *modéré*) [m/s].

Enfin, la configuration $7g$ en écoulement *rapide* présente des oscillations importantes dans la rue HB comme mentionné dans le tableau 3.10. Notons également que les oscillations observées dans cette configuration avec ce scénario d'écoulement possèdent une fréquence plus élevée que les oscillations observées dans les autres cas étudiés. Cette fréquence a d'ailleurs été mesurée aux sections 3 et 4 et vaut 1,3 Hz.

En observant les écart-types présentés à la figure 3.17, nous constatons logiquement que les écart-types de vitesse sont importants dans la rue HB ainsi que dans la partie supérieure de l'espace vide. Les écart-types sont particulièrement importants entre les deux blocs supérieurs. C'est en fait dans cette zone, à l'aval du premier bloc supérieur qu'a lieu le phénomène de lâcher tourbillonnaire. Ce phénomène est illustré en trois étapes à la figure 3.18. Nous décelons sur la deuxième image de cette figure (figure 3.18b) le tourbillon qui se détache à l'aval du premier bloc.

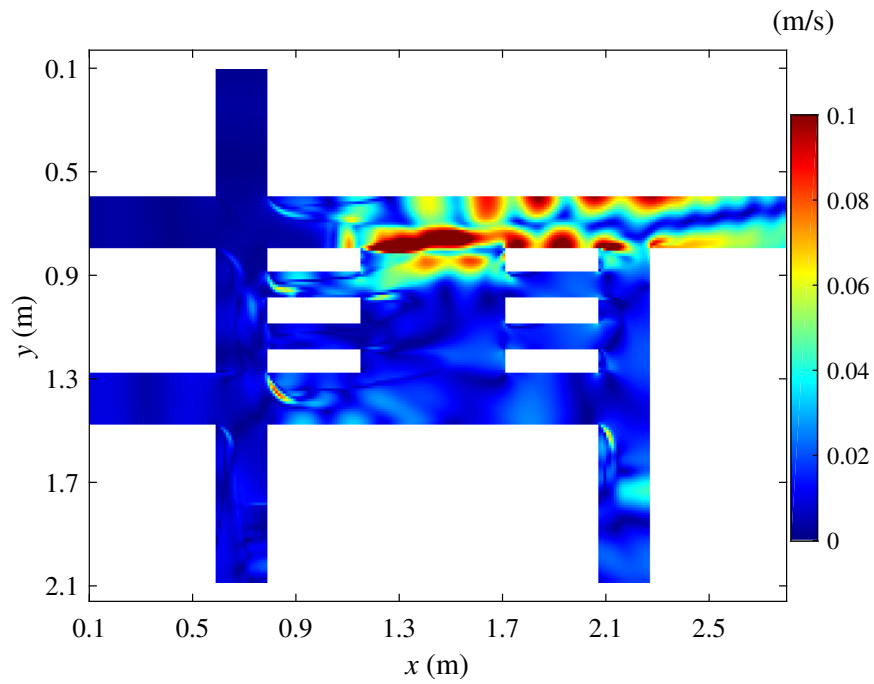


FIGURE 3.17 – Ecarts-types du champ de vitesse numérique (configuration γg - écoulement rapide).

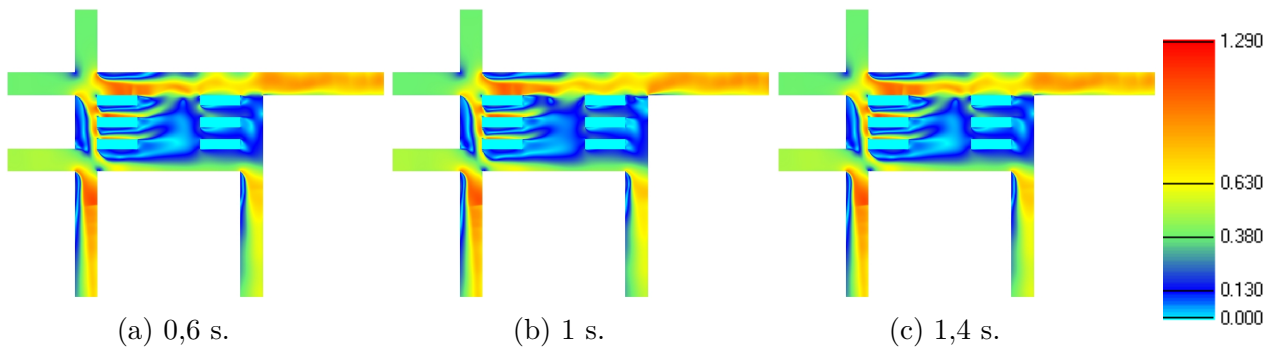


FIGURE 3.18 – Détachement tourbillonnaire dans la partie supérieure de l'espace vide (configuration γg - scénario rapide) [m/s].

7 Conclusion

En conclusion, la configuration $7g$ est relativement proche de la configuration de référence au niveau des hauteurs d'eau en entrée ainsi qu'en termes de répartition de débit en sortie. Néanmoins, les hauteurs d'eau en entrée sont légèrement supérieures à celles de la configuration de référence, une portion plus importante du débit s'écoule vers la sortie 1 et une moins importante vers la sortie 2 . En écoulement *lent* et *modéré*, cette configuration est très stable au vu des écarts-types, indiquant un écoulement stationnaire. Par contre, en écoulement *rapide*, cette configuration présente d'importantes oscillations dans la rue HB avec une fréquence relativement élevée. Concernant la configuration $7h$, les valeurs moyennes des hauteurs d'eau en entrée et de la répartition du débit sont également très proches de la configuration de référence. Cependant, les hauteurs d'eau en entrée ainsi que les débits sortants présentent des fluctuations périodiques en scénario *lent* et *modéré*. Ces fluctuations sont les indicateurs des oscillations observées dans la rue HB . Enfin, la configuration $7i$ est la plus différente par rapport à la configuration de référence, au sujet des hauteurs d'eau en entrée et de la répartition du débit en sortie. Elle est stable en écoulement *lent* mais des oscillations apparaissent lorsque l'écoulement est accéléré.

Finalement, ces trois configurations méritent l'intérêt que nous leur portons par leur différence vis-à-vis de la configuration de référence et/ou par leur comportement oscillatoire.

Chapitre 4

Résultats expérimentaux et validation du modèle numérique

1 Hauteurs d'eau en entrée

La figure 4.1 illustre les hauteurs d'eau moyennes aux entrées pour les trois configurations étudiées en scénario d'écoulement *lent*. Les résultats obtenus en scénario d'écoulement *modéré* sont illustrés à la figure 6.29 à l'annexe 5.1. Ces hauteurs d'eau sont représentées sous forme de diagrammes en bâtonnets comme pour les résultats numériques présentés précédemment. Les écarts-types sont également repris sur ces graphiques sous forme de traits rouges. Nous observons sur ces deux figures que les différences entre les résultats numériques et les résultats expérimentaux sont très faibles.

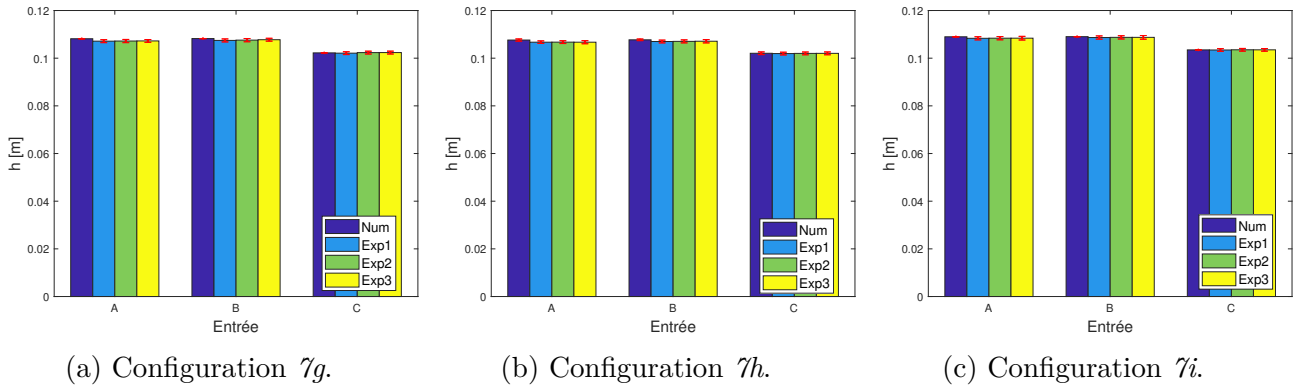


FIGURE 4.1 – Comparaisons des hauteurs d'eau moyennes numériques et expérimentales aux entrées (écoulement *lent*) [m].

Afin de mieux visualiser les différences, les figures 4.2 et 4.3 ont été réalisées. Ces dernières affichent les différences des hauteurs d'eau moyennes entre les résultats obtenus numériquement et les résultats des essais en laboratoire. Les écarts-types sont également représentés sur ces figures. Les valeurs expérimentales des hauteurs d'eau moyennes, des différences de hauteurs d'eau moyennes ainsi que des écarts-types illustrées sur ces figures sont toutes reprises dans les tableaux 4.1 et 4.2.

1. Hauteurs d'eau en entrée

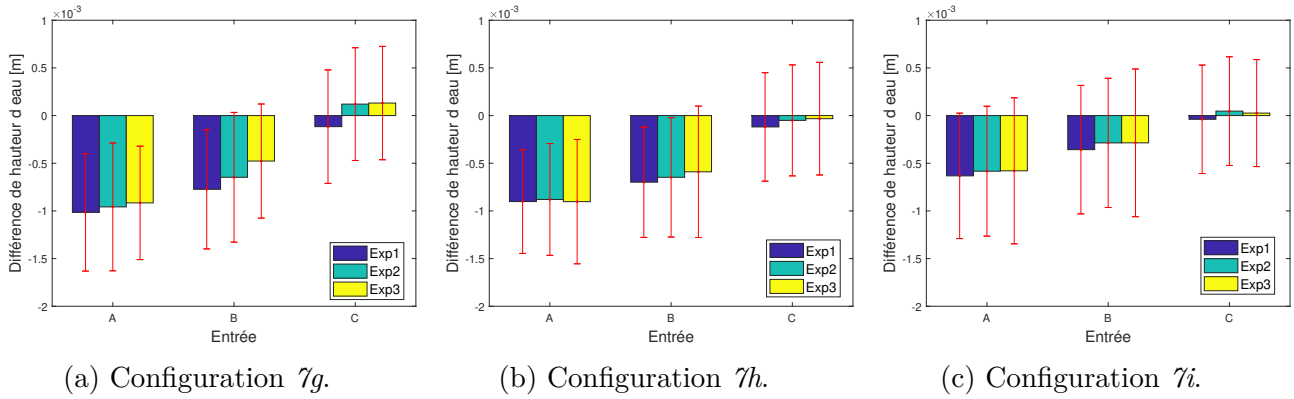


FIGURE 4.2 – Différences entre les hauteurs d'eau moyennes numériques et les hauteurs d'eau moyennes expérimentales aux entrées (écoulement *lent*) [m].

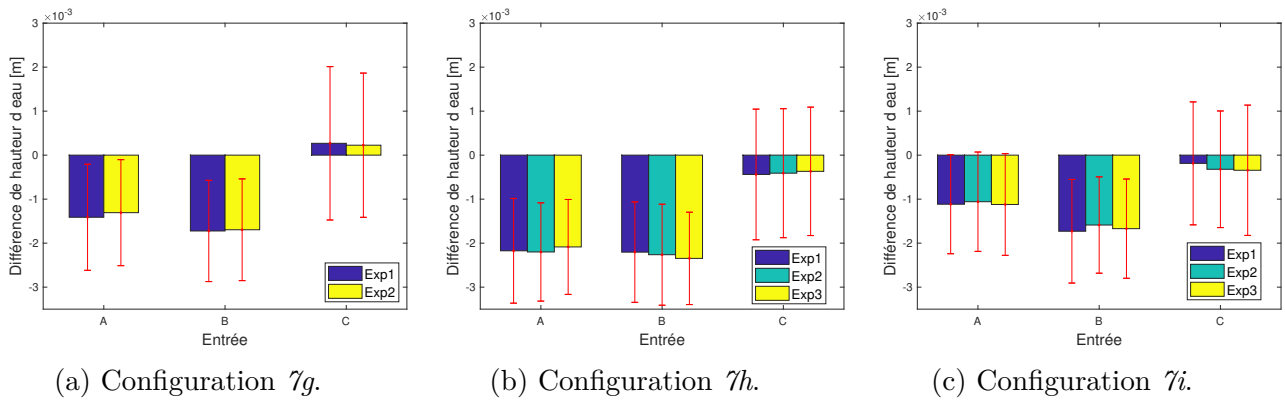


FIGURE 4.3 – Différences entre les hauteurs d'eau moyennes numériques et les hauteurs d'eau moyennes expérimentales aux entrées (écoulement *modéré*) [m].

Nous remarquons tout d'abord que les différences entre les mesures effectuées pour un même cas d'étude sont très faibles. En effet, elles sont inférieures à $2,5 \times 10^{-4}$ m soit approximativement 0,2% des hauteurs d'eau moyennes mesurées.

Pour les trois configurations et dans les deux scénarios d'écoulement testés, aux entrées *A* et *B*, les hauteurs d'eau moyennes expérimentales sont plus faibles que les hauteurs d'eau moyennes numériques. En écoulement *lent*, nous remarquons que la tendance est plus conséquente pour l'entrée *A*. Les différences varient entre 0,5 mm et 1 mm pour les configuration 7g et 7h. Notons que les différences sont légèrement inférieures pour la configuration 7i. En revanche, en scénario *modéré*, l'inverse est observé. En effet, les différences à l'entrée *B* sont plus importantes que celles à l'entrée *A*. De plus, les différences sont plus importantes en scénario *modéré* puisqu'elles sont comprises entre 1 mm et 2,4 mm pour ces deux entrées.

Concernant l'entrée *C*, les différences entre les résultats numériques et expérimentaux sont plus faibles d'un ordre de grandeur par rapport aux deux autres entrées, pour les trois configurations et les deux scénarios d'écoulement. Notons également qu'à cette entrée la direction de la différence n'est plus semblable dans les trois configurations ni entre les mesures expérimentales d'une même configuration. Effectivement, des hauteurs d'eau moyennes légèrement supérieures aux valeurs numériques sont observables pour certaines mesures (la configuration 7g en écoulement *lent* et en écoulement *modéré* ainsi que la configuration 7i en écoulement *lent*).

L'observation de différences de l'ordre du millimètre en écoulement *lent* sur des hauteurs d'eau supérieures à 100 millimètres, représentant donc 1% de la hauteur d'eau, nous indique une

bonne correspondance entre les résultats numériques et les mesures expérimentales. En effet, ces différences sont du même ordre de grandeur que les incertitudes de mesure. En écoulement *modéré*, les différences sont légèrement supérieures mais les hauteurs d'eau également. Par conséquent, ces différences sont inférieures à 2%. Les différences sont donc légèrement supérieures à celles déterminées en écoulement *lent* mais la turbulence accrue de l'écoulement rend les mesures plus compliquées.

Analysons à présent les écarts-types. En écoulement *lent* (figure 4.2), nous nous rendons compte que ceux-ci sont tous du même ordre de grandeur, peu importe la configuration ou l'entrée considérée. L'ordre de grandeur de ces écarts-types est de 6×10^{-4} m. Rappelons que les écarts-types numériques les plus importants en écoulement *lent* ont été observés pour la configuration *7h* et sont de l'ordre de 4×10^{-4} m. Les écarts-types expérimentaux sont dès lors légèrement plus importants que les écarts-types numériques. En écoulement *modéré*, la même tendance est observée sur la figure 4.3, ils sont tous similaires. L'ordre de grandeur de ces écarts-types est de $1,5 \times 10^{-3}$ m alors que les écarts-types numériques sont inférieurs à 9×10^{-4} m.

Il est logique d'observer des écarts-types supérieurs lors d'essais expérimentaux à cause des incertitudes de mesure. Cependant, les signaux des sondes ont été filtrés afin de rejeter les valeurs aberrantes. Par conséquent, la valeur de ces écarts-types est un indicateur d'oscillations. De plus, il a été mis en évidence numériquement que les configurations possédant des écarts-types du même ordre de grandeur que ceux des mesures expérimentales présentent des oscillations. Le comportement oscillatoire de l'écoulement doit donc être vérifié pour chacune des configurations, dans les deux scénarios d'écoulement.

Les données concernant les hauteurs d'eau moyennes en entrées tendent dès lors à valider le modèle numérique puisque de faibles différences sont observées. En revanche, les écarts-types expérimentaux possèdent une allure différentes des écarts-types numériques. Les valeurs plus élevées et homogènes indiquent la présence d'un comportement oscillatoire dans chacun des cas testés expérimentalement.

Entrée		Configuration 7g			Configuration 7h			Configuration 7i		
		Exp 1	Exp 2	Exp 3	Exp 1	Exp 2	Exp 3	Exp 1	Exp 2	Exp 3
A	H [m]	0,1071	0,1072	0,1072	0,1067	0,1067	0,1067	0,1083	0,1084	0,1084
	Différence E-4 [m]	-10	-9,6	-9,2	-9	-8,8	-9	-6,3	-5,8	-5,8
	Ecart-type E-4 [m]	6,2	6,7	5,9	5,4	5,9	6,5	6,6	6,8	7,7
B	H [m]	0,1075	0,1076	0,1077	0,107	0,1071	0,1071	0,1087	0,1087	0,1087
	Différence E-4 [m]	-7,7	-6,5	-4,8	-7	-6,5	-5,9	-3,6	-2,9	-2,9
	Ecart-type E-4 [m]	6,3	6,8	6	5,8	6,3	6,9	6,7	6,8	7,7
C	H [m]	0,1021	0,1023	0,1024	0,1019	0,102	0,102	0,1034	0,1035	0,1035
	Différence E-4 [m]	-1,2	1,2	1,3	-1,2	-0,5	-0,3	-0,4	0,5	0,3
	Ecart-type E-4 [m]	6	5,9	5,9	5,7	5,8	5,9	5,7	5,7	5,6

TABLE 4.1 – Valeurs expérimentales des hauteurs d'eau moyennes aux entrées, des différences et des écarts-types en écoulement *lent*.

Entrée		Configuration γ_g		Configuration γ_h			Configuration γ_i		
		Exp 1	Exp 2	Exp 1	Exp 2	Exp 3	Exp 1	Exp 2	Exp 3
A	H [m]	0,1271	0,1272	0,125	0,1249	0,1251	0,1298	0,1298	0,1298
	Différence E-3 [m]	-1,4	-1,3	-2,2	-2,2	-2,1	-1,1	-1,1	-1,1
	Ecart-type E-3 [m]	1,2	1,2	1,2	1,1	1,1	1,1	1,1	1,2
B	H [m]	0,127	0,127	0,1252	0,1251	0,125	0,1293	0,1294	0,1294
	Différence E-3 [m]	-1,7	-1,7	-2,2	-2,3	-2,3	-1,7	-1,6	-1,7
	Ecart-type E-3 [m]	1,2	1,2	1,1	1,1	1	1,2	1,1	1,1
C	H [m]	0,1095	0,1095	0,1081	0,1081	0,1082	0,1132	0,1131	0,1131
	Différence E-3 [m]	0,27	0,23	-0,44	-0,41	-0,37	-0,19	-0,32	-0,34
	Ecart-type E-3 [m]	1,7	1,6	1,5	1,5	1,5	1,4	1,3	1,5

TABLE 4.2 – Valeurs expérimentales des hauteurs d'eau moyennes aux entrées, des différences et des écarts-types en écoulement *modéré*.

2 Répartition de débit

Les répartitions du débit expérimentales et numériques pour les trois configurations étudiées en scénario d'écoulement *lent* sont présentées sous forme de diagramme en bâtonnets à la figure 4.4. Une figure similaire pour les résultats en écoulement *modéré* est exposée à la figure 6.30 à l'annexe 5.2. Sur ces diagrammes en bâtonnets apparaissent également les écarts-types représentés par les traits rouges.

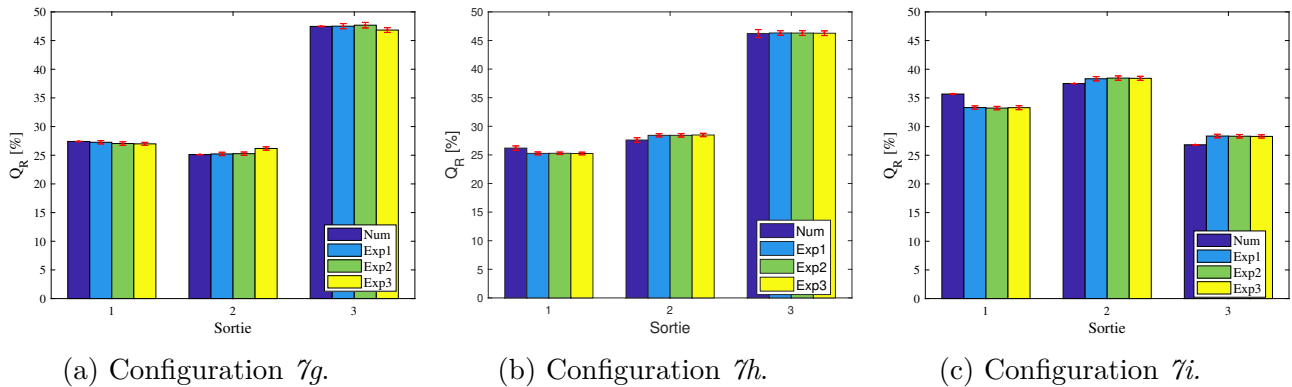


FIGURE 4.4 – Comparaisons des répartitions de débit numériques et expérimentales (écoulement *lent*) [%].

Tout comme les hauteurs d'eau moyennes, les répartitions de débit mesurées expérimentalement sont très proches de celles calculées numériquement. Une tendance se dénote toute de même de ces graphiques. La portion de débit sortant à la sortie 1 est légèrement inférieure lors des essais expérimentaux par rapport aux prévisions numériques et l'inverse est observé à la sortie 2. Cette constatation est valide pour les trois configurations en écoulement *lent*. En revanche, elle n'est pas valide pour la configuration 7g en écoulement *modéré*. De plus, la tendance est plus importante pour la configuration 7i, dans les deux scénarios d'écoulement.

Afin d'analyser plus en détails ces différences de répartitions de débit, les figures 4.5 et 4.6 ont été réalisées. Elles illustrent les différences des mesures expérimentales par rapport aux prévisions numériques. Les écarts-types y sont également affichés.

La tendance observée sur les figures de répartitions de débit est confirmée par les figures de différences de répartitions. En effet, la portion de débit s'écoulant par la sortie 1 est inférieure à celle déterminée numériquement et inversement pour la sortie 2, à l'exception de la configuration 7g en écoulement *modéré*.

Nous remarquons tout de même que la configuration 7i présente les plus grandes différences par rapport aux prévisions numériques, en écoulement *lent* comme en écoulement *modéré*. En effet, les différences à la sortie 1 sont de l'ordre de 2,4 pp en écoulement *lent* et de 1,6 pp en écoulement *modéré* tandis que les deux autres configurations présentent des différences ne dépassant pas 1 pp en écoulement *lent* et 0,5 pp en écoulement *modéré* pour cette même sortie.

Li et al. (2021a) ont observé une tendance inverse pour la configuration urbaine ne présentant aucun obstacle dans la zone centrale. Dans ce cas-là, la proportion de débit sortant à la sortie 2 était surestimée par le modèle numérique et inversement pour celle de la sortie 3. Cette observation a été expliquée par la moins bonne approximation numérique de l'écoulement diagonal intense entre les entrées A et B et la sortie 2. Dans le cas étudié ici, malgré que les observations soient opposées, l'explication est identique. En effet, l'écoulement diagonal intense se développe dans la configuration 7i grâce à l'espace libre présent dans la partie amont de la zone centrale et le modèle numérique n'estime pas exactement cet écoulement diagonal intense.

Les différences restent toutefois faibles puisqu'elles ne dépassent pas 2,5 pp. Cette valeur est en effet du même ordre de grandeur que les erreurs liées aux incertitudes de mesures. Par conséquent, le modèle numérique reste valide concernant le calcul des répartitions de débit en sortie pour les trois configurations étudiées. Par ailleurs, les mesures expérimentales pour un même cas sont très proches les unes des autres. En effet, la différence maximale entre deux valeurs moyennes issues des mesures expérimentales est inférieure à 1 pp. La représentativité des mesures est donc assurée.

Concernant les écarts-types, en écoulement *lent* comme en écoulement *modéré*, ils sont du même ordre de grandeur, peu importe la configuration étudiée ou la sortie considérée. L'ordre de grandeur de ces écarts-types est de 0,3%. Les écarts-types des répartitions de débit déterminés numériquement varient entre $2 \times 10^{-3}\%$ et $6,3 \times 10^{-1}\%$ en écoulement *lent*. En écoulement *modéré*, ils sont légèrement supérieurs pour les configurations $7h$ et $7i$ mais ils restent inférieurs à 1%.

Au sujet des écarts-types de la configuration $7g$ dans le scénario d'écoulement *modéré*, nous observons un écart-type plus important à la sortie 3 pour une des deux mesures réalisées. Ce dernier vaut 1,77%, soit quatre à cinq fois plus grand que les autres écarts-types observés dans cette configuration. De plus, les écarts-types numériques de cette configuration sont compris entre 7×10^{-3} et $1,5 \times 10^{-2}$. Cette valeur semble donc aberrante et est peut-être issue d'une mauvaise récolte des données. Les valeurs temporelles de cette expérience doivent dès lors être analysées plus en détails.

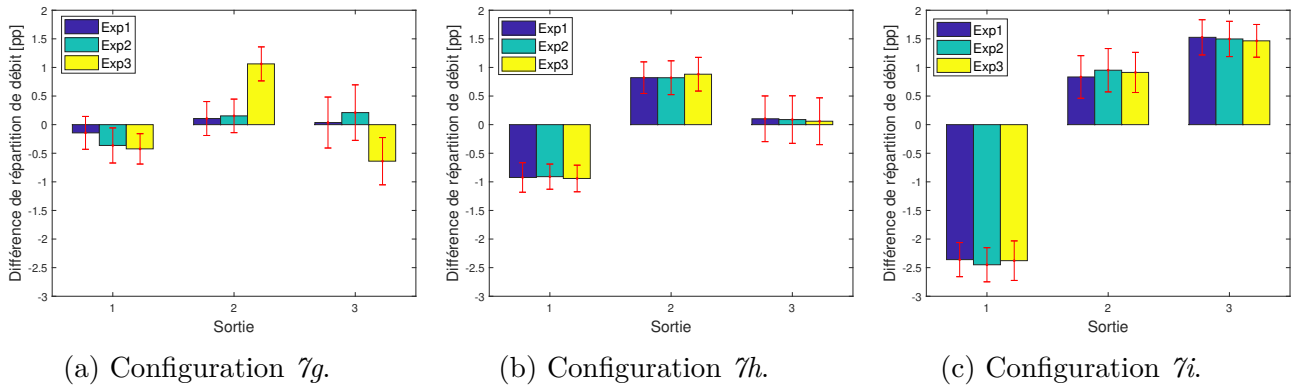


FIGURE 4.5 – Différences entre les répartitions de débit numériques et les répartitions de débit expérimentales (écoulement *lent*) [pp].

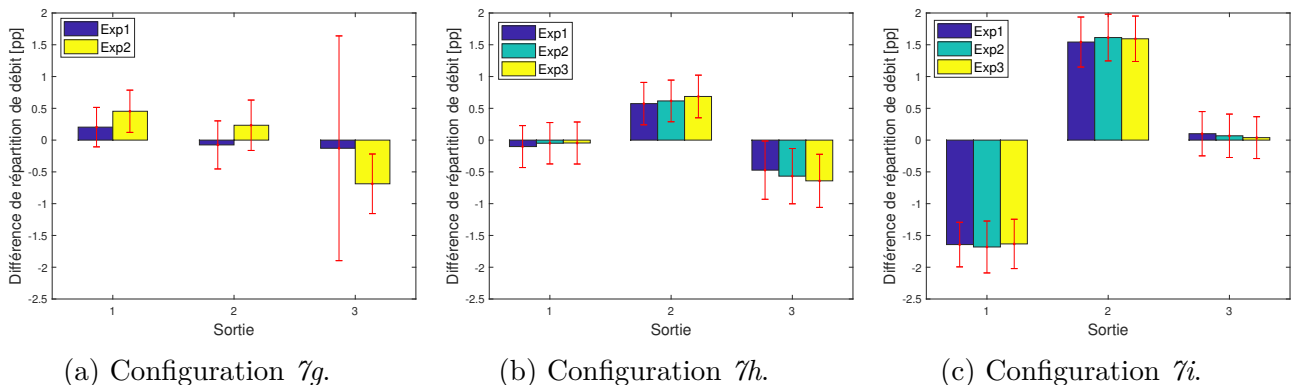


FIGURE 4.6 – Différences entre les répartitions de débit numériques et les répartitions de débit expérimentales (écoulement *modéré*) [pp].

Les écarts-types expérimentaux présentent de manière générale des valeurs comparables aux valeurs numériques mais aucune différence importante entre les trois configurations. Par conséquent, nous déduisons que les observations réalisées sur base des résultats numériques ne sont pas réitérées sur base des résultats expérimentaux.

Les variations temporelles des mesures récoltées seront tout de même analysées afin de déterminer si un comportement oscillatoire existe pour l'une ou l'autre de ces configurations.

L'ensemble des valeurs expérimentales illustrées sur les figures 4.4, 6.30, 4.5 et 4.6 sont reprises dans les tableaux 4.3 et 4.4.

Entrée		Configuration γ_g			Configuration γ_h			Configuration γ_i		
		Exp 1	Exp 2	Exp 3	Exp 1	Exp 2	Exp 3	Exp 1	Exp 2	Exp 3
A	Q_R [%]	27,26	27,04	26,98	25,27	25,28	25,25	33,31	33,22	33,3
	Différence [pp]	-0,14	-0,36	-0,42	-0,92	-0,91	-0,94	-2,36	-2,45	-2,38
	Ecart-type [%]	0,29	0,31	0,27	0,26	0,22	0,23	0,3	0,3	0,35
B	Q_R [%]	25,23	25,27	26,18	28,42	28,42	28,48	38,34	38,46	38,42
	Différence [pp]	0,11	0,15	1,06	0,82	0,82	0,88	0,83	0,95	0,91
	Ecart-type [%]	0,3	0,29	0,3	0,28	0,3	0,29	0,37	0,38	0,35
C	Q_R [%]	47,51	47,68	46,83	46,31	46,3	46,27	28,35	28,32	28,29
	Différence [pp]	0,04	0,21	-0,64	0,1	0,09	0,06	1,53	1,5	1,47
	Ecart-type [%]	0,45	0,49	0,41	0,4	0,42	0,41	0,31	0,31	0,29

TABLE 4.3 – Valeurs expérimentales des répartitions de débit, des différences et des écarts-types en écoulement *lent*.

Entrée		Configuration γ_g		Configuration γ_h			Configuration γ_i		
		Exp 1	Exp 2	Exp 1	Exp 2	Exp 3	Exp 1	Exp 2	Exp 3
A	Q_R [%]	28,63	28,88	26,91	26,96	26,96	33,9	33,86	33,91
	Différence [pp]	0,2	0,45	-0,1	-0,05	-0,05	-1,64	-1,68	-1,6
	Ecart-type [m]	0,31	0,33	0,33	0,33	0,33	0,35	0,41	0,39
B	Q_R [%]	25,32	25,63	28,23	28,27	28,34	38,53	38,6	38,58
	Différence [pp]	-0,08	0,23	0,57	0,62	0,69	1,54	1,61	1,59
	Ecart-type [%]	0,38	0,4	0,33	0,33	0,34	0,39	0,37	0,36
C	Q_R [%]	46,05	45,49	44,87	44,77	44,7	27,57	27,54	27,51
	Différence [pp]	-0,13	-0,69	-0,47	-0,57	-0,64	0,1	0,08	0,04
	Ecart-type [%]	1,77	0,47	0,46	0,43	0,42	0,35	0,34	0,33

TABLE 4.4 – Valeurs expérimentales des répartitions de débit, des différences et des écarts-types en écoulement *modéré*.

3 Etude des variations temporelles des hauteurs d'eau

Etant donné les valeurs des écarts-types expérimentaux, les variations temporelles des hauteurs d'eau aux entrées et aux sorties doivent être étudiées.

Trois types de figures sont présentés dans cette section. Tout d'abord, les figures 4.7, et 4.8 illustrent les variations temporelles de la hauteur d'eau à l'entrée B durant dix secondes. Les deux figures reprennent ces valeurs pour les trois configurations étudiées, respectivement en écoulement *lent* et en écoulement *modéré*. Ensuite, dans la même idée, les figures 4.11 et 4.12 montrent quant à elles les variations des débits à la sortie 2 durant dix secondes également. L'intervalle de dix secondes a été choisi approximativement à la moitié des mesures réalisées, soit entre la 90ème et la 100ème seconde. Notons que sur ces quatre figures, les signaux numériques correspondant sont également illustrés, permettant ainsi de mieux comparer les résultats. Enfin, les figures 4.9 et 4.10 représentent les densités spectrales de puissance (DSP) des hauteurs d'eau aux entrées et les figures 4.13 et 4.14 les DSP des hauteurs d'eau en sortie. Les densités spectrales de puissance des résultats numériques et des mesures expérimentales, en fonction de la fréquence sont présentées sur ces figures. Chaque graphique représente dès lors les DSP pour un cas d'étude testé au laboratoire. Le calcul des densités spectrales de puissance a été réalisé sur base des mesures temporelles des hauteurs d'eau diminuées de la valeur moyenne de celles-ci. De cette manière, le calcul des DSP est réalisé sur des signaux oscillant autour de zéro. La borne supérieure des fréquences est fixée à 3 Hz sur les graphiques car au-delà de cette valeur, les courbes ne présentent pas de pics visibles à cette échelle. De plus, les fréquences attendues devraient se trouver dans l'intervalle [0 Hz ; 1,1 Hz].

3.1 Entrées

Commençons par les variations temporelles des hauteurs d'eau aux entrées illustrées aux figures 4.7 et 4.8.

La première observation tirée de ces graphiques concerne les six cas étudiés. Il s'avère que les signaux récoltés lors des essais expérimentaux présentent tous des variations qui semblent périodiques. Certes ces signaux présentent, possèdent du "bruit" mais la courbe représentant le signal lissé indique bel et bien la présence d'oscillations, pour les six cas d'étude. Il est d'ailleurs notable que les variations des mesures expérimentales sont bien plus importantes que l'amplitude des oscillations détectées numériquement.

Concernant la configuration $7g$, aucune oscillation n'avait été détectée lors de l'analyse des vitesses numériques et ce dans les deux scénarios d'écoulement. Nous observons en revanche que les mesures expérimentales présentent des variations périodiques d'amplitude relativement importante (jusqu'à 4mm en écoulement *modéré*). La fréquence de ces oscillations vaut approximativement 0,5 Hz puisque 5 pics, 5 périodes d'oscillations sont observées sur 10 secondes. Notons toutefois que le signal des hauteurs d'eau calculées numériquement, en écoulement *lent*, présente de très faibles oscillations, de l'ordre du dixième de millimètre dont la période est de 4 ou 5 secondes.

Les mesures des hauteurs d'eau en configuration $7i$ en écoulement *lent* présentent un comportement similaire à celui des mesures de la configuration $7g$ à savoir des variations plus ou moins périodiques avec une amplitude variable. De nouveau, aucun signe de comportement oscillatoire n'a été détecté lors de l'analyse des résultats numériques de ce cas.

Les données expérimentales de hauteurs d'eau aux entrées de cette même configuration mais en scénario *modéré* présentent également des oscillations relativement importantes. Nous remar-

quons par ailleurs sur la figure 4.8c que les oscillations ne présentent pas la même fréquence que les oscillations observées numériquement.

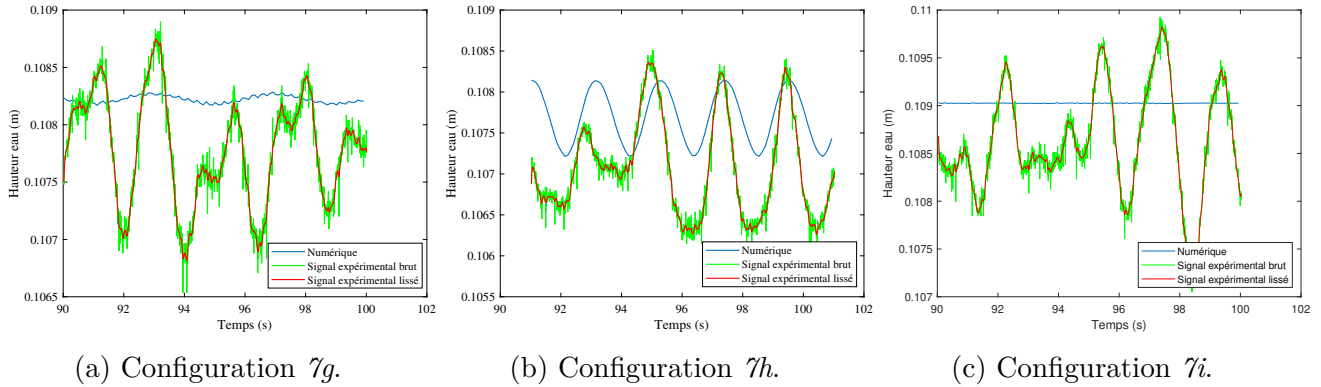


FIGURE 4.7 – Echantillons des variations temporelles des hauteurs d'eau en entrée (écoulement *lent*).

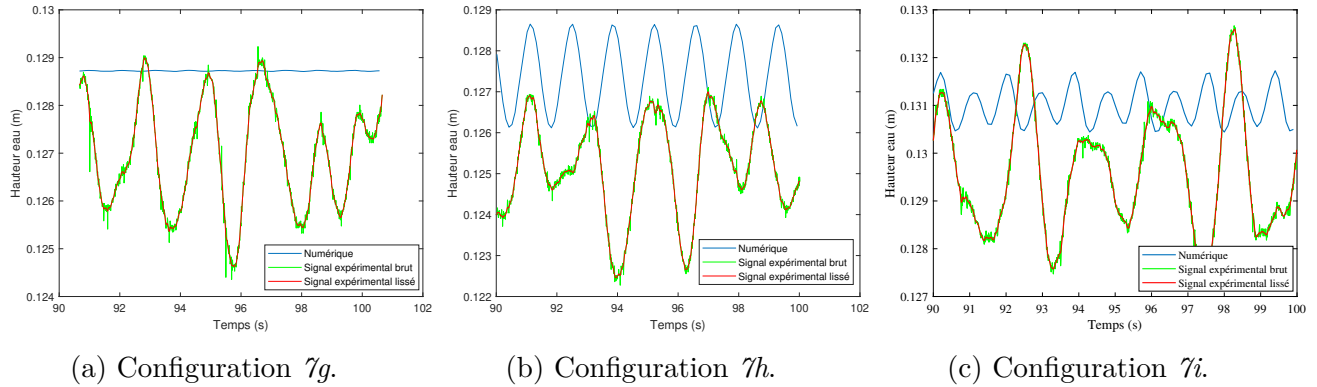


FIGURE 4.8 – Echantillons des variations temporelles des hauteurs d'eau en entrée (écoulement *modéré*).

Enfin, la configuration 7h en écoulement *lent* semble être le seul cas étudié pour lequel la fréquence des oscillations des hauteurs d'eau calculées numériquement correspond avec la fréquence des oscillations des mesures expérimentales des hauteurs d'eau. En écoulement *modéré*, les oscillations sont observées mais la fréquence est différente entre les résultats numériques et les mesures expérimentales.

Afin de déterminer avec plus de précision les fréquences des oscillations observées, les densités spectrales de puissance sont présentées aux figures 4.9 et 4.10.

Nous observons sur ces deux figures que les densités spectrales de puissance présente un pic aux alentours de 0,5 Hz pour chacun des graphiques c'est-à-dire aux trois entrées, lors des trois mesures réalisées, pour chacune des trois configurations étudiées et dans les deux scénarios d'écoulement.

En écoulement *lent*, les densités spectrales de puissance sont concentrées autour de 0,5 Hz. En revanche, en écoulement *modéré*, elle sont un peu plus dispersées. Cette tendance est notamment visible pour l'entrée C de la configuration 7g. Les DSP de cette entrée présentent un pic qui s'étend de 0,2 Hz à 1 Hz. Cependant, comme mentionné précédemment, la simulation numérique de ce cas n'a pas révélé la présence d'oscillations. D'ailleurs, les densités spectrales de puissance

des hauteurs d'eau calculées numériquement sont nulles en tout point. Le modèle numérique n'est donc pas fiable au niveau du comportement oscillatoire de l'écoulement dans ce cas-ci.

Les simulations numériques des configurations $7g$ et $7i$ en écoulement *lent* ne présentent pas d'oscillations non plus comme le montrent les densités spectrales de puissance. Etant donné que des oscillations avec une fréquence de 0,5 Hz ont été mesurées, le modèle numérique ne semble pas tenir compte de certains phénomènes apparaissant dans ces deux configurations.

Par ailleurs, la simulation de la configuration $7i$ en écoulement modéré avait indiqué la présence d'un comportement oscillatoire avec des fréquences de 0,55 Hz et 1,1 Hz. Ces valeurs sont logiquement mises en évidence par les densités spectrales des résultats numériques des hauteurs d'eau. Cependant, les mesures expérimentales montrent la présence d'oscillations avec une fréquence de 0,5 Hz. La fréquence de 1,1 Hz n'est pas reprise dans la gamme de fréquences mesurées. Toutefois, la "bosse" présente dans les DSP des valeurs expérimentales de l'entrée C nous indique que des oscillations à plus haute fréquence (0,8 Hz) sont mesurées. Ces résultats sont donc encourageants.

Les résultats numériques indiquent des oscillations dans la configuration $7h$ avec une fréquence de 0,5 Hz en écoulement *lent* et de 0,73 Hz en écoulement *modéré*. Les mesures expérimentales confirment la présence d'un comportement oscillatoire. Cependant, les fréquences mesurées sont toutes de l'ordre de 0,5 Hz, même en écoulement *modéré*. Seule l'entrée C comporte des oscillations à plus haute fréquence, à l'instar de la configuration $7i$ en écoulement *modéré*. Ces fréquences sont très proches de la fréquence numérique puisqu'elles avoisinent 0,73 Hz.

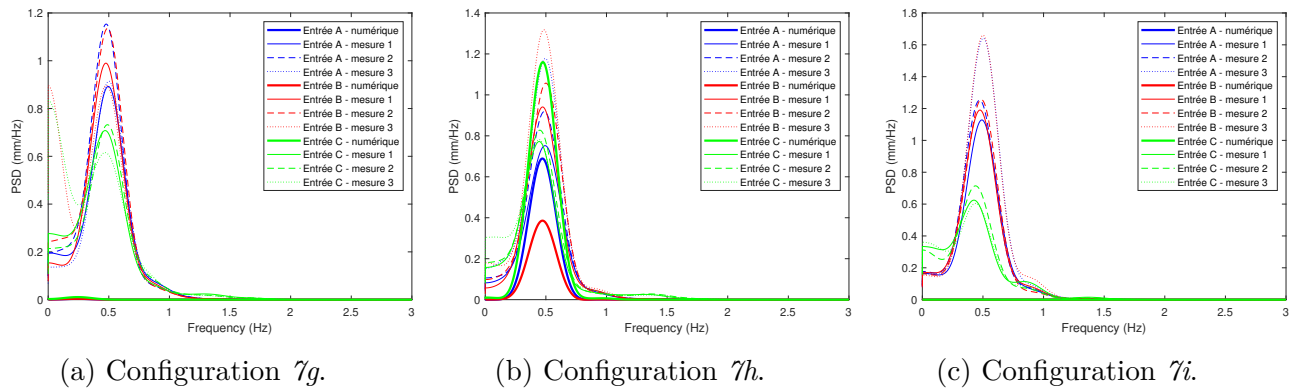


FIGURE 4.9 – Densités spectrales de puissance des hauteurs d'eau aux entrées (écoulement *lent*).

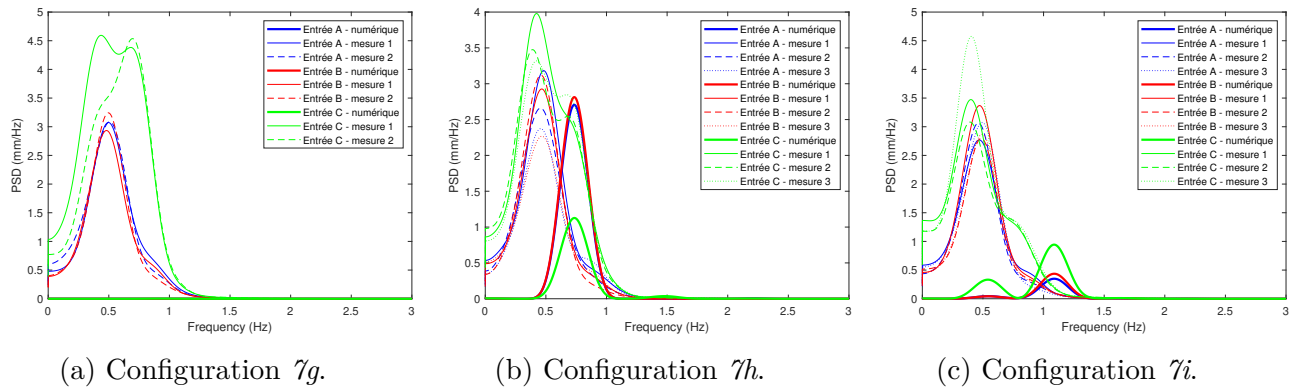


FIGURE 4.10 – Densités spectrales de puissance des hauteurs d'eau aux entrées (écoulement *modéré*).

3.2 Sorties

Les variations temporelles des hauteurs d'eau aux sorties, illustrées aux figures 4.11 et 4.12 sont également analysées. Le but est de déterminer si les observations numériques ainsi que les observations basées sur les hauteurs d'eau aux entrées sont valables également pour les hauteurs d'eau aux sorties.

Tout d'abord, les mesures récoltées lors des différents essais expérimentaux comportent toutes des variations relativement importantes. Certaines présentent clairement des variations périodiques comme celles présentées à la figure 4.11b. En revanche, les mesures semblent plus irrégulières pour d'autres cas avec par exemple l'échantillon de mesures de la configuration 7i en écoulement *lent* (figure 4.11c).

Parmi les exemples illustrés aux figures 4.11 et 4.12, la configuration 7h en écoulement *lent* ainsi que la configuration 7i en écoulement *modéré* sont les deux cas pour lesquels les fréquences des variations temporelles des hauteurs d'eau en sortie semblent correctement estimées par le modèle numérique. Concernant la configuration 7h en écoulement *modéré*, la fréquence des oscillations des mesures expérimentales n'est pas clairement identifiable sur cette figure. Pour les autres cas étudiés, les oscillations ou du moins les fortes variations irrégulières ne sont pas présentes lors des simulations numériques.

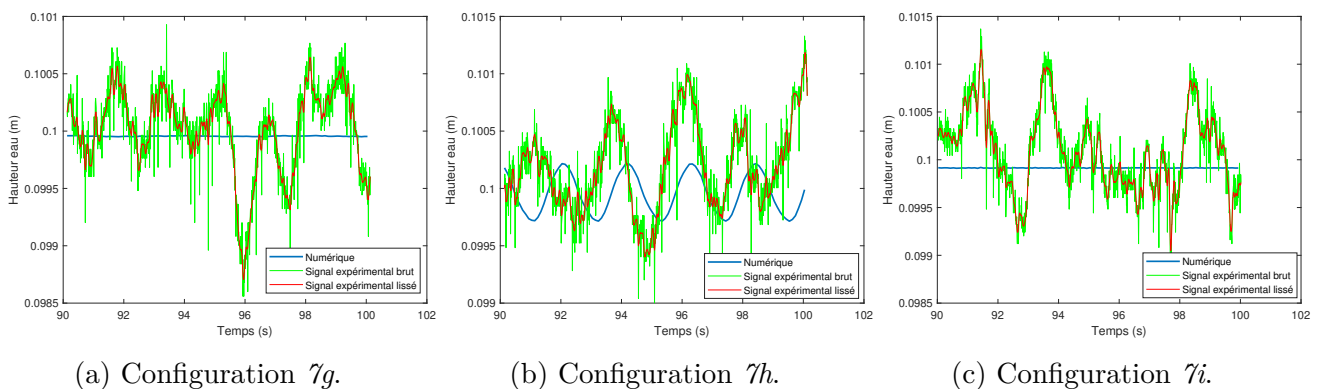


FIGURE 4.11 – Echantillons des variations temporelles des hauteurs d'eau aux sorties (écoulement *lent*).

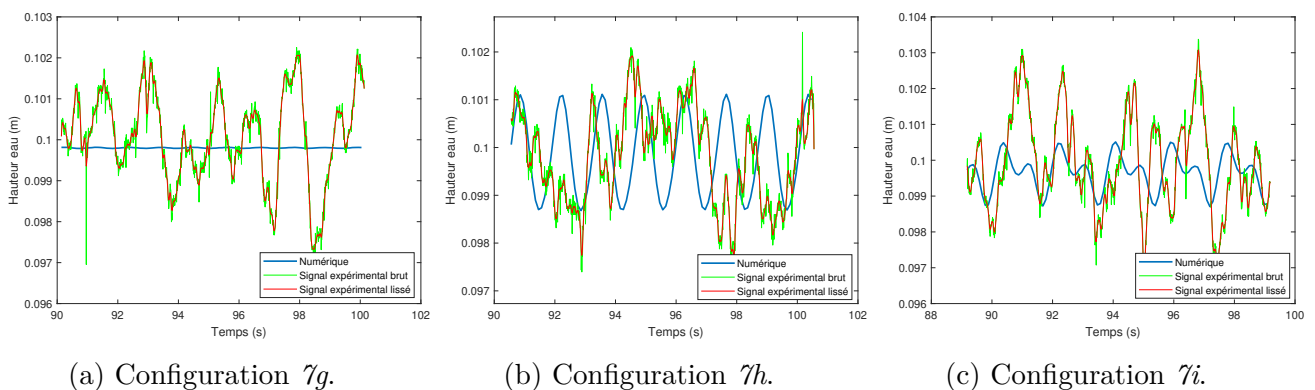


FIGURE 4.12 – Echantillons des variations temporelles des hauteurs d'eau aux sorties (écoulement *modéré*).

Afin de déterminer les fréquences des oscillations, les densités spectrales de puissance des hauteurs d'eau aux sorties sont présentées aux figures 4.13 et 4.14. La figure 4.13 présente les DSP d'une des mesures en écoulement *lent* tandis que la figure 4.14 reprend celles d'une des mesures en écoulement *modéré*, pour chacune des trois configurations urbaines.

Les graphiques des DSP des mesures expérimentales présentent tous la même allure. Les courbes ressemblent effectivement à des gaussiennes centrées en 0,5 Hz. Plus précisément, comme pour les DSP des hauteurs d'eau en entrée, le pic est concentré autour de 0,5 Hz en écoulement *lent* tandis qu'il s'étend sur une plus grande gamme de fréquences en écoulement *modéré*. En effet, dans le premier scénario d'écoulement, le pic s'étend de 0,3 Hz à 0,7 Hz alors qu'en écoulement *modéré*, le pic de ces courbes s'étend de 0,1 Hz à 1 Hz. Par conséquent, la présence d'oscillations à plus haute fréquence est probable pour les trois configurations en écoulement *modéré*.

De manière plus détaillée, les densités spectrales de puissance des mesures expérimentales illustrées à la figure 4.14a présentent deux maxima, un pour des fréquences inférieures à 0,5 Hz (0,2-0,3 Hz) et un autre pour des fréquences supérieures à 0,5 Hz (0,7-0,8 Hz). Cette tendance a été notifiée lors de l'analyse des hauteurs d'eau en entrée mais uniquement pour l'entrée *C* dans le second scénario d'écoulement. En revanche, pour les hauteurs d'eau en sortie, cette observation est valable pour les trois sorties lors de la configuration *7g* et pour la sortie *2* de la configuration *7h* mais de manière moins prononcée.

En comparaison avec les résultats numériques, la simulation de la configuration *7h* en écoulement *lent* est à nouveau la seule qui prédit exactement la fréquence des oscillations observées expérimentalement, soit 0,5 Hz. Pour les configurations *7h* et *7i* en écoulement *modéré*, la présence d'oscillations avec une fréquence supérieure à 0,5 Hz a été prédite. La simulation de la configuration *7h* prévoit un comportement oscillatoire avec une fréquence de 0,74 comme identifié lors de l'analyse des débits sortants calculés numériquement (section 4 du chapitre 3). Concernant la simulation *7i*, l'analyse des débits sortants a démontré la présence de variations périodiques possédant une fréquence de 0,55 Hz. Or, nous remarquons sur la figure 4.14c que les DSP des hauteurs d'eau en sortie présentent deux maxima, le premier en l'abscisse 0,55 Hz et le second à 1,1 Hz. Cette dernière fréquence n'avait pas été mise en lumière par la simulation numérique. Cependant, comme mentionné précédemment, les hauteurs d'eau en entrée calculées numériquement comportent cette fréquence. Les mesures expérimentales de ces deux cas révèlent des oscillations possédant une gamme de fréquence relativement large centrée à l'abscisse 0,5 Hz. Par conséquent, les prévisions numériques ne sont pas exactes mais elles sont tout de même proches des résultats expérimentaux. Enfin, pour les trois autres cas étudiés (configuration *7g* en écoulement *lent* et en écoulement *modéré* ainsi que la configuration *7i* en écoulement *lent*), le modèle numérique ne prédit aucune oscillation alors que lors des essais expérimentaux un comportement oscillatoire est mesuré.

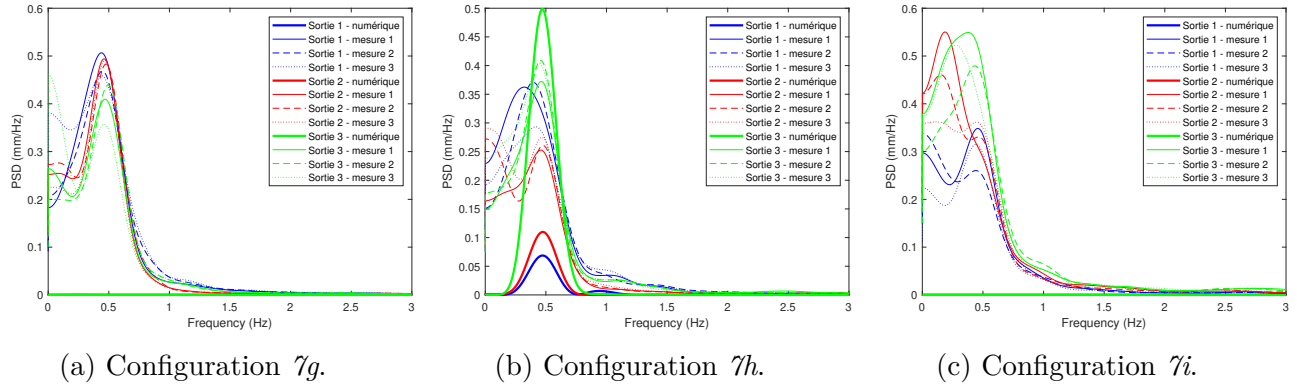


FIGURE 4.13 – Exemples de densités spectrales de puissance des hauteurs d'eau aux sorties (écoulement *lent*).

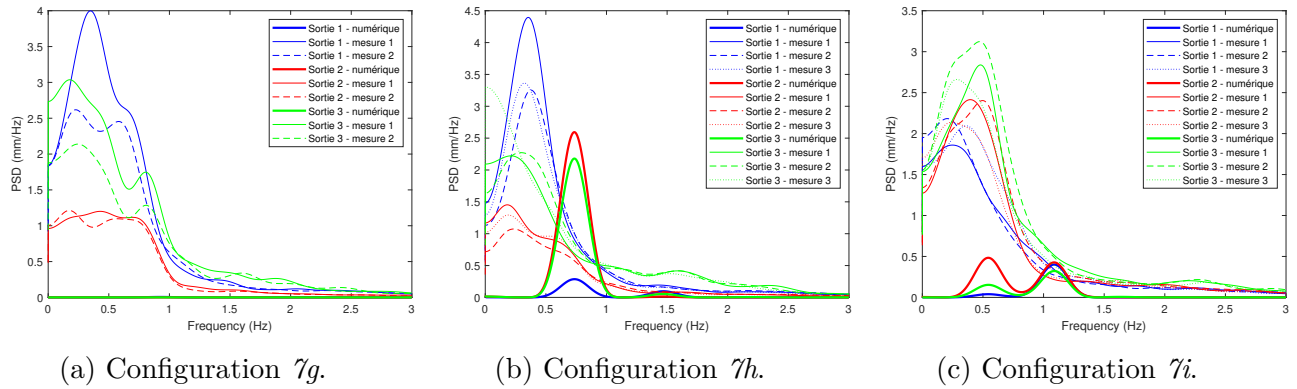


FIGURE 4.14 – Exemples de densités spectrales de puissance des hauteurs d'eau aux sorties (écoulement *modéré*).

3.3 Conclusion

L'étude des variations temporelles des hauteurs d'eau mesurées expérimentalement aux entrées et aux sorties du domaine d'écoulement indique clairement la présence d'oscillations dans les six cas étudiés. Les comportements oscillatoires observés possèdent d'ailleurs tous une fréquence similaire se situant dans l'intervalle $[0,1 \text{ Hz} ; 1 \text{ Hz}]$. Il est toutefois notable que les oscillations détectées dans les trois configurations en scénario d'écoulement *lent* possèdent une fréquence égale ou du moins très proche de 0,5 Hz. Enfin, le modèle numérique prédit parfaitement le comportement oscillatoire de la configuration 7h en écoulement *lent*. Un comportement oscillatoire est également simulé pour les configurations 7h et 7i en écoulement *modéré*. Leurs fréquences sont proches des fréquences mesurées expérimentalement mais ne correspondent pas exactement. Concernant les trois derniers cas étudiés, aucune oscillation n'apparaît lors des simulations numériques alors qu'un comportement oscillatoire est décelé expérimentalement.

4 Comparaison des champs de vitesses

Les figures 4.15, 4.16, 4.17, 4.18, 4.19 et 4.20 présentent chacune le champ de vitesse de surface moyenne mesuré expérimentalement, le champ de vitesse moyennée sur la hauteur d'eau calculé numériquement ainsi que la différence entre ces deux champs de vitesse (champ de vitesse moyennée - champ de vitesse de surface). La différence des deux champs de vitesse est normalisée par une vitesse caractéristique qui correspond au débit spécifique d'entrée divisé par une hauteur d'eau caractéristique. La valeur de cette dernière est de 0,1 m correspondant donc à la valeur de la condition limite aval. Ce choix a été réalisé car c'est la seule valeur de hauteur d'eau connue et fixe au cours des essais. Cette vitesse théorique caractéristique vaut dès lors 0,2 m/s en écoulement *lent* et 0,4 m/s en écoulement *modéré*.

Les champs de vitesse comparés ne représentent pas les mêmes grandeurs étant donné que le premier illustre les vitesses moyennées sur la hauteur d'eau et le second illustre uniquement les vitesses de surface de l'écoulement. Par conséquent, une correspondance parfaite entre ces deux champs de vitesse est inenvisageable.

4.1 Scénario d'écoulement *lent*

Les figures 4.15, 4.16 et 4.17 présentent les résultats en écoulement *lent*. Nous observons tout d'abord que les deux champs de vitesse sont de manière générale assez proches l'un de l'autre, pour les trois configurations étudiées. En effet, les schémas d'écoulement sont identiques et les lieux d'extremum des vitesses correspondent également. Les prédictions du modèle numérique sont donc généralement correctes.

Nous remarquons toutefois certaines différences mises en évidence grâce à l'illustration de la comparaison des deux champs de vitesse.

La première différence notable concerne la rue horizontale *HB* dans les configurations *7g* et *7h*. Nous remarquons que cette rue présente de manière générale des vitesses moyennes calculées plus importantes que les vitesses de surface. Cette observation n'est toutefois pas valable pour le début de la rue. Ce type de différence a également été notifié par Li et al. (2021a). L'explication vient des structures d'écoulement 3D qui se créent à l'aval d'intersections de rues et qui induisent donc des différences plus conséquentes entre la vitesse de surface et la vitesse moyennée sur la hauteur d'eau (Li et Zeng, 2010; Mignot et al., 2013). Nous remarquons le même phénomène dans la ruelle supérieure de la configuration *7i* mais il est moins conséquent.

Dans la configuration *7g*, les mesures expérimentales indiquent que l'écoulement rapide sortant des ruelles formées par la première colonne de blocs a tendance à se détacher des blocs avant la fin de la ruelle. Cet écoulement rapide remonte ensuite vers la rue *HB* de manière assez prononcée. En revanche, cet écoulement rapide reste collé au bloc inférieur en aval de la zone de recirculation lors des simulations numériques. De plus, il ne montre qu'une faible inclinaison à la sortie des ruelles. Cette différence est remarquable dans la zone centrale de la configuration *7g* avec une zone de différence négative importante surmontant une zone de différence positive, à la sortie des deux ruelles horizontales. Ce phénomène fut également observé par Li et al. (2021a). Il y est d'ailleurs indiqué que ces différences proviendraient peut-être de la nature différente des variables comparées et donc des différences entre les vitesses de surface et les vitesses à une altitude inférieure (El Kadi Abderrezzak et Paquier, 2009; Li et Zeng, 2010; El Kadi Abderrezzak et al., 2011; Mignot et al., 2013; Luo et al., 2018). Notons que ce phénomène n'est pas rencontré pour la deuxième colonne de blocs. L'écoulement est en effet fortement ralenti dans l'espace libre avant de rencontrer la deuxième colonne de blocs.

La tendance décrite au paragraphe précédent est également observable dans la configuration $7h$, aux intersections entre les ruelles horizontales et la ruelle verticale, avec une remontée du jet dans la ruelle verticale. Cette tendance s'estompe d'ailleurs dans les ruelles de la deuxième colonne de blocs. L'espace vide situé dans la partie aval de la zone centrale ne présente d'ailleurs que de faibles différences entre les vitesses moyennées et les vitesses de surface. Cependant, le phénomène est plus flagrant dans la configuration $7g$.

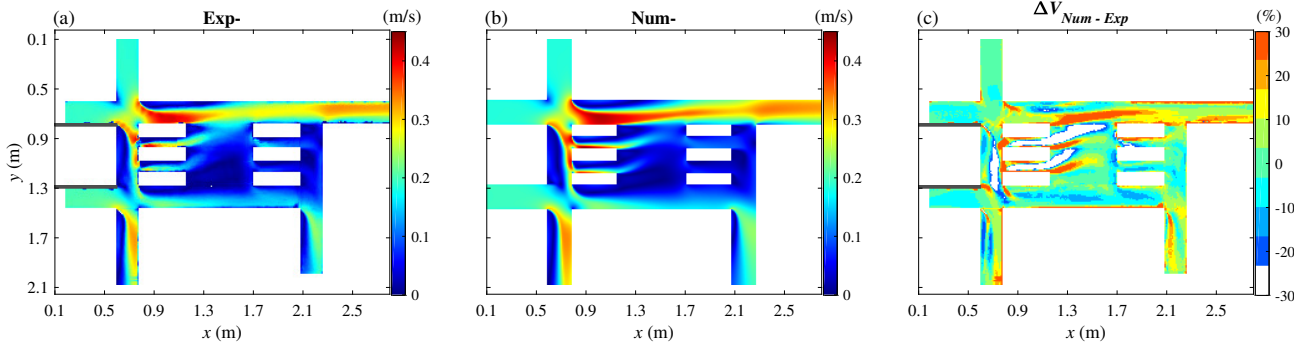


FIGURE 4.15 – Comparaison des vitesses (configuration $7g$ - écoulement *lent*).

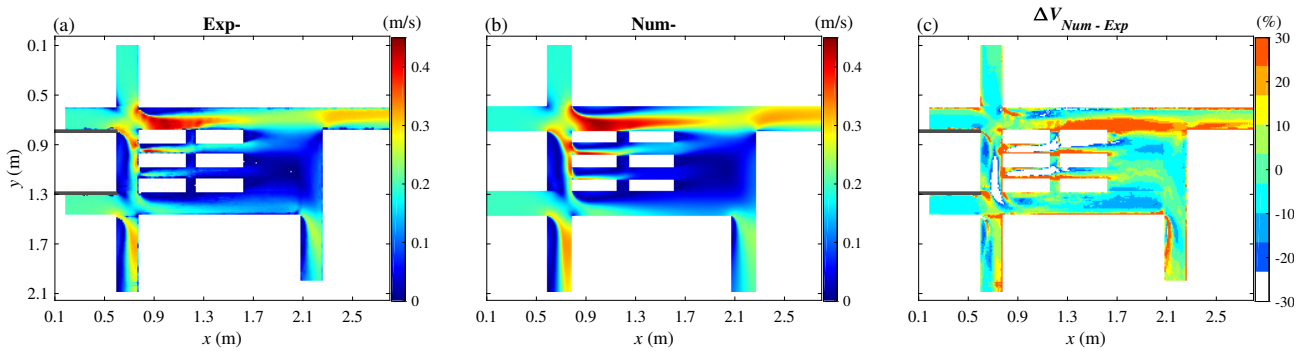


FIGURE 4.16 – Comparaison des vitesses (configuration $7h$ - écoulement *lent*).

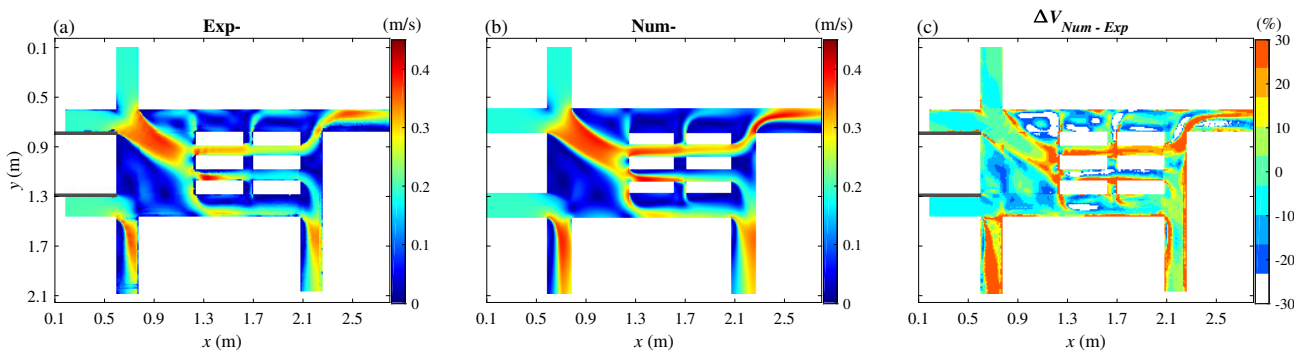


FIGURE 4.17 – Comparaison des vitesses (configuration $7i$ - écoulement *lent*).

Concernant la configuration $7i$, les vitesses de l'écoulement diagonal se développant dans l'espace libre sont plutôt correctement évaluées par le modèle numérique. Les différences les plus notables apparaissent dans la zone de recirculation supérieure, indiquant une vitesse de surface supérieure à la vitesse moyenne calculée. C'est également le cas dans la partie centrale de la rue horizontale C . Dans cette configuration, il semble y avoir plus de différences dans les zones de recirculation ainsi que dans les branches de sortie 1 et 2. Ces différences sont peut-être dues à la comparaison de deux grandeurs de nature différente. Il est cependant possible qu'elle soient liées à l'écoulement diagonal présent dans l'espace vide. En effet, nous avons mis en évidence

tout comme Li et al. (2021a) que les prédictions du modèle numérique en termes de répartitions de débit sont légèrement incorrectes pour les configurations présentant un écoulement diagonal intense.

Nous identifions finalement que les vitesses moyennées sur la hauteur d'eau dans la branche de sortie 1 sont plus importantes que les vitesses de surface mesurées. Cette observation correspond aux différences mesurées entre les répartitions de débit numériques et les répartitions de débit expérimentales présentées à la section 2 de ce chapitre. Il avait effectivement été dégagé que le modèle numérique surestime la proportion de débit sortant à la première sortie.

4.2 Scénario d'écoulement *modéré*

Passons à présent aux champs de vitesse en scénario d'écoulement *modéré* illustrés aux figures 4.18, 4.19 et 4.20.

De premier abord, les écarts entre les champs de vitesse de surface et les champs de vitesse moyennée sur la hauteur d'eau semblent plus importants. En effet, nous observons sur l'image de comparaison de la figure 4.18 une grande zone de différence supérieure à 25% dans la rue *HB*. Une zone similaire est présente en écoulement *lent* comme mentionné précédemment. Cependant, la zone en écoulement *modéré* est bien plus vaste puisqu'elle s'étend de l'intersection avec la rue *V1* jusqu'à la sortie 3. Cette tendance est également observée pour la configuration *7h*. De plus, la sortie 1, dans les trois configurations présente également des vitesses de surface plus lentes que les vitesses moyennées. Les résultats de la sortie 2 semblent plus proches dans les configurations *7g* et *7h*. Il est très probable que les structures d'écoulement 3D soient plus importantes en écoulement *modéré* qu'en écoulement *lent* puisque la turbulence est plus élevée.

Concernant les décollements de flux rapides dans les ruelles horizontales repérés en écoulement *lent*, leur détection est plus compliquée en écoulement *modéré*. Ces derniers sont observables dans la configuration *7g*, dans les ruelles formées par les deux blocs supérieurs positionnés en amont. Leur trace la plus visible reste néanmoins la zone de différence négative importante entre les deux types de résultats, localisée dans la partie supérieure de l'espace libre. Comme en scénario *lent*, il est à noter que l'écoulement est lent dans l'espace vide. Les ruelles de la deuxième colonnes de blocs ne présentent donc pas le phénomène de contraction-recirculation engendrant un flux d'écoulement rapide le long des blocs ou alors de manière très légère.

Dans la configuration *7h*, une zone de différence négative est visible dans la ruelle horizontale inférieure mais pas réellement dans la ruelle supérieure. Cette zone de différence négative témoigne à nouveau du phénomène de décollement du flux rapide. La remontée dans la ruelle verticale n'apparaît cependant pas, indiquant que le phénomène semble moins important qu'en écoulement *lent*. Enfin, la zone libre contient à nouveau des vitesses moyennées et des vitesses de surface très faibles.

Les observations tirées de la configuration *7i* en scénario *modéré* sont fortement similaires à celles réalisées en scénario *lent*. Le modèle numérique prédit le développement de l'écoulement intense dans l'espace libre. Cependant, les différences entre les vitesses moyennées et les vitesses de surface sont plus importantes qu'en écoulement *lent* pour ce flux rapide. En revanche, les zones de recirculation semblent être mieux évaluées par le modèle numérique que dans le scénario d'écoulement *lent*. La seule zone avec une forte différence négative est présente dans la rue verticale aval (rue *V2*) indiquant que le flux sortant de la ruelle inférieure se partage entre les sorties 2 et 3 au lieu de se diriger principalement vers la sortie 2 comme le prédit le modèle numérique. Nous remarquons également que les trois branches de sortie présentent des différences positives conséquentes. Par conséquent, il n'est pas possible de confirmer à l'aide des champs de vitesse la tendance de surestimation du débit à la sortie 1 et de sous-estimation du

débit à la sortie 2 par le modèle numérique dans le scénario d'écoulement *modéré*. Ces différences sont peut-être dues aux structures d'écoulement 3D se développant avec la turbulence accentuée en écoulement *modéré*. Cependant, il est également envisageable que la performance du logiciel de capture des vitesses de surface (FUDAA-LSPIV) soit réduite avec l'augmentation des vitesses d'écoulement.

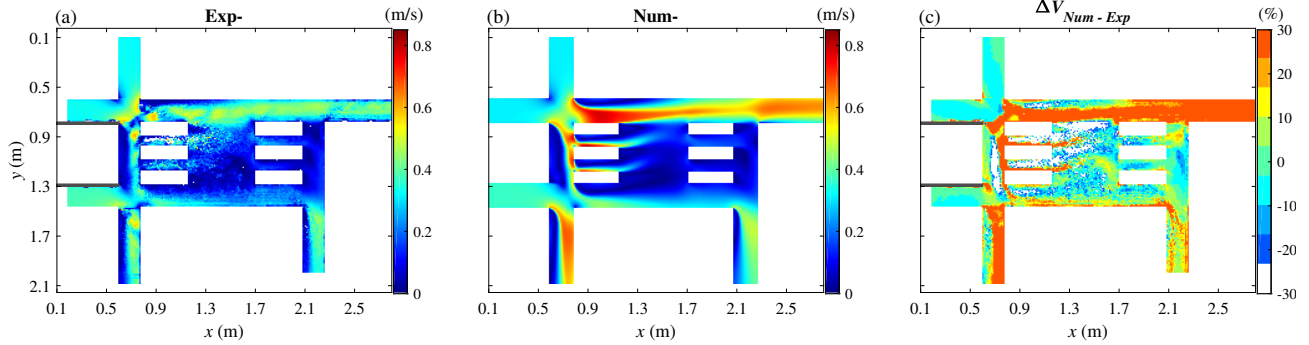


FIGURE 4.18 – Comparaison des vitesses (configuration $7g$ - écoulement *modéré*).

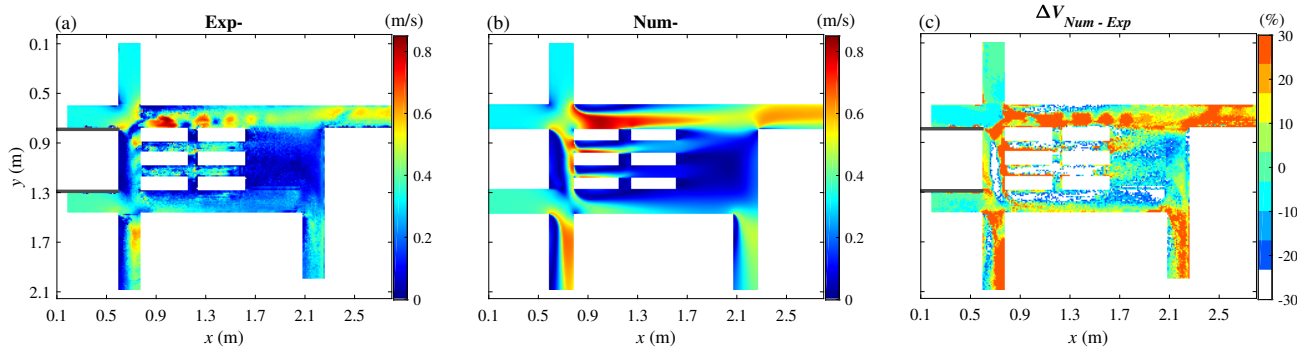


FIGURE 4.19 – Comparaison des vitesses (configuration $7h$ - écoulement *modéré*).

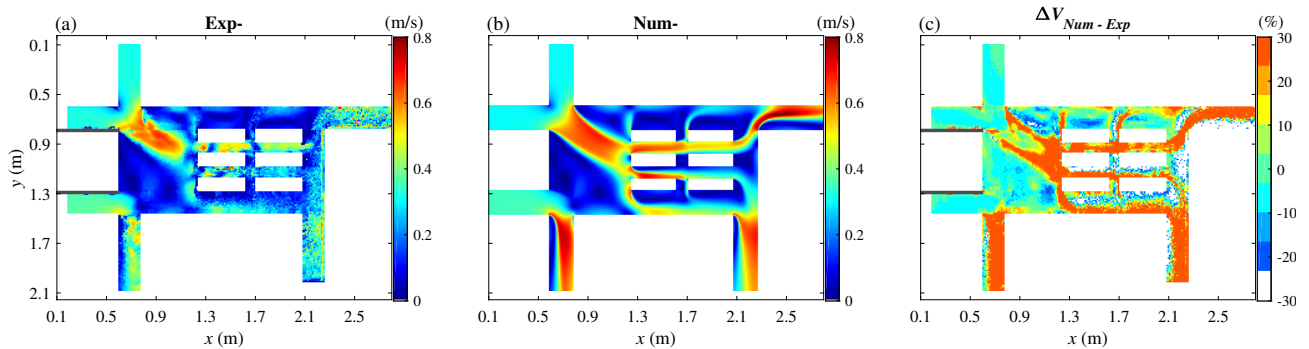


FIGURE 4.20 – Comparaison des vitesses (configuration $7i$ - écoulement *modéré*).

4.3 Fonction de distribution cumulative

Afin de quantifier les proportions de différences, les fonctions de distribution cumulative (FDC) (*Cumulative Distribution Function (CDF)*) des différences entre le champ de vitesse moyennée sur la hauteur d'eau et le champ de vitesse de surface sont représentées à la figure 4.21. Cette figure reprend la courbe de chacun des 6 cas étudiés. La figure 4.21 n'illustre que les valeurs des FDC dans la gamme des différences entre -50% et 50% car cette zone est la plus intéressante. Les courbes entières sont illustrées à la figure 6.31 à l'annexe 5.3.1.

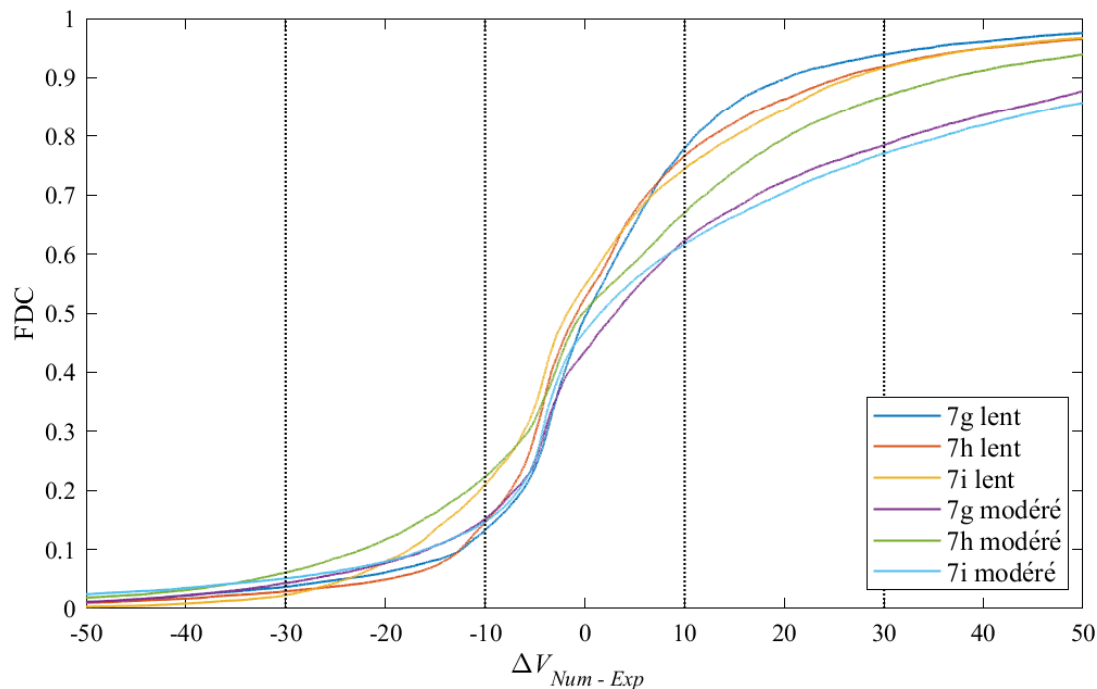


FIGURE 4.21 – Fonction de distribution cumulative.

Nous déduisons de cette figure qu'en scénario d'écoulement *lent*, approximativement 60% des différences sont comprises dans la gamme de valeurs [-10% ; 10%]. En écoulement *modéré*, entre 40% et 50% des différences sont comprises dans cet intervalle. Il est également important de mentionner que 85% des différences pour les trois configurations en écoulement *lent* entrent dans l'intervalle [-30% ; 30%]. En écoulement *modéré*, les fonctions de distribution cumulative sont plus étalées. En effet, 70% des différences sont comprises dans la gamme de -30% à 30%. La correspondance des résultats, malgré le fait que deux grandeurs différentes soient comparées, est donc plutôt bonne.

Ensuite, il ressort de ce graphique que les différences positives, donc des vitesses moyennées sur la hauteur plus grandes que les vitesses de surface, de plus de 10% sont plus nombreuses en écoulement *modéré* qu'en écoulement *lent*. De fait, les valeurs des fonctions de distribution cumulative sont plus faibles en scénario *modéré* pour les différences positives. Pour une différence de +10%, la valeur des FDC en écoulement *lent* tourne autour de 0,76 tandis qu'en écoulement *modéré* elle avoisine 0,63.

Nous remarquons également des différences parmi les configurations pour un même scénario d'écoulement. Effectivement, en scénario *lent*, nous remarquons que la fonction de distribution cumulative de la configuration *7i* présente des valeurs plus importantes que les courbes des deux autres configurations pour les différences inférieures à -5%. Cette différence est de l'ordre de 0,06. Cette même observation est réalisée pour la FCD de la configuration *7h* en écoulement *modéré*

avec des différences du même ordre de grandeur. En revanche, la courbe de la configuration 7h en écoulement *modéré* est plus élevée pour les différences positives que les courbes des deux autres configurations dans ce scénario d'écoulement.

Une proportion plus importante de différences négatives indique une sous-estimation plus importante des vitesses par le modèle numérique. Inversement, lorsque la fonction de distribution cumulative est plus basse pour les différences positives, cela signifie que les différences positives sont plus nombreuses. Par conséquent, le modèle numérique surestime les vitesses. Néanmoins, les champs de vitesse comparés sont de nature différente, entraînant une incidence sur les comparaisons et donc sur les fonctions de distribution cumulative.

4.4 Conclusion

La comparaison du champ de vitesse moyennée sur la hauteur d'eau et du champ de vitesse de surface mesurée par LSPIV révèle une bonne correspondance entre les deux et ce pour les six cas étudiés. Il semble toutefois que les différences soient plus importantes et plus nombreuses lorsque l'écoulement est accéléré. La nature différente des deux champs de vitesse joue un rôle. Nous retiendrons notamment les différences importantes pour les zones à l'aval des intersections à cause des structures d'écoulement 3D prise en compte par le modèle numérique mais n'influençant pas ou peu les vitesses de surface mesurées. Un détachement des jets rapides à l'aval d'une zone de contraction-recirculation est observé sur les champs de vitesse de surface alors que le modèle numérique considère que ces flux rapides restent collés aux blocs. Enfin, l'écoulement diagonal intense se développant dans la configuration 7i est bien évalué par le modèle numérique avec cependant des différences notables pour les zones de recirculation.

5 Comportement oscillatoire des vitesses de surface

5.1 Ecart-types des vitesses de surface

Comme annoncé précédemment, chacun des six cas étudiés expérimentalement présente un comportement oscillatoire caractérisé par une fréquence proche de 0,5 Hz. Afin de déterminer les zones du domaine où les oscillations se développent, les écart-types des vitesses de surface mesurées expérimentalement ont été calculés. Ces derniers ont été déterminés sur base des vitesses de surface reconnues et filtrées par le logiciel FUDAA-LSPIV. Un champ de vitesse de surface filtrée est retourné par le logiciel pour chaque image. Il a dès lors fallu sélectionner une gamme d'images suffisamment importante afin que les écart-types soient représentatifs. En écoulement *lent*, 1300 images soit 52 secondes d'écoulement ont été employées pour le calcul des écart-types. En revanche, en scénario *modéré*, la durée des essais et donc des enregistrements vidéos est plus courte. Il n'a dès lors été possible d'employer uniquement 600 images soit 24 secondes d'écoulement. Les valeurs nulles, indiquant une absence de vecteur vitesse ont été négligées afin de ne pas biaiser les résultats. Ces écart-types permettront également la comparaison avec les écart-types des vitesses moyennées sur la hauteur obtenus numériquement dont certains ont été présentés à la section 6 du chapitre 3.

La comparaison des écart-types des vitesses de surface expérimentales et ceux des vitesses obtenues numériquement est qualitative et non quantitative. En effet, les écart-types des vitesses moyennées sur la hauteur d'eau sont dans certains cas très faibles puisqu'aucun comportement oscillatoire notoire y a été observé.

Configuration 7g :

Tout d'abord, les figures 4.22 et 4.23 illustrent les écart-types des vitesses pour la configuration 7g, respectivement en scénario d'écoulement *lent* et en scénario d'écoulement *modéré*.

En premier lieu, les écart-types expérimentaux sont cinquante à cent fois plus importants que les écart-types numériques selon le scénario. Ceci est dû au fait que lors de la simulation numérique, aucune oscillation n'a été détectée. Cette observation appuie donc le fait que cette analyse soit qualitative et non quantitative.

Dans le premier scénario, le schéma des écart-types expérimentaux et numériques présentent une correspondance correcte au niveau de l'allure générale. En effet, les maxima des résultats numériques sont observés dans les rues *HB* et *V1* et les résultats expérimentaux présentent des valeurs importantes dans ces deux rues. Ces valeurs sont la preuve de très faibles variations également détectées par l'intermédiaire des variations temporelles des hauteurs d'eau en entrée. Nous remarquons également que les écart-types expérimentaux sont conséquents dans les ruelles horizontales formées par la première colonne de blocs ainsi que dans les branches de sortie et plus particulièrement dans celle de la sortie 2. Cette tendance n'est pas observée sur le champ des écart-types obtenus numériquement. Il est possible que la sortie 2 présente des oscillations importantes mais il se peut également que l'origine de ces valeurs soit une quantité changeante de traceur à la surface de l'écoulement. Il en est probablement de même pour les valeurs importantes dans les ruelles.

En revanche, en scénario *modéré*, la correspondance entre les deux schémas n'est pas bonne. Les résultats numériques indiquent des valeurs relativement élevées dans la rue *HB*, plus particulièrement la partie supérieure de l'espace vide central et dans la branche de sortie 1. En revanche, les écart-types des vitesses de surface sont importants sur la majorité du domaine. En effet, seules les entrées ainsi que la rue *V2* sont "épargnées" et ne présentent pas de variations importantes. Les valeurs globalement élevées des écart-types des vitesses de surface résultent

peut-être d'une densité de traceur trop faible à la surface de l'écoulement. L'analyse LSPIV ne détectent alors qu'un nombre limité de vecteurs vitesse par image. Toutefois, les deux schémas comportent des maxima dans la rue *HB* et dans la branche de sortie 1.

Par conséquent, le comportement oscillatoire des vitesses de surface se manifeste à plusieurs endroits du domaine. Ces zones de variations importantes détectées diffèrent selon le scénario d'écoulement étudié. Cependant, la partie supérieure de l'espace libre central qui correspond également au milieu de la rue *HB*, comporte dans les deux scénarios des écarts-types conséquents. C'est également cette portion du domaine qui, malgré les valeurs (beaucoup) plus faibles, présente les écarts-types numériques les plus importants. Cette zone fait d'ailleurs l'objet d'une analyse supplémentaire détaillée dans la section suivante.

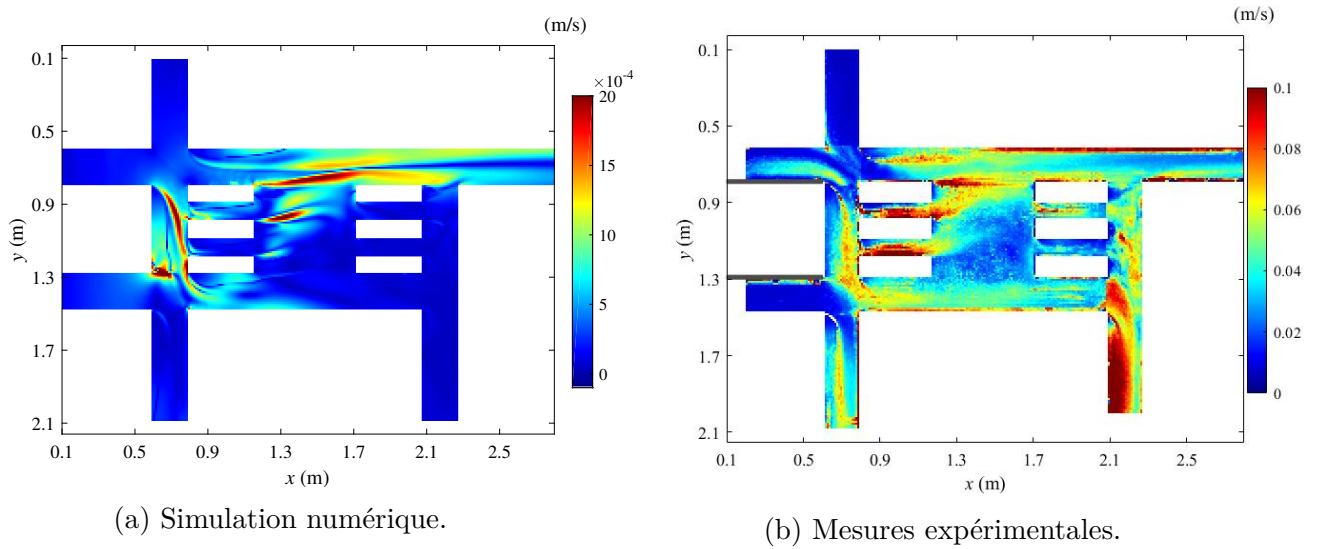


FIGURE 4.22 – Ecarts-types des vitesses (configuration γg - écoulement *lent*).

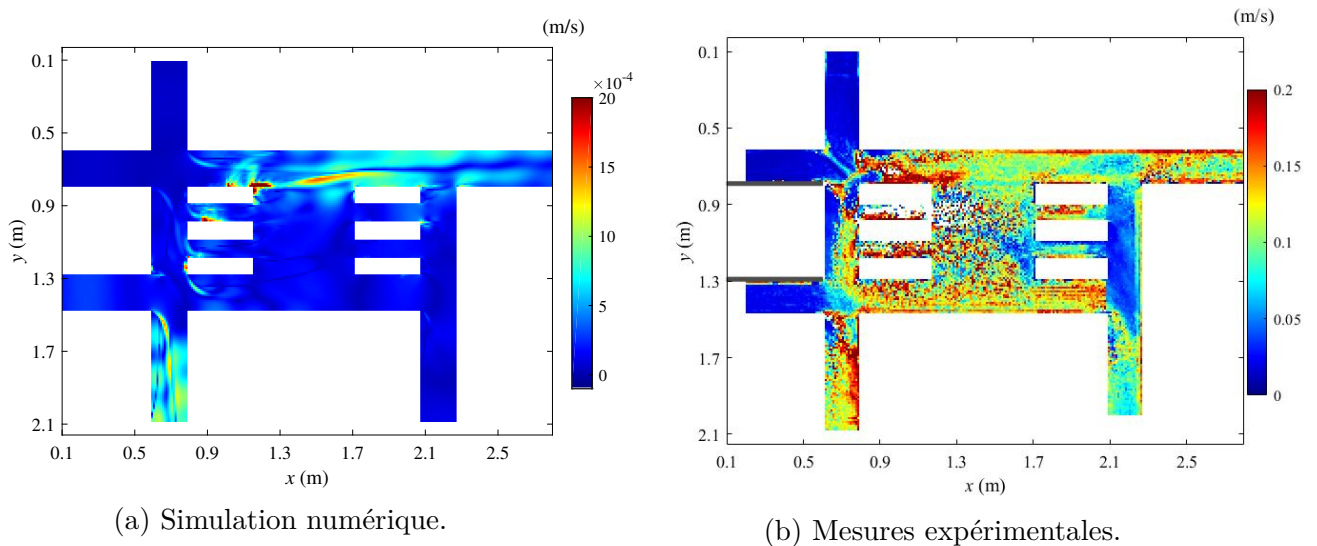


FIGURE 4.23 – Ecarts-types des vitesses (configuration γg - écoulement *modéré*).

Configuration 7h :

Comme mentionné à la section 6 du chapitre 3, lors de la simulation numérique de la configuration urbaine 7h, les oscillations et donc les plus grandes valeurs des écarts-types numériques apparaissent dans la rue *HB* et dans la partie supérieure de l'espace libre (figures 3.11 et 3.12).

Les résultats expérimentaux de cette configuration en écoulement *lent* sont différents du schéma numérique observé (figure 4.24a). La rue *HB* présente bel et bien des maxima de valeurs mais dans la portion située au-dessus des deux colonnes de blocs. Les valeurs à l'aval, dans la zone supérieure de l'espace vide, sont élevées mais pas maximales. De plus, les écarts-types sont plus importants dans les ruelles horizontales ainsi qu'à l'amont des blocs, dans la rue verticale *V1* et au début de la rue *HC*. Il est également déduit que l'écoulement dans les branches de sortie 1 et 2 lors des essais expérimentaux oscille légèrement en comparaison avec les résultats numériques qui sont quasiment nuls dans ces deux branches.

Dans le deuxième scénario d'écoulement, les résultats du test en laboratoire sont moins concluants. En effet, les écarts-types sont certes conséquents dans la rue *HB* mais également dans l'espace vide de manière générale ainsi que dans les ruelles horizontales (figure 4.24b). Ce schéma présente une moins bonne correspondance avec les calculs numériques dont les variations restent concentrées dans la rue *HB* et la partie supérieure de l'espace libre.

Ces résultats nous indiquent donc que les oscillations de l'écoulement se développent dans la rue *HB* mais également dans les autres rues et ruelles horizontales. La rue *V1* présente également des écarts-types importants. La généralisation de manière significative des oscillations sur l'ensemble du domaine en écoulement *modéré* est avancée par les résultats expérimentaux dans ce scénario. Cependant, les valeurs élevées des écarts-types sont possiblement liées à la qualité des essais. Il n'est effectivement pas à exclure que la densité de sciure n'était pas suffisante lors des enregistrements vidéos et donc que les résultats des vitesses filtrées sont "pauvres".

C'est tout de même la partie supérieure de "l'open space" qui a été choisie afin de réaliser une analyse LSPIV supplémentaire afin d'observer les oscillations de l'écoulement de surface. Ce choix se base sur l'idée que les valeurs maximales des écarts-types observées à d'autres endroits du domaine sont liées à une faible quantité de valeurs disponibles. Ce choix est en partie subjectif car nous pensons que c'est une zone propice au développement et à l'observation d'oscillations.

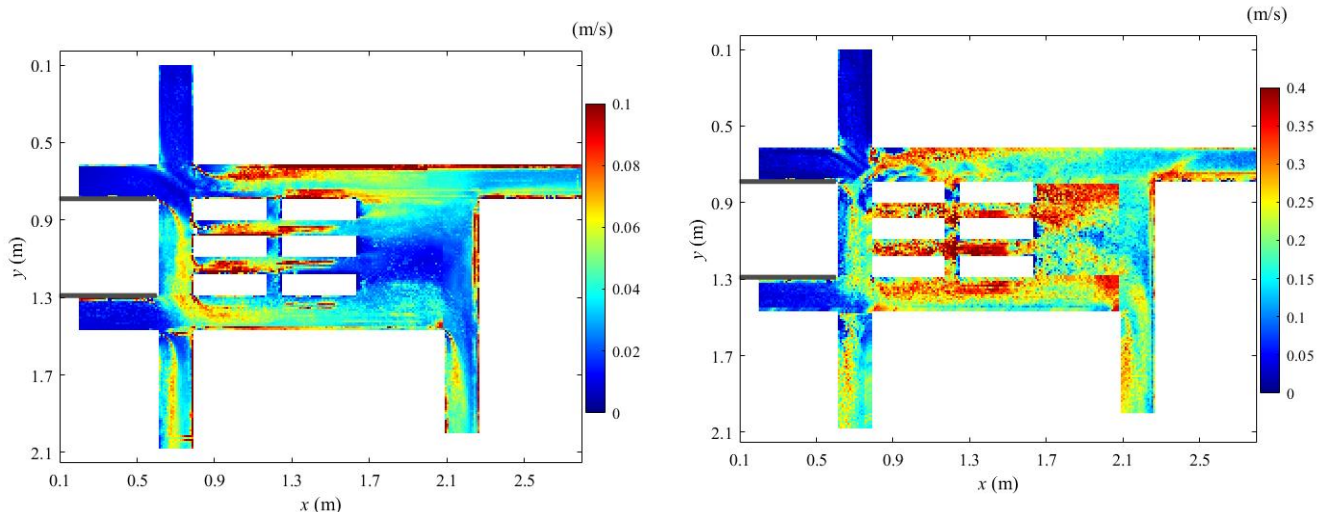
(a) Mesures expérimentales (écoulement *lent*).(b) Mesures expérimentales (écoulement *modéré*).

FIGURE 4.24 – Ecarts-types des vitesses (configuration 7h).

Configuration \mathcal{N}_i :

La figure 4.25 illustre les écarts-types des vitesses moyennées sur la hauteur d'eau obtenues numériquement et les écarts-types des vitesses de surface expérimentales pour la configuration \mathcal{N}_i en scénario d'écoulement *lent*.

A nouveau, cette analyse est qualitative et non quantitative. Les seules zones du domaine qui comportent des écarts-types issus des résultats numériques remarquables à cette échelle (de l'ordre de 10^{-4} m/s) sont les ruelles formées par les blocs. En revanche, les écarts-types issus des vitesses de surface sont plus conséquents dans les branches de sortie, le long du flux diagonal intense dans l'espace vide ainsi que dans la ruelle horizontale *HE* et la rue *HC*. Les signes du comportement oscillatoire sont donc observés en plusieurs endroits.

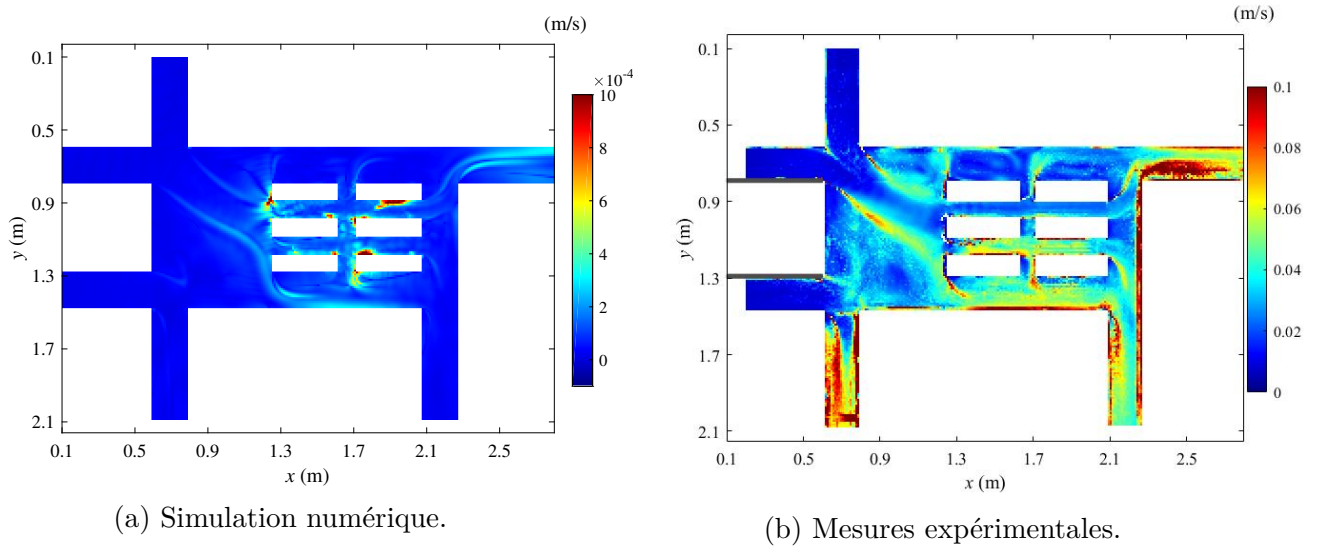


FIGURE 4.25 – Ecarts-types des vitesses (configuration \mathcal{N}_i - écoulement *lent*).

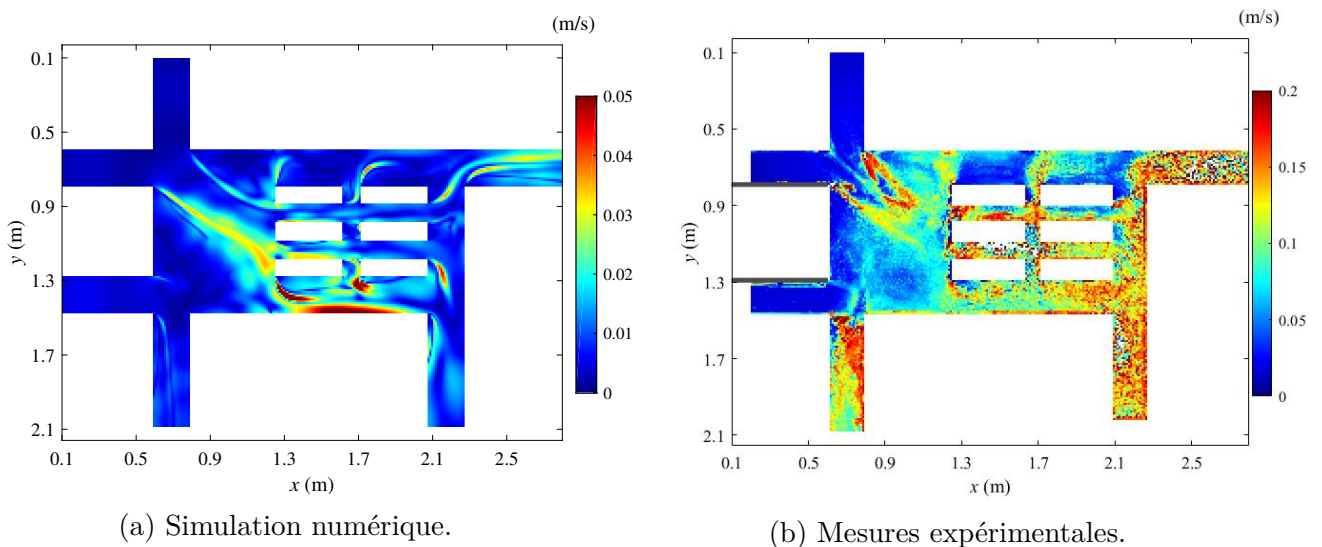


FIGURE 4.26 – Ecarts-types des vitesses (configuration \mathcal{N}_i - écoulement *modéré*).

Au sujet du scénario d'écoulement *modéré*, la simulation numérique présente des oscillations au niveau de la rencontre entre l'écoulement diagonal intense formé dans "l'open space" et les blocs inférieurs ainsi que dans la partie aval de la rue *HC*. Ce comportement oscillatoire a été observé et décrit à la section 6 du chapitre 3. Le schéma des écarts-types issus des valeurs expérimentales en écoulement *modéré* correspond plutôt bien au schéma numérique et est similaire à celui observé en écoulement *lent*. Des écarts-types relativement importants sont observés le long de l'écoulement diagonal intense, à la rencontre de cet écoulement diagonal avec les blocs, dans les ruelles horizontales ainsi que dans la partie aval de la rue *HC* et aux sorties. A nouveau, il n'est pas à exclure que la densité de sciure à la surface de l'écoulement n'ait pas été suffisante dans les branches de sorties et donc que les variations de vitesse de surface n'ont pas été correctement capturées. Les valeurs sur le reste du domaine semblent cohérentes.

Au vu de ces résultats, il est certain que le modèle numérique ne capture pas le comportement oscillatoire en écoulement *lent*. En revanche, les mesures expérimentales indiquent un schéma de variations similaire au schéma présenté par les écarts-types de vitesses numériques en écoulement *modéré*. Cependant, une partie des résultats expérimentaux en scénario *modéré*, principalement ceux des sorties et de la rue *V2* sont à mettre en perspective à cause des mesures probablement insuffisantes.

Le point commun principal des résultats numériques en écoulement *modéré* et des mesures expérimentales (dans les deux scénarios d'écoulement) est la présence d'écarts-types relativement importants lors de la rencontre de l'écoulement diagonal intense qui se développe dans l'espace vide avec les blocs des deux rangées inférieures. C'est pourquoi, cette zone du domaine a été désignée pour l'analyse des vitesses de surface moyennées sur une demi-période d'oscillation (section suivante).

5.2 Exemples de vitesses de surface moyennées sur une demi-période

Afin de démontrer la présence d'oscillations lors des essais expérimentaux, les vitesses filtrées par le logiciel FUDAA-LSPIV ont été moyennées sur une seconde. La durée sur laquelle les résultats sont moyennés est un choix basé sur les fréquences d'oscillations observées. En effet, il a été mis en lumière précédemment que les fréquences d'oscillations sont proches de 0,5 Hz pour les six cas étudiés expérimentalement. Par conséquent, une seconde représente une demi-période. Les résultats moyennés devraient donc nous permettre d'observer les oscillations en opposition de phase.

Les zones choisies pour l'observation des oscillations et donc pour calculer les moyennes dépendent de la configuration urbaine. Effectivement, comme illustré et observé précédemment, les oscillations ne se développent pas aux mêmes endroits pour les trois configurations. Par conséquent, la zone la plus adéquate a été choisie pour chaque configuration. Ces trois zones sont reprises sur la figure 4.27. Nous savons que dans les configurations *7g* et *7h*, les oscillations sont principalement situées dans la partie supérieure de l'espace vide. Le choix de cette zone était dès lors évident (cadre rouge sur les figures 4.27a et 4.27b). Concernant la configuration *7i*, le choix est moins évident car les oscillations sont moins prononcées mais apparaissent à différents endroits. Notre choix s'est porté sur la partie inférieure de l'espace vide, juste à l'amont des blocs et comprenant le début des ruelles (cadre rouge sur la figure 4.27c).

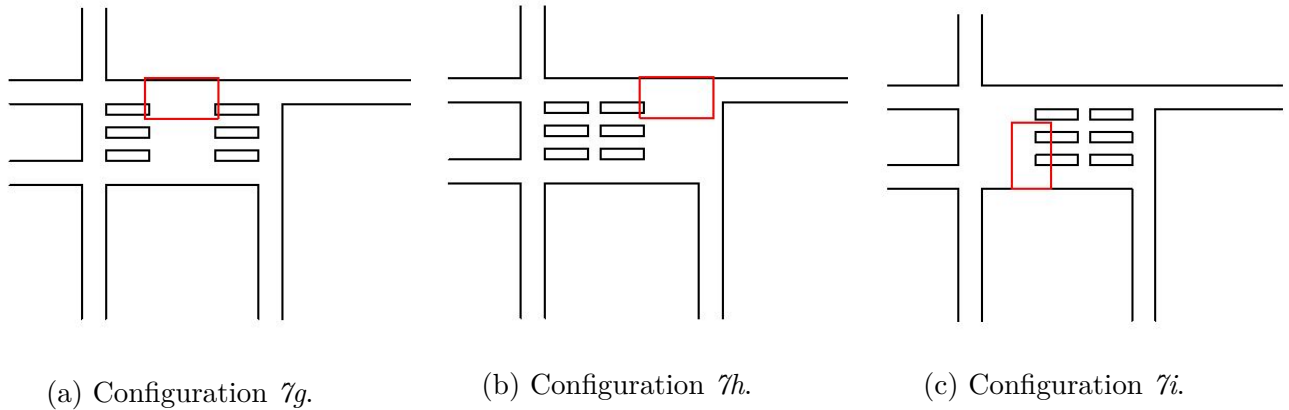
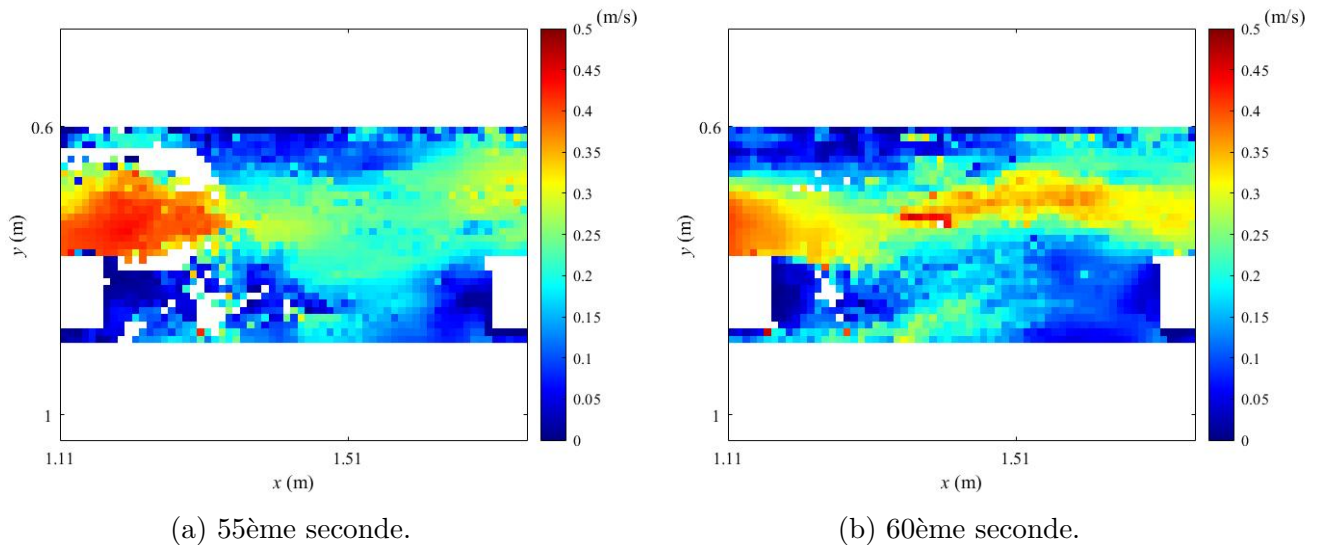


FIGURE 4.27 – Zones d’observation des oscillations en opposition de phase.

Configuration 7g - écoulement *lent* :

La figure 4.28 illustre la zone supérieure de l’espace vide central du champ de vitesse de surface durant la 55ème et la 60ème seconde de l’enregistrement vidéo de cette zone.

Ces deux images montrent assez clairement l’écoulement oscillatoire en opposition de phase. En effet, à la 55ème seconde, l’écoulement est assez diffus mais présente tout de même une courbure orientée vers le haut. La figure 4.28b présente quant à elle un jet dont la courbure est distinctement orientée vers le bas avec le maximum, point de tangence nulle aux alentours de l’abscisse 1,51 m.

FIGURE 4.28 – Champs de vitesse de surface moyennée sur une seconde (configuration 7g - écoulement *lent*).

Configuration 7h - écoulement *lent* :

Comme énoncé précédemment, la figure 4.29 reprend deux champs de vitesse de surface moyennée sur un intervalle d'une seconde. Le premier champ de vitesse a été calculé pendant la 63ème seconde et le deuxième pendant la 66ème seconde de la vidéo réalisée lors de l'essai au laboratoire.

A nouveau, l'opposition de phase de l'écoulement et donc son comportement oscillatoire est formellement identifié grâce à ces deux champs de vitesse moyennée sur une seconde. Le premier champ de vitesse indique clairement une demi-période pendant laquelle le jet rapide est en position basse tandis que le second montre le jet en position haute sur une autre demi-période. Les courbures, respectivement vers le haut et vers le bas sont clairement identifiables sur les deux champs de vitesse.

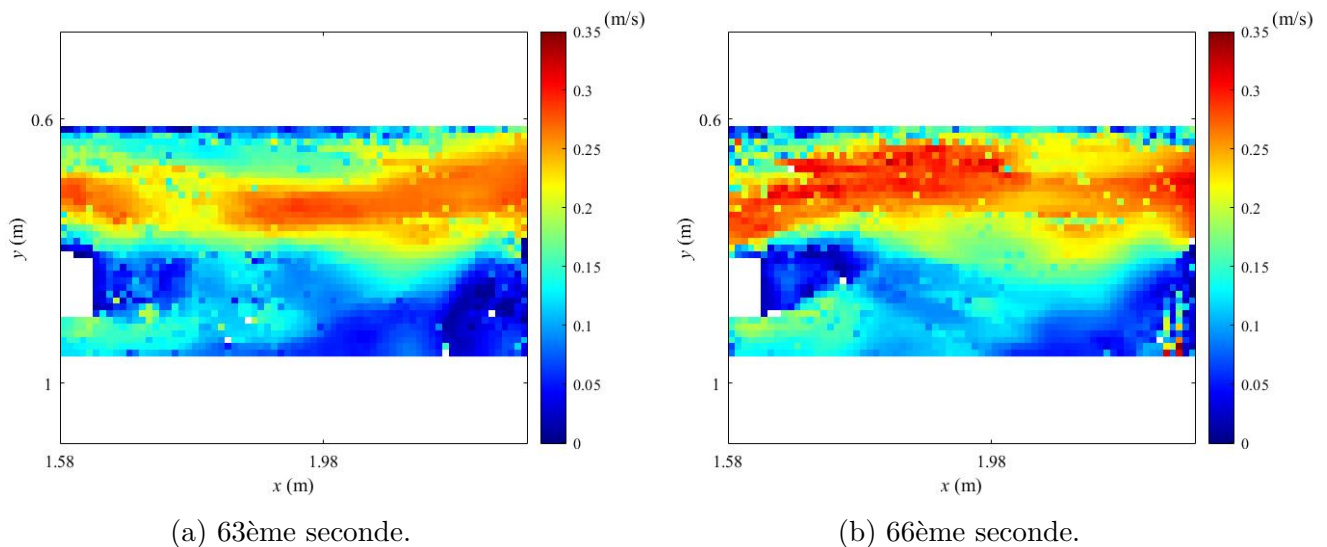


FIGURE 4.29 – Champs de vitesse de surface moyennée sur une seconde (configuration 7h - écoulement *lent*).

Configuration 7i - écoulement *lent* :

La figure 4.30 comporte les deux champs de vitesse de surface moyennée sur une seconde pour la configuration 7i dans le premier scénario d'écoulement. Ces deux champs de vitesse ont été obtenus en moyennant les vitesses pendant la 44ème seconde et la 46ème seconde de l'enregistrement.

La différence entre ces deux champs de vitesse est relativement évidente. Nous observons en effet sur le premier (figure 4.30a) que les vitesses de surface sont faibles à l'amont direct de la ruelle inférieure (entre 0,1 et 0,2 m/s). En revanche, sur la figure 4.30b, les vitesses à l'amont de la ruelle inférieure sont proches de 0,3 m/s. Le comportement oscillatoire observé est dès lors constitué des variations d'intensité de vitesse de la partie de l'écoulement diagonal intense qui se dirige vers la ruelle inférieure et la rue principale C. Les différences de vitesse entre les deux champs de vitesse illustrés sont une preuve de ce comportement oscillatoire.

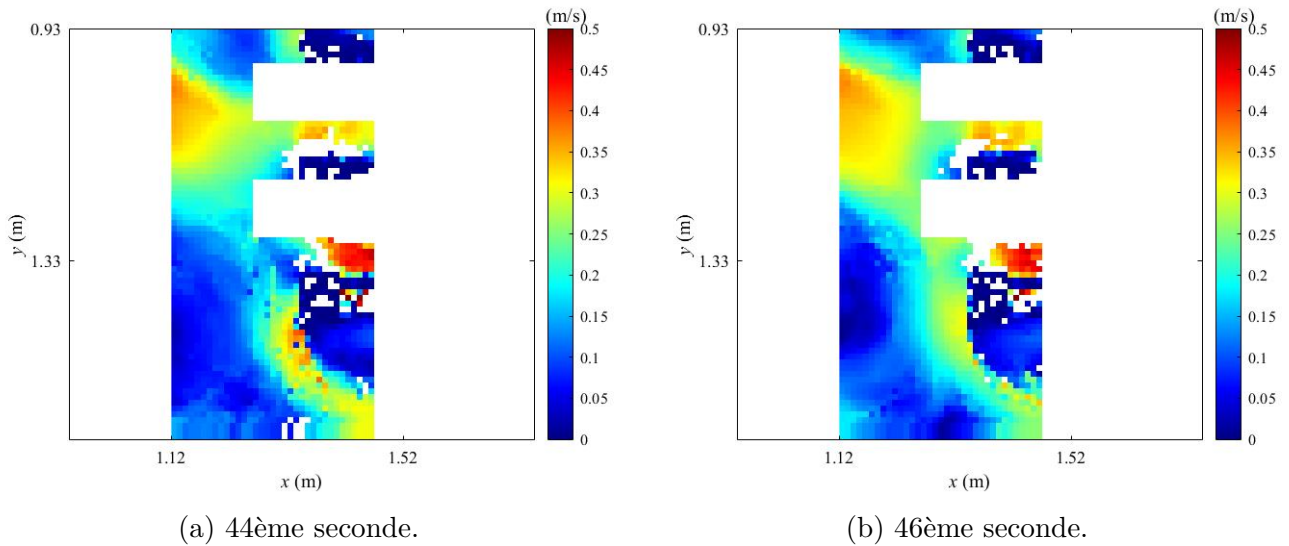


FIGURE 4.30 – Champs de vitesse de surface moyennée sur une seconde (configuration 7i - écoulement *lent*).

Configuration 7g - écoulement *modéré* :

Les champs de vitesse de surface moyennée sur une seconde obtenus pour ce cas sont présentés à la figure 4.31. Il est évident que l'enregistrement vidéo servant de base à l'analyse LSPIV n'était pas idéal au vu des résultats obtenus. De fait, les champs de vitesses illustrés comportent d'importantes zones blanches. Ces zones blanches indiquent l'absence de particule, de sciure durant la période étudiée. Il est dès lors très compliqué de tirer des conclusions hors de ces champs de vitesse. Une courbure tournée vers le haut peut être identifiée sur le champ de vitesse obtenu durant la 36ème seconde. Cependant, la qualité des résultats nous empêchent d'affirmer avec certitude la présence des oscillations en opposition de phase sur cette figure.

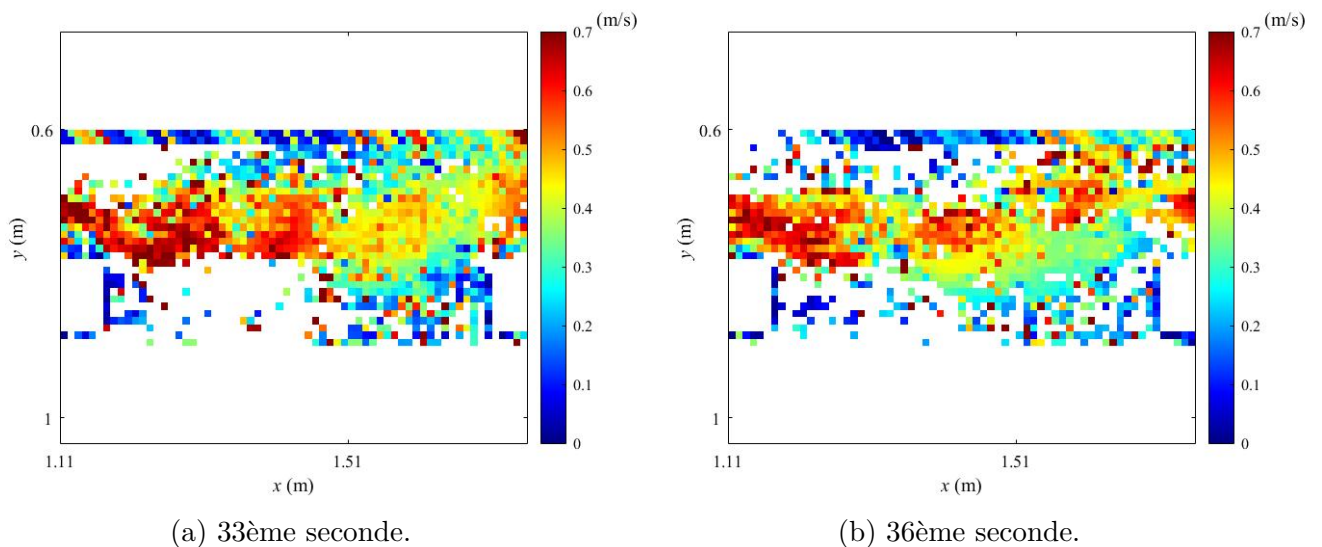


FIGURE 4.31 – Champs de vitesse de surface moyennée sur une seconde (configuration 7g - écoulement *modéré*).

Configuration 7h - écoulement *modéré* :

Dans ce cas-ci, les résultats présentent des valeurs sur quasiment l'ensemble de la zone qui nous intéresse. Par contre, il est complexe, voire impossible de déceler des oscillations en opposition de phase. Les deux champs de vitesse illustrés à la figure 4.32 sont quasiment identiques. Aucune différence dans le schéma de l'écoulement n'est observée. Nous notons toutefois que les vitesses dans la moitié aval des champs de vitesse sont plus faibles à la 30ème seconde par rapport à celles de la 29ème seconde. Cette différence est peut-être un signe du comportement oscillatoire mais l'opposition de phase recherchée n'est pas identifiée sur cette figure.

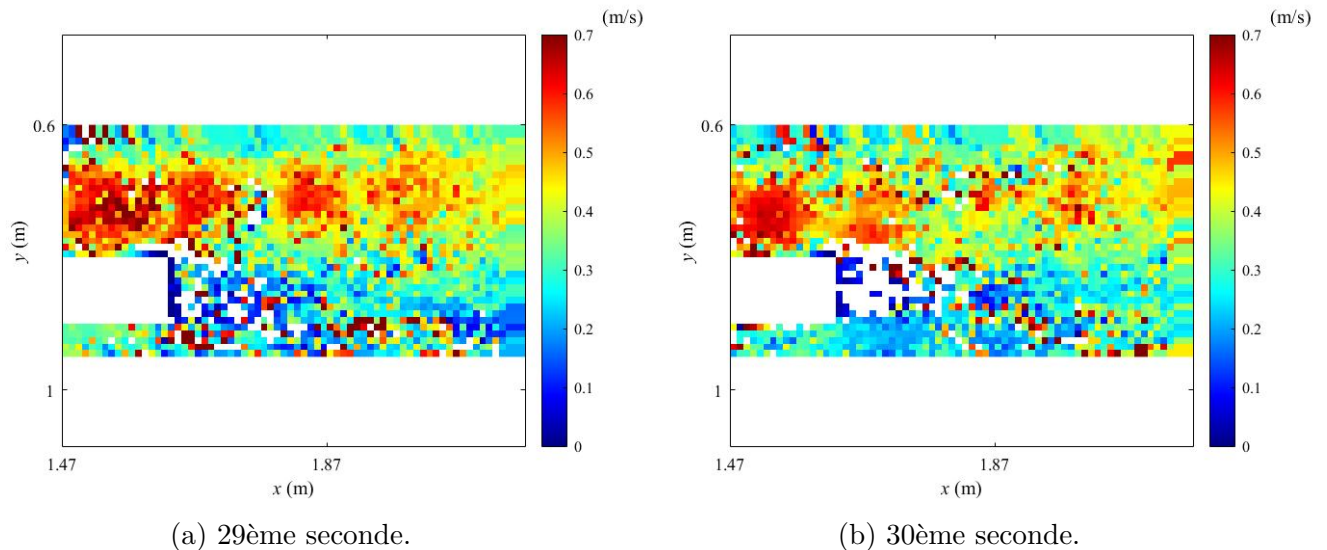


FIGURE 4.32 – Champs de vitesse de surface moyennée sur une seconde (configuration 7h - écoulement *modéré*).

Configuration 7i - écoulement *modéré* :

Finalement, les champs de vitesse de surface moyennée sur une seconde pour la configuration 7i en écoulement *modéré* sont illustrés à la figure 4.33. Ces champs de vitesse sont issus de la 37ème seconde et de la 42ème seconde de l'enregistrement vidéo.

Comme nous l'observons sur cette figure, les résultats obtenus ne sont pas très lisibles. De fait, peu de différences sont identifiables. Toutefois, sur la figure 4.33b, l'écoulement est plus rapide à l'amont du bloc inférieur, en comparaison avec la figure 4.33a.

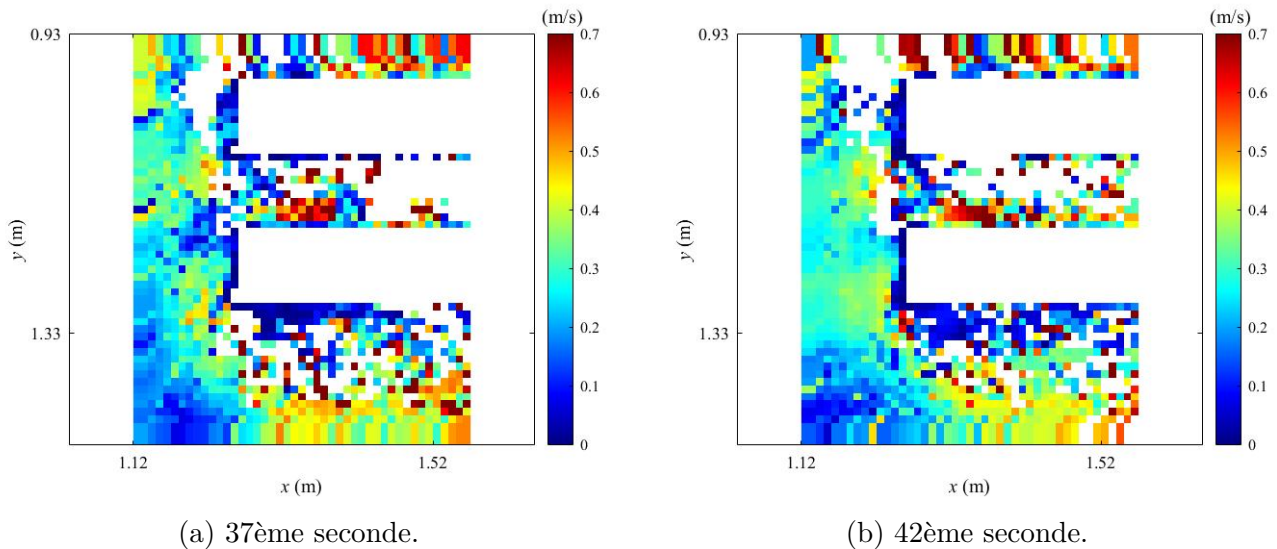


FIGURE 4.33 – Champs de vitesse de surface moyennée sur une seconde (configuration 7i - écoulement *modéré*).

5.3 Conclusion

Le comportement oscillatoire des vitesses de surface a été identifié et confirmé grâce à l'analyse des écarts-types des vitesses de surface pour les six cas étudiés. Les zones du domaine où les preuves d'oscillations sont observées sont de manière générale cohérentes avec les zones prédites par le modèle numérique. Il a d'ailleurs été remarqué que même lorsque les résultats du modèle numérique ne présentent pas d'oscillation visible, les écarts-types de vitesse à plus petite échelle (de l'ordre de 10^{-4} m/s) indiquent des variations aux endroits où les oscillations sont observées expérimentalement. De plus, des écarts-types relativement conséquents sont observés expérimentalement dans les branches de sortie indiquant des oscillations de l'écoulement dans les trois branches et non pas uniquement dans l'une ou l'autre comme prédit par exemple par les résultats numériques de la configuration 7h. Cependant, l'étude des écarts-types des vitesses de surface mesurées expérimentalement en scénario d'écoulement *modéré* a révélé des valeurs importantes dans des zones parfois inattendues selon les configurations urbaines. Une explication potentielle à ces valeurs est la trop faible quantité de traceurs présente à la surface de l'écoulement. Cette trop faible quantité de sciure engendre des valeurs nulles dans les résultats de vitesse filtrée et donc un nombre limité de valeurs permettant le calcul des écarts-types.

Ensuite, l'observation des oscillations de l'écoulement de surface a été réalisée pour chaque cas d'étude grâce à la moyenne sur une seconde d'écoulement des vitesses mesurées et traitées. Pour le scénario d'écoulement *lent*, les champs de vitesse locaux obtenus ont permis l'observation des oscillations de l'écoulement en opposition de phase pour les trois configurations urbaines étudiées. C'est donc une preuve supplémentaire du comportement oscillatoire de l'écoulement. En revanche, en écoulement *modéré*, les champs de vitesse locaux résultant de cette opération de moyenne sur une demi-période d'oscillation ne sont pas très lisibles, pas nets. Des zones de vitesses nulles apparaissent indiquant une absence de résultats et donc une absence de sciure. Par conséquent, l'observation des oscillations en opposition de phase n'a pas pu être réalisée en scénario d'écoulement *modéré*.

6 Différences des conditions limites

En laboratoire, les conditions limites (*CL*) imposées à l'écoulement ne sont pas exactement égales aux valeurs théoriques requises. Par conséquent, les résultats expérimentaux sont entachés d'une erreur. Afin de quantifier cette erreur et les effets qui en résultent, des simulations numériques ont été réalisées en imposant des conditions limites amont égales à celles mesurées lors des essais expérimentaux. Par contre, les conditions limites avalées n'ont pas été modifiée car les valeurs expérimentales étaient très proches de la valeur théorique désirée. Les valeurs expérimentales des conditions limites amont sont reprises dans le tableau 4.5.

Configuration	7g		7h		7i	
Scénario	lent	modéré	lent	modéré	lent	modéré
IN A	14.226	28.556	14.287	28.486	14.253	28.519
IN B	14.238	28.582	14.22	28.63	14.258	28.589
IN C	14.248	28.57	14.247	28.578	14.253	28.535

TABLE 4.5 – Valeurs des conditions limites amont expérimentales [m^3/h].

La démarche employée est identique à celle élaborée précédemment. Les valeurs des variables d'écoulement de la simulation numérique avec les conditions limites expérimentales (*Num CL exp*) sont comparées avec celles de la simulation numérique possédant les conditions limites théoriques (*Num base*) ainsi qu'avec les résultats d'une des mesures expérimentales (*Exp*). La deuxième mesure réalisée pour chaque cas a été employée pour la comparaison.

6.1 Hauteurs d'eau en entrée

Tout d'abord, examinons les hauteurs d'eau moyennes en entrée. Les valeurs obtenues en scénario *lent* sont disposées sous forme de diagrammes en bâtonnets à la figure 4.34 et celles pour le scénario *modéré* sont illustrées à la figure 6.32 à l'annexe 6.1.

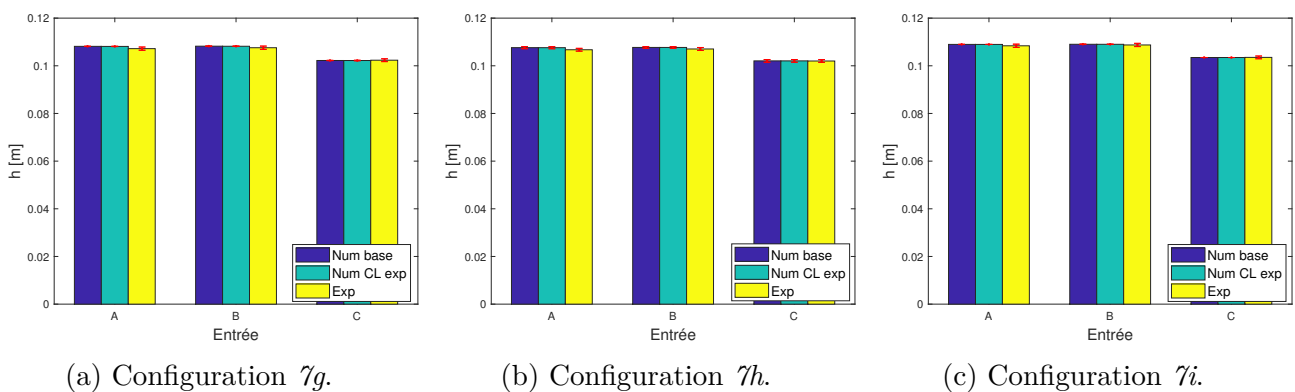


FIGURE 4.34 – Comparaisons des hauteurs d'eau moyennes aux entrées calculées numériquement avec les CL de base, celles calculées numériquement avec les CL expérimentales et celles déterminées avec les mesures expérimentales (écoulement *lent*) [m].

Les résultats de la simulation avec les CL expérimentales sont identiques ou presque à ceux de la simulation avec les CL théoriques pour les six cas étudiés. En effet, aucune différence notable n'est remarquée sur ces diagrammes, que ce soit au sujet des valeurs moyennes comme celles des écarts-types.

6.2 Répartition de débit

Le même principe est appliqué pour les répartitions de débit. Les résultats sous forme de diagrammes en bâtonnets sont présentés à la figure 4.35 pour le scénario d'écoulement *lent* et ceux obtenus en scénario *modéré* sont repris à la figure 6.33 présentée l'annexe 6.2.

La conclusion tirée de ces graphiques est identique à celle des hauteurs d'eau c'est-à-dire que les valeurs obtenues en changeant les CL sont quasiment identiques aux valeurs résultant des simulations avec les CL de base.

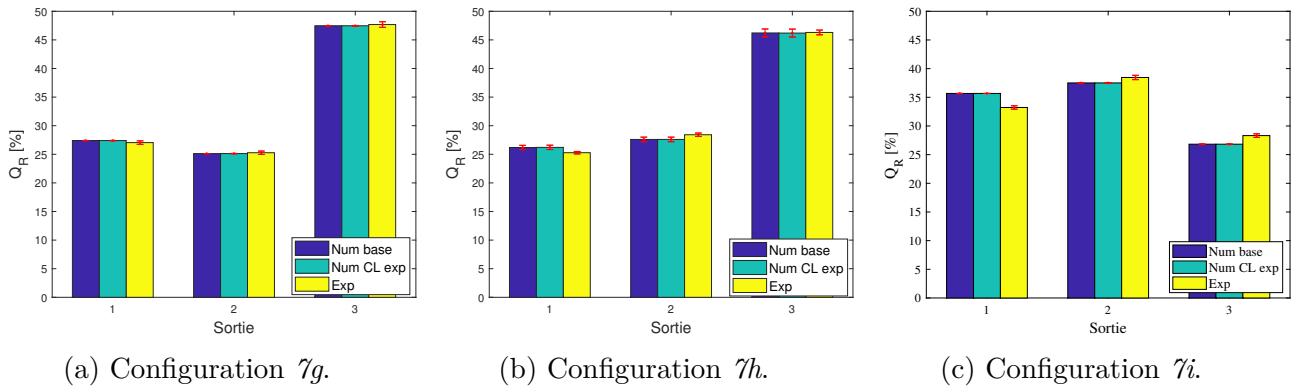


FIGURE 4.35 – Comparaisons de la répartition de débit calculée numériquement avec CL de base, celle calculée numériquement avec CL expérimentales et celle déterminée avec les mesures expérimentales (écoulement *lent*) [%].

6.3 Variations temporelles des hauteurs d'eau

Afin de déterminer l'éventuelle présence d'un comportement oscillatoire et de le caractériser dans le cas où sa présence est avérée, les variations temporelles des hauteurs d'eau en entrée et en sortie des six cas étudiés dans ce chapitre ont été analysées.

Des différences ont été remarquées dans la configuration 7g en écoulement *lent* et en écoulement *modéré* ainsi que dans la configuration 7i en écoulement *modéré*. Les variations temporelles sur dix secondes des hauteurs d'eau en entrée sont illustrées à la figure 4.36 pour ces trois cas. Les variations temporelles sur dix secondes des hauteurs d'eau en sortie pour ces trois mêmes cas sont reprises à la figure 4.37. Les densités spectrales de puissance des hauteurs d'eau en entrée et en sortie sont présentées respectivement aux figures 4.38 et 4.39 pour les trois cas mentionnés.

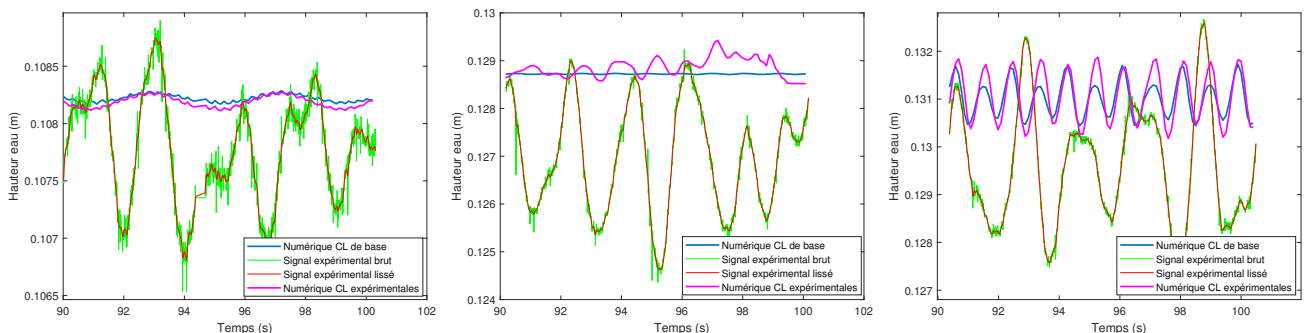
Les variations temporelles sur dix secondes pour les trois autres cas sont illustrées aux figures 6.34 et 6.35 à l'annexe 6.3 respectivement des hauteurs d'eau en entrée et des hauteurs d'eau en sortie. Les DSP des résultats numériques lorsque les CL expérimentales sont imposées n'ont pas été calculées puisque les variations sont identiques à celles des résultats numériques lorsque les CL théoriques sont imposées. Les densités spectrales de puissance sont donc identiques.

Concernant la configuration 7g en écoulement *lent*, des oscillations de très faible amplitude et de basse fréquence ont été détectées lors de l'analyse des variations temporelles des hauteurs d'eau calculées par la simulation numérique avec les CL théoriques. Ces oscillations étaient cependant trop faibles et donc le comportement oscillatoire n'était pas visible sur le champ de vitesse. Sur la figure 4.36a, nous remarquons que l'amplitude des oscillations des hauteurs d'eau calculées numériquement est plus importante lorsque les CL expérimentales sont imposées. En revanche, aucune oscillation n'est détectée dans les hauteurs d'eau en sortie résultant de cette simulation.

En observant les DSP des hauteurs d'eau en entrée de ce cas-ci, un maximum est observé pour la fréquence de 0,25 Hz. Ce maximum est bien plus faible que ceux calculés sur base des mesures expérimentales mais il est visible, contrairement aux DSP des hauteurs d'eau en entrée de la simulation avec les CL théoriques. Par contre, les variations ne sont pas observées en sortie lors des simulations, comme le prouvent les DSP présentées à la figure 4.39a.

Les hauteurs d'eau en entrée et en sortie calculées par la simulation avec les CL expérimentales de la configuration γg en écoulement *modéré* présentent des variations non négligeables. Or, la simulation de ce cas avec les CL théoriques ne présentait aucune variation. Les variations observées sont tout de même plus faibles que les variations mesurées lors de l'essai expérimental correspondant. Les DSP de la simulation avec les CL expérimentales de cette configuration en écoulement *modéré* démontrent bel et bien la présence d'oscillations avec des fréquences comprises entre 0,1 Hz et 1,2 Hz. Cette simulation prédit donc le comportement oscillatoire mesuré avec une gamme de fréquences similaire. L'amplitude des oscillations reste toutefois plus faible et les fréquences moins précises que celles des mesures expérimentales. Il est également intéressant de noter que les conditions limites amont ont une influence certaine sur la prédiction du comportement oscillatoire, dans ce cas-ci du moins.

Enfin, la simulation avec les CL expérimentales de la configuration γi en écoulement *modéré* révèle des oscillations de plus grande amplitude mais de même fréquence que celles observées par la simulation avec les CL théoriques. Les densités spectrales de puissance indiquent d'ailleurs que les fréquences des oscillations sont quasiment identiques.



(a) Configuration γg - écoulement *lent*.

(b) Configuration γg - écoulement *modéré*.

(c) Configuration γi - écoulement *modéré*.

FIGURE 4.36 – Echantillons des variations temporelles des hauteurs d'eau en entrée pour la comparaison des résultats des simulations avec les CL expérimentales.

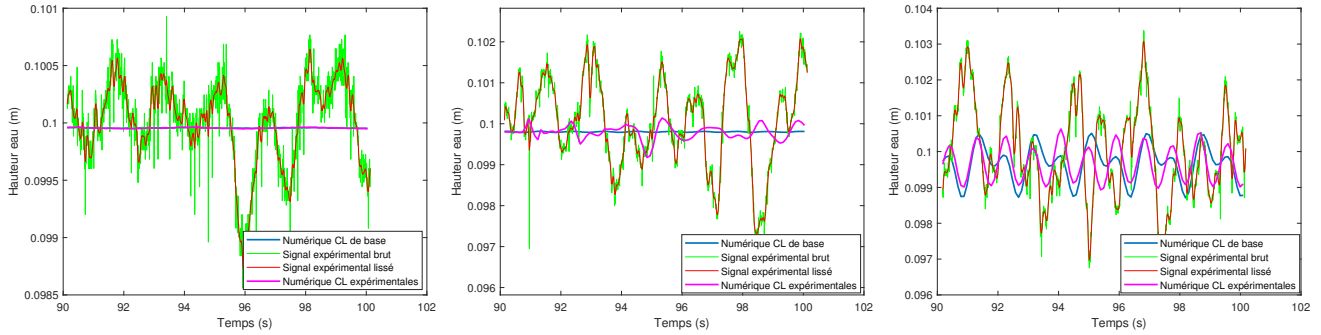
(a) Configuration $7g$ - écoulement *lent*.(b) Configuration $7g$ - écoulement *modéré*.(c) Configuration $7i$ - écoulement *modéré*.

FIGURE 4.37 – Echantillons des variations temporelles des hauteurs d'eau en sortie pour la comparaison des résultats des simulations avec les CL expérimentales.

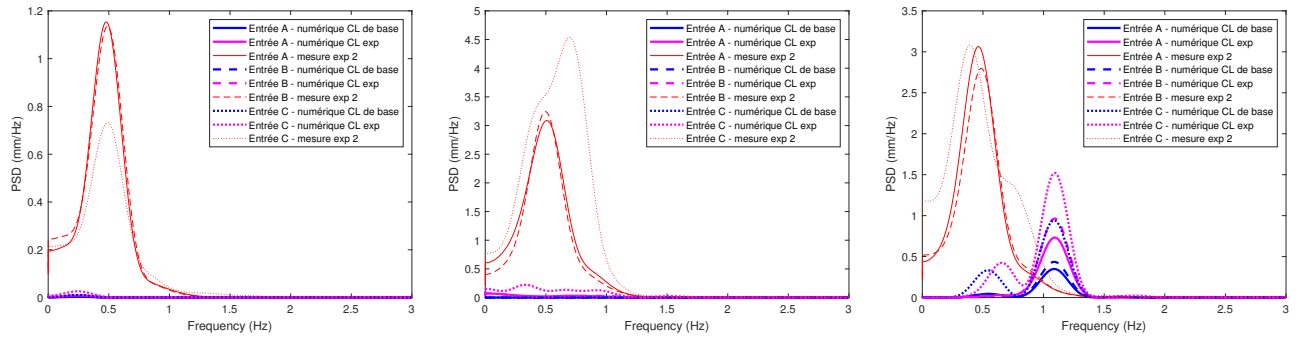
(a) Configuration $7g$ - écoulement *lent*.(b) Configuration $7g$ - écoulement *modéré*.(c) Configuration $7i$ - écoulement *modéré*.

FIGURE 4.38 – Densités spectrales de puissance des hauteurs d'eau aux entrées pour la comparaison des résultats des simulations avec les CL expérimentales.

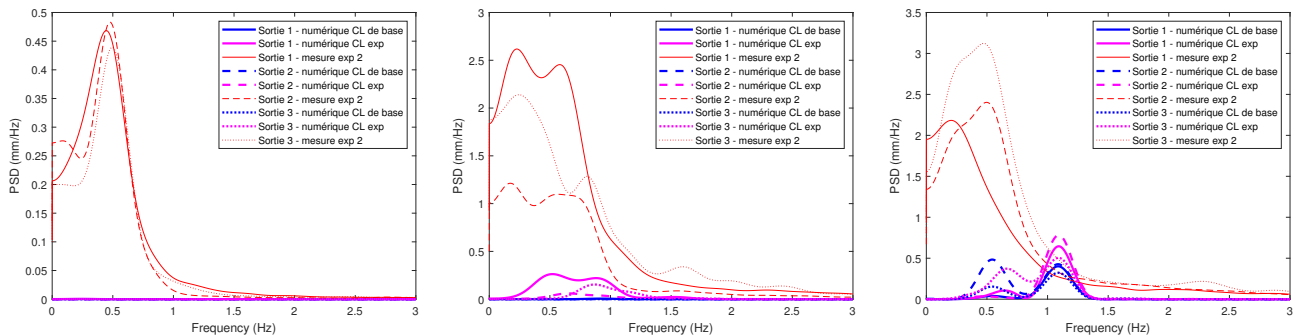
(a) Configuration $7g$ - écoulement *lent*.(b) Configuration $7g$ - écoulement *modéré*.(c) Configuration $7i$ - écoulement *modéré*.

FIGURE 4.39 – Densités spectrales de puissance des hauteurs d'eau aux sorties pour la comparaison des résultats des simulations avec les CL expérimentales.

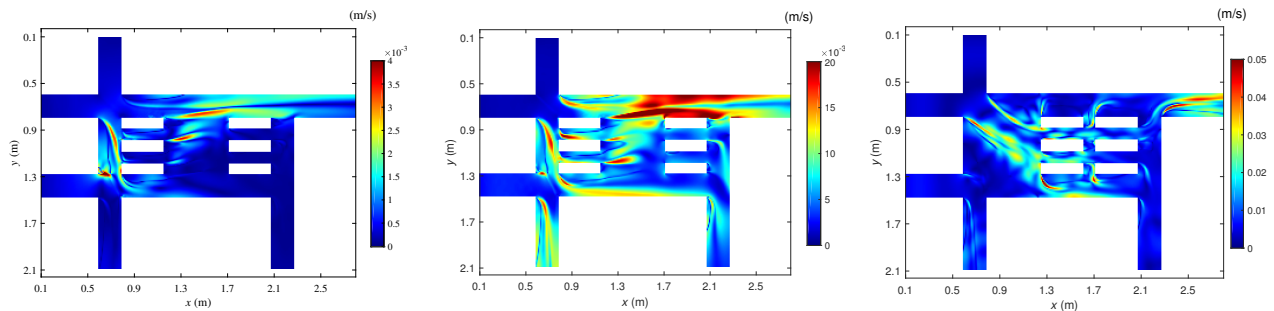
6.4 Ecart-types des vitesses moyennées sur la hauteur d'eau

Dans cette section, les écart-types des vitesses moyennées sur la hauteur d'eau sont analysés pour les trois cas présentant des différences de comportement oscillatoire. Ces écart-types sont présentés à la figure 4.40.

Pour la configuration $7g$ en écoulement *lent*, le schéma des écart-types est identique à celui observé pour la simulation avec les conditions limites théoriques. La différence résulte dans les valeurs. En effet, ces dernières sont deux fois plus élevées lorsque les conditions limites sont égales aux conditions limites de l'essai expérimental correspondant.

En écoulement *modéré*, la simulation avec les CL expérimentales de la configuration $7g$ présentent des écart-types dont les maxima sont plus de dix fois plus grands que ceux issus de la simulation avec les CL théoriques. Ces valeurs restent tout de même faibles (de l'ordre de $10^{-2} m/s$). Par ailleurs, la figure 4.40b indique que les écart-types les plus élevés sont situés dans la deuxième partie de la rue *HB*, dans la partie supérieure de l'espace vide et au-dessus de la deuxième colonne de blocs. Ce schéma indique donc l'emplacement de la formation et du détachement des tourbillons.

Concernant la configuration $7i$ en écoulement *modéré*, le schéma observé à la figure 4.40c est similaire à celui produit par la simulation avec les conditions limites théoriques. Quelques différences minimales sont observées comme les valeurs légèrement plus faibles dans la portion aval de la rue *HC* et des valeurs plus importantes dans la branche de sortie β . Enfin, la zone inférieure de variation de l'écoulement diagonal est légèrement plus étendue en comparaison avec la simulation numérique de base.



(a) Configuration $7g$ - écoulement *lent*.

(b) Configuration $7g$ - écoulement *modéré*.

(c) Configuration $7i$ - écoulement *modéré*.

FIGURE 4.40 – Ecart-types des vitesses moyennées sur la hauteur d'eau calculées avec les conditions limites des essais expérimentaux.

6.5 Conclusion

Les simulations avec les conditions limites égales aux conditions limites expérimentales ont révélé que les conditions limites ont un impact sur le comportement oscillatoire de l'écoulement. Parmi les six configurations analysées, trois ont présenté des différences au niveau de leur comportement oscillatoire. La configuration $7g$ en écoulement *lent* développe de légères oscillations aux entrées. Cette même configuration en écoulement *modéré* possède un comportement oscillatoire généralisé de faible amplitude. Enfin, les oscillations calculées pour la configuration $7i$ en scénario *modéré* changent d'amplitude.

Cependant, le modèle numérique n'est toujours pas capable de prédire le comportement oscillatoire pour toutes les configurations. Un manque de précision est également pointé du doigt au niveau des fréquences et des amplitudes des oscillations.

7 Conclusion

En conclusion, le modèle numérique prédit de manière fiable les valeurs moyennes des variables d'écoulement étudiées dans cette analyse à savoir les hauteurs d'eau en entrée et la répartition des débits en sortie. Au niveau des hauteurs d'eau en entrée, le modèle numérique a tendance à légèrement surestimer les valeurs moyennes aux entrées *A* et *B* d'après la comparaison avec les résultats expérimentaux pour les six cas étudiés. Concernant les répartitions de débit en sortie, il a été révélé que le modèle numérique sous-estime la portion de débit s'écoulant à la sortie *2* et surestime celle de la sortie *1*. Cette tendance est particulièrement vraie pour la configuration *7i* présentant un écoulement diagonal intense dans l'espace vide, rejoignant ainsi les observations de Li et al. (2021a).

La comparaison du champ de vitesse moyennée sur la hauteur d'eau obtenu par simulation numérique et du champ de vitesse de surface moyennée sur la durée de l'essai expérimental montre pour chaque cas une bonne correspondance. Les fonctions de distribution cumulative ont d'ailleurs indiqué que plus de 70% des différences sont comprises dans la gamme de valeurs [-30% ; 30%]. La correspondance est meilleure en écoulement *lent* puisque dans ce cas, 85% des différences sont comprises dans ce même intervalle. L'estimation par le modèle numérique est donc excellente. Des différences au niveau du schéma d'écoulement ont tout de même été notées comme le détachement du jet rapide dans les ruelles horizontales alors que ce jet reste collé aux blocs lors des simulations numériques. Une autre différence majeure réside dans les valeurs des vitesses à l'aval d'une intersection de rues. Les intersections engendrent des structures d'écoulement 3D comme mentionné par Li et al. (2021a). Par conséquent, les vitesses moyennées sur la hauteur d'eau sont plus importantes que les vitesses de surface puisque les structures d'écoulement 3D n'influencent pas ou peu ces dernières. Cet effet est par ailleurs amplifié avec l'accélération de l'écoulement comme remarqué en scénario d'écoulement *modéré*. Les champs de vitesse moyennée sur la hauteur et de vitesse de surface de la configuration *7i* mettent en évidence l'écoulement diagonal intense qui se développe dans l'espace libre à l'amont des blocs. Comme expliqué dans ce chapitre et par Li et al. (2021a), le modèle numérique prédit cet écoulement diagonal intense mais la répartition de débit qui en résulte est légèrement faussée par rapport aux mesures expérimentales.

Lors de la comparaison des hauteurs d'eau en entrée, il a été remarqué que les écarts-types des mesures expérimentales étaient plus importants que les écarts-types des résultats numériques. De plus, les écarts-types sont du même ordre de grandeur pour les trois configurations dans un même scénario d'écoulement alors que les résultats numériques n'indiquaient que des écarts-types relativement importants pour l'une ou l'autre configuration. Les écarts-types numériques importants ont révélé la présence d'oscillations de l'écoulement. Les mêmes observations sur les écarts-types des répartitions de débit en sortie ont été réalisées. Par conséquent, il était logique de vérifier le comportement oscillatoire de l'écoulement dans les six cas testés expérimentalement. Pour ce faire, les variations temporelles des hauteurs d'eau en entrée et en sortie ont été étudiées. Il en est ressorti que les mesures présentent toute un comportement oscillatoire avec une fréquence proche de 0,5 Hz. En outre, la gamme de fréquence observée est légèrement plus large en écoulement *modéré*. Le modèle numérique n'avait pas prédit d'oscillations dans la configuration *7g* en écoulement *lent* et *modéré* ainsi que dans la configuration *7i* en écoulement *lent*. Le modèle numérique, employé avec les paramètres décrits précédemment semble donc comporter une lacune à ce niveau-là.

Enfin, le comportement oscillatoire des champs de vitesse de surface a été analysé afin de démontrer une fois de plus que l'écoulement de toutes les configurations dans les deux scénarios étudiés présentent bel et bien des oscillations. L'étude des écarts-types des vitesses a permis de localiser les zones de développement des oscillations. Il a été mis en évidence qu'en négli-

geant la différence d'ordre de grandeur entre les écarts-types des vitesses moyennées obtenues numériquement et les écarts-types de vitesse de surface mesurées, les schémas, les variations des deux types de résultats sont relativement proches en écoulement *lent*. D'autres zones avec des écarts-types importants sont identifiées comme les sorties de manière générale. En écoulement *modéré*, des différences notables apparaissent. Les écarts-types de vitesse de surface en écoulement *modéré* sont toutefois remis en question car la densité de traceurs employés pour la LSPIV ne semblent pas toujours suffisante. Ceci a d'ailleurs été clairement observé sur les champs de vitesse moyennées sur une demi-période d'oscillations. Ces champs de vitesse locaux présentent dans certains cas des zones blanches c'est-à-dire de vitesse nulle prouvant qu'aucun traceur n'a été détecté par le logiciel FUDAA-LSPIV. Il a par conséquent été impossible d'observer les oscillations en opposition de phase dans ces derniers cas. En revanche, en écoulement *lent*, les oscillations en opposition de phase ont été formellement identifiées grâce à ces champs de vitesse locaux. Ce sont des preuves supplémentaires du comportement oscillatoire de l'écoulement durant les essais expérimentaux.

Les simulations numériques avec les conditions limites amont identiques à celles des essais expérimentaux ont démontré une certaine influence de celles-ci sur le comportement oscillatoire de l'écoulement. Cependant, les oscillations ne sont toujours pas prédites pour les six cas étudiés.

Il en résulte donc que le modèle numérique est fiable afin de prédire les valeurs moyennes des variables d'écoulement analysées c'est-à-dire les hauteurs d'eau en entrée, la répartition de débit en sortie ainsi que le champ de vitesse. Par contre, ce modèle numérique n'est pas fiable au niveau du comportement oscillatoire de l'écoulement car il ne prédit pas ou du moins sous-estime le comportement oscillatoire. De plus amples investigations sont donc nécessaires afin de trouver l'origine de cette absence d'oscillations lors de certaines simulations numériques.

Chapitre 5

Discussion des résultats

1 Influence des formes urbaines

Le modèle numérique est valide pour les valeurs moyennes des hauteurs d'eau aux entrées ainsi que pour les valeurs moyennes des répartitions de débit en sortie. Par conséquent, il nous est possible de déterminer l'influence générale des configurations urbaines étudiées. Rappelons que les résultats sont comparés à ceux de la configuration de référence présentée à la figure 3.1.

Les différences des hauteurs d'eau moyennes en entrée illustrées à la figure 3.3 indiquent clairement une augmentation des hauteurs d'eau en amont pour les configurations *7g* et *7i*. L'augmentation est d'autant plus forte que l'écoulement est rapide. Pour la configuration *7g*, la différence de hauteur d'eau reste inférieure à 3 millimètres à l'échelle du modèle en écoulement *rapide*, représentant une augmentation de 2,3% de la hauteur d'eau. A l'échelle du prototype, cette augmentation équivaut approximativement à 1,5 cm. Cette augmentation est donc notable mais pas affolante. En revanche, les augmentations observées pour la configuration *7i* sont bien plus importantes, surtout à l'entrée *C* où l'augmentation moyenne est de 7,4 % de la hauteur d'eau en écoulement *rapide*. A l'échelle prototype, cette augmentation équivaut à 3,7 cm et devient donc conséquente. Concernant la configuration *7h*, les hauteurs d'eau moyennes sont très proches de celles de la configuration de référence. Ces résultats indiquent donc que la présence d'un espace vide en aval n'a presque pas d'influence sur les hauteurs d'eau en amont mais que lorsque cet espace libre est plus en amont, ces hauteurs d'eau augmentent. C'est d'ailleurs une des observations réalisées à la section 5.1 du chapitre 3. L'espace vide joue le rôle de tampon, permettant aux écoulements de se calmer et donc le niveau d'eau augmente en amont. C'est pourquoi, dans la configuration *7h* l'espace libre ne semble pas avoir d'influence sur les hauteur d'eau en amont. L'écoulement qui entre dans les rues et ruelles horizontales est accéléré par le phénomène de contraction. De cette manière, l'eau s'écoule plus vite vers les sorties. Pour limiter les hauteurs d'eau en amont et donc les dégâts potentiels, il est donc préférable de créer les espaces libres, "open spaces" dans la partie aval du domaine étudié, aménagé.

Concernant les répartitions de débit, il a été mentionné précédemment (section 2 du chapitre 3) que la configuration *7h* engendrait des résultats presque identiques à ceux de la configuration de référence. En configuration *7g*, la proportion de débit s'écoulant par la sortie 1 est plus élevée qu'en configuration de référence et inversement pour la sortie 2. Toutefois, ces trois configurations à savoir la configuration de référence, la configuration *7g* et la configuration *7h* ont une répartition de débit similaire. En effet, approximativement 25% du débit total s'écoule par la sortie 1 et de même par la sortie 2. Par contre, la configuration *7i* possède une toute autre répartition de débit avec plus de 35% du débit total pour chacune des deux premières sorties. La proportion de débit à la sortie 3 est donc 20% plus faible que dans les

autres configurations. L'espace libre en amont permettant le développement d'un écoulement diagonal intense est responsable de cette différence. Cette configuration a l'avantage de répartir le débit de façon plus égalitaire entre les trois sorties malgré la géométrie du domaine qui tend à favoriser l'écoulement d'ouest en est. Cette configuration est donc meilleure pour limiter les dégâts en aval.

Il est important de ne pas oublier le comportement oscillatoire de l'écoulement. Les hauteurs d'eau oscillent et il faut tenir compte des hauteurs d'eau maximales rencontrées. Dans ce travail, il a été révélé que les variations, les écarts-types des hauteurs d'eau sont du même ordre de grandeur pour les trois configurations étudiées dans un même scénario d'écoulement. Il en est de même pour les répartitions de débit. Par conséquent, la configuration urbaine n'influence pas l'intensité du comportement oscillatoire et donc des variations, des vagues induites.

2 Formation des oscillations

Il est intéressant de se questionner sur la cause des oscillations observées. Effectivement, pourquoi des oscillations apparaissent-elles dans les trois configurations étudiées dans ce travail.

Les analyses réalisées dans ce travail montre le développement de tourbillons et donc d'oscillations des vitesses de surface dans la partie supérieure de l'espace libre des configurations 7g et 7h. A l'aval du bloc supérieur précédant l'espace libre, une zone de recirculation apparaît avec la rencontre de deux flux de vitesse différente, le premier issu de la rue *HB* et le second de la ruelle *HD*. Les vitesses dans la rue *HB* sont très élevées alors que celles de l'écoulement provenant de la ruelle *HD* sont plus faibles. La rencontre de ces deux flux engendre le développement de tourbillons de Von Karman. Ces tourbillons se développent dans ces configurations et pas dans les configuration étudiées par Li et al. (2021a) à cause de l'espace vide, sans obstacle présent à l'aval des blocs. Cet espace permet le développement et le détachement de ces tourbillons alors que dans les autres configurations, les blocs sont alignés horizontalement avec uniquement de petits intervalles, des ruelles verticales étroites. Le développement et le détachement de tourbillons à une échelle suffisamment grande sont par conséquent compliqués.

En revanche, les oscillations présentes dans la configuration 7i se manifestent sous forme de variations de l'intensité de la vitesse et non des variations de direction. Ce type d'oscillations a également été observé par Li et al. (2021a) dans la configuration ne présentant aucun bloc dans l'espace central.

3 Analyse LSPIV

Précédemment, la qualité de l'analyse LSPIV effectuée a été remise en cause pour le scénario d'écoulement *modéré*. En effet, les résultats obtenus pour les écarts-types des vitesses de surface ainsi que les champs locaux de vitesse moyennée sur une seconde ont montré des valeurs étonnantes et ils étaient parfois illisibles. Une source potentielle de ces résultats inattendus serait la trop faible densité de traceurs à la surface de l'écoulement lors des enregistrements vidéos. Cette explication est tout a fait censée car en écoulement *modéré*, les vitesses d'écoulement devraient être approximativement deux fois plus grandes qu'en scénario d'écoulement *lent*. La sciure a été relâchée, disposée à une même fréquence au cours du temps, donc une même quantité de sciure sur un même intervalle temporel est disposée aux entrées pour les deux scénarios d'écoulement. Etant donné que les vitesses sont plus grandes en scénario *modéré*, la densité de sciure observée et donc plus faible car une même quantité de sciure est placée pour une plus grande quantité d'eau entrante.

La figure 5.1 illustre les vitesses filtrées obtenues par FUDAA-LSPIV au début de six secondes successives (la première image des 25 images formant une seconde) pour la configuration 7g en écoulement *modéré*. Il est évident que le nombre de valeurs est beaucoup trop faible. Une interpolation dans le temps des valeurs serait d'ailleurs inappropriée au vu de leur trop faible nombre. Notons toutefois que le cas illustré sur cette figure est le cas présentant le moins de valeurs. Les vitesses filtrées des autres configurations dans ce même scénario d'écoulement sont plus nombreuses mais toujours insuffisantes pour assurer des résultats lisibles et cohérents. Concernant les résultats en écoulement *lent*, ils sont bien meilleurs, le nombre de valeurs de vitesses filtrées est largement supérieur à celui des résultats en écoulement *modéré*. Les vitesses filtrées au début de six secondes consécutives en scénario d'écoulement *lent* ainsi que celles des deux autres configurations en écoulement *modéré* sont présentées à l'annexe 7.1.

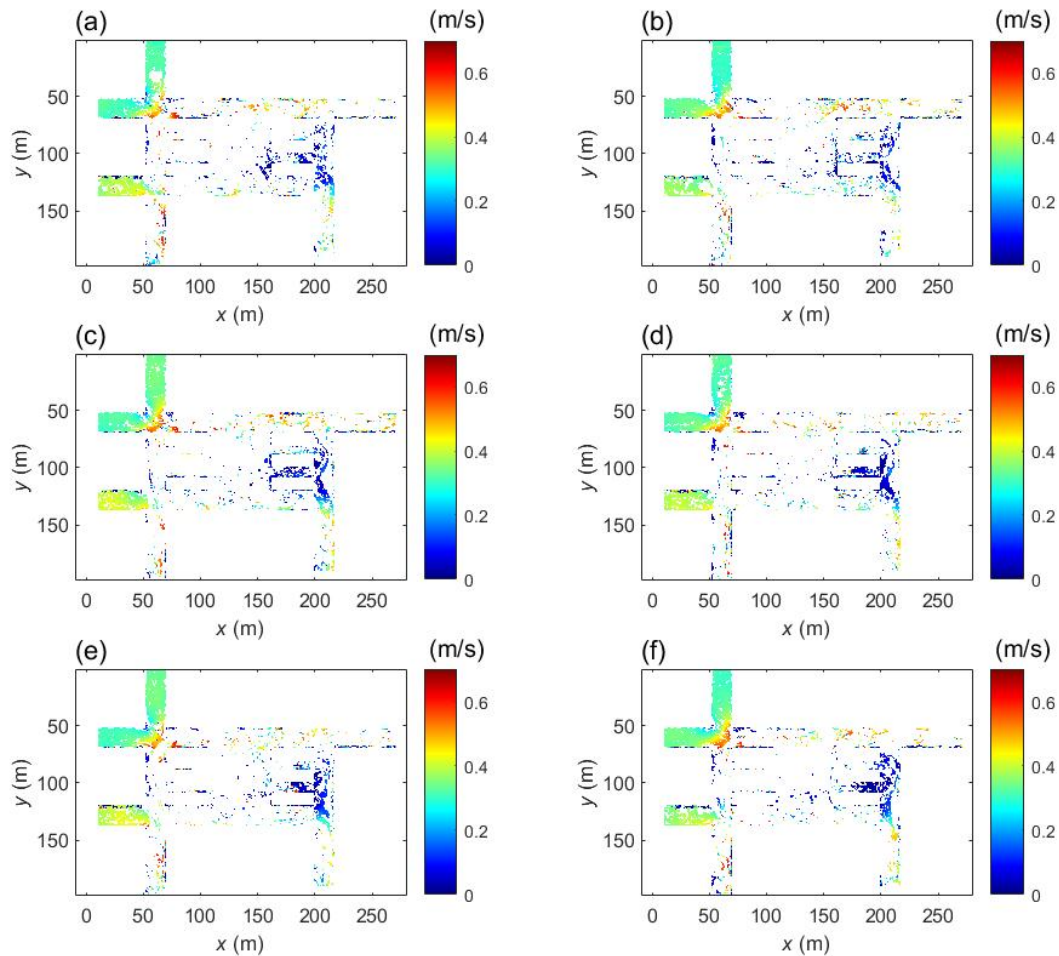


FIGURE 5.1 – Vitesses filtrées au début de six secondes consécutives (configuration 7g - écoulement *modéré*).

Peltier et al. (2014) ont étudié les jets oscillatoires dans les réservoirs peu profonds. Dans le but de caractériser les jets oscillatoires observés, une analyse LSPIV a également été effectuée. Les résultats étaient très concluants avec notamment l'observation des variations des vitesses de surface de manière assez précise. Certains paramètres et certains outils employés par Peltier et al. (2014) pour l'analyse LSPIV étaient différents de ceux utilisés dans ce travail. Par conséquent, afin de déterminer si, en dehors de la densité de traceurs, d'autres facteurs liés aux analyses LSPIV réalisées dans cette étude-ci ont pu influencer les résultats, une comparaison des paramètres et des outils d'analyse LSPIV de cette étude et de celle de Peltier et al. (2014) est établie. Les paramètres et outils des deux études sont repris au tableau 5.1.

	Peltier Y.	Scheen V.
Traceur	Sciure 2 mm	Sciure 1 à 3 mm
Fréquence d'enregistrement [Hz]	25	25
Résolution caméra [pixels]	1920x1080	1920x1080
Durée d'enregistrement	6 min	entre 1min et 30sec
Résolution LSPIV	1 pixel = 1mm x 1mm	1 pixel = 1mm x 1mm
Maillage	1cm x 1cm	1cm x 1cm
Logiciel	Code MATLAB personnel	FUDAA-LSPIV
Type de filtre	filtre médian	Amplitude et direction et/ou corrélation des vecteurs vitesse (indiquer soi-même les bornes)
Interpolation	Fonction "smoothn"	Aucune
Nombre de Froude caractéristique	0,36 à 0,46	0,2 et 0,4

TABLE 5.1 – Comparaison des outils et paramètres d'analyse LSPIV.

Tout d'abord, les caractéristiques du matériel d'enregistrement vidéo sont identiques. De fait, pour les deux études, une caméra possédant une fréquence d'enregistrement d'images de 25 Hz et une résolution de 1920 par 1080 pixels est employée. Il en est de même pour la résolution des images orthorectifiées puisqu'un pixel correspond à un millimètre carré du domaine réel dans les deux cas. Par conséquent, le nombre d'images par seconde et la qualité des images sources et orthorectifiées ne sont a priori pas l'origine des problèmes rencontrés.

La durée des enregistrements est très différente. Peltier et al. (2014) assuraient un enregistrement d'une durée de six minutes alors que dans cette étude, les enregistrements d'images exploitables durent entre 30 secondes et une minute. Cependant, une des analyses réalisées dans ce travail consistait à moyenniser les vitesses mesurées sur une demi-période d'oscillation, soit une seconde. Un enregistrement beaucoup plus long n'est donc pas réellement utile. Le seul avantage qu'il présenterait serait d'avoir un plus grand "choix", une plus grande gamme de résultats. De plus, l'accumulation de sciure dans les bacs récolteurs situés aux sorties empêchent l'eau de s'écouler vers le réservoir inférieur. Ce phénomène d'obstruction de l'écoulement est particulièrement rapide en écoulement *modéré*. C'est d'ailleurs la cause de la durée plus courte des enregistrements. Un enregistrement d'une plus longue durée est donc très compliqué à réaliser avec le modèle utilisé dans ce cas-ci.

Le maillage employé pour le calcul des vitesses est identique. Il en est de même pour le type de traceur et la taille des particules de sciure est similaire dans les deux cas. Ces paramètres sont donc supposés sans influence.

Au niveau des outils d'analyse LSPIV, Peltier et al. (2014) ont élaboré des routines MATLAB afin de traiter les images et de calculer les champs de vitesse. En revanche, ce travail a recouru à un logiciel libre d'accès appelé FUDAA-LSPIV. Il existe probablement un certain nombre de différences entre les deux outils. Une différence dont nous avons connaissance est le filtre opéré sur les vitesses brutes afin de négliger les valeurs aberrantes. Peltier et al. (2014) font appel à un filtre médian afin de détecter et rejeter les valeurs aberrantes. Ce filtre se base donc sur les valeurs de l'entourage du point considéré afin de déterminer si la valeur est cohérente ou non. Moins de 3% des valeurs brutes obtenues ont ainsi été rejetées. Dans notre étude, le filtre appliqué consiste simplement à délimiter les valeurs des composantes et des normes des vecteurs de vitesse calculés. De cette manière, l'amplitude et l'orientation des vecteurs calculés sont contrôlés. De plus, les valeurs du facteur de corrélation des vitesses sont également bornées. Les vecteurs qui ne respectent pas ces gammes de valeurs sont donc négligés. Les valeurs des composantes et de la norme des vecteurs ont été conservées pour les trois configurations dans un même scénario d'écoulement. Concernant le coefficient de corrélation, les bornes, fixées à 0,8 (minimum) et 0,98 (maximum) sont identiques pour tous les cas étudiés.

Ensuite, les valeurs filtrées des vecteurs de vitesse calculés par Peltier et al. (2014) ont été interpolées et lissées grâce à la fonction *smoothn* dans MATLAB. Cette fonction a été employée comme filtre passe-bas, limitant ainsi l'influence des mouvements parasites à haute fréquence et permettant une meilleure visualisation des phénomènes turbulents (Peltier et al., 2014). Cette procédure n'a pas été appliquée dans ce travail. Une simple moyenne temporelle des résultats a été réalisée. Ensuite, les résultats ont été affichés à l'aide de la fonction *imagesc*. Par conséquent, aucune interpolation n'est réalisée.

Enfin, les vitesses d'écoulement étudiées sont similaires. Peltier et al. (2014) ont étudié des écoulements présentant un nombre de Froude compris entre 0,36 et 0,46 aux entrées. D'une manière similaire, nous avons défini un nombre de Froude caractéristique valant 0,2 et 0,4 pour tenir compte de deux scénarios d'écoulement. Il est donc peu probable que les vitesses observées soient bien plus importantes. Les vitesses d'écoulement ne sont donc pas un frein à la détection des vitesses des traceurs.

En conclusion, la trop faible densité de traceur à la surface de l'écoulement expliquerait les valeurs parfois étonnantes ou les résultats illisibles obtenus en écoulement *modéré*. Une autre source potentielle identifiée grâce à la comparaison avec l'analyse LSPIV de Peltier et al. (2014) serait les filtres employés. Une solution serait d'employer un autre type de filtre(s), par exemple un filtre médian comme Peltier et al. (2014). Une autre possibilité afin d'améliorer les résultats serait d'interpoler et de lisser les valeurs obtenues comme effectué par Peltier et al. (2014).

Chapitre 6

Conclusions

Ce travail s'est concentré sur l'analyse de différentes variables d'écoulement afin de déterminer l'influence d'un nombre limité de configurations urbaines. Les trois configurations étudiées sont composées de blocs rectangulaires placés dans un certain alignement afin de créer un espace libre aussi appelé "open space". Cette caractéristique urbaine a un impact sur les variables d'écoulement d'inondation et l'objectif principal de cette étude est d'analyser son influence sur ces variables. Les variables d'écoulement étudiées sont les hauteurs d'eau en amont, les répartitions du débit en sortie, les champs de vitesse ainsi que le comportement oscillatoire de l'écoulement. Afin de réaliser ce travail, les trois configurations ont été simulées numériquement et testées expérimentalement. Les résultats et mesures obtenus ont permis de valider le modèle numérique et de tirer des conclusions sur l'influence de cette caractéristique urbaine.

Il résulte de cette étude que la position de l'espace libre au sein du quartier urbain influence les hauteurs d'eau en amont ainsi que la répartition du débit en sortie. Plus l'espace vide est en amont, plus les hauteurs d'eau en amont sont élevées et inversement. En revanche, un espace libre près des entrées du domaine d'écoulement présente l'avantage de répartir le débit total de manière relativement équitable entre les trois sorties. Il est important de noter que la porosité de transport ("conveyance porosity") est identique dans les trois configurations puisque la largeur et le nombre de rues sont identiques. Ces résultats furent prédits à l'aide du logiciel de simulation d'écoulement *WOLF* et confirmés par les mesures expérimentales réalisées sur un modèle physique en laboratoire. Les variables d'écoulement étudiées pour obtenir ces résultats et pour valider le modèle numérique sont les hauteurs d'eau en entrée, les répartitions de débit en sortie et les champs de vitesse. Toutes ces variables ont indiqué une très bonne correspondance des valeurs moyennes calculées par le modèle numérique et les valeurs moyennes des mesures expérimentales réalisées. Une faiblesse du modèle numérique a été soulevée par Li et al. (2021a). L'évaluation de la répartition de débit pour une configuration urbaine présentant un écoulement diagonal intense présente une correspondance plus faible avec les résultats expérimentaux. Cette tendance a également été remarquée pour la configuration *7i* étudiée dans ce travail. Cette configuration possède un espace libre au début de la zone centrale d'étude, permettant ainsi le développement d'un écoulement diagonal.

Lors des six essais expérimentaux (les trois configurations urbaines en scénarios d'écoulement *lent* et *modéré*), des oscillations ont été observées. Les mesures expérimentales des hauteurs d'eau en entrée et en sortie ainsi que les écarts-types des vitesses de surface enregistrées ont confirmé la présence du comportement oscillatoire. Dans les six cas, le comportement oscillatoire possède une fréquence avoisinant 0,5 Hz. La gamme de fréquences s'élargit légèrement lorsque l'écoulement est accéléré ([0,1 Hz ; 1 Hz]). Concernant les amplitudes, il a été mis en évidence qu'elles sont du même ordre de grandeur dans les trois configurations pour un même scénario d'écoulement et qu'elles augmentent lorsque l'écoulement est accéléré. Les vitesses de

surface ont été moyennées sur une demi-période d'oscillations à savoir une seconde sur une zone bien précise de chaque configuration. Les résultats en écoulement *lent* indiquent clairement les oscillations en opposition de phase. Pour les configurations *7g* et *7h*, des détachements tourbillonnaires sont formellement identifiés dans la partie supérieure de l'espace vide. Ces tourbillons apparaissent à cause de l'obstacle rencontré par l'écoulement et de l'espace disponible en aval pour leur développement. C'est d'ailleurs pour cette raison qu'aucun détachement tourbillonnaire n'est observé dans les configurations étudiées par Li et al. (2021a) car l'espace à l'aval des blocs est occupé par un autre bloc, empêchant ainsi la formation des tourbillons. En revanche, dans la configuration *7i*, les oscillations sont observées lors de la rencontre de l'écoulement diagonal intense se développant dans l'espace libre avec les blocs inférieurs. Ce sont des oscillations d'intensité de vitesse et non de direction. Il n'était pas possible de réaliser les essais en écoulement *rapide* mais il n'est pas insensé de penser qu'un comportement oscillatoire similaire serait également observé dans les trois configurations.

Le modèle numérique a également prédit un comportement oscillatoire de l'écoulement mais uniquement dans certains cas étudiés. L'étude temporelle des hauteurs d'eau en entrée ainsi que des débits en sortie calculés par ces simulations ont permis de détecter et de caractériser les fréquences et les amplitudes des oscillations. Les fréquences des différents comportements oscillatoires observés diffèrent et sont comprises entre 0,47 Hz et 1,3 Hz. Cette gamme de fréquences est plus large que l'intervalle des fréquences mesurées expérimentalement. Concernant les amplitudes des oscillations calculées, elles sont également très différentes d'une configuration à l'autre, ne correspondant pas ainsi à la tendance d'amplitudes similaires entre les configurations relevées par les mesures expérimentales. La comparaison des écarts-types des vitesses moyennées sur la hauteur d'eau avec ceux des vitesses de surface mesurées lors des essais expérimentaux a ensuite démontré que le modèle numérique ne prédit pas toutes les zones présentant des oscillations. Le modèle numérique possède donc une lacune au niveau de la prédiction d'un comportement oscillatoire ou non de l'écoulement. De plus, les caractéristiques du comportement oscillatoire ne sont pas exactes lorsqu'il est prédit. Des recherches supplémentaires sont en conséquence requises afin de déterminer si le modèle numérique doit être amélioré ou si d'autres paramètres jouent un rôle dans la simulation du comportement oscillatoire. Une piste à explorer est l'influence des conditions limites sur le comportement oscillatoire. Effectivement, les valeurs des conditions limites amont influencent le développement du comportement oscillatoire dans certaines simulations numériques comme illustré par l'analyse des simulations avec les conditions limites amont égales aux valeurs des essais expérimentaux.

Certains résultats sont à mettre en perspective, notamment ceux issus des vitesses de surface en écoulement *modéré* : les écarts-types de ces dernières ou les valeurs moyennées sur une seconde d'écoulement. Les valeurs des vitesses filtrées déterminées à l'aide du logiciel FUDAA-LSPIV sont trop peu nombreuses dans ce scénario d'écoulement. Une des causes du nombre assez restreint de valeurs est la trop faible densité de traceurs à la surface de l'écoulement. L'emploi d'un autre type de filtres comme Peltier et al. (2014) par exemple pourrait être une solution. L'emploi d'une fonction d'interpolation (ex : *smoothn*) pourrait également améliorer la lisibilité des résultats. Cependant, le nombre de valeurs est trop faible en écoulement *modéré* pour assurer une interpolation de qualité.

Ce travail comporte évidemment des limitations. Premièrement, le nombre de configurations urbaines est restreint. Uniquement trois configurations urbaines différentes mais présentant des caractéristiques communes ont été étudiées. La représentativité de ces trois configurations est limitée et par conséquent l'étendue des conclusions tirées également. Ces trois configurations ont été simulées dans trois scénarios d'écoulement seulement et testées uniquement dans deux d'entre eux. Des essais expérimentaux supplémentaires avec des vitesses d'écoulement plus élevées seraient appréciés afin de renforcer les conclusions de ce travail.

De plus, la géométrie générale du modèle est restrictive puisqu'elle favorise l'écoulement d'ouest en est. Cette géométrie un peu particulière a permis à Li et al. (2021a) d'étudier certaines variables des configurations urbaines de manière plus adéquate mais limitant de ce fait la portée des conclusions tirées. Li et al. (2021a) révèlent d'ailleurs que l'écoulement d'ouest en est est quatre fois plus fort que l'écoulement du nord au sud. Cette géométrie nous aura permis de mettre en évidence le comportement oscillatoire de l'écoulement. Cependant, ce comportement subsiste-t-il dans un modèle dont une des directions d'écoulement n'est pas favorisée ?

Le modèle ne présente également aucune pente de fond. L'influence de ce paramètre sur les variables d'écoulement et sur le comportement oscillatoire devrait faire l'objet d'une étude comme par exemple déterminer les différences pour une même configuration urbaine entre une pente faible et une pente forte.

Des limitations sont aussi à mentionner au niveau des conditions limites d'écoulement choisies. Les conditions limites sont effectivement constantes tout au long des simulations et des essais. De plus, la condition limite amont est identique pour les trois entrées et la condition limite aval est identique pour les trois sorties lors des simulations. Lors des essais expérimentaux, de faibles différences apparaissent. Au vu des observations tirées des simulations avec les conditions limites amont expérimentales, il serait intéressant d'investiguer en détails l'influence de conditions limites non constantes et/ou différentes aux entrées/sorties.

Lors de ce travail, le facteur de distorsion a été gardé constant et égal à 10. Ce facteur de distorsion permet d'assurer un nombre de Reynolds élevé et donc de rester proche des conditions de viscosité réelles. Sans cette distorsion géométrique, un modèle physique plus grand aurait été nécessaire afin d'assurer des hauteurs d'eau suffisantes pour négliger les erreurs de mesures. Une étude des effets de la distorsion a été menée par Li et al. (2020). La principale conclusion de cette étude indique que les effets de la distorsion sont minimales lorsque le coefficient caractérisant la distorsion géométrique du modèle est supérieur à 5.

Certes l'influence des configurations urbaines a déjà fait l'objet de plusieurs études. Cependant, la plupart des travaux réalisés sur le sujet étudient l'influence des quartiers urbains à grande échelle comme notamment celui de Bruwier et al. (2018). La caractérisation de l'influence des configurations urbaines à l'échelle d'un quartier urbain uniquement comme étudié par Li et al. (2021a) reste limitée. Des études supplémentaires sont donc nécessaires afin de déterminer l'influence des configurations urbaines. L'orientation des blocs est un paramètre qui n'a pas pu être étudié dans ce travail. L'orientation des rues a été étudiée notamment par Velickovic et al. (2017). Cependant, l'étude se limitait à l'orientation des rues. Par conséquent, les blocs étaient disposés de manière à obtenir des rues rectilignes continues mais inclinées. Il serait intéressant d'analyser les variables d'écoulements pour des configurations urbaines présentant des blocs inclinés mais dont la direction principale des rues reste horizontale ou verticale, à l'instar de la série de configuration 6 présentée au chapitre 1.

D'autres phénomènes ne sont pas pris en compte dans ce travail et méritent une attention particulière afin de comprendre l'ensemble des phénomènes gouvernant et agissant lors d'événements d'inondations urbaines (Mignot et al., 2019). Il serait intéressant d'inclure l'effet des obstacles présents dans les rues tels que les trottoirs, les bancs, les barrières, les bacs à fleurs, les potentiels véhicules, etc (Mignot et al., 2013). Les interactions entre les écoulements de surface et le réseau d'égouttage (Beg et al., 2020), l'infiltration d'eau dans les bâtiments (Mignot et al., 2020) ainsi que le transport de sédiments et polluants sont également des phénomènes associés aux inondations en milieu urbain.

Bibliographie

- Arndt, R., Roberts, P., Wahl, T. et Ettema, R. (2000). Hydraulic modeling : Concepts and practice. American Society of Civil Engineers.
- Arrault, A., Finaud-Guyot, P., Archambeau, P., Bruwier, M., Erpicum, S., Piroton, M. et Dewals, B. (2016). Hydrodynamics of long-duration urban floods : experiments and numerical modelling. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 16(6), p.1413-1429. doi:10.5194/nhess-16-1413-2016.
- Beg, M. N. A., Rubinato, M., Carvalho, R. F. et Shucksmith, J. D. (2020). CFD modelling of the transport of soluble pollutants from sewer networks to surface flows during urban flood events. doi:10.3390/w12092514.
- Brown, R. et H.Chanson (2012). Suspended sediment properties and suspended sediment flux estimates in an inundated urban environment during a major flood event. *Water resources research*, 48(11), doi:10.1029/2012WR012381.
- Brown, R. et H.Chanson (2013). Turbulence and Suspended Sediment Measurements in an Urban Environment during the Brisbane River Flood of January 2011. *Journal of hydraulic engineering (New York, N.Y.)*, 139(2), p.244-253. doi:10.1061/(ASCE)HY.1943-7900.0000666.
- Bruwier, M., Erpicum, S., Archambeau, P., Piroton, M. et Dewals, B. (2017). Computing flooding of crossroads with obstacles using a 2D numerical model. *Journal of Hydraulic Research*, 55(5), p.737-741. doi:10.1080/00221686.2017.1326406.
- Bruwier, M., Maravat, C., Mustafa, A., Teller, J., Piroton, M., Erpicum, S., Archambeau, P. et Dewals, B. (2020). Influence of urban forms on surface flow in urban pluvial flooding. *Urban and Environmental Engineering*.
- Bruwier, M., Mustafa, A., Aliaga, D. G., Archambeau, P., Erpicum, S., Nishida, G., Zhang, X., Piroton, M., Teller, J. et Dewals, B. (2018). Influence of urban pattern on inundation flow in floodplains of lowland rivers. *Science of The Total Environment*, 622-623, p.446-458. doi:10.1016/j.scitotenv.2017.11.325.
- Cea, L., Garrido, M. et Puertas, J. (2010). Experimental validation of two-dimensional depth-averaged models for forecasting rainfall-runoff from precipitation data in urban areas. *Journal of hydrology (Amsterdam)*, 382(1), p.88-102. doi:10.1016/j.jhydro.2009.12.020.
- Chen, Y., Z., Haolan, Zhang, H., Du, G. et Zhou, J. (2015). Urban flood risk warning under rapid urbanization. *Environmental Research on Hydrology and Water Resources* 139, p.3-10. doi:10.1016/j.envres.2015.02.028.
- Creëlle, S., Engelen, L., Schindfessel, L., Ramos, P. X. et De Mulder, T. (2018). Experimental Investigation of Free Surface Gradients in a 90° Angled Asymmetrical Open Channel Confluence. doi:10.1007/978-981-10-7218-5_58.
- Demonceau, J.F. et Dewals, B. (2020). Natural and Technological Risks in Civil Engineering.
- El Kadi Abderrezzak, K., Lewicki, L., Paquier, A., Rivière, N. et Travin, G. (2011). Division of critical flow at three-branch open-channel intersection. *Journal of hydraulic research*, 49(2), p.231-238. doi:10.1080/00221686.2011.558174.
- El Kadi Abderrezzak, K. et Paquier, A. (2009). Discussion of “Numerical and Experimental Study of Dividing Open-Channel Flows” by A. S. Ramamurthy, Junying Qu, and Diep Vo. *Journal of hydraulic engineering (New York, N.Y.)*, 133, 135(1), p.1111-1112. doi:10.1061/(ASCE)HY.1943-7900.0000009.

- Erpicum, S., Meile, T., Dewals, B., Pirotton, M. et Schleiss, A. (2009). 2D numerical flow modeling in a macro-rough channel. *International Journal for Numerical Methods in Fluids*, 61(11), p.1227-1246. doi:<https://doi.org/10.1002/fld.2002>.
- Fang, Q. (2016). Adapting Chinese cities to climate change. *Science (American Association for the Advancement of Science)*, 354(6311), p.425-426. doi:[10.1126/science.aak9826](https://doi.org/10.1126/science.aak9826).
- Finaud-Guyot, P., Garambois, P.-A., Araud, Q., Lawniczak, F., François, P., Vazquez, J. et Mosé, R. (2018). Experimental insight for flood flow repartition in urban areas. *Urban Water Journal*, 15(3), p.242-250. doi:[10.1080/1573062X.2018.1433861](https://doi.org/10.1080/1573062X.2018.1433861).
- Güney, M. S., Tayfur, G., Bombar, G. et Elci, S. (2014). Distorted Physical Model to Study Sudden Partial Dam Break Flows in an Urban Area. *Journal of hydraulic engineering (New York, N.Y.)*, 140(11). doi:[10.1061/\(ASCE\)HY.1943-7900.0000926](https://doi.org/10.1061/(ASCE)HY.1943-7900.0000926).
- Ishigaki, T., Keiichi, T. et Kazuya, I. (2003). Hydraulic model tests of inundation in urban area with underground space. *Proc. of XXX IAHR Cogress*, p.487-493.
- Isidoro, J.M.G.P., Lima, J.L.M.P. et de Leandro, J. (2013). The study of rooftop connectivity on the rainfall-runoff process by means of a rainfall simulator and a physical model. *Zeitschrift für Geomorphologie, Supplementary Issues 57*, p.177-191.
- Jodeau, M., Hauet, A., Le Coz, J., Faure, J.B. et Bodart, G. (2020). Manuel d'utilisation du logiciel Fudaa-LSPIV Version 1.7.3.
- Le Coz, J., Jodeau, M., Hauet, A., Marchand, B. et Le Boursicaud, R. (2014). Image-based velocity and discharge measurements in field and laboratory river engineering studies using the free FUDAA-LSPIV software. in : *InProceedings International ConferenceFluvialHydraulics(RiverFlow)*. Lausanne, Switzerland, p.1961-1967.
- Legout, C., Darboux, F., Nédélec, Y., Hauet, A., Esteves, M., Renaux, B., Denis, H. et Cordier, S. (2012). High spatial resolution mapping of surface velocities and depths for shallow overland flow. *Earth surface processes and landforms*, 37(9), p.984-993. doi:[10.1002/esp.3220](https://doi.org/10.1002/esp.3220).
- Leitão, J. P., Peña-Haro, S., Lüthi, B., Scheidegger, A. et Moy de Vitry, M. (2018). Urban overland runoff velocity measurement with consumer-grade surveillance cameras and surface structure image velocimetry. *Journal of Hydrology*, 565, p.791-804. doi:[10.1016/j.jhydrol.2018.09.001](https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2018.09.001).
- Li, C.W. et Zeng, C. (2010). Flow division at a channel crossing with subcritical or supercritical flow. *International journal for numerical methods in fluids*, 62(1), p.56-73. doi:[10.1002/fld.2012](https://doi.org/10.1002/fld.2012).
- Li, X., Erpicum, S., Bruwier, M., Mignot, E., Finaud-Guyot, P., Archambeau, P., Pirotton, M. et Dewals, B. (2019). Technical note : Laboratory modelling of urban flooding : strengths and challenges of distorted scale models. *Hydrology and Earth System Sciences*, 23(3), p.1567-1580. doi:[10.5194/hess-23-1567-2019](https://doi.org/10.5194/hess-23-1567-2019).
- Li, X., Erpicum, S., Mignot, E., Archambeau, P., Pirotton, M. et Dewals, B. (2021). Influence of urban forms on long-duration urban flooding : laboratory experiments and computational analysis. Manuscrit soumis.
- Li, X., Erpicum, S., Mignot, E., Archambeau, P., Rivière, N., Pirotton, M. et Dewals, B. (2020). Numerical insights into the effects of model geometric distortion in laboratory experiments of urban flooding. *Water Resources Research*. doi:[10.1029/2019WR026774](https://doi.org/10.1029/2019WR026774).
- Li, X., Kitsikoudis, V., Mignot, E., Archambeau, P., Pirotton, M., Dewals, B. et Erpicum, S. (2021). Experimental and numerical study of the effect of model geometric distortion on laboratory modelling of urban flooding. Manuscrit soumis.

- Liu, H., Wang, Y., Zhang, C., Chen, A. et Fu, G. (2018). Assessing real options in urban surface water flood risk management under climate change. *Natural hazards (Dordrecht,)*94(1), p.1-18. doi:10.1007/s11069-018-3349-1.
- Lopes, P., Carvalho, R. F. et Leandro, J. (2017). Numerical and experimental study of the fundamental flow characteristics of a 3D gully box under drainage. *Water Science and Technology*, 75(9), p.2204-2215. doi:10.2166/wst.2017.071.
- Luo, H., Fytanidis, D., Schmidt, A. et García, M. (2018). Comparative 1D and 3D numerical investigation of open-channel junction flows and energy losses. *Advances in water resources*, 117, p.120-139. doi:10.1016/j.advwatres.2018.05.012.
- Macchione, F., Costabile, P., Costanzo, C. et De Lorenzo, G. (2019). Extracting quantitative data from non-conventional information for the hydraulic reconstruction of past urban flood events. A case study. *Journal of hydrology (Amsterdam)*, 576, p.443-465. doi:10.1016/j.jhydrol.2019.06.031.
- Mahbub, R. (2017). Materials and Measures. in : *The Geometry of Urban Layouts A Global Comparative Study*. Springer International Publishing, p.47-69. doi:10.1007/978-3-319-30750-3.
- Mahbub, R. (2017). Compendium of the Urban Layout Maps of Downtown Areas in Cities Around the World. in : *The Geometry of Urban Layouts A Global Comparative Study*. Springer International Publishing, p.235-453. doi:10.1007/978-3-319-30750-3.
- Martins, R., Kesserwani, G., Rubinato, M., Lee, S., Leandro, J., Djordjević, S. et Shucksmith, J. D. (2017). Validation of 2D shock capturing flood models around a surcharging manhole. *Urban water journal*, 14(9), p.892-899. doi:10.1080/1573062X.2017.1279193.
- Mignot, E., Camusson, L. et Riviere, N. (2020). Measuring the flow intrusion towards building areas during urban floods : Impact of the obstacles located in the streets and on the facade. *Journal of Hydrology*, 583, p.124607. doi:10.1016/j.jhydrol.2020.124607.
- Mignot, E., Li, X. et Dewals, B. (2019). Experimental modelling of urban flooding : A review. *Journal of Hydrology*, 568, p.334-342. doi:10.1016/j.jhydrol.2018.11.001.
- Mignot, E., Zeng, C., Dominguez, G., Li, C.-W., Rivière, N. et Bazin, P.-H. (2013). Impact of topographic obstacles on the discharge distribution in open-channel bifurcations. *Journal of Hydrology*, 494, p.10-19. doi:10.1016/j.jhydrol.2013.04.023.
- Moy de Vitry, M., Dicht, S. et Leitão, J.P. (2017). floodX : urban flash flood experiments monitored with conventional and alternative sensors. *Earth system science data*, 9(2), p.657-666. doi:10.5194/essd-9-657-2017.
- National Academies of Sciences Engineering and Medicine (2019). *Framing the Challenge of Urban Flooding in the United States*. Washington (DC) : National Academies Press (US).
- Novak, P. (1984). Scaling Factors and Scale Effects in Modelling Hydraulic Structures. Symposium on Scale Effects in Modelling Hydraulic Structures.
- Peltier, Y., Erpicum, S., Archambeau, P., Piroton, M. et Dewals, B. (2014). Meandering jets in shallow rectangular reservoirs : POD analysis and identification of coherent structures. Springer Science & Business Media BV.
- Perks, M., Russell, A. et Large, A. (2016). Technical Note : Advances in flash flood monitoring using unmanned aerial vehicles (UAVs). *Hydrology and earth system sciences*, 20(10), p.4005-4015. doi:10.5194/hess-20-4005-2016.
- Rivière, N., Travin, G. et Perkins, R.J. (2011). Subcritical open channel flows in four branch intersections. *Water resources research*, 47(10). doi:10.1029/2011WR010504.

- Romagnoli, M., Carvalho, R. et Leandro, J.(2013). Turbulence Characterization in a Gully with Reverse Flow. *Journal of hydraulic engineering (New York, N.Y.)*, 139(7), p.736-744. doi:10.1061/(ASCE)HY.1943-7900.0000737.
- Rubinato, M., Martins, R., Kesserwani, G., Leandro, J., Djordjević, S. et Shucksmith, J. (2017). Experimental calibration and validation of sewer/surface flow exchange equations in steady and unsteady flow conditions. *Journal of hydrology (Am-sterdam)*, 552, p.421-432. doi:10.1016/j.jhydrol.2017.06.024.
- Smith, G. P., Rahman, P. F. et Wasko, C. (2016). A comprehensive urban floodplain dataset for model benchmarking. *International Journal of River Basin Management*, 14(3), p.345-356. doi:10.1080/15715124.2016.1193510.
- Soares-Frazão, S. et Zech, Y. (2008). Dam-break flow through an idealised city. *Journal of hydraulic research*, 46(5), p.648-658. doi:10.3826/jhr.2008.3164.
- Tesema, D. et Abebe, B. (2020). A review of flood modeling methods for urban pluvial flood application. *Modeling Earth Systems and Environment*.
- Testa, G., Zuccalà, D., Alcrudo, F., Mulet, J. et Soares-Frazão, S. (2007). Flash flood flow experiment in a simplified urban district. *Journal of hydraulic research*, 45 (sup1), p.37-44. doi:10.1080/00221686.2007.9521831.
- Tomiczek, T., Prasetyo, A., Mori, N., Yasuda, T. et Kennedy, A. (2016). Physical modelling of tsunami onshore propagation, peak pressures, and shielding effects in an urban building array. *Coastal engineering (Amsterdam)*, 117, p.97-112. doi:10.1016/j.coastaleng.2016.07.003.
- Velickovic, M., Zech, Y. et Soares-Frazão, S. (2017). Steady-flow experiments in urban areas and anisotropic porosity model. *Journal of Hydraulic Research*, 55(1), p.85-100. doi:10.1080/00221686.2016.1238013.
- Zhou, Q., Leng, G. et Huang, M. (2018). Impacts of future climate change on urban flood volumes in Hohhot in northern China : benefits of climate change mitigation and adaptations. *Hydrology and earth system sciences*, 22(1), p.305-316. doi:10.5194/hess-22-305-2018.

Annexes

1 Nouvelles configurations urbaines

1.1 Configurations imaginées

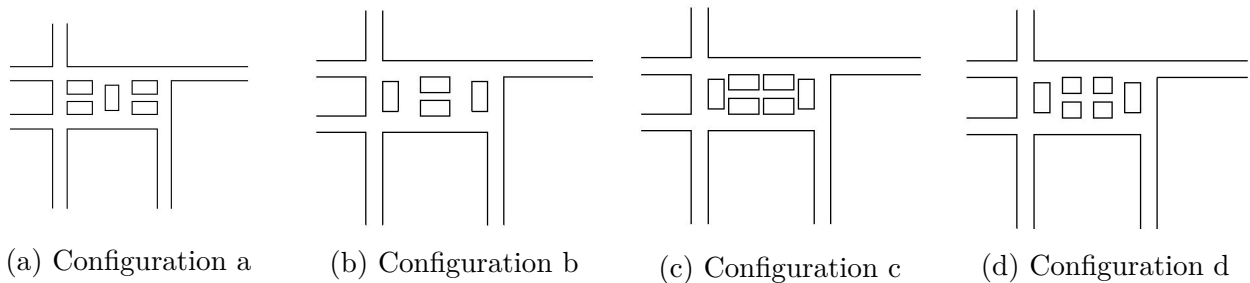


FIGURE 6.1 – Série 1.

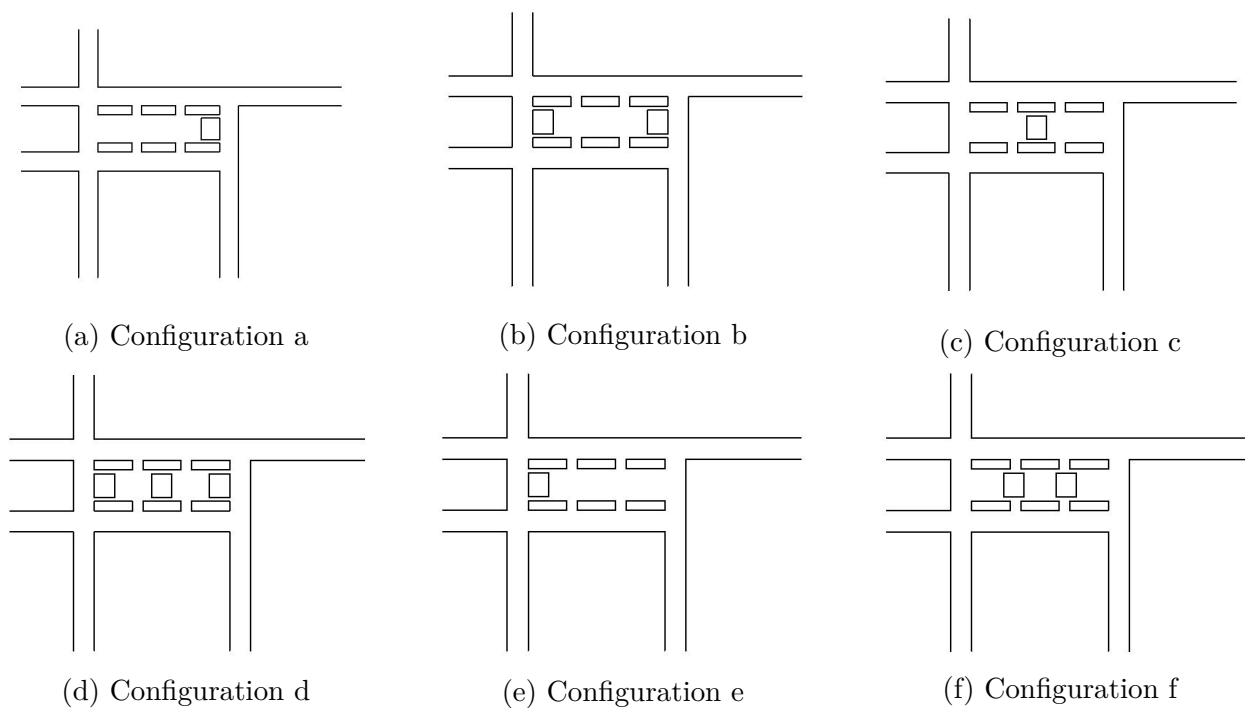


FIGURE 6.2 – Série 2.

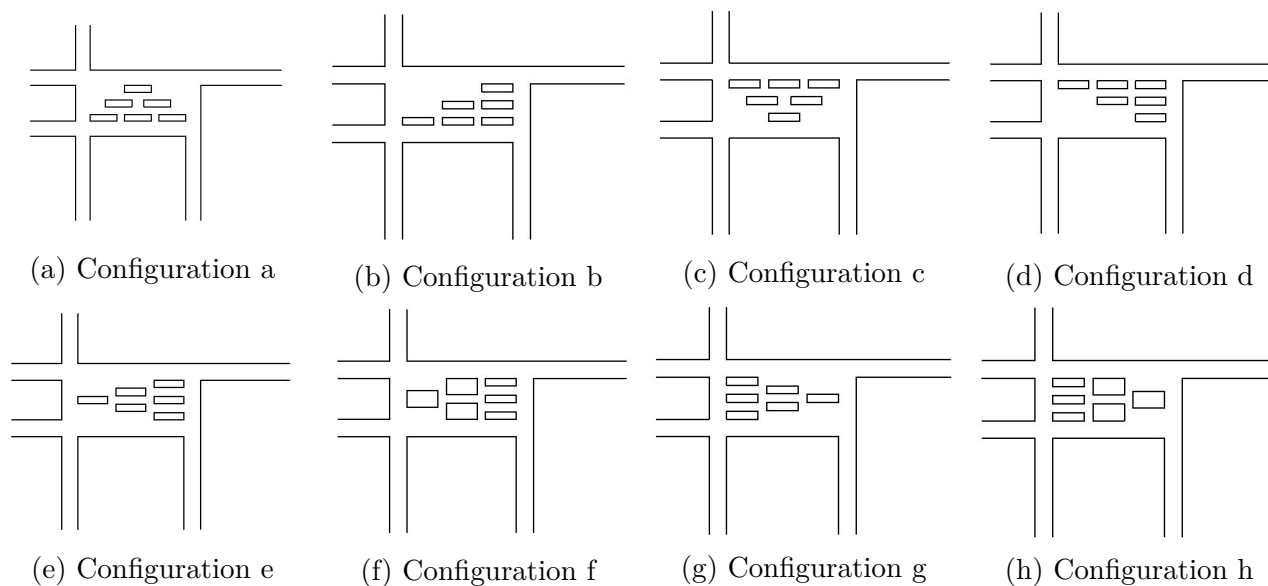


FIGURE 6.3 – Série 3.

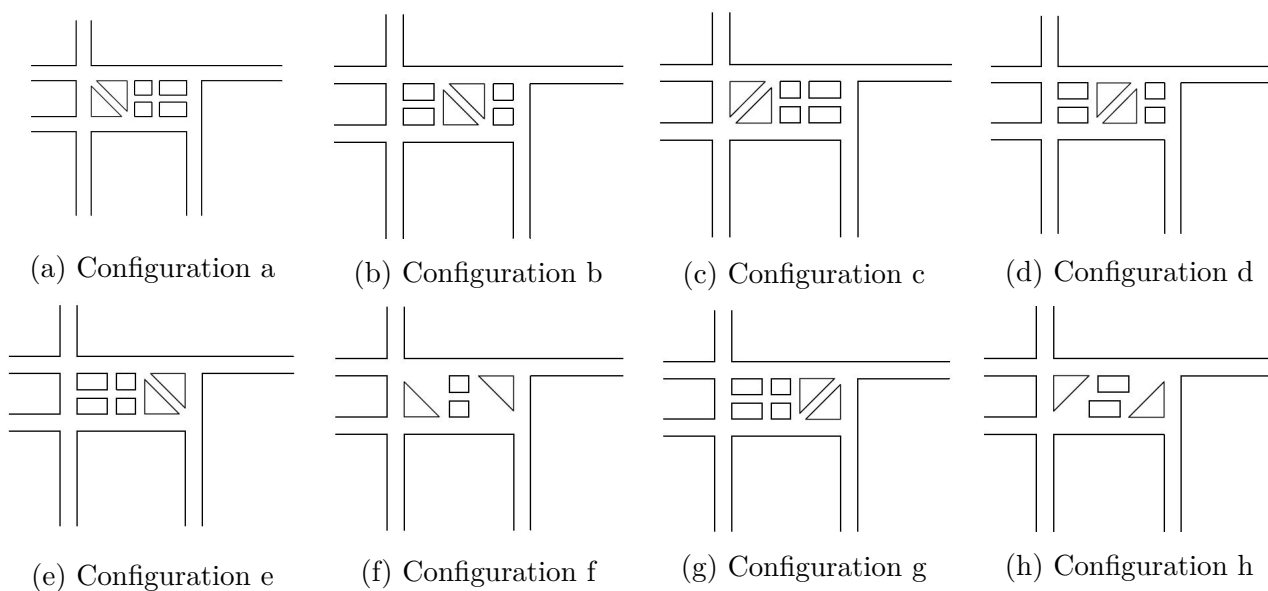


FIGURE 6.4 – Série 4.

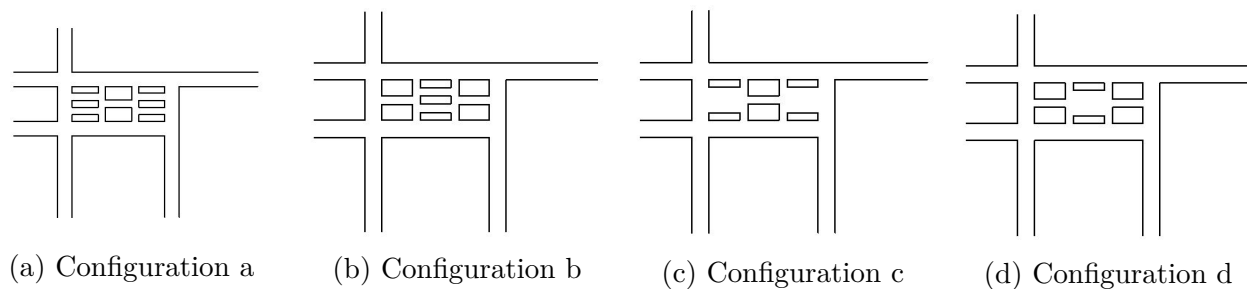


FIGURE 6.5 – Série 5.

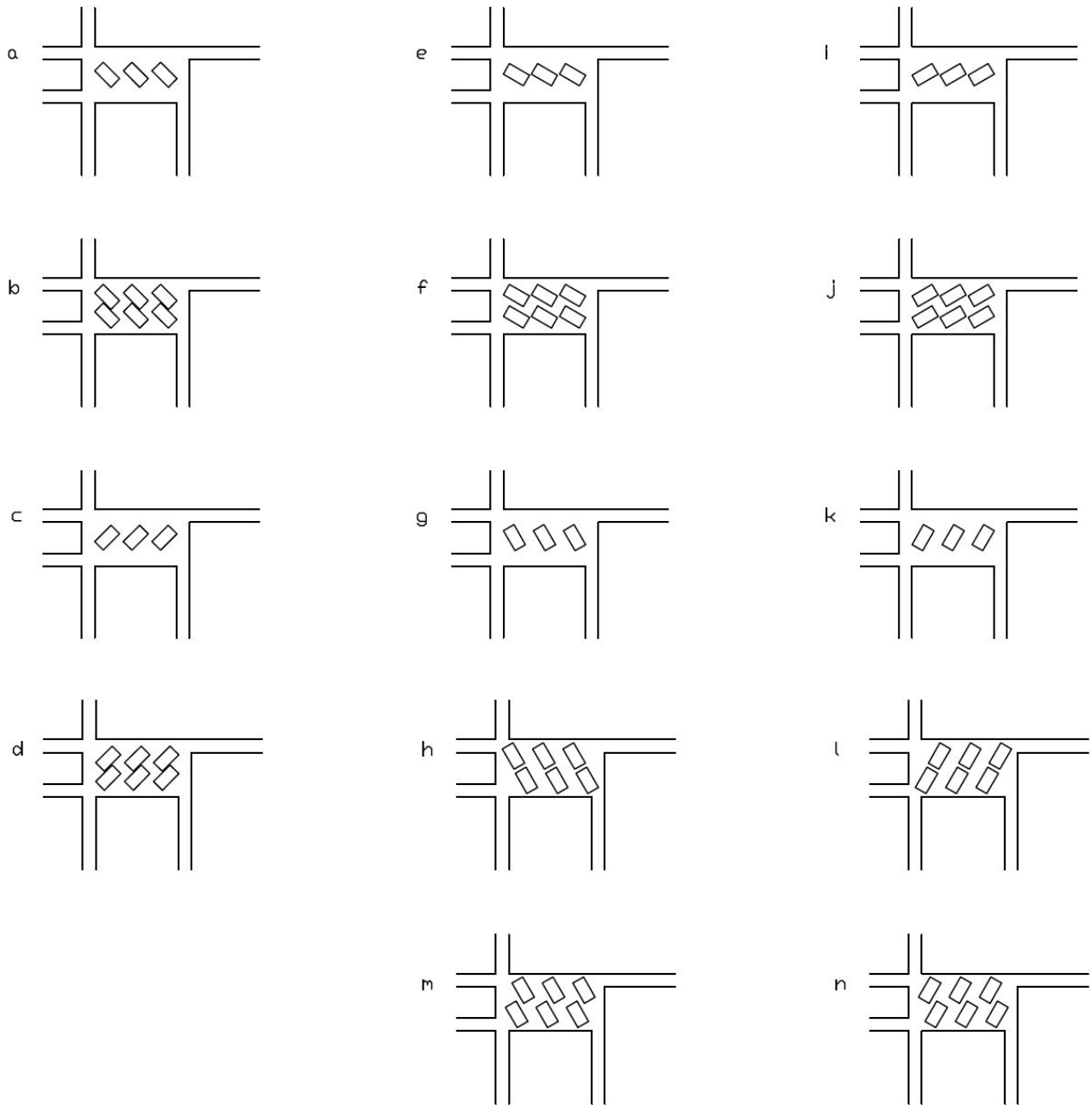


FIGURE 6.6 – Configurations de la série 6 avec les blocs épais.

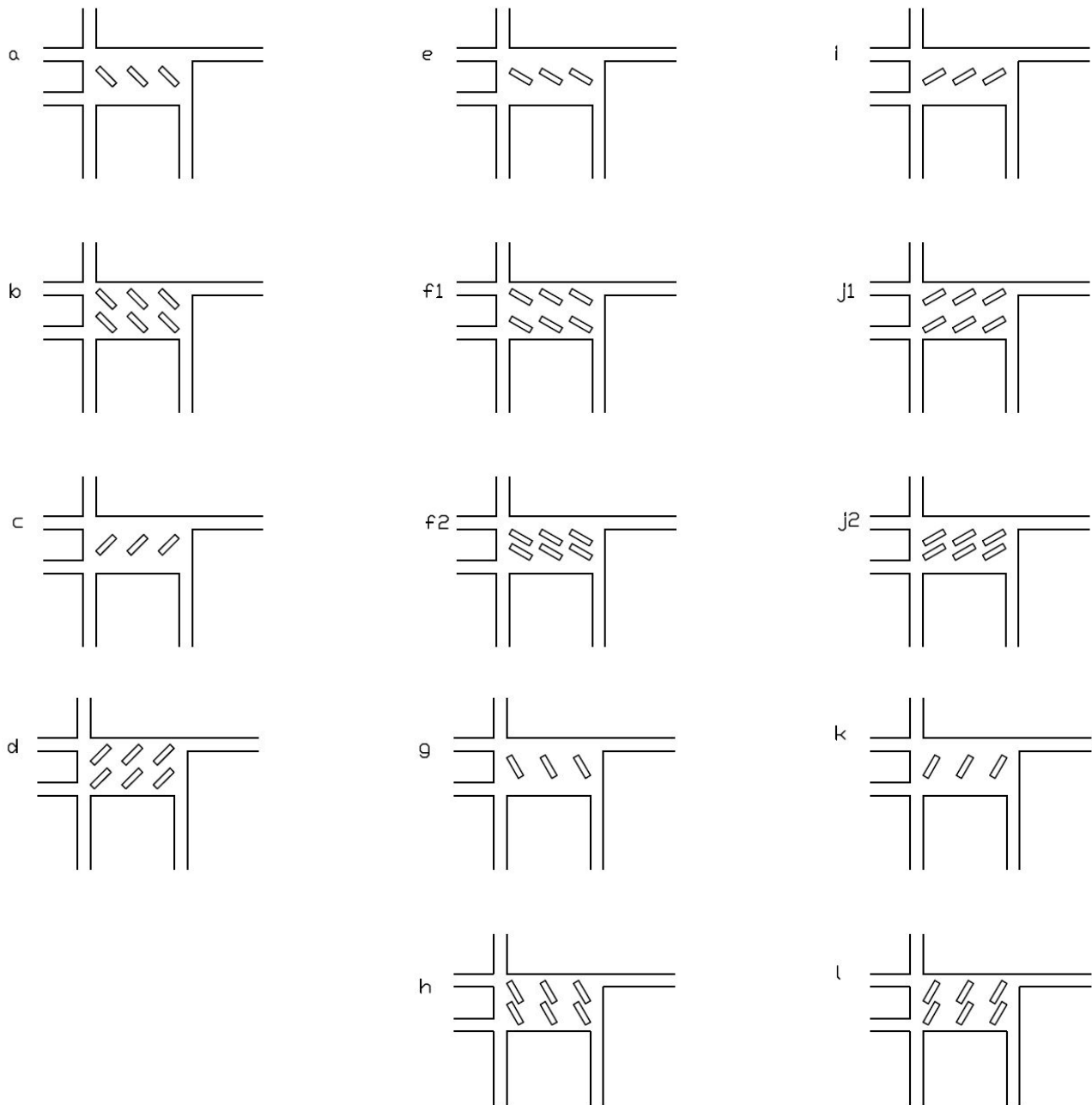


FIGURE 6.7 – Configurations de la série 6 avec les blocs fins.

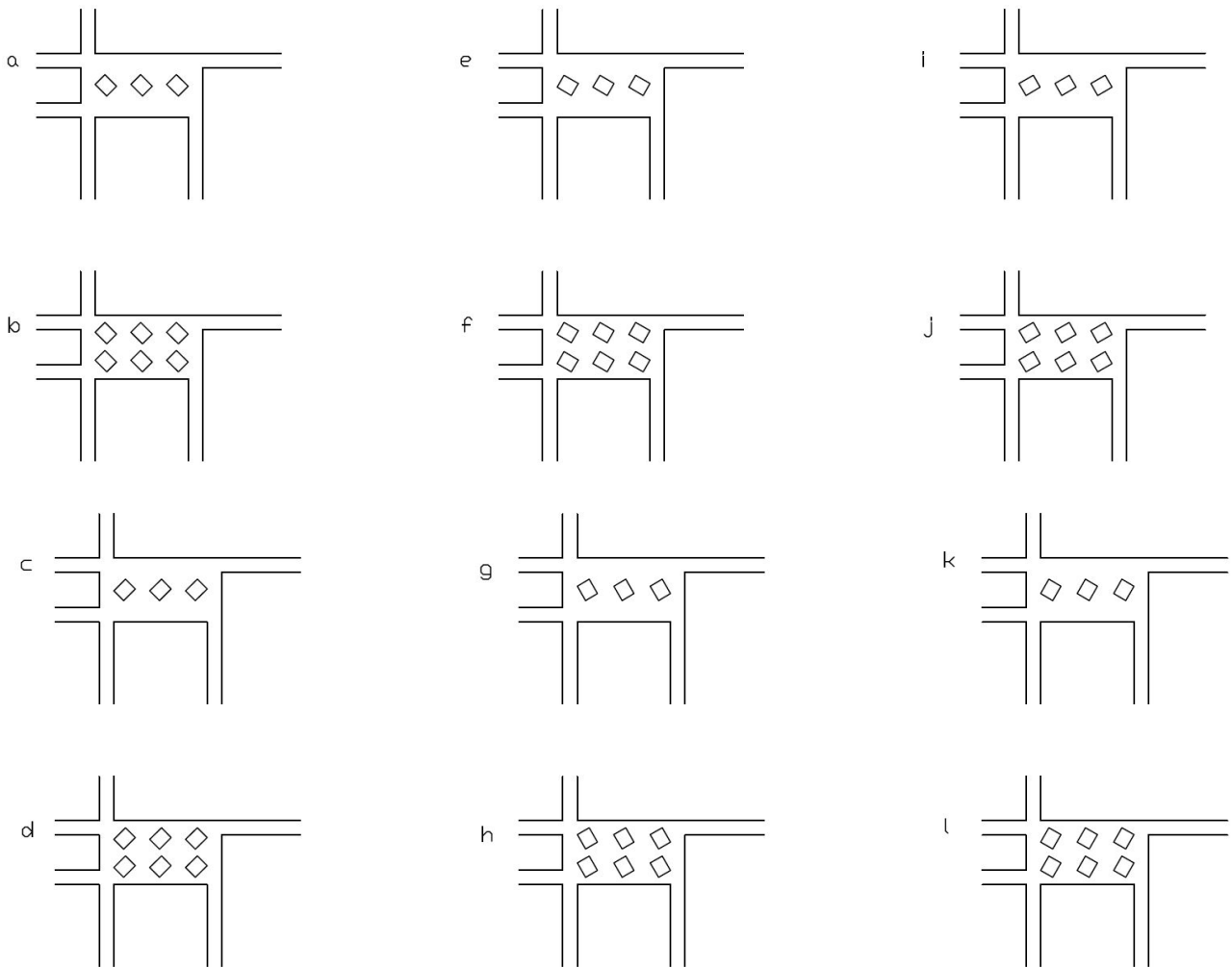


FIGURE 6.8 – Configurations de la série 6 avec les blocs carrés.

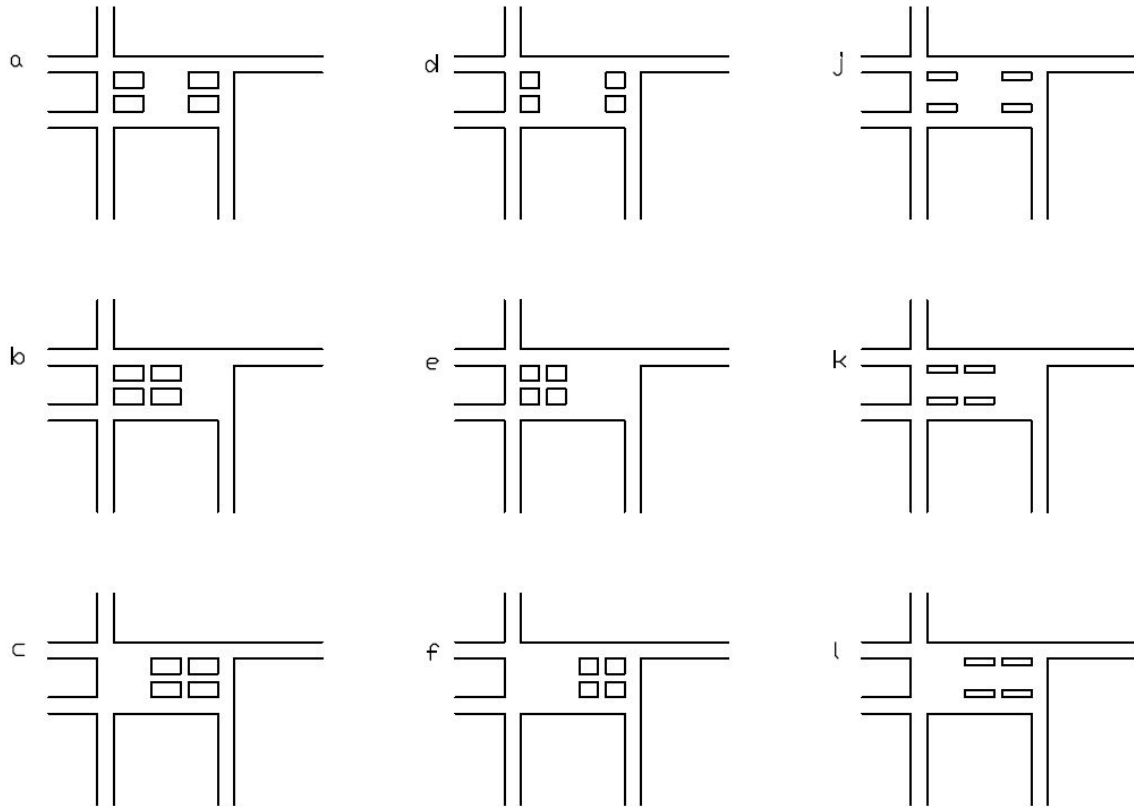


FIGURE 6.9 – Configurations de la série 7.

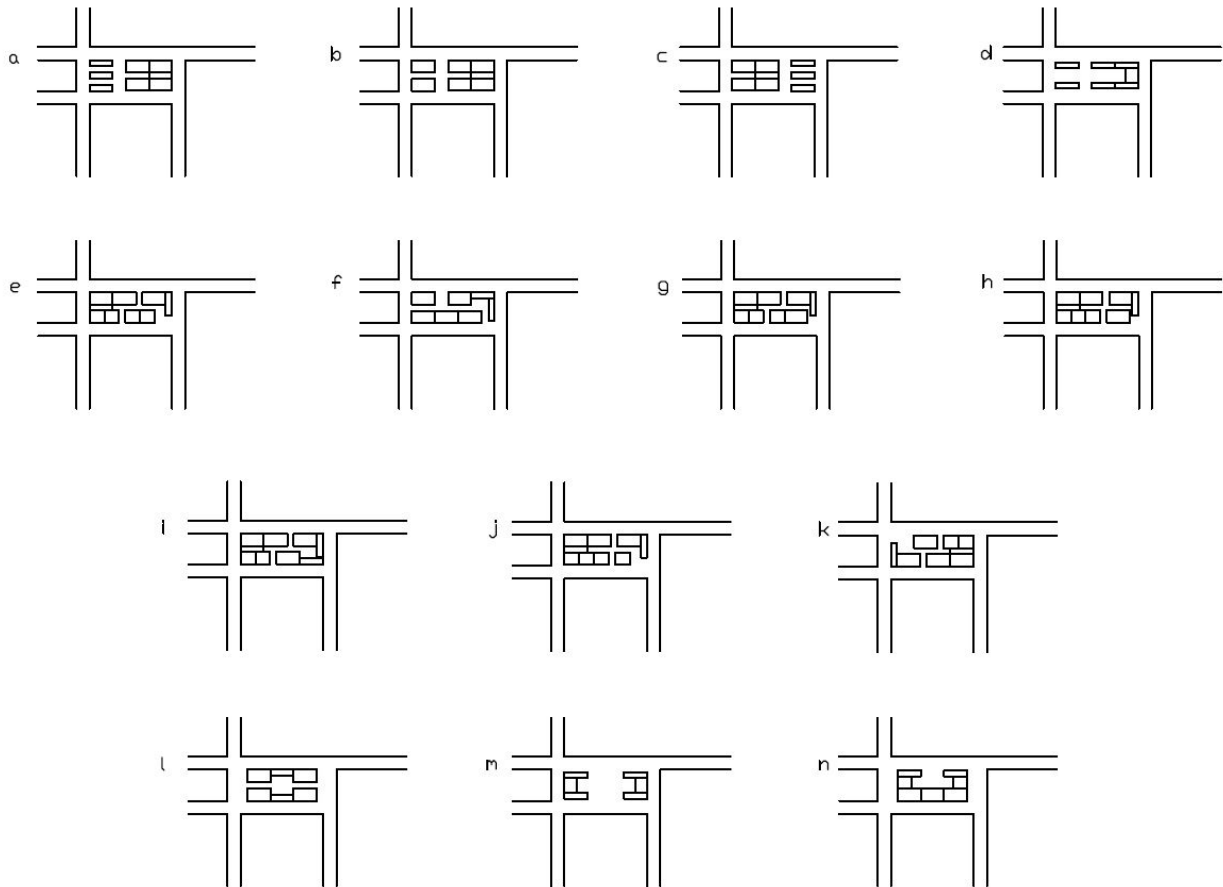


FIGURE 6.10 – Configurations de la série 8.

2 Déroulement des simulations numériques

Les simulations numériques des nouvelles configurations présentées à la section 1.3 du chapitre 2 sont réalisées en trois étapes. La réalisation en trois étapes des simulations est nécessaire pour assurer la convergence et la stabilité des résultats.

La première étape consiste à réaliser une simulation de 100 secondes d'écoulement sans turbulence et avec une reconstruction constante. Trois conditions initiales sont nécessaires à cette étape puisque les équations présentent trois inconnues. Ces dernières sont la hauteur d'eau et les débits spécifiques dans les deux directions principales, sur l'ensemble du domaine. Les débits spécifiques sont fixés à zéro tandis que la hauteur d'eau initiale vaut 0,5 m à l'échelle du prototype, comme la condition limite mentionnée précédemment (*confer* section 5.2 du chapitre 2). Une fois la première étape terminée, les résultats de la dernière itération sont enregistrés comme condition initiale.

La seconde étape est la simulation de 100 secondes d'écoulement avec une reconstruction constante mais cette fois-ci avec turbulence. Le modèle de turbulence employé est le modèle $k-\epsilon$ (Erpicum et al., 2009). Lors de cette simulation, nous indiquons au logiciel de lire les valeurs initiales dans le fichier reprenant les résultats enregistrés à la première étape. Les conditions initiales ont dès lors été modifiées par rapport à la première étape. Avec l'activation de la turbulence, le problème comporte à présent cinq inconnues. En effet, les variables k et ϵ ont été ajoutées ainsi que leurs valeurs initiales. Notons que les résultats de la dernière itération sont également enregistrés afin d'être utilisés comme condition initiale de la troisième étape.

La troisième et dernière étape consiste alors à employer une reconstruction linéaire, tout en conservant la turbulence. Cette dernière étape est réalisée sur 200 secondes d'écoulement. En cas de fluctuations des résultats, il peut s'avérer utile de relancer une simulation de 200 secondes avec turbulence et reconstruction linéaire (avec les résultats précédents comme condition initiale). De cette manière, il sera possible de déterminer si les résultats n'étaient pas encore stabilisés ou s'ils présentent des fluctuations périodiques. La présence de fluctuations périodiques, d'oscillations peut être la conséquence du schéma numérique d'intégration temporelle mais cet aspect est examiné dans la suite.

Notons également qu'une quatrième étape est réalisée afin de créer une vidéo des vitesses d'écoulement obtenues. Cette quatrième étape consiste toujours à utiliser une reconstruction linéaire avec turbulence. Cependant, l'enregistrement des résultats ne se fait pas toutes les secondes mais tous les dixièmes de seconde, durant dix secondes. De cette manière, nous obtenons une vidéo des vitesses d'écoulement avec une fréquence de dix Hz. Ces vidéos nous permettront de mieux détecter, décrire et analyser les oscillations.

3 Configurations simples

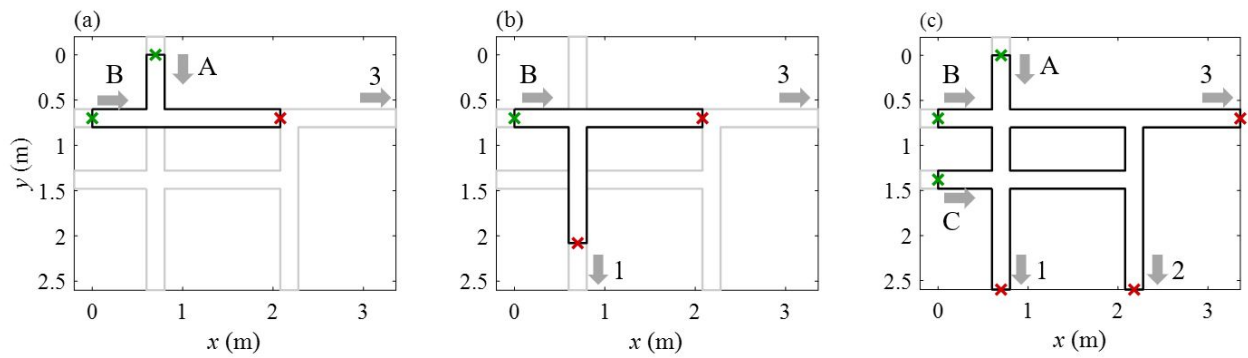


FIGURE 6.11 – Configurations simples étudiées par Li et al. (2021b).

4 Résultats numériques

4.1 Oscillations des hauteurs d'eau en entrée

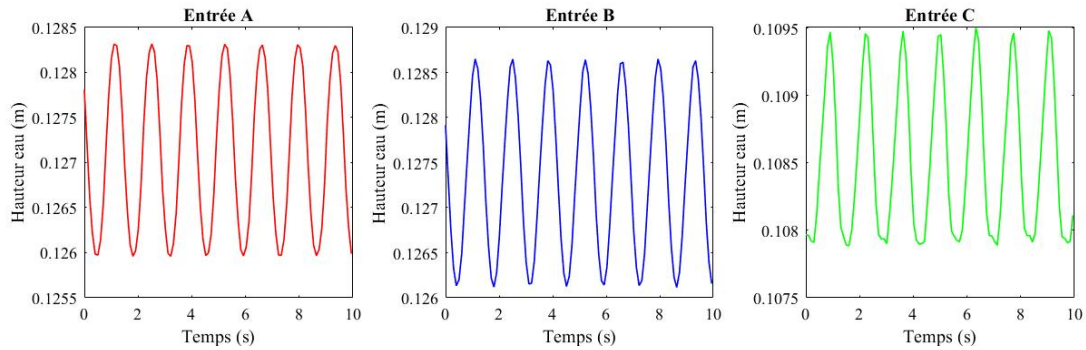


FIGURE 6.12 – Hauteurs d'eau moyennées sur la largeur de l'entrée en fonction du temps (écoulement *modéré* - configuration \mathcal{H}).

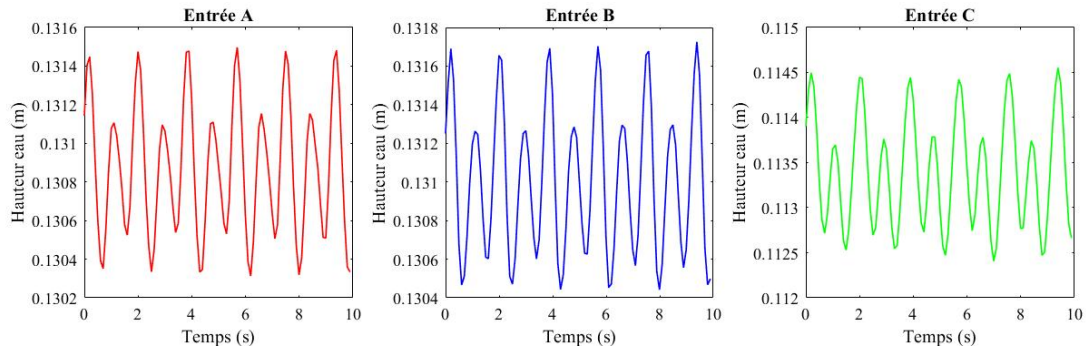


FIGURE 6.13 – Hauteurs d'eau moyennées sur la largeur de l'entrée en fonction du temps (écoulement *modéré* - configuration \mathcal{I}).

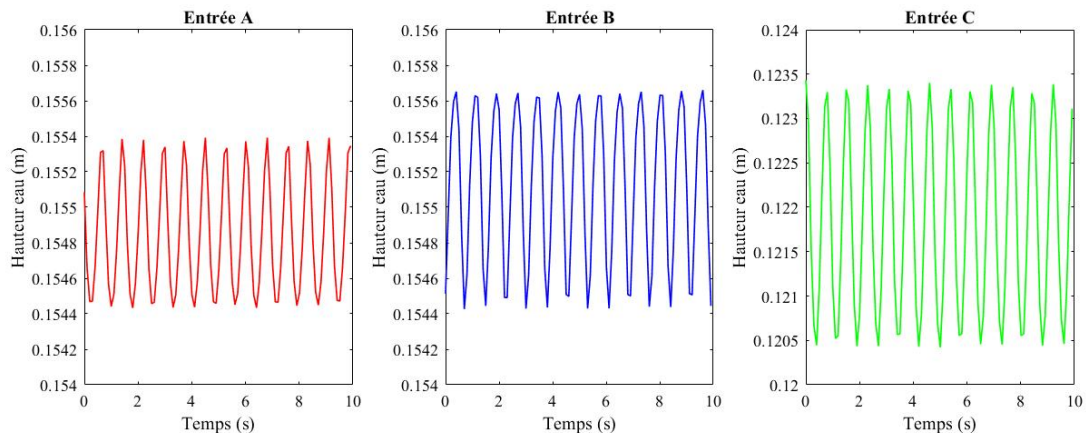


FIGURE 6.14 – Hauteurs d'eau moyennées sur la largeur de l'entrée en fonction du temps (écoulement *rapide* - configuration \mathcal{J}).

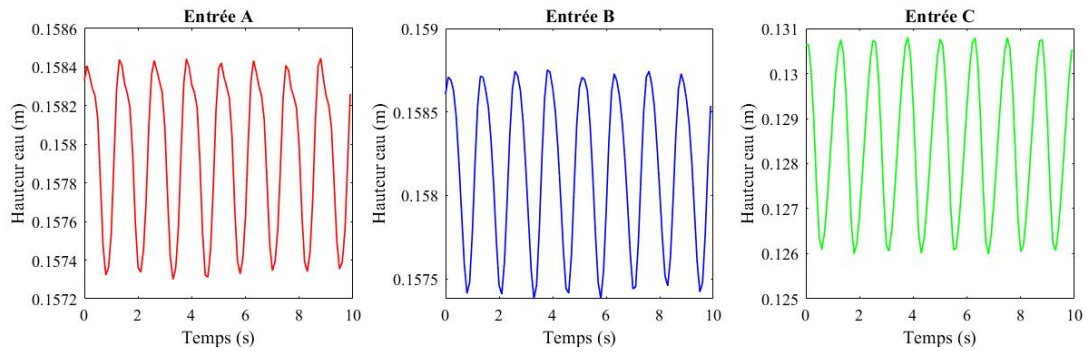


FIGURE 6.15 – Hauteurs d'eau moyennées sur la largeur de l'entrée en fonction du temps (écoulement *rapide* - configuration \mathcal{H}).

4.2 Oscillations des débits sortants

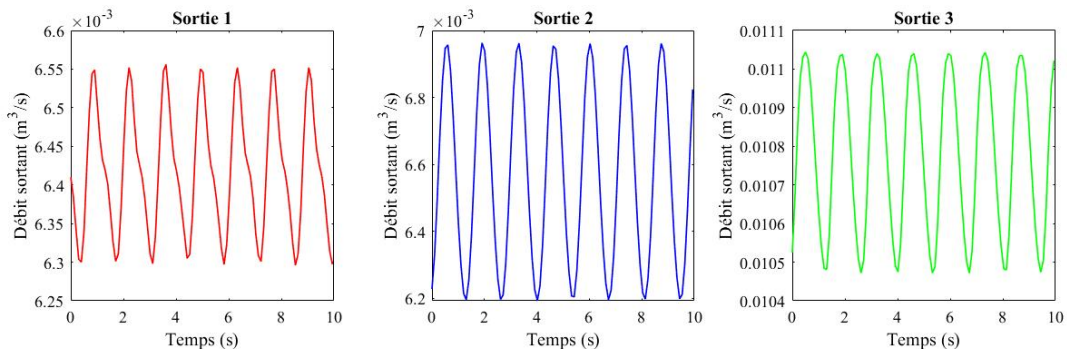


FIGURE 6.16 – Débits sortants moyennés sur la largeur de la sortie en fonction du temps (écoulement *modéré* - configuration \mathcal{H}).

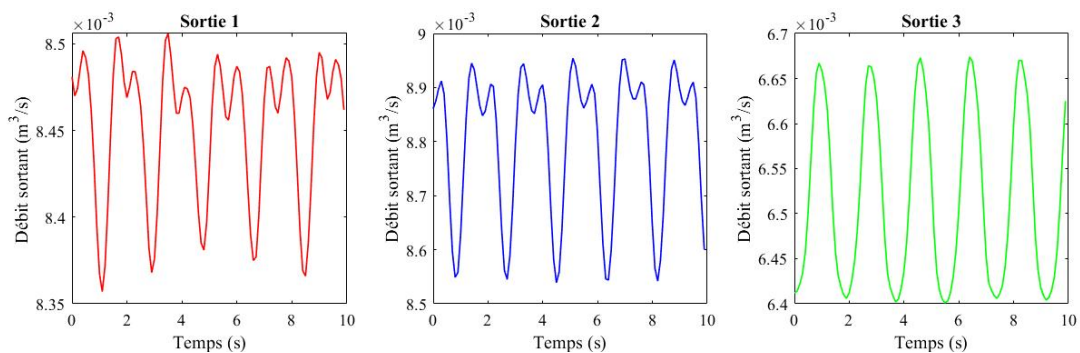


FIGURE 6.17 – Débits sortants moyennés sur la largeur de la sortie en fonction du temps (écoulement *modéré* - configuration \mathcal{H} - RK22).

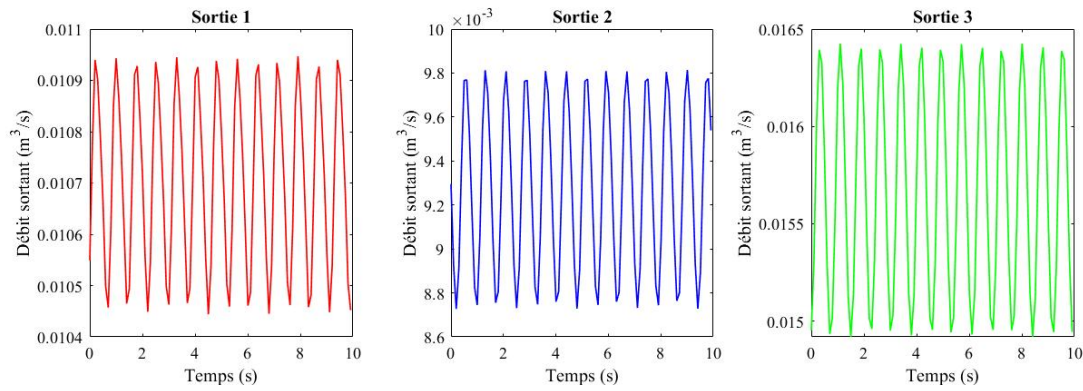


FIGURE 6.18 – Débits sortants moyennés sur la largeur de la sortie en fonction du temps (écoulement *rapide* - configuration γg).

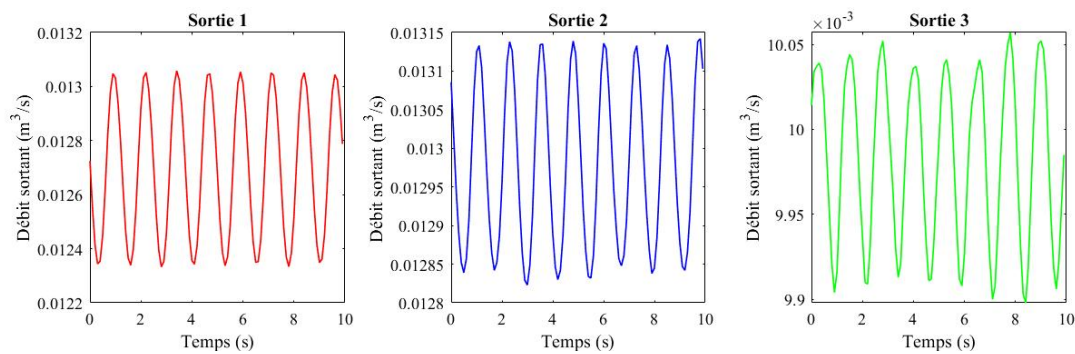


FIGURE 6.19 – Débits sortants moyennés sur la largeur de la sortie en fonction du temps (écoulement *rapide* - configuration γi).

4.3 Sources des différences

4.3.1 Cartes des hauteurs d'eau locales et des valeurs locales du nombre de Froude

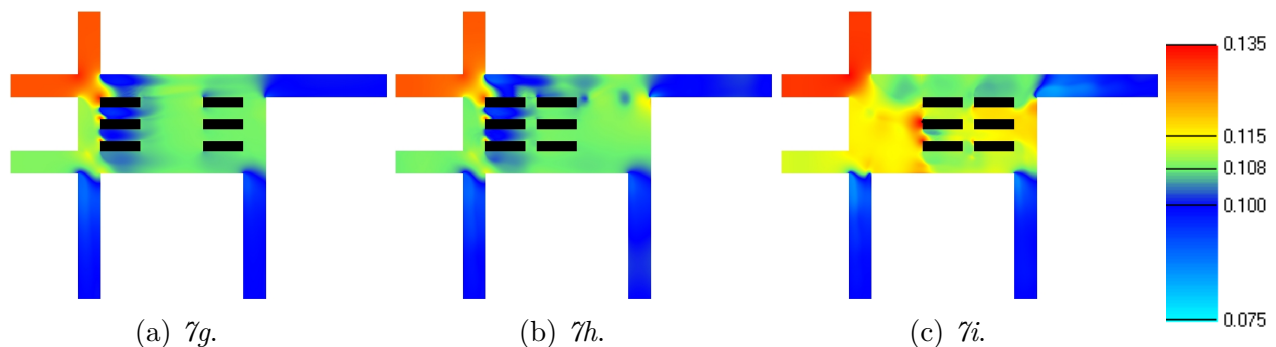


FIGURE 6.20 – Hauteurs d'eau au dernier pas de temps de la simulation (scénario *modéré*) [m].

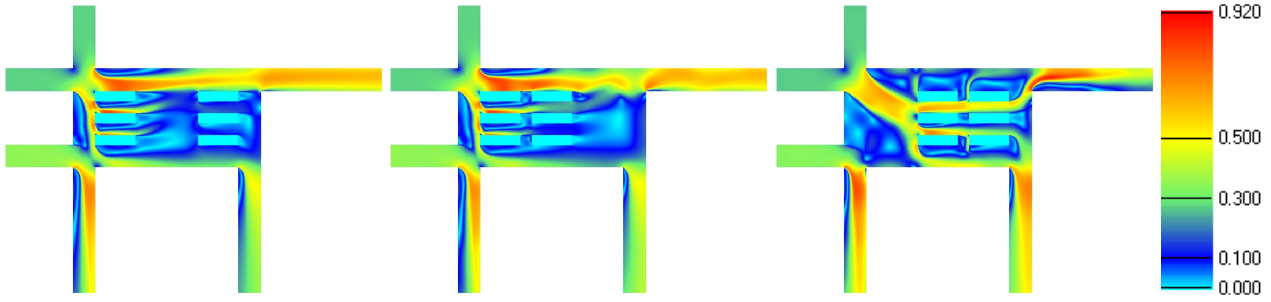


FIGURE 6.21 – Valeurs locales du nombre de Froude au dernier pas de temps de la simulation (scénario *modéré*) [-].

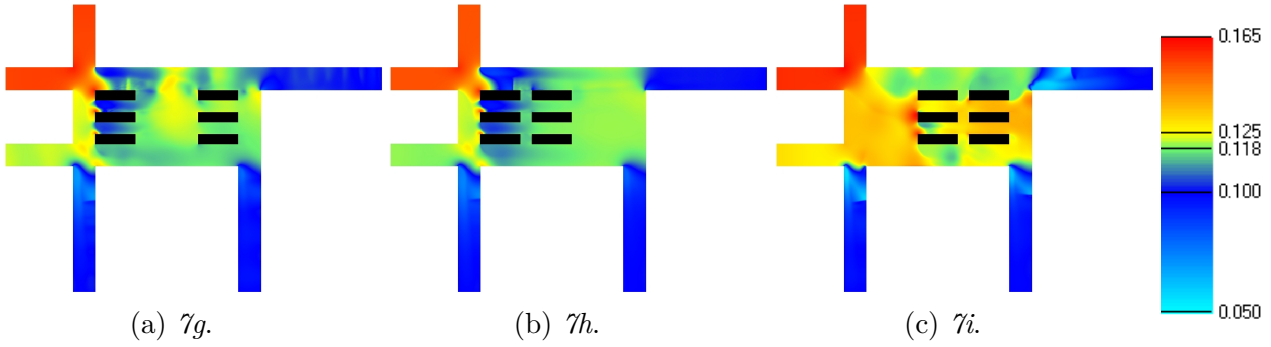


FIGURE 6.22 – Hauteurs d'eau au dernier pas de temps de la simulation (scénario *rapide*) [m].

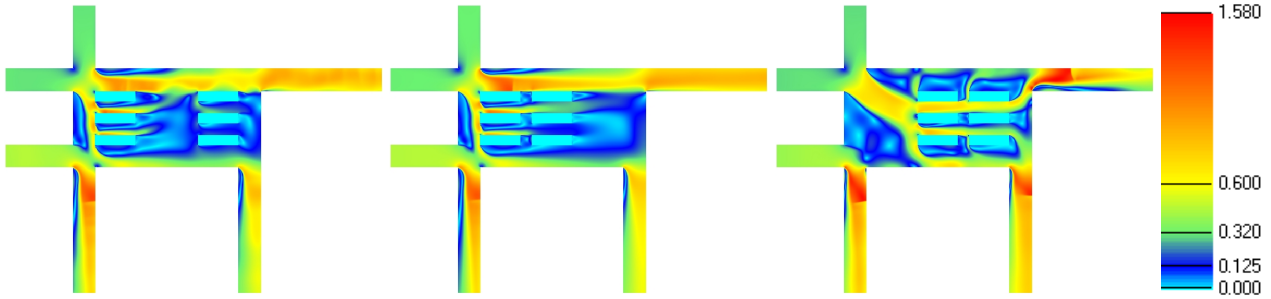


FIGURE 6.23 – Valeurs locales du nombre de Froude au dernier pas de temps de la simulation (scénario *rapide*) [-].

4.3.2 Equations du bilan de puissance

Les équations 6.1 et 6.2 (Li et al., 2020) permettent de calculer numériquement la puissance totale en entrée et la puissance totale en sortie respectivement. Dans ces deux équations, N_{in} et N_{out} représentent le nombre de mailles sur la largeur de l'entrée/la sortie considérée. Or, comme mentionné précédemment, la taille de maille employée est de 5mm. Par conséquent, vingt mailles sont présentes sur la largeur des entrées et sorties.

$$P_{in} = \rho \sum_{In \ 1,2,3} \left(\sum_{n=1}^{N_{in}} \left(\frac{1}{2} \|\mathbf{v}\|^3 h + gh^2 \|\mathbf{v}\| \right)_n \right) \Delta x \quad (6.1)$$

$$P_{out} = \rho \sum_{Out \ 1,2,3} \left(\sum_{n=1}^{N_{out}} \left(\frac{1}{2} \|\mathbf{v}\|^3 h + gh^2 \|\mathbf{v}\| \right)_n \right) \Delta x \quad (6.2)$$

Enfin, l'équation 6.3 traduit la composante de dissipation due au cisaillement vertical avec N le nombre de mailles sur l'entièreté du domaine.

$$\phi_V = \rho \frac{1}{2} \sum_{n=1}^N (c_f ||\mathbf{v}||^3)_n \Delta x^2 \quad (6.3)$$

La composante de dissipation due au cisaillement horizontal ne peut pas être calculée explicitement. Cependant, les trois autres termes de l'équation de bilan sont connus. Par conséquent, la valeur de la composante de dissipation due au cisaillement horizontal peut être déduite de l'équation de bilan. Notons que les vitesses et hauteurs employées dans ces équations sont celles calculées par le modèle numérique pour chaque maille concernée.

Ces équations ont été implémentées dans une routine Matlab et les résultats obtenus sont illustrés sous forme de diagramme en bâtonnets. Les figures 3.9, 6.24 et 6.26 reprennent la proportion de puissance dissipée par rapport à la puissance totale d'entrée (P^*). L'équation 6.4 traduit mathématiquement cette grandeur introduite dans *Li et al., 2020*.

$$P^* = \frac{P_{in} - P_{out}}{P_{in}} \times 100 \quad (6.4)$$

Les figures 3.10, 6.25 et 6.27 représentent l'importance relative des deux termes de dissipation de puissance.

4.3.3 Résultats du bilan de puissance

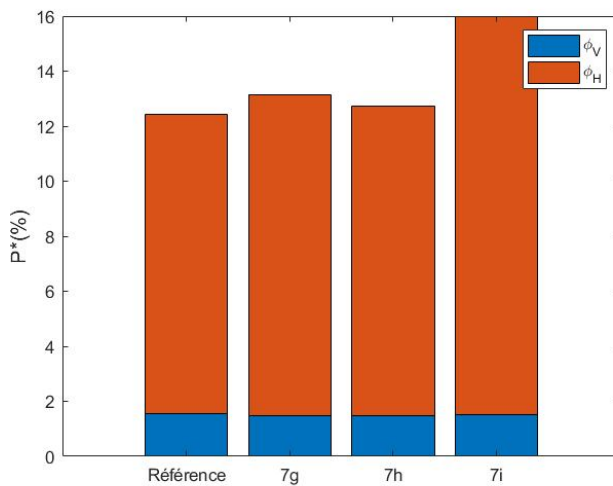


FIGURE 6.24 – Proportion de puissance dissipée (écoulement *modéré*).

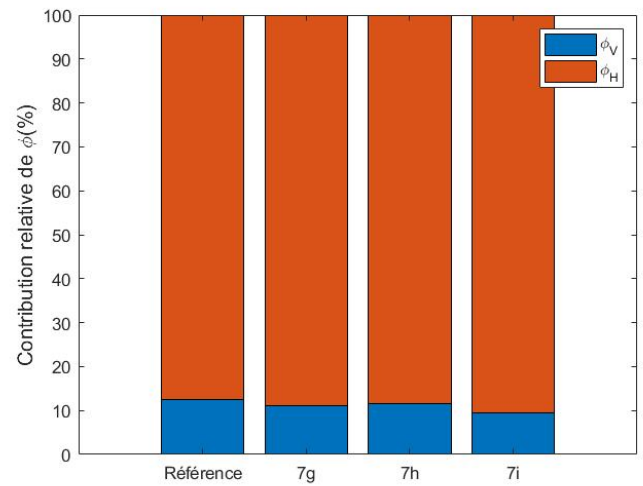


FIGURE 6.25 – Contributions relatives de la dissipation de puissance (écoulement *modéré*).

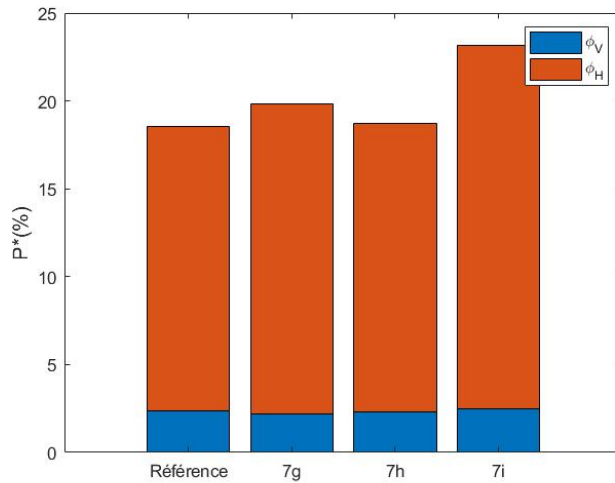


FIGURE 6.26 – Proportion de puissance dissipée (écoulement *rapide*).

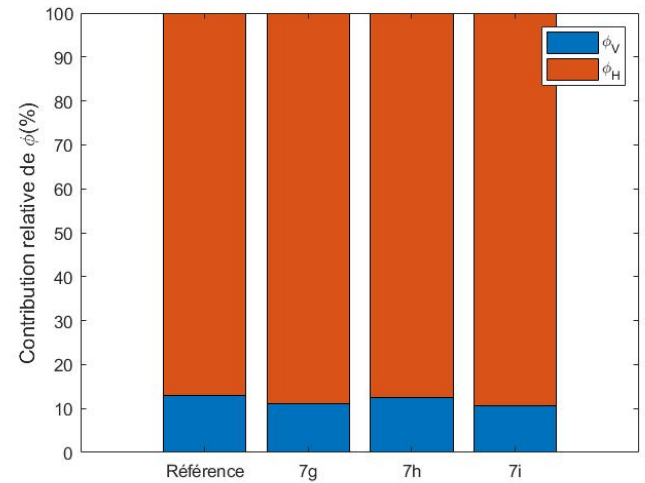


FIGURE 6.27 – Contributions relatives de la dissipation de puissance (écoulement *rapide*).

4.4 Vitesses d'écoulement

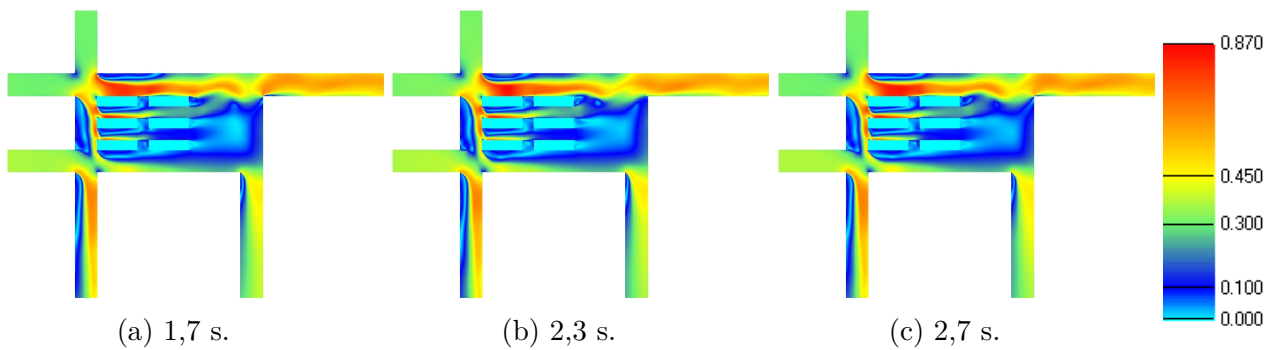


FIGURE 6.28 – Détachement tourbillonnaire en aval de la première ligne de blocs (configuration 7h - scénario *modéré*) [m/s].

5 Comparaisons des résultats numériques et des résultats expérimentaux

5.1 Hauteurs d'eau en entrée

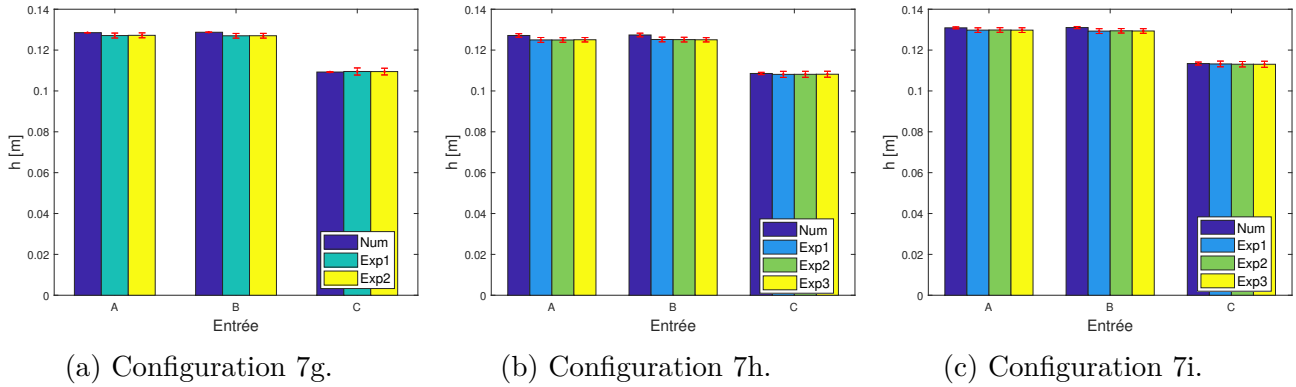


FIGURE 6.29 – Comparaisons des hauteurs d'eau moyennes numériques et expérimentales aux entrées (écoulement *modéré*) [m].

5.2 Répartition de débit

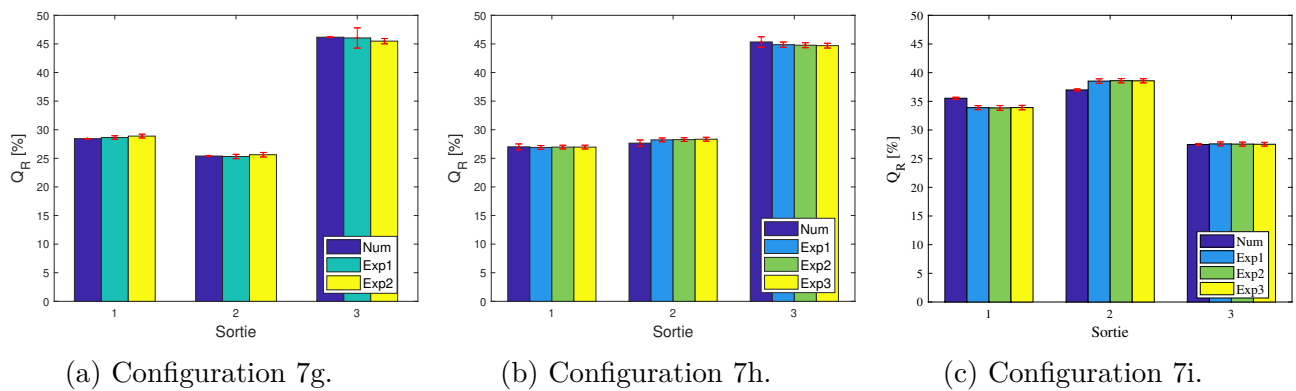
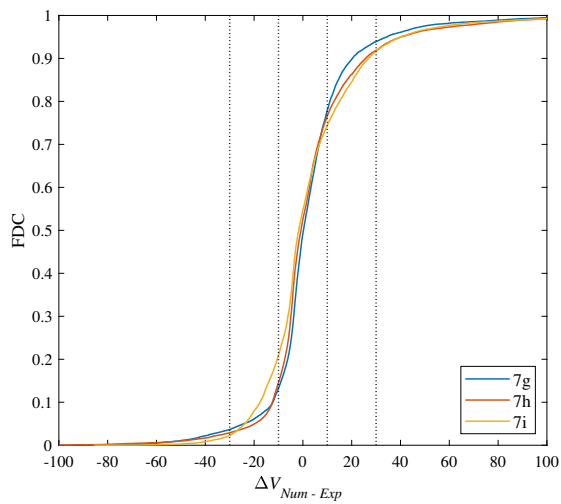


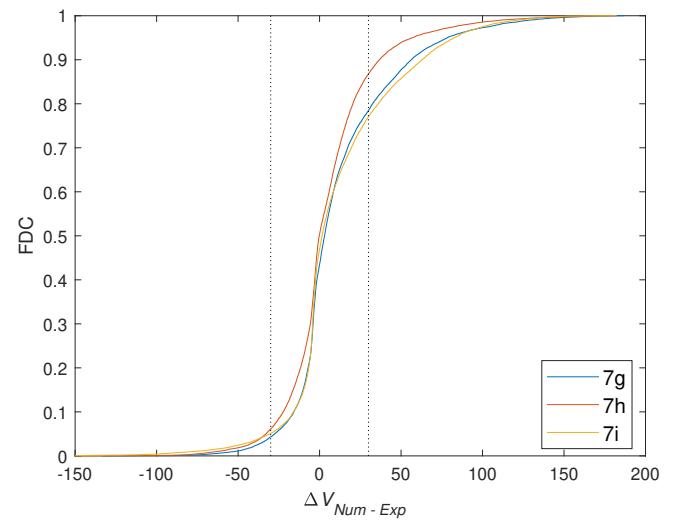
FIGURE 6.30 – Comparaisons des répartitions de débit numériques et expérimentales (écoulement *modéré*) [%].

5.3 Comparaison des champs de vitesses

5.3.1 Fonction de distribution cumulative



(a) Scénario d'écoulement *lent*.



(b) Scénario d'écoulement *modéré*.

FIGURE 6.31 – Fonction de distribution cumulative.

6 Simulations numériques avec CL expérimentales

6.1 Hauteurs d'eau en entrée

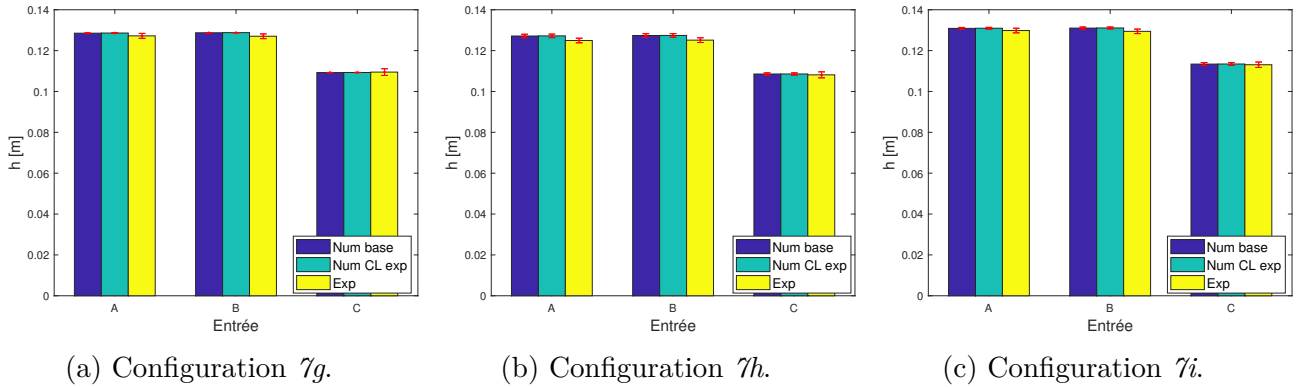


FIGURE 6.32 – Comparaisons des hauteurs d'eau moyennes aux entrées calculées numériquement avec CL de base, celles calculées numériquement avec CL expérimentales et celles déterminées avec les mesures expérimentales (écoulement *modéré*) [m].

6.2 Répartition de débit

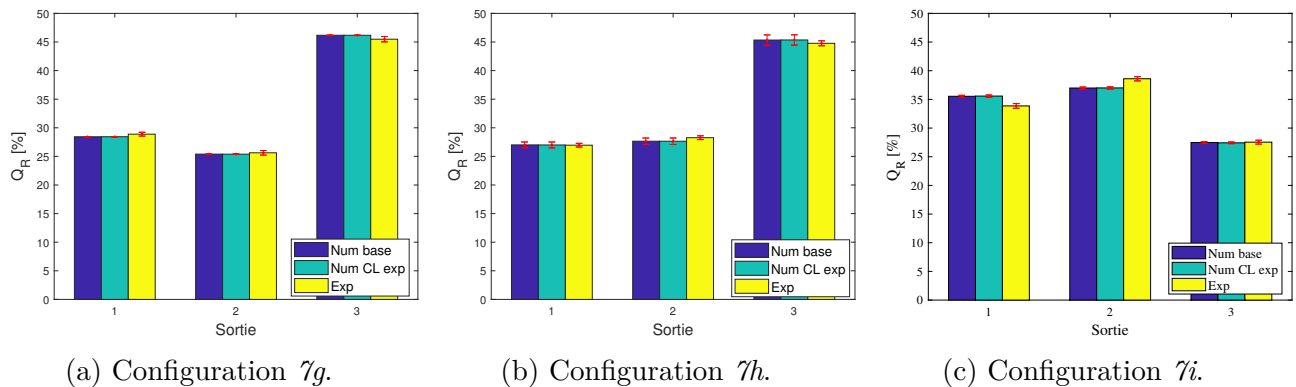
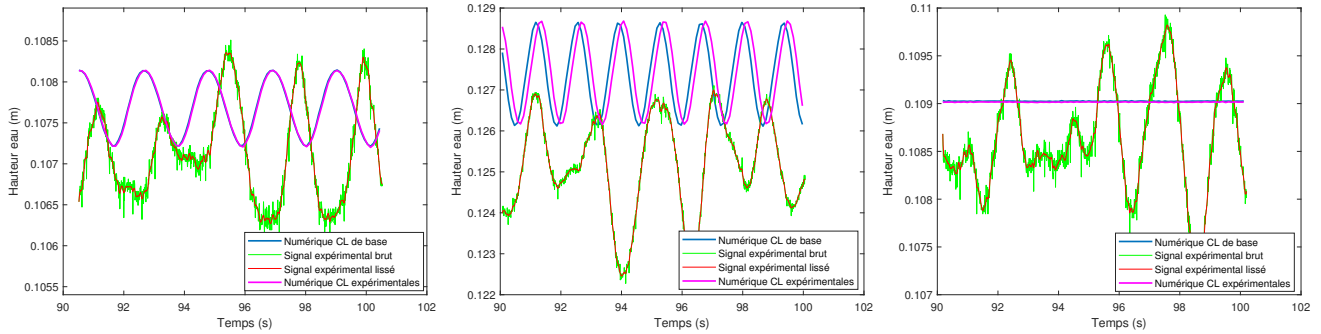


FIGURE 6.33 – Comparaisons de la répartition de débit calculée numériquement avec CL de base, celle calculée numériquement avec CL expérimentales et celle déterminée avec les mesures expérimentales (écoulement *modéré*) [%].

6.3 Variations temporelles des hauteurs d'eau

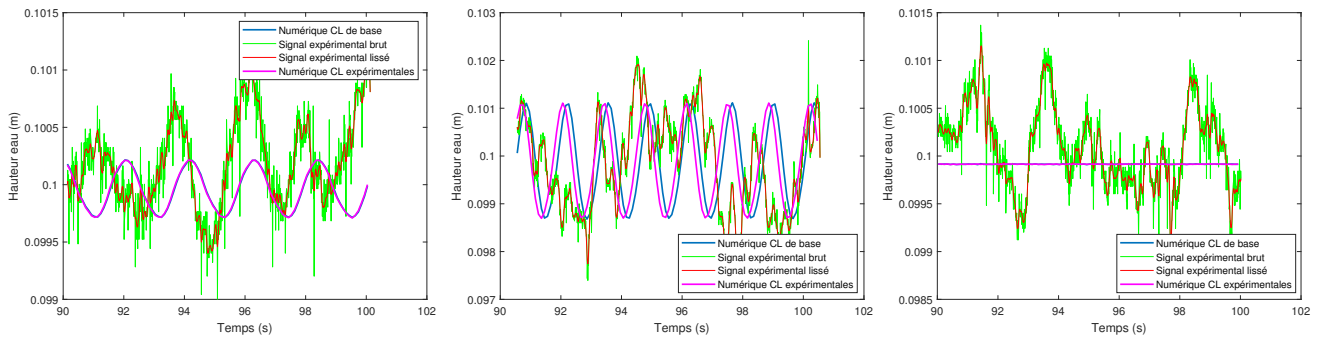


(a) Configuration 7h - écoulement *lent*.

(b) Configuration 7h - écoulement *modéré*.

(c) Configuration 7i - écoulement *lent*.

FIGURE 6.34 – Echantillons des variations temporelles des hauteurs d'eau en entrée pour la comparaison des résultats des simulations avec les CL expérimentales.



(a) Configuration 7h - écoulement *lent*.

(b) Configuration 7h - écoulement *modéré*.

(c) Configuration 7i - écoulement *lent*.

FIGURE 6.35 – Echantillons des variations temporelles des hauteurs d'eau en sortie pour la comparaison des résultats des simulations avec les CL expérimentales.

7 Discussion

7.1 Analyse LSPIV

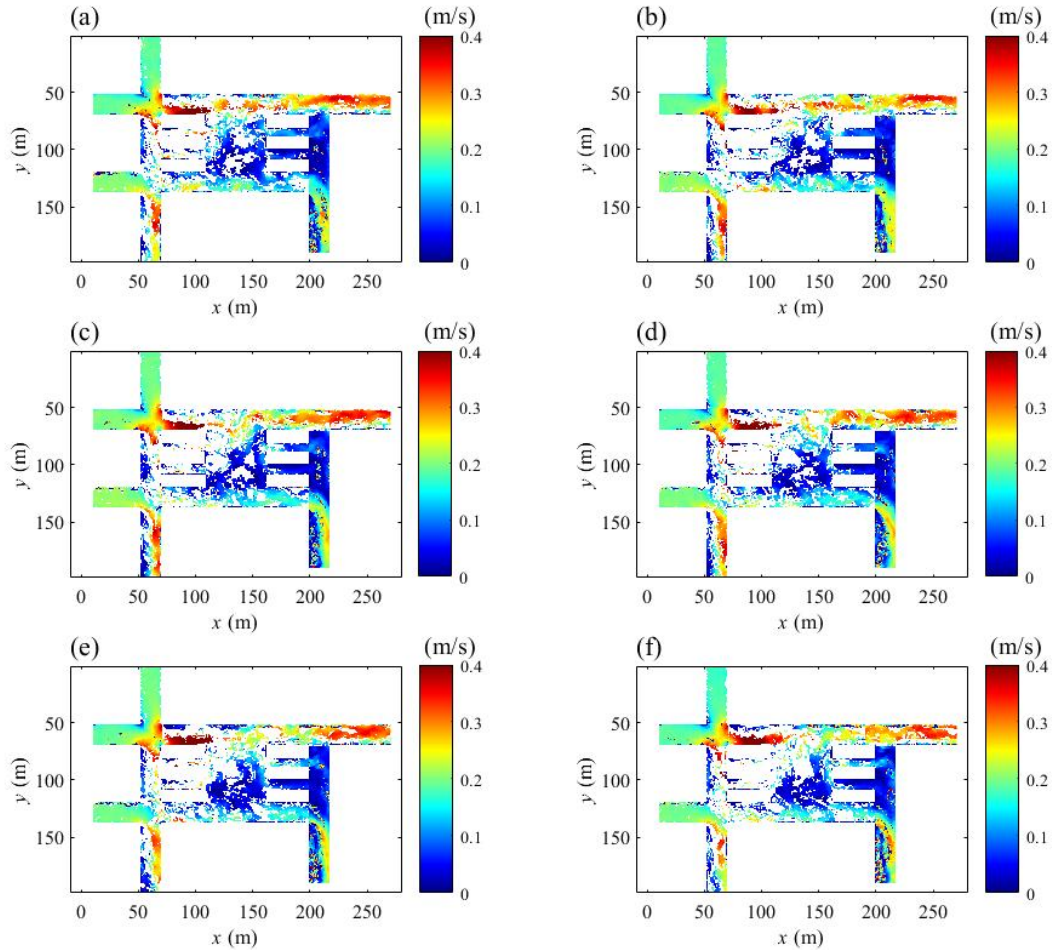


FIGURE 6.36 – Vitesses filtrées au début de six secondes consécutives (configuration 7g - écoulement *lent*).

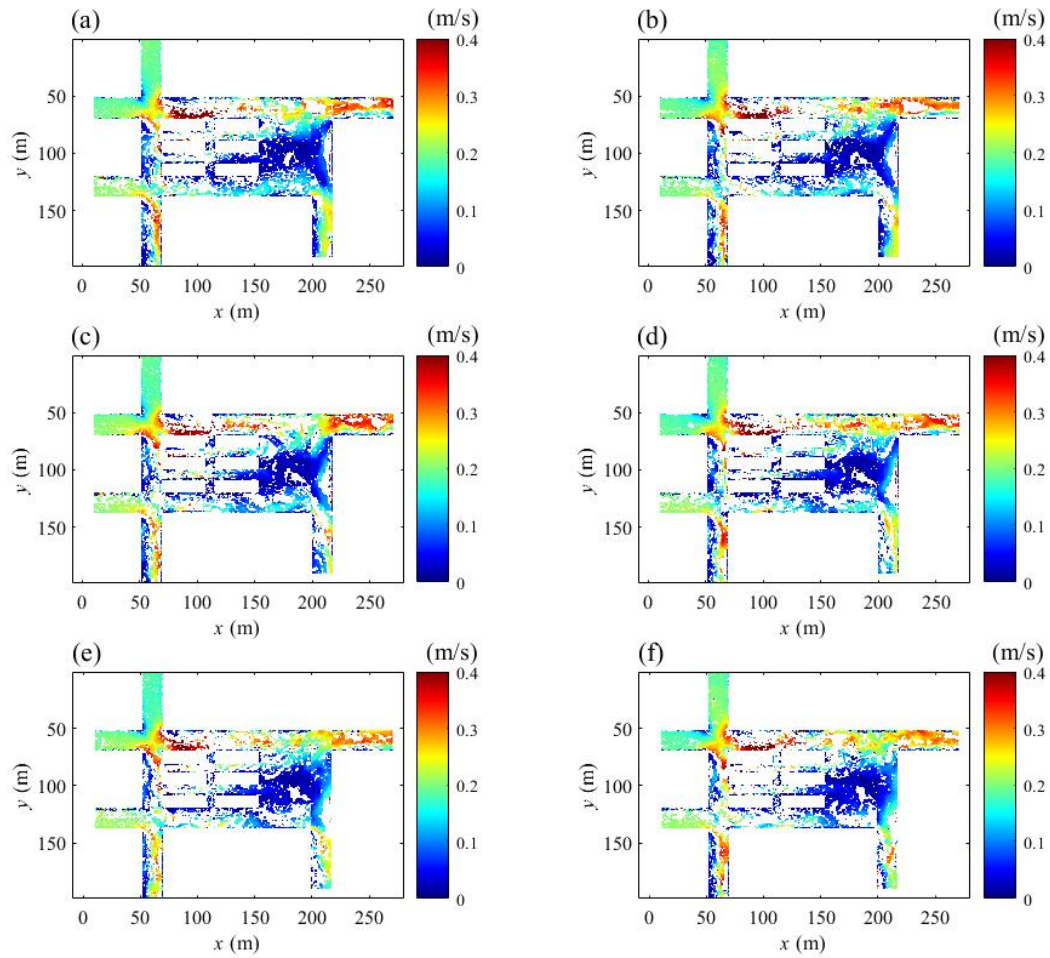


FIGURE 6.37 – Vitesses filtrées au début de six secondes consécutives (configuration 7h - écoulement *lent*).

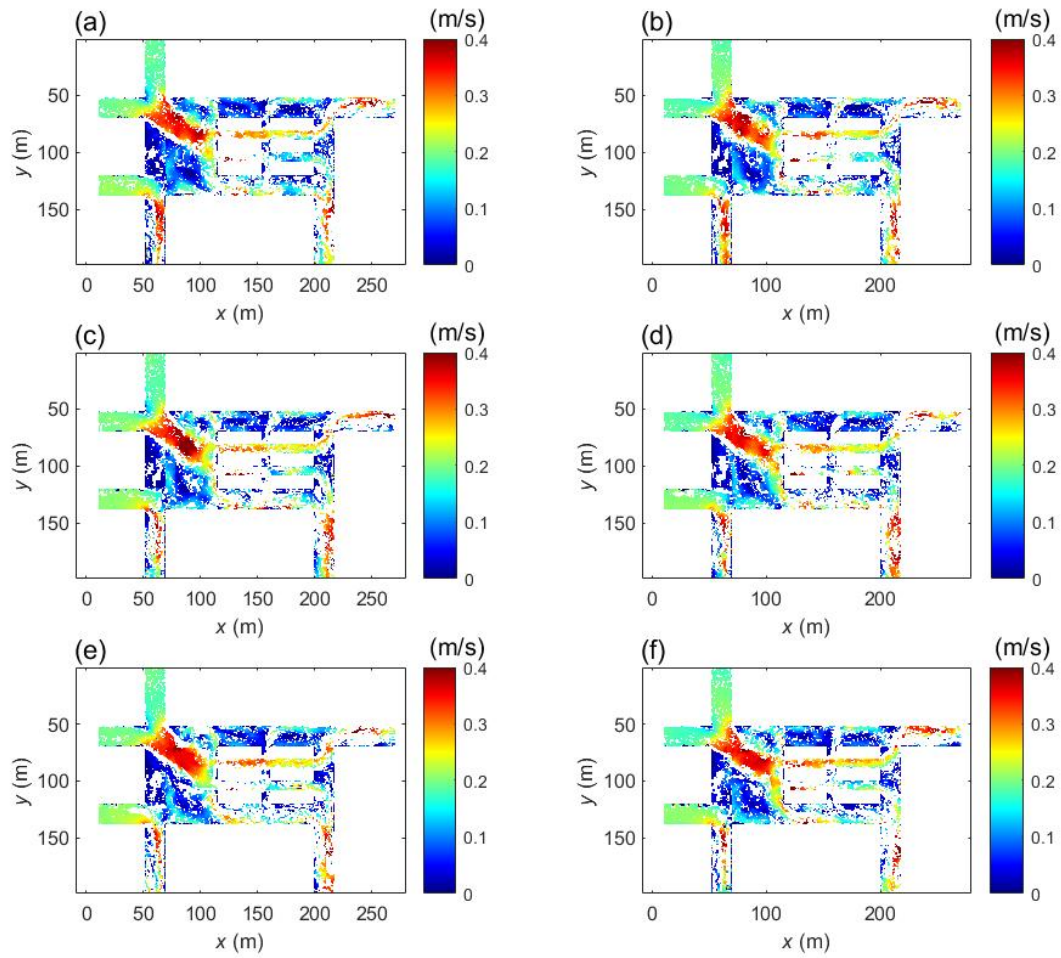


FIGURE 6.38 – Vitesses filtrées au début de six secondes consécutives (configuration 7i - écoulement *lent*).

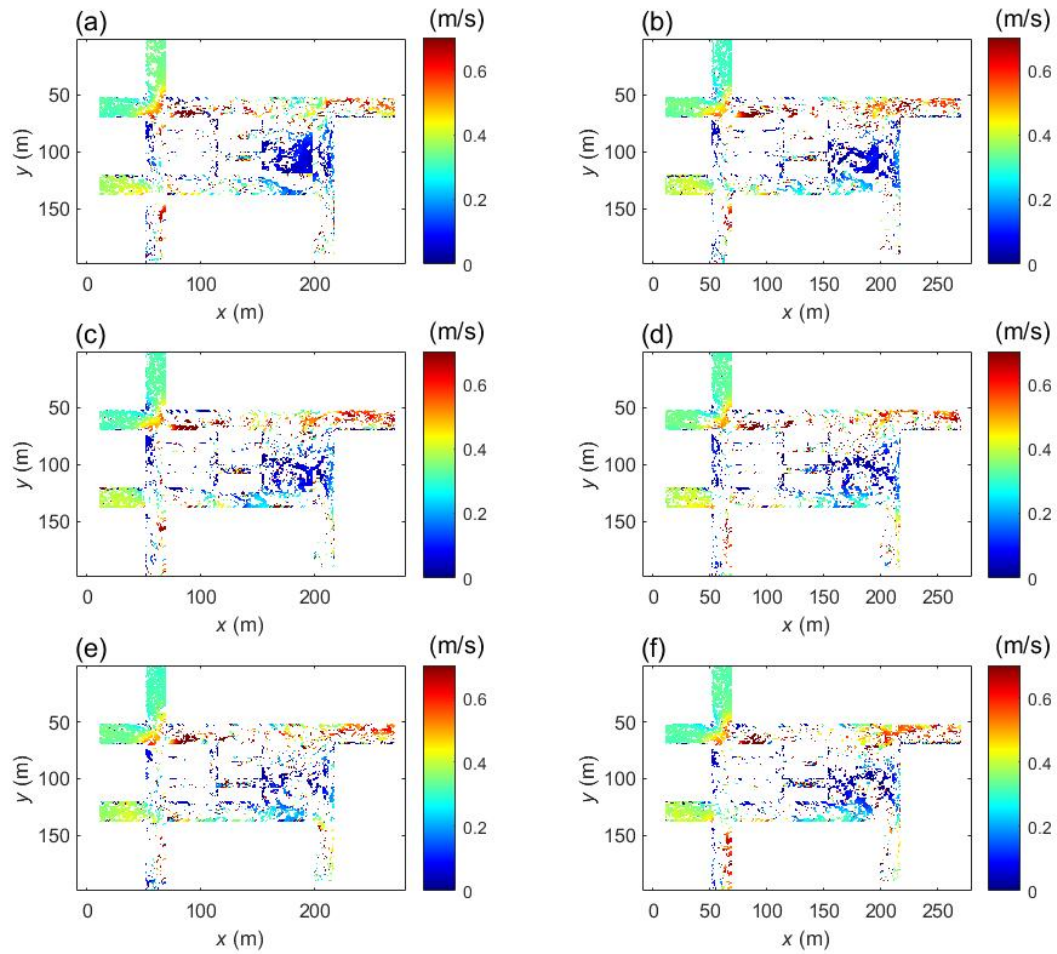


FIGURE 6.39 – Vitesses filtrées au début de six secondes consécutives (configuration 7h - écoulement *modéré*).

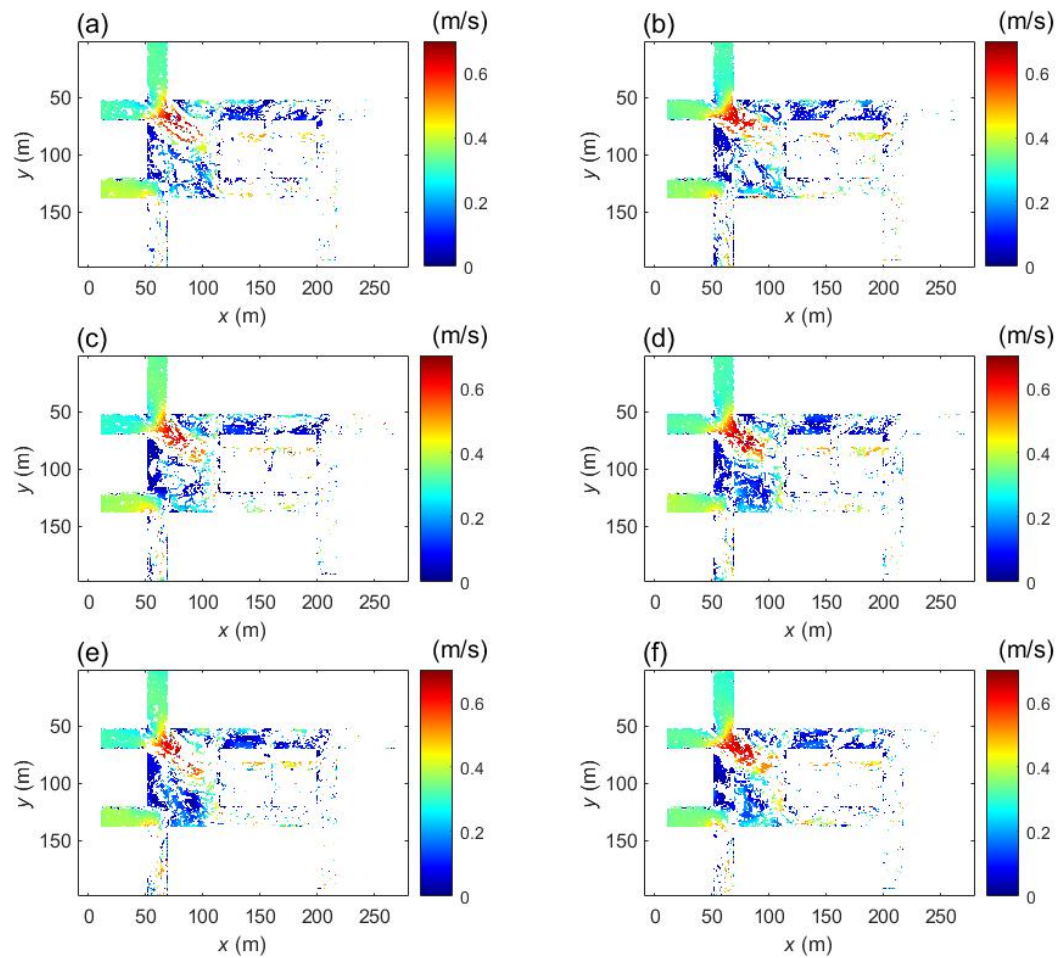


FIGURE 6.40 – Vitesses filtrées au début de six secondes consécutives (configuration 7i - écoulement *modéré*).

8 Mode d'emploi du modèle physique - Model instruction manual



Model Instruction Manual

District model to evaluate the influence of urban forms on
urban flooding

Contents

1	Introduction	1
2	Emergency stop button	2
3	Ultrasonic sensors	2
4	Flowmeters	4
5	Pumps	6
6	Downstream boundary condition	8
7	Flow entries	9
8	Flow exits	10
9	Camera	11
10	Sawdust for LSPIV	15
11	Drain valves	16
12	Computer	17
13	Bibliography	18

List of Figures

1	Plan view of the model (Li et al., 2021).	1
2	3 types of blocks.	1
3	Measurement channels (Li et al., 2021).	1
4	Triangular weir (Li et al., 2021).	1
5	Location of the emergency button	2
6	Emergency button	2
7	Outlets and inlets ultrasonic sensor.	3
8	Measurement channels ultrasonic sensor.	3
9	Connections of the sensors to the signals casing.	3
10	Signals casing connected to the computer.	3
11	Flowmeter SIEMENS-MAG 5100W.	4
12	Opened valve.	6
13	Closed valve.	6
14	Starting configuration of the valves.	6
15	Pump screen.	7
16	Downstream adjustable weir.	8
17	Entries B and C.	9
18	Cleaning of the honeycomb.	9
19	Top view of the collection box.	10
20	Collection box.	10
21	Drying of the sawdust on a sieve.	10
22	Drying of the sawdust on a plastic sheet.	10
23	Camera: main features	11
24	Camera: Setup menu.	11
25	Camera: Wi-Fi menu	11
26	Camera: Wi-Fi Function menu.	11
27	Camera: Select a function.	12
28	Camera: options of connection.	12
29	Panasonic Images App.	13
30	Camera structure.	14

31	Mobile part along the bar.	14
32	Camera attachment system.	14
33	Camera positioning.	14
34	Side view of the sawdust box.	15
35	Top view of the sawdust box.	15
36	Automatic sawdust box.	15
37	Casing for the automatic box.	15
38	Socket location for the automatic box.	16
39	Drain valve of inlet A.	16
40	Drain valve of inlets B and C.	16
41	Drain valve of tank.	17
42	Exit of the drain.	17

1 Introduction

The model represents a city district. It contains 3 inlets and 3 outlets. The inlets are designated with letters (A, B and C), while the outlets are designated with numbers (1, 2 and 3). The Figure 1 displays a plan view of the model with the annotation of the inlets and outlets. The central part of the model is the zone where the building blocs can be placed. In Figure 1, a big block has been placed. However, there are three different sizes of blocks (Figure 2) with six blocks for each size. These blocks can be placed at different positions and orientations any way you like. The three sizes are the followings:

- 36×19 cm
- 36×9 cm
- 22.7×19 cm

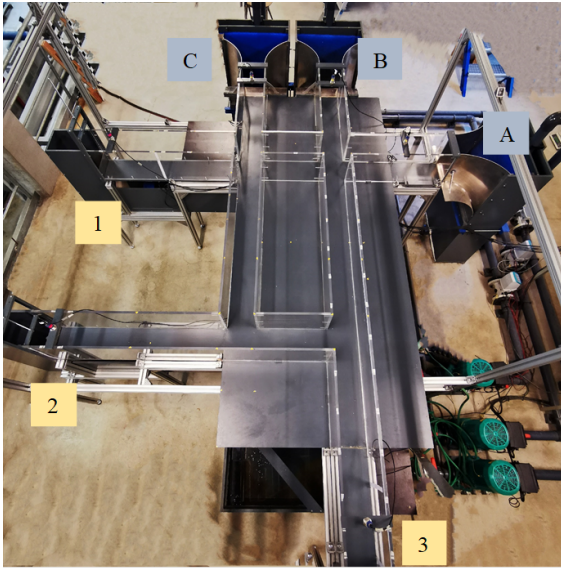


Figure 1: Plan view of the model (Li et al., 2021).

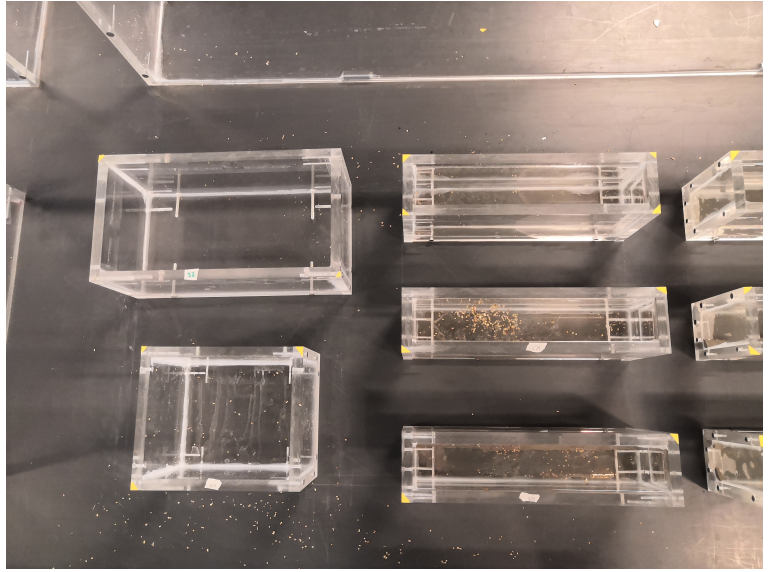


Figure 2: 3 types of blocks.

Each outlet is followed by a measurement channel placed under (confer Figure 3). At the end of these measurement channels, there is a triangular weir (confer Figure 4) allowing to estimate the output discharge thanks to the use of rating curves.

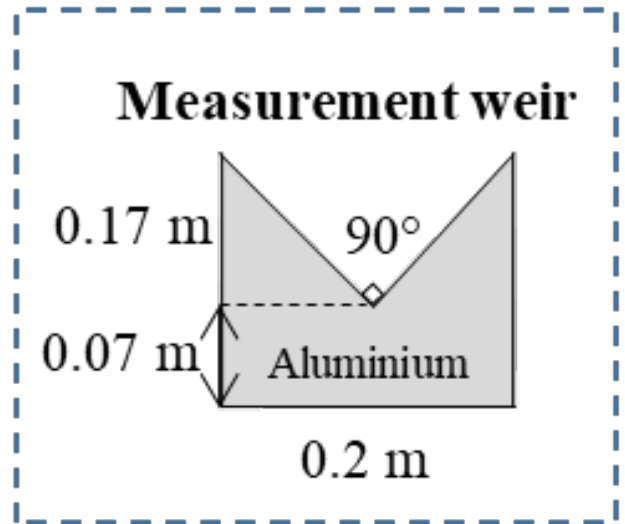
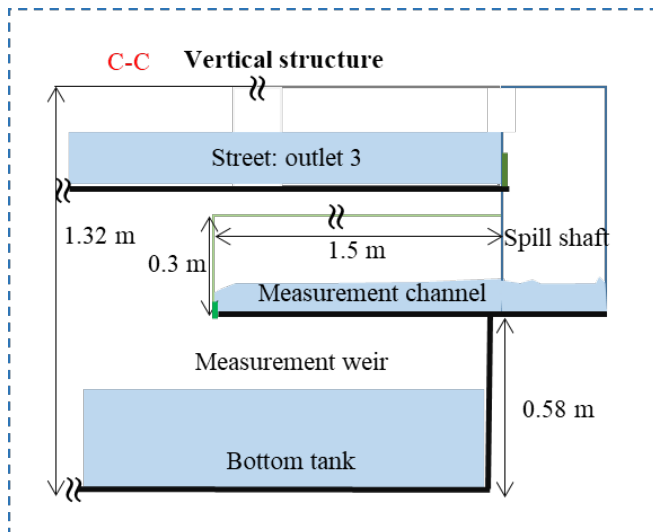


Figure 3: Measurement channels (Li et al., 2021). Figure 4: Triangular weir (Li et al., 2021).

2 Emergency stop button

An important button is the emergency stop button. It is placed on the first column, as it can be seen in Figure 5 and Figure 6. If you have any problem such as an overflow or something broke, press this button. It will instantly shut off the electricity powering for all instruments.



Figure 5: Location of the emergency button



Figure 6: Emergency button

3 Ultrasonic sensors

The model is equipped with 9 ultrasonic sensors (Microsonic: Mic+35/IU/TC) used to measure the water depths (Li et al., 2021). The first three are placed at the inlets (one per inlet), the next three are placed in the measurement channels and the last three are placed at the outlets. All sensors are connected to the computer through a signals casing but the numbering can change if you change the entries in the casing.

The sensors at the inlets and outlets of the models are placed vertically above the flow (Figure 7). They present a small screen indicating the distance between the sensor and the surface on which the signal is reflecting. They are very sensible and a calibration is necessary.

To perform a calibration, place one of the jigs where the height is indicated on the top. The distance between the sensor and the surface of the jig has to be measured thanks to a meter stick or measuring tape. Then you can record the signal of the sensor thanks to *Labview*¹ and compare the measures. Note that the sensor measures the distance between the **bottom** of the sensor and the detected surface.

The sensors in the measurement channels are a bit different. They present a 90 degree angle at their extremity, allowing them to be placed horizontally, thus reducing the vertical space requirement (Figure 8).

¹*Labview* is a software used to record the signals from the sensors. An instruction manual of this software has already been written and its reference is given at the end of this manual.



Figure 7: Outlets and inlets ultrasonic sensor.

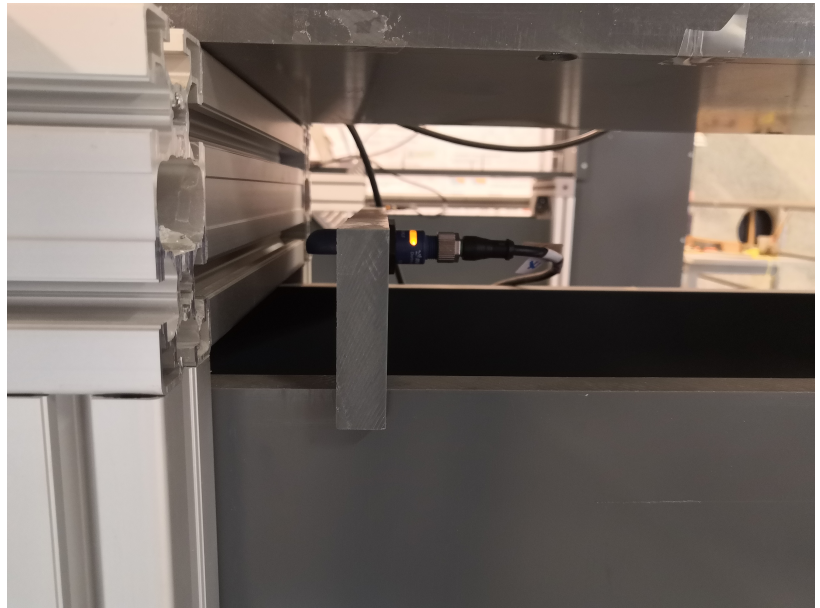


Figure 8: Measurement channels ultrasonic sensor.

Note that each sensor is placed around 10 cm away from the outlet. The three sensors located near the exits are used to control the waterdepth. The water depth at each exit has to be monitored because it is a boundary condition. This distance ensures that the water surface is horizontal, which is not the case exactly at the inlet/outlet. There are pen-marking on the top of the walls from the previous experiments. During your first test, pay attention to the flow surface and adapt the location of the probes if necessary.

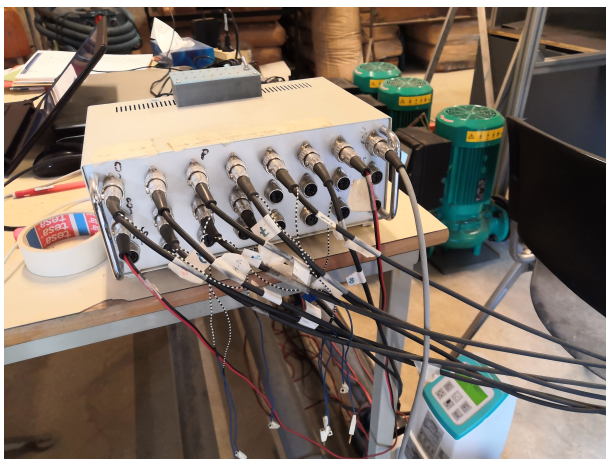


Figure 9: Connections of the sensors to the signals casing.



Figure 10: Signals casing connected to the computer.

4 Flowmeters

An electromagnetic flowmeter (SIEMENS-MAG 5100W) is placed after each pump in order to know the discharge sent to each inlet of the model (Li et al., 2021). The value of the discharge is displayed on the screen of the flowmeter and is given in cubic metre per hour (m^3/h). However, the units can be changed in the parameters. These flowmeters are also connected to the computer through the same signals casing used for the ultrasonic sensors.

As it can be seen in Figure 11, there are six buttons, keys on the flowmeter:

1. On the top left, it is the "Return/Escape" button;
2. On the top in the middle, it is used to access to the next menu;
3. On the top right, it is used to access to the previous menu;
4. On the bottom left, this is the button to change the figure, the digit;
5. On the bottom in the middle, this is the button to go to the next figure, the next digit;
6. On the bottom right, it is the "OK/Enter" button, used to enter and to confirm.



Figure 11: Flowmeter SIEMENS-MAG 5100W.

Before changing anything on the flowmeter, a password is required. The procedure to enter it is the following (the numbering of the buttons follow the list here above):

- i Press and hold (1 second) the button 1 until "Password" is displayed on the screen;
- ii Press 6 to enter;
- iii Change the figures thanks to the buttons 4 and 5 to obtain "1000" which is the password (press only once on the button 4);
- iv Press 6 to confirm;

Now you can access to all menus and parameters.

The value of the discharge displayed on the screen is an average value on a certain period of time (from 0.1 to 99.9 seconds). It is suggested to choose an average period of 5 seconds. To change this value:

- i Go to the menu "Output" (thanks to the button 2) and press 6;
- ii "Current output" is displayed, press 6;
- iii Go to the menu "timeconst." thanks to button 2 and press 6;
- iv Modify the value thanks to buttons 4 and 5 and press 6 when you have entered the period you desire;
- v Press 1 twice to go back to the general menu, press 1 once more if you have no other parameters to change.

The maximum value of discharge can also be specified. This value means that the flowmeter won't be efficient for higher discharges than the one entered. If you change this value, the relationship between the signal and the discharge has to be calibrated. To modify the value of maximum discharge:

- i Go to the menu "Basic settings" and press 6;
- ii Go to the menu "Qmax" thanks to the button 2 or 3 and press 6;
- iii Modify the value to your choice and press 6;
- iv Press 1 once to go back to the general menu, twice if you have no other parameters to change.

The other parameters can be changed too. For example, you can change the frequency of measurement of the flowmeter (in Hz), etc.

5 Pumps

The model is equipped with 3 identical pumps (WILO), each of them supplying an inlet.

Before switching on the pumps, check that the valve before each pump is fully opened and that the valve after each pump is at least half opened. Generally, they are leaved totally opened. We suggest to start the model with lower head of pumps (less than 3 H/m for example). This way, the flow can easily circulate and the beginning of the experiment is quiet, smooth.

The valve are completely opened when the handle is aligned with the pipe (Figure 12) and they are closed when the handle is perpendicular to the pipe (Figure 13). Before starting, you should therefore have the configuration presented in figure 14. Check also that there is no object in the model tank.



Figure 12: Opened valve.



Figure 13: Closed valve.

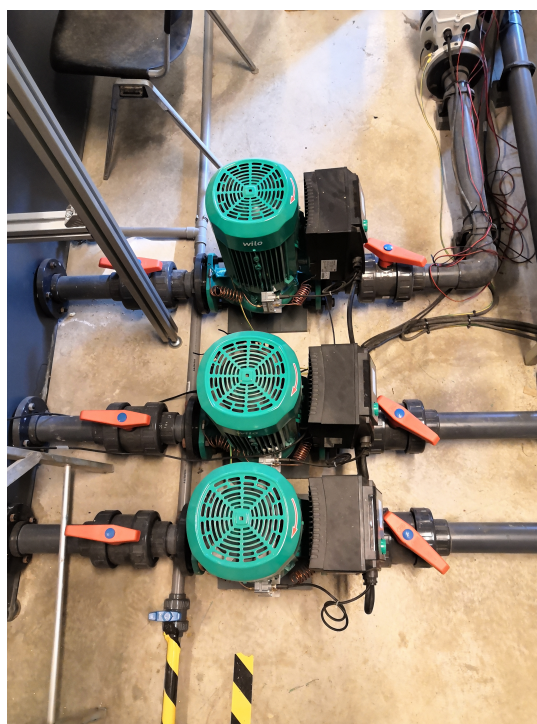


Figure 14: Starting configuration of the valves.

To **switch on** the pump:

1. Turn the round button to obtain a head of 1.4 and press the button (Figure 15);
2. Keep pressed the button of the pump 3 seconds, until the writing on the screen flashes;
3. Turn the button to obtain "3000" on the screen and press the button;
4. Turn the button to have "ON" and press the button. The pump will start and a small emoticon of a curved arrow is displayed (bottom left of the screen);

Once the pump has started, wait a moment before changing the head. Some time is needed so that the discharge tend to a stable value after the modification of the head or the opening/-closing of the valve. To change the head of the pump, turn the button and then press it. To control the discharge (read on the flowmeters), you can also play with the valve downstream each pump.



Figure 15: Pump screen.

Note that it is easier to control the discharge, induce smaller variations by closing/opening the valves with a higher pump head. **However, DO NOT largely close the valve and run the pump in high head**, it will damage the valve. Pay also attention not to increase the head too much at once. This would induce high discharges and therefore high water depths that could result in overflows.

NB: Check that the water level at the inlet of the pumps, in the model tank is high enough. The water level should be higher than 10 cm over the pipe.

To **switch off** the pumps, the procedure is the same:

1. Keep pressed the button of the pump 3 seconds, until the writing on the screen flashes;
2. Turn the button to obtain "3000" on the screen and press the button;
3. Turn the button to have "OFF" and press the button. The pump will stop and the small emoticon represents a crossed-out curved arrow.

NB: Always switch off the pump before closing the valve !

6 Downstream boundary condition

To adjust the downstream boundary condition which is the water depth, an adjustable weir has been placed at each outlet. To modify its height, turn the screw on the top (Figure 16).



Figure 16: Downstream adjustable weir.

The water depth is influenced by the three weirs and the inlet discharges. Therefore, it is recommended to adjust the discharges first and then the weirs height. **Always pay attention to the water level in the model when changing the discharges or the weirs in order to avoid the overflowing !** Once the outlet ultrasonic sensors display a quit steady water depth value that is equal to your objective, provided a measurement test, with *Labview*, to verify it.

7 Flow entries

The inlets are presented in Figure 17. There are three inlets, numbered A, B and C as mentioned previously.

The honeycomb are placed to stabilize the flow at entrances. Due to the use of sawdust for the LSPIV analysis, it is necessary to clean the honeycomb before starting a new record. To do that, once you started the pumps and you obtained the desired discharge(s) and water level, hit gently the honeycomb with a piece of plastic, as it can be seen in Figure 18. The sawdust imprisoned in the honeycomb will be freed in the flow and collected in the outlets boxes (confer next section). It is also recommended to remove the honeycombs occasionally to clean them.



Figure 17: Entries B and C.



Figure 18: Cleaning of the honeycomb.

8 Flow exits

As mentioned previously, the outlets are equipped with an adjustable weir to modify the water depth which represents the downstream boundary conditions. Moreover, each exit of the model possesses a collection box which is in fact a grid as it can be seen in Figure 19 and 20. These boxes are removable to empty them. To remove the boxes, place your hands inside it, push on the side and pull upwards.

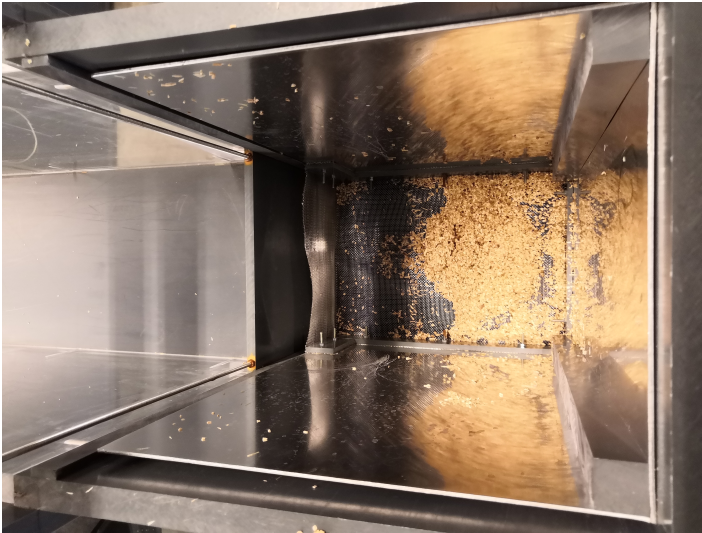


Figure 19: Top view of the collection box.



Figure 20: Collection box.

Note that the used sawdust is recycled by drying it on a sieve (Figure 21) and then on a plastic sheet (Figure 22). Don't forget to spread out the sawdust so that it dry faster.



Figure 21: Drying of the sawdust on a sieve.



Figure 22: Drying of the sawdust on a plastic sheet.

9 Camera

A structure has been built to be able to place a camera above the model. In this way, the surface flow is filmed and with sawdust on the flow surface, it is possible to perform an LSPIV analysis thanks to the software *Fudaa-LSPIV*.

You can connect your smartphone to the camera, using either a password or a QR code. In this way, you can see on your smartphone what the camera is filming.

To connect your smartphone to the camera:

1. Download the smartphone application *Panasonic Image app*;
2. Switch on the camera and open the screen;
3. Press the "Menu" button on the right of the camera (confer Figure 23);
4. Go to the menu "Setup";
5. Press the "Menu" button to enter in "Wi-Fi" (confer Figure 24);



Figure 23: Camera: main features

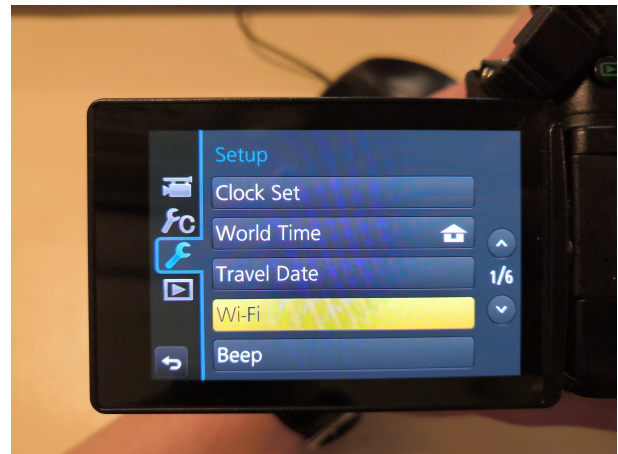


Figure 24: Camera: Setup menu.

6. Press the "Menu" button to enter in "Wi-Fi Function" (confer Figure 25);
7. Press the "Menu" button to enter in "New connection" (confer Figure 26);



Figure 25: Camera: Wi-Fi menu



Figure 26: Camera: Wi-Fi Function menu.

8. Press the "Menu" button to enter in "Remote Shooting & View" (confer Figure 27), then the different ways of connection are displayed on the screen (confer Figure 28);
9. To establish the connection, there are two possibilities:
 - (a) Open the smartphone application and press the wifi icone, second on the top (Figure 29);
 - (b) Select the wifi of the camera ("GH4-84674E");
 - (c) Enter the password indicated on the camera.

OR

- (a) Open the smartphone application and press the "Code QR" icone, third on the top(Figure 29);
- (b) Tap on the magnifying glass icone on the bottom right of the screen of the camera;
- (c) Place the QR code of the camera in the blue rectangle on your smartphone screen.

The connection should be established after a few seconds.

Now you can see on your smartphone what the camera is filming by tapping on the satellite icone on the bottom of the screen (second from the left) (confer Figure 29). To begin the recording, you have to tap on the red icon on the right of your screen. Once you finished recording, you can watch the video(s) you have produced by tapping on the playback icone on the bottom of the screen (third from the left) (confer Figure 29).



Figure 27: Camera: Select a function.

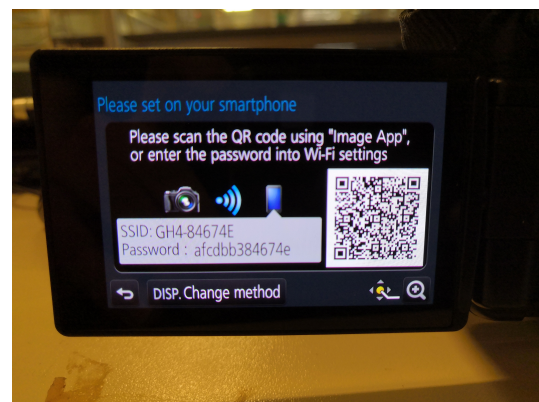


Figure 28: Camera: options of connection.

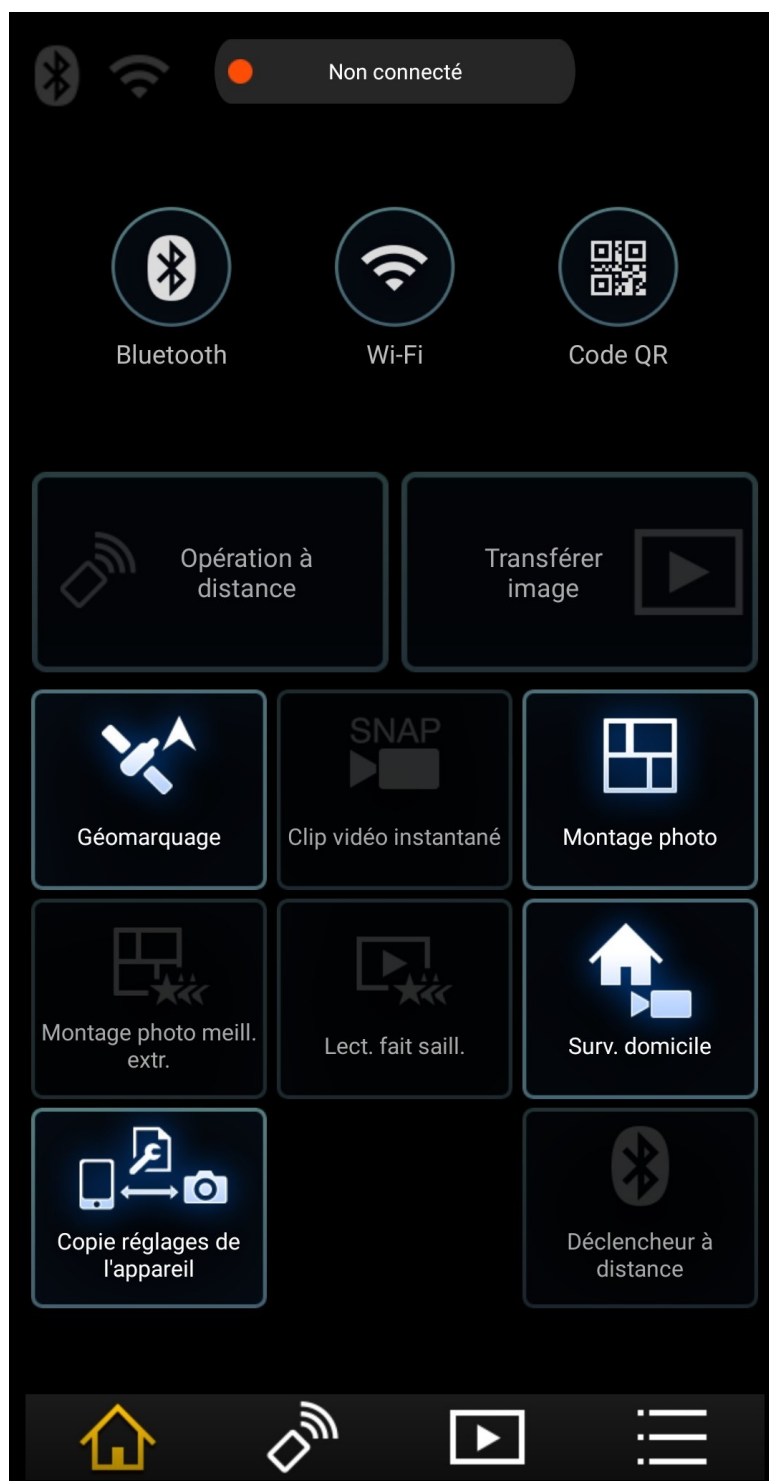


Figure 29: Panasonic Images App.

Once the connection is established, the camera can be put in place. It is fixed to a transverse bar that can be moved along the x-axis thanks to a rope. The whole system is visible in Figure 30. It can also move along this bar (y-axis) thanks to a mobile part (confer Figure 31). The camera has to be fixed thanks to the small piece of metal placed on its bottom, visible in Figure 32. It should enter in the vertical groove (from the top) like shown in Figure 33. To do so, you have to climb on the stepladder, to reach the piece of metal with the vertical groove. The camera fixed, you can adjust its position by watching the view on your smartphone.



Figure 30: Camera structure.



Figure 31: Mobile part along the bar.



Figure 32: Camera attachment system.



Figure 33: Camera positioning.

10 Sawdust for LSPIV

To perform a LSPIV analysis, particles on the surface of the flow are needed. As mentioned previously, sawdust is used here. The sawdust is sieved in order to avoid too small particles.

The sawdust is placed on the surface of the flow thanks to three boxes with a grid as bottom (Figures 34 and 35). The boxes are filled with sawdust and when hit with a plastic piece, a certain amount of sawdust fall through the grid. Therefore, the operation consists in hitting the grid repetitively to obtain a more or less uniform amount of particles on the flow surface. Note that one of the boxes is equipped with a "hammer" connected to a small electric engine whose speed can be adapted. It is turned on and off thanks to the button on the bottom left of the casing presented in Figure 37. The round button on the right is used to adapt the speed of the hammer. There is a socket to plug the casing near the desk as it can be seen in Figure 38. In this way, you can hit the boxes on two entries by yourself and the last one is automatic.



Figure 34: Side view of the sawdust box.



Figure 35: Top view of the sawdust box.



Figure 36: Automatic sawdust box.



Figure 37: Casing for the automatic box.



Figure 38: Socket location for the automatic box.

11 Drain valves

There are 4 drain valves: one for each inlet and one for the tank (Figures 39, 40 and 41). They are all connected to the same drain pipe (Figure 42).



Figure 39: Drain valve of inlet A.



Figure 40: Drain valve of inlets B and C.



Figure 41: Drain valve of tank.



Figure 42: Exit of the drain.

12 Computer

First, press "Enter" on the keyboard of the computer to switch on. Press "Ctrl" + "Alt" + "Delete" to open the session. A Password is required. This password is written on the keyboard of the computer. Once you have written it, press "Enter".

NB: The way to switch on the computer may be different according to the computer.

The software used to collect and read the data from the ultrasonic sensors and the flowmeters is called *LabVIEW*. An instruction manual has already been written: *Getting Started with LABVIEW*.

13 Bibliography

Li, X., Kitsikoudis, V., Mignot, E., Archambeau, P., Pirotton, M., Dewals, B. et Erpicum, S. (2021). Experimental and numerical study of the effect of model geometric distortion on laboratory modelling of urban flooding. Manuscript soumis.