

Application du concept de porosité pour la modélisation d'écoulements en milieu urbain

Mémoire présenté par
Jean-Charles SNAPS en vue de l'obtention du grade de Master

Ingénieur civil mécanicien

Jérémy LINKENS en vue de l'obtention du grade de Master

Ingénieur civil en construction

Promotrice
Sandra SOARES-FRAZAO

Lecteurs
Fabian FRANZINI, Olivier CARLIER , François HENROTTE

Année académique 2016-2017

Remerciements

Nous adressons nos remerciements aux personnes qui nous ont aidé dans la réalisation de ce document.

Tout d'abord, nous remercions notre promotrice de mémoire, Mme Sandra Soares-Frazão, pour nous avoir guidés tout au long de notre travail et pour sa disponibilité.

Nous remercions aussi Mr Vincent Guinot pour son intérêt envers notre travail et ses remarques avisées.

Nous remercions Mr Fabian Franzini pour son aide concernant la mise en fonction du code de calcul et son débogage.

Nous remercions finalement Mr Marc Materne pour son aide à la relecture et à la correction de notre mémoire.

Abstract

Previous works had confirmed that porosity-based shallow water models can be powerful to simulate flow through urban media. It enhances considerably time-calculations in comparison with detailed models. But some effects due to obstacles and vortices were let unquantified and errors were significant. Errors which lead to the fact that simulation results didn't fit with experimental ones [Velickovic, 2012]. Thanks to experiences, real behaviour can be analyzed. And some difference have been highlighted.

- The first buildings row locally induces a medium porosity drop.
- The angle between flow direction and main street axes generates head losses due to eddies. Applying a rotation matrice is not enough.

The main goal of this paper is to approach all these uncertainties to make the porosity-based model robust. Two ways will be taken to achieve it. First, porosity field has to be found to transcribe flow behaviour across streets. Afterwards, the raise of head losses at crossroads due to redistribution is characterized by a drag tensor related to geometrical properties.

The guideline followed is defined by these questions about flow behaviour :

- How can the model accurately generate experimentally recorded water levels ?
- How can the directional effect imposed by the streets of the city be revealed ?
- How can a preferential direction related to the possible anisotropy of the network be translated ?
- How to express singular head losses due to the redistribution of the flux at crossroads ?

Table des matières

List of terms	9
1 Introduction	11
1.1 Les inondations	11
1.1.1 Caractéristiques des inondations	11
1.1.2 Conséquences des inondations	12
1.1.3 Inondations en milieu urbain	13
1.1.4 Actualité récente	14
1.2 Objectif de ce présent TFE	14
1.3 Feuille de route	16
2 Contextualisation	17
2.1 Rappels théoriques	17
2.1.1 Notions fondamentales d'hydraulique	17
2.1.2 Équations du modèle à porosité	23
2.2 Recherches précédentes	25
2.2.1 Configurations de villes considérées	25
2.2.2 Débits et conditions de hauteur d'eau à l'aval	25
2.2.3 Champs de porosité	29
2.2.4 Tenseur de traînée	30
2.2.5 Temps de simulation	31
3 Champs de porosité	33
3.1 Généralités	33
3.2 Paramètres de simulation	35
3.2.1 Tenseur de traînée	35
3.2.2 Configuration de la ville	35
3.3 Champ à porosité constante : $\phi = 0.4375$	35
3.4 Champ de porosité du type <i>Plateau avec transition</i>	36
3.5 Champ de porosité du type <i>CDF - Cumulative distribution function</i>	37
3.5.1 Configuration de ville isotrope alignée	38
3.6 Champ de porosité du type <i>Building Peak</i>	40
3.6.1 Configuration de ville isotrope alignée	40
3.6.2 Configuration de ville isotrope inclinée	42
3.7 Champ de porosité du type <i>Building Peak translaté</i>	44
3.8 Champ de porosité du type <i>Building Interpolated</i>	46
3.8.1 Configuration d'une ville isotrope alignée	47
3.9 Champ de porosité du type <i>Building Interpolated</i> [ϕ_{bat} ; $\phi_{x,y,rue}$]	49
3.9.1 Configuration de ville isotrope alignée	49
3.9.2 Configuration de ville anisotrope large alignée	50
3.9.3 Configuration de ville anisotrope étroite alignée	52

3.9.4	Configuration de ville isotrope inclinée	53
3.9.5	Configuration de ville anisotrope large inclinée	54
3.10	Conclusion	58
4	Tenseur de traînée	59
4.1	Généralités	59
4.2	Influence des composantes du tenseur sur la ville isotrope alignée	62
4.2.1	Impact sur la vitesse	64
4.2.2	Impact sur la hauteur d'eau	67
4.3	Influence des composantes du tenseur sur la ville isotrope inclinée	68
4.3.1	Impact sur la vitesse	69
4.3.2	Impact sur la hauteur d'eau	72
4.4	Combinaison des éléments D'_{xxxx} et D'_{yyyy}	76
4.4.1	Ville isotrope alignée - Cas $D' = 0$ sauf $D'_{xxxx} = D'_{yyyy} = 25$	76
4.4.2	Ville isotrope inclinée - Cas $D' = 0$ sauf $D'_{xxxx} = D'_{yyyy} = 25$	77
4.5	Combinaison des éléments D'_{xxxx} et D'_{yyyy} avec effets directionnels	80
4.5.1	Pertes de charge dans la direction de la diagonale de la ville	80
4.5.2	Pertes de charge dans l'axe des rues	81
4.5.3	Esquive de la diagonale et orientation selon les rues	82
4.5.4	Influence des composantes du tenseur D sur la hauteur d'eau	85
4.6	Conclusion	88
4.6.1	Impact sur la vitesse	88
4.6.2	Impact sur la hauteur d'eau	88
4.6.3	Combinaison des éléments D'_{xxxx} et D'_{yyyy}	89
5	Validation du modèle	91
5.1	Formulation 1 : Combinaison du tenseur de traînée avec le champ de porosité constant	92
5.1.1	Ville alignée avec l'écoulement	92
5.1.2	Ville inclinée par rapport à l'écoulement	95
5.1.3	Résultats d'un point de vue des directions préférentielles	99
5.2	Formulation 2 : Combinaison du tenseur de traînée avec le champ de porosité <i>Building Peak</i>	101
5.2.1	Ville alignée avec l'écoulement	101
5.2.2	Ville inclinée par rapport à l'écoulement	104
5.3	Formulation 3 : Combinaison du tenseur de traînée avec le champ de porosité <i>Building Interpolated</i>	107
5.3.1	Ville alignée avec l'écoulement	108
5.3.2	Ville inclinée par rapport à l'écoulement	111
5.4	Conclusion	114
6	Conclusion	115

Liste des variables et notations

A_{0f}	Aire initiale occupée par le fluide.	23
A	Aire de la section mouillée.	19
C	Coefficient de Chézy.	19
D	Tenseur de traînée.	30
E	Energie spécifique de l'écoulement.	21
H	Charge hydraulique.	30
J	Pertes de charge.	17
K	Coefficient de pertes de charge régulières.	18
L	Longueur du lit.	18
M_{xx}	Composante tourbillonnaire selon l'axe x.	24
M_{yy}	Composante tourbillonnaire selon l'axe y.	24
P	Périmètre mouillé.	19
Q	Débit volumique.	18
R	Rayon hydraulique.	19
S_0	Pente de fond.	19
S_{0x}	Pente de fond selon l'axe x.	23
S_{0y}	Pente de fond selon l'axe y.	23
S_{fx}	Pente de ligne de charge selon l'axe x.	24
S_{fy}	Pente de ligne de charge selon l'axe y.	24
U	Composante selon l'axe x de la vitesse.	23
V	Vitesse de l'écoulement.	17
V	Composante selon l'axe y de la vitesse.	23
$X_{fs,b}$	Indice relatif à une frontière entre fluide et solide de type "lit".	24
$X_{fs,w}$	Indice relatif à une frontière entre fluide et solide de type "mur".	24
α	Angle du fond.	21
β	Angle que forme la ville avec l'axe de l'écoulement calculé de manière trigonométrique..	61
γ	Poids volumique.	17
$\langle \dots \rangle_A^f$	Notation condensée d'une intégrale sur la fraction occupée par le fluide de la section A.	24
ϕ_s	Porosité de stockage.	23
ϕ_x	Porosité directionnelle selon l'axe x.	23
ϕ_y	Porosité directionnelle selon l'axe y.	23
ϕ	Porosité du milieu ou de la cellule de calcul.	15

τ Contrainte de cisaillement. 19
 ξ Coefficient de Borda. 19
 c Célérité de l'écoulement. 22
 d_{ij} Partie déviatorique du tenseur des vitesses. 24
 ds Longueur d'un tronçon de canal. 19
 $dx_{batiment}$ Dimension des bâtiments prise selon l'axe x. 49
 dx_{rue} Dimension des rues prise selon l'axe x. 49
 $dy_{batiment}$ Dimension des bâtiments prise selon l'axe y. 49
 dy_{rue} Dimension des rues prise selon l'axe y. 49
 g Accélération gravitationnelle. 17
 h_c Hauteur critique. 22
 h_u Hauteur uniforme. 20
 n Coefficient de Manning. 24
 p_0 Niveau piézométrique de l'écoulement. 17
 p_{dyn} Pression dynamique. 17
 p_{tot} Pression totale du fluide. 17
 p Pression hydrostatique. 17
 t Temps. 23
 z_b Niveau du lit par rapport à un niveau de référence. 24
 z Niveau de l'écoulement par rapport à un niveau de référence. 17

Chapitre 1

Introduction

1.1 Les inondations

Les inondations ont été longtemps considérées comme des « événements imprévisibles » ou des « catastrophes naturelles » inévitables, souvent vues comme une sorte de fatalité dont on ne pouvait se soustraire. L'occupation progressive des rives et la transformation des plaines inondables ont peu à peu fait prendre conscience du pouvoir de transformer ces environnements dynamiques et de les adapter selon les besoins des différentes activités humaines. Aujourd'hui, on cherche tant bien que mal à maîtriser ce phénomène et surtout, on le considère de plus en plus comme un risque qu'il convient d'évaluer et gérer, selon les contraintes administratives, physiques et environnementales. Malgré une volonté des autorités de préserver les zones inondables du développement urbain ou périurbain par des contraintes juridiques plus strictes, le problème demeure entier pour les habitations anciennes qui occupent toujours ces zones vulnérables [Saint-Laurent, 2008].

1.1.1 Caractéristiques des inondations

On distingue trois grands types d'inondations :

Lentes : inondations étendues faisant suite à une longue période pluvieuse

Brutales : crues éclair brèves et très localisées, elles sont généralement dues à des pluies torrentielles après un orage violent ou un ou deux jours de fortes pluies

Tsunami : inondations marines dues à une rupture de digue ou d'écluse, ou à un séisme

Mais il est également possible de les classer selon leurs origines, très variées, qui sont naturelles ou non :

- Éléments d'origine naturelle
 - ◇ Fonte des neiges
 - ◇ Pluies intensives
 - ◇ Crues majeures
 - ◇ Tsunamis
- Éléments d'origine artificielle
 - ◇ Ruptures de barrage
 - ◇ Faible absorption de l'eau par le sol (béton,...)

Par ailleurs, le changement climatique a un retentissement majeur sur le risque de crue et d'inondation. Les modifications des régimes météorologiques liées au réchauffement du climat

contribuent à exacerber les risques, avec leur cortège d'impacts directs et indirects. L'évolution climatique observée et prévue peut amplifier le risque d'inondation existant, par exemple en :

- aggravant l'élévation du niveau de la mer
- modifiant les régimes pluviométriques au niveau local
- entraînant une fréquence accrue des tempêtes, et donc des ondes de tempête

Le rôle du changement climatique pourrait s'amplifier à une échelle de temps plus longue [K Jha et al., 2012].

1.1.2 Conséquences des inondations

Les inondations sont des catastrophes qui provoquent des dégâts considérables. Elles représentent une source majeure d'adversité. En termes d'occurrences, les inondations sont les catastrophes naturelles les plus fréquentes. Leur nombre a considérablement augmenté, surtout au cours des 20 dernières années, une tendance bien illustrée par les Figures 1.1 et 1.2. Le nombre de victimes, les dégâts financiers et économiques et les coûts d'indemnisation des sinistres sont eux aussi en augmentation [K Jha et al., 2012]. Chaque année, les inondations sont responsables de la mort de 9000 personnes en moyenne dans le monde, 115 millions de personnes étant plus ou moins sévèrement touchées par ces événements [CRED, 2016]. Les dégâts économiques sont quant à eux évalués, toujours en moyenne annuelle, à hauteur de 19 milliards de dollars US. Ceci place les inondations en seconde position au classement des catastrophes naturelles les plus dévastatrices, la première position étant occupée par les tempêtes. Dans les années exceptionnelles telles que 1998, 2010, 2011 et 2013, les pertes totales dépassent les 40 milliards de dollars, comme illustré sur la Figure 1.3 [K Jha et al., 2012].

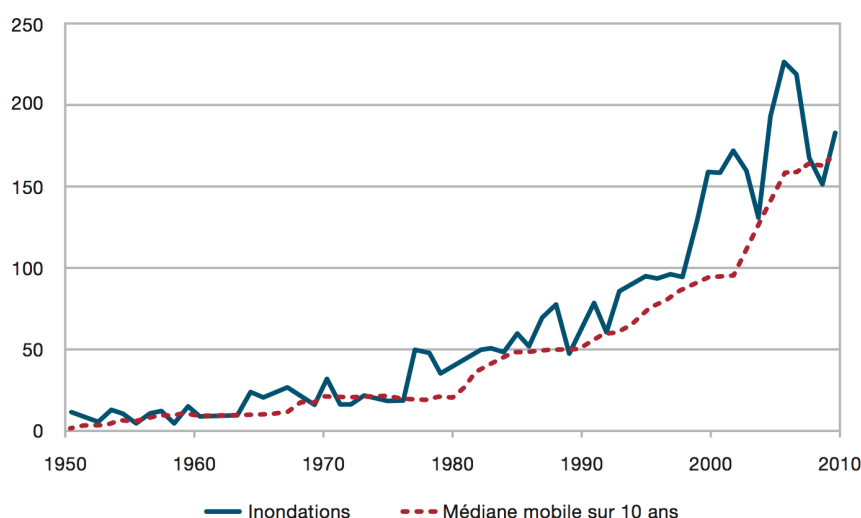


FIGURE 1.1 – Évolution du nombre d'inondations annuelles. Source : [K Jha et al., 2012]

Le nombre de personnes tuées par les inondations s'accroît de plus en plus lentement, et aurait même tendance à diminuer, ce qui atteste de l'efficacité des mesures de maîtrise du risque. Même si ces résultats sont encourageants, le nombre de décès reste élevé dans les pays en développement où ces catastrophes frappent disproportionnellement les pauvres et les défavorisés, en premier lieu les femmes et les enfants [K Jha et al., 2012].

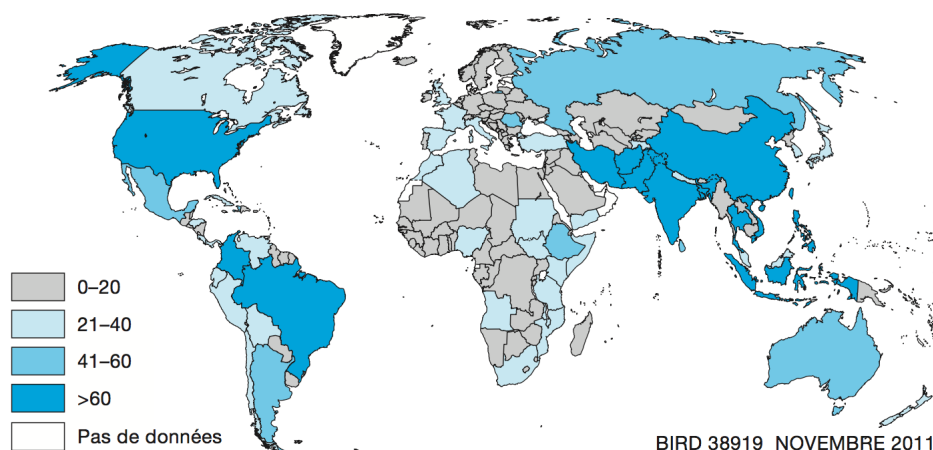


FIGURE 1.2 – Occurrences des inondations, 1970-2011. Source : EM-DAT : Base de données des catastrophes internationales OFDA/CRED (www.emdat.be), Université Catholique de Louvain, Bruxelles (Belgique).

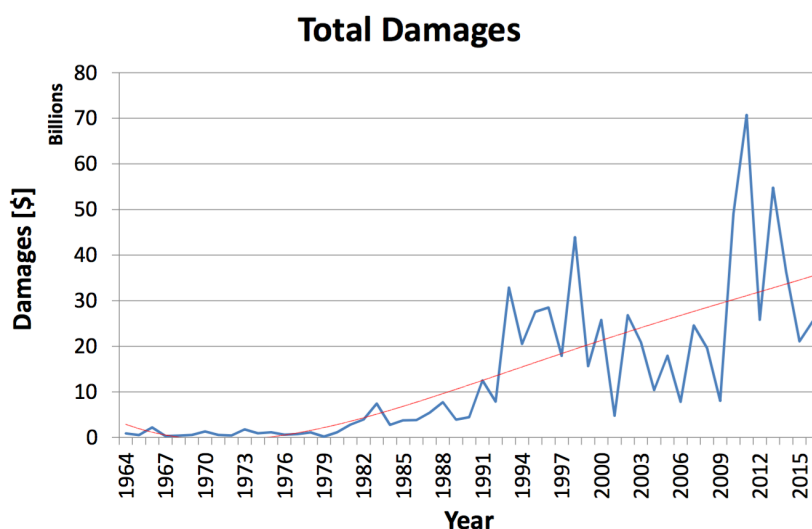


FIGURE 1.3 – Évolution des dégâts économiques annuels. Le trait rouge représente une approximation de cette évolution. Source : [CRED, 2016]

1.1.3 Inondations en milieu urbain

Les zones urbaines sont souvent exposées au risque d'inondation et tout aussi souvent mal préparées à sa gestion. Les inondations frappent les agglomérations urbaines en tous genres : petits villages, bourgs et centres de négoce et de service, comme le long de l'Indus, ainsi que les villes, les mégapoles et les zones métropolitaines telles que Sendai, Brisbane, New York, Karachi et Bangkok, qui ont toutes connu des inondations récentes.

En outre, les inondations urbaines ont ceci de distinctif que les villes sont caractérisées par de vastes populations et une forte concentration de biens. Les dommages y sont donc plus importants et plus coûteux. Comme les établissements humains abritent les principaux services, infrastructures et actifs économiques et sociaux, les dévastations ne se limitent pas à la seule montée des eaux, mais se mesurent en répercussions dramatiques sur la société. Les effets indirects et souvent à long terme, tels que les maladies, les problèmes alimentaires, le recul des possibilités d'éducation et la perte des moyens de subsistance, peuvent aussi entamer la résistance des populations et contrecarrer les objectifs de développement.

C'est en 2008 que pour la première fois dans l'histoire de l'humanité, la proportion d'urbains —

dont les deux tiers dans des pays à revenu faible à intermédiaire — a atteint la moitié de la population mondiale. Selon les estimations, les urbains devraient représenter 60 % de la population mondiale en 2030, pour passer à 70 % en 2050, soit un total de 6,2 milliards d’habitants, soit le double de la population rurale prévue cette même année. À mesure que les citoyens représentent une part de plus en plus large de la population mondiale, il s’ensuit que les inondations urbaines deviennent plus dangereuses et plus coûteuses à gérer en raison de la taille même des populations exposées [K Jha et al., 2012].

1.1.4 Actualité récente

Au premier semestre de l’année 2017, les inondations se sont invitées également dans l’actualité. D’abord en février, les déversoirs du plus haut barrage des Etats-Unis situé à Oroville (Californie du nord), endommagés par une tempête, ne suffisaient plus à évacuer le surplus d’eau du lac. 188.000 habitants de Californie avaient été évacués par mesure de sécurité [Terhaar, 2017]. Ensuite au Canada, depuis les rives du lac Ontario (centre) et Toronto jusqu’à plus de 500 km en aval du fleuve Saint-Laurent, le niveau des eaux est rapidement monté suite à la rupture de trois digues provisoires à Pierrefonds, à l’ouest de l’île de Montréal. Près de 2.000 résidences ont été inondées dans les 126 municipalités sinistrées de la province [Network, 2017].



FIGURE 1.4 – Barrage d’Oroville aux Etats-Unis. Source : [Collman, 2017]



FIGURE 1.5 – Inondations au Canada suite à la rupture de digues. Source : [Sutton and Cullinane, 2017]

1.2 Objectif de ce présent TFE

La prévision constitue un point clef pour minimiser les conséquences de telles catastrophes. La modélisation numérique permet de réaliser une cartographie des écoulements dans la ville, avec différentes applications possibles : connaissance de l’exposition au risque, réglementation du développement urbain, définition de scénarios de gestion de crise, etc.

C’est dans ce contexte que prend racine le concept de modèle à porosité. En effet, pour simuler l’écoulement en milieu urbain, des modèles détaillés à volumes finis ont été créés, donnant des résultats fiables. Cependant, les caractéristiques géométriques d’un tel milieu nécessitent des maillages¹ très fins pour tenir compte des détails des rues, des bâtiments, et des carrefours. De ce point de vue, le modèle est dit détaillé, et le temps de calcul est considérable. De plus,

1. Un maillage est une structure de données géométriques résultant de la discrétisation d’un milieu continu, et est de ce fait représenté par un ensemble de polygones appelés cellules de calcul.

les données nécessaires pour faire un maillage très fin ne sont pas toujours disponibles ou assez précises.

La modélisation macroscopique constitue une alternative intéressante, où une description fine de la géométrie urbaine est remplacée, dans les équations de propagation, par une porosité qui rend compte des propriétés du tissu urbain [Guinot et al., 2007]. En effet, un milieu urbain peut être assimilé à un milieu poreux du point de vue de l'écoulement : les rues constituent les pores dans lesquelles l'écoulement peut prendre place, et le bâti constitue les diverses obstructions à l'écoulement. On étudie alors le comportement global de l'écoulement au sein de la ville, de ce point de vue, le modèle est dit macroscopique. Un maillage beaucoup plus grossier peut être utilisé, ce qui permet des temps de calcul beaucoup plus faibles. A titre de comparaison, un maillage fin correspondant au modèle détaillé qui compte 47503 cellules voit ce nombre être réduit à 10349 cellules pour le modèle macroscopique. Concernant le temps de simulation, on passe de 90500 secondes à 6800.

La Figure 1.6 illustre la comparaison d'un modèle détaillé et d'un modèle macroscopique en terme de raffinement du maillage.

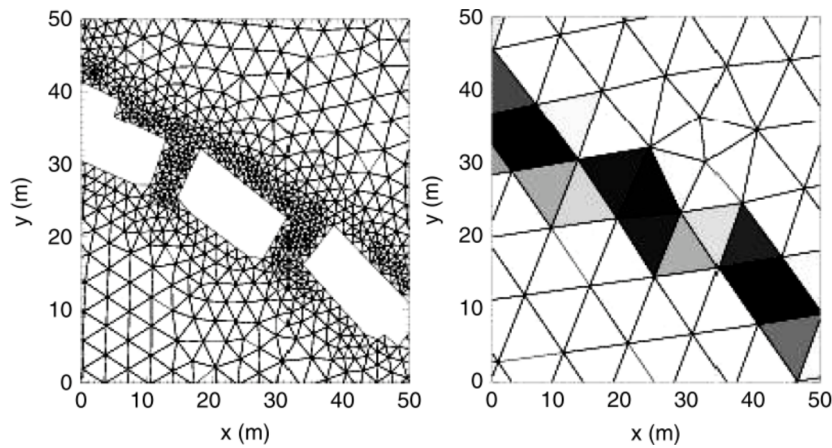


FIGURE 1.6 – Comparaison d'un modèle détaillé (gauche) et d'un modèle macroscopique (droite). Dans le modèle détaillé, les bâtiments sont considérés comme des frontières imperméables. Dans le modèle macroscopique, les éléments du maillage occupés par un bâtiment se voient attribués une valeur de porosité calculée sur base de la portion de surface occupée par le bâtiment. Source : [Mason et al., 2007]

Le modèle macroscopique à porosité nécessite des paramètres supplémentaires. Ainsi, chaque cellule de calcul² du maillage se verra caractérisée par une valeur de porosité et un tenseur de pertes de charge. Il faudra donc déterminer pour l'ensemble du milieu urbain :

Un champ de porosité $\phi(x, y)$ pouvant prendre des valeurs comprises entre 0 (cellule complètement imperméable) et 1 (cellule complètement perméable) permettant de traduire au mieux la nature du milieu urbain.

Un tenseur de traînée D caractérisant les pertes de charges aux carrefours et/ou les directions préférentielles de l'écoulement si le réseau de rues est anisotrope.

Le TFE a pour objectif de valider différentes formulations des pertes de charge, prenant en compte les effets directionnels tels que l'orientation préférentielle des rues dans la ville notamment. Pour ce faire, le travail de développement et de simulations numériques est réalisé à partir

2. Les cellules de calcul sont les éléments constitutifs du maillage sur lesquels les équations de conservations sont calculées ainsi que les flux entrant et sortant vers les cellules adjacentes.

d'un code de calcul écrit en C++ qui a été développé dans le cadre d'une thèse de doctorat à l'UCL [Velickovic, 2012]. Plus précisément, il s'agit de répondre aux quatre questions suivantes :

- Comment permettre au modèle de rendre fidèlement les hauteurs d'eau enregistrées expérimentalement ?
- Comment laisser transparaître l'effet directionnel imposé par les axes des rues de la ville ?
- Comment traduire une direction préférentielle liée à l'anisotropie éventuelle du réseau ?
- Comment exprimer les pertes de charge singulières dues à la redistribution du flux à chaque carrefour ?

1.3 Feuille de route

Le but de cette dernière partie de l'introduction est de présenter au lecteur la démarche adoptée. Pour cela, les différents points abordés sont rassemblés ici. La structure de ce TFE s'organise selon les chapitres suivants :

Chapitre 2 : *Contextualisation*

Ce chapitre pose le contexte dans lequel prend place ce travail. Les rappels théoriques des notions fondamentales d'hydraulique ainsi que l'état de l'art du modèle à porosité sont présentés. Ce chapitre contient également un aperçu des points importants de la thèse de doctorat [Velickovic, 2012], document qui fait office d'assise de ce TFE.

Chapitre 3 : *Champs de porosité*

Ce chapitre expose les différents champs de porosité implémentés dans le modèle numérique. Leurs caractéristiques sont mises en évidence au travers de l'analyse de profils de hauteur d'eau et des champs vectoriels de vitesse.

Chapitre 4 : *Tenseur de traînée*

Le second paramètre étudié est le tenseur de traînée. Différentes valeurs de ce tenseur sont testées afin d'évaluer leurs effets sur l'écoulement. Pour ce faire, on s'appuiera à nouveau sur l'analyse des profils de hauteur d'eau et des champs vectoriels de vitesse.

Chapitre 5 : *Validation du modèle*

Ce chapitre expose différentes combinaisons d'un champ de porosité avec un jeu de valeurs du tenseur de traînée. Le but est d'aboutir à un modèle robuste, obtenu par un choix de champ de porosité et de tenseur de traînée gouverné par les caractéristiques géométriques du milieu, qui donne des résultats fiables.

Chapitre 6 : *Conclusion*

Pour finir, la conclusion reprend les enseignements clefs de ce travail, énonce les limites de l'étude qui a été menée et propose des pistes d'amélioration pour les travaux futurs.

Chapitre 2

Contextualisation

Afin de comprendre au mieux les différentes analyses qui vont suivre, une remise en contexte s'impose. Ce chapitre contient un rappel théorique des équations fondamentales en hydraulique et celles qui gouvernent le modèle à porosité, ainsi qu'un bref historique des travaux clefs portant sur ce sujet. Une description des points importants développés précédemment (principalement de la thèse [Velickovic, 2012]) clôturera ce chapitre.

2.1 Rappels théoriques

2.1.1 Notions fondamentales d'hydraulique

Charge hydraulique

La charge hydraulique est la notion qu'on relie le plus souvent à la pression de l'écoulement. Cependant, ce lien est un peu réducteur, pour être complet, la charge est la pression dite "totale", se définissant par la loi des liquides parfaits de Bernoulli :

Pression totale = pression hydrostatique + pression motrice

$$p_{tot} = p_0 + p_{dyn} \longleftrightarrow p_{tot} = z + \frac{p}{\gamma} + \frac{V^2}{2g} \quad (2.1)$$

Cette pression totale prend en compte les effets statique et dynamique de l'écoulement. La charge est en fait le terme utilisé en hydraulique pour parler de l'énergie totale de l'écoulement. L'énergie totale n'est rien de plus que la somme de l'énergie cinétique (liée à la vitesse) et l'énergie potentielle (liée à une différence de niveau). La charge hydraulique s'exprime en mètres [m]. Elle représente la hauteur de la colonne d'eau générant la pression statique équivalente à la pression totale calculée. La différence de charge entre un point A et un point B se calcule en se basant sur le schéma de la Figure 2.1. Les deux états hydrauliques doivent s'équilibrer, on écrit :

$$z_A + \frac{p_A}{\gamma} + \frac{V_A^2}{2g} = z_B + \frac{p_B}{\gamma} + \frac{V_B^2}{2g} + J_{AB} \quad (2.2)$$

Où :

- $z[m]$ est la cote moyenne de la conduite par rapport à un niveau de référence.
- $\frac{p}{\gamma}$ est la pression hydrostatique normalisée à la masse volumique de l'eau. Elle est aussi exprimée en [m].
- $\frac{V^2}{2g}$ est la pression hydrodynamique, exprimée en [m] également.

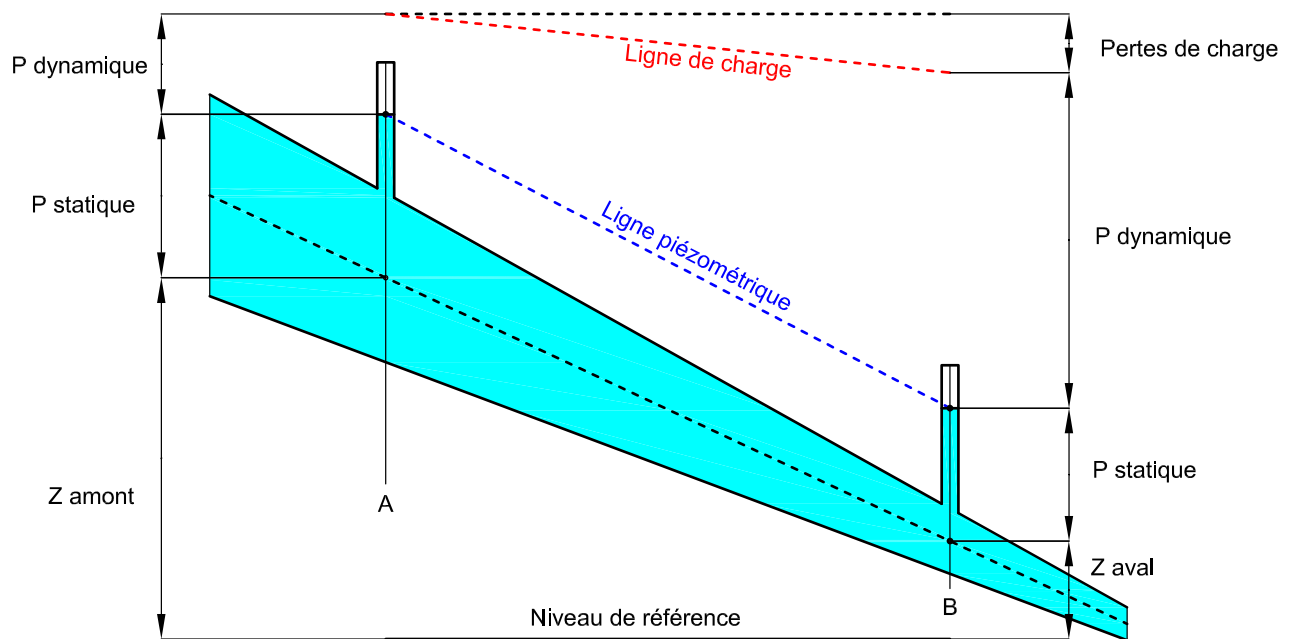


FIGURE 2.1 – Illustration du concept de charge hydraulique dans le cas d'un écoulement parallèle en conduite.

- $J_{AB}[m]$ est la perte de charge entre le point A et le point B, cela équivaut à l'énergie perdue lors de l'écoulement sur la distance parcourue.

Sur la Figure 2.1, quelques outils géométriques apparaissent.

Tout d'abord, la *ligne piézométrique* qui relie tous les points de pression statique nulle le long de la conduite. Dans le cas d'un écoulement en surface libre, cette ligne coïncide avec la surface de l'écoulement.

Ensuite, la *ligne de charge* est la ligne matérialisant les pertes de charge. En effet, l'écoulement, en s'établissant dans la conduite, perd de l'énergie au fur et à mesure de son avancée. Plusieurs éléments peuvent être des sources de pertes de charge. Deux grandes catégories de pertes de charge existent, elles se distinguent par leur origine.

1. Les *pertes de charges régulières* sont liées au frottement avec les parois du canal dans lequel l'écoulement s'établit. Ces pertes de charges surviennent dans tous les cas. Une fois que le liquide est en mouvement, de l'énergie est dissipée par frottement. L'intensité de cette perte est liée à plusieurs facteurs : la rugosité de la paroi du canal et ses dimensions, la longueur parcourue entre les deux points de référence et la vitesse de l'écoulement. La formule de Darcy simplifiée, donnant la perte de charge d'un écoulement de débit Q sur une longueur de conduite L , s'écrit :

$$J = KLQ^2 \quad (2.3)$$

Avec le coefficient K qui est une fonction du diamètre D et de la rugosité relative ϵ/D . Ce coefficient K peut être déterminé à l'aide de tables ou de diagrammes. Dans le cas simplifié exposé en figure 2.1, ce sont des pertes de charge régulières générées par du frottement qui sont illustrées par la ligne de charge.

2. Les *pertes de charge singulières* sont quant à elles provoquées par des événements ponctuels et singuliers comme son nom l'indique. Il faut savoir que toute perturbation de l'écoulement

induit une dépense en énergie pour revenir à un état stable. Cette dépense d'énergie ponctuelle prend sa source dans des événements tels que la traversée d'une vanne, d'un coude, d'une réduction de la section ou d'un élargissement, par exemple. Ces dernières sources ont été étudiées en profondeur et des formules empiriques ont pu être mises en place. Ces formules ont la forme générale suivante :

$$J = \xi \cdot \frac{V^2}{2g} \quad (2.4)$$

Où le coefficient ξ est lié au dispositif générant des pertes de charge.

Variations des écoulements à surface libre

Les écoulements à surface libre s'établissent dans les canaux de plusieurs manières différentes. Un récapitulatif des variantes va être exposé ici pour que les termes spécifiques à ces comportements ne posent pas de problème tout au long de ce TFE.

Les différentes hypothèses qui doivent être intégrées pour comprendre les développements des points suivants sont :

- L'écoulement doit être stationnaire. Celui-ci ne varie pas en fonction du temps.
- Par le principe de continuité, le débit est constant en toute section du canal.
- L'approche utilisée pour étudier l'écoulement est unidimensionnelle.
- L'écoulement est considéré comme étant parallèle au fond du lit. Les filets fluides sont parallèles entre eux et sont orientés dans la direction donnée par la pente du lit.
- L'écoulement est considéré comme étant turbulent. Le profil des vitesses peut donc être macroscopiquement simplifié comme étant constant sur toute la hauteur de la section étudiée.

Écoulement uniforme

Tout d'abord, il faut aborder l'état de référence d'un écoulement à surface libre. Cet état est dit "uniforme". Il correspond à un état stationnaire et surtout établi de l'écoulement, ce qui est lié à un profil de vitesse équivalent pour toute section du canal. Cette caractéristique induit également une profondeur et une section mouillée équivalente sur tout le canal. Pour illustrer l'équilibre d'un tronçon de canal, toutes les forces en présence ont été répertoriées sur le schéma de la Figure 2.2.

La force motrice, qui permet le déplacement de la masse d'eau, est liée à la composante du poids parallèle au fond du lit. La force de frottement, exercée par le frottement avec le lit de la rivière, s'applique dans la même direction mais dans le sens opposé au déplacement. L'écoulement établi ne subissant aucune accélération, l'équilibre des forces doit être respecté. Ce dernier s'écrit :

$$P\tau ds = \gamma A s_0 ds \quad (2.5)$$

Sachant que le terme de frottement est considéré comme étant proportionnel au carré de la vitesse, après simplification des longueurs ds et avoir développé le terme τ , on obtient :

$$PkV^2 = \gamma s_0 A \iff V = \sqrt{\frac{\gamma}{k} \cdot \frac{A}{P} \cdot s_0} = C \cdot \sqrt{i \cdot R} \quad (2.6)$$

Où R est le rayon hydraulique de l'écoulement égal au rapport de l'aire de la section mouillée sur le périmètre mouillé, i est la pente de fond du canal, C est le coefficient de Chézy valant $\sqrt{\frac{\gamma}{k}}$ lié donc aux propriétés du liquide en présence et du coefficient de friction.

Un tel écoulement implique que la pente de la ligne de charge, dénotée le plus souvent par la

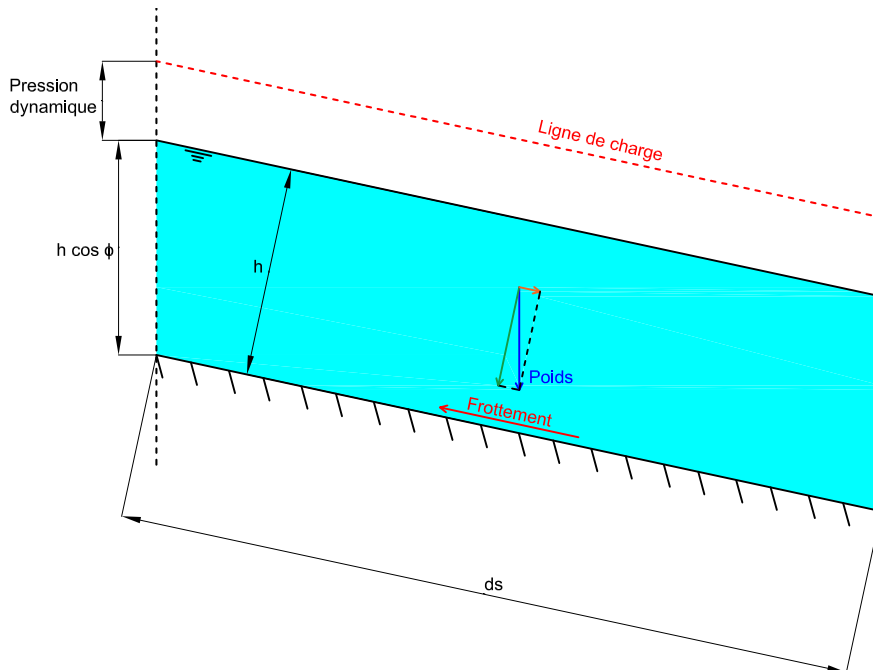


FIGURE 2.2 – Equilibre des forces agissant sur un tronçon d'écoulement uniforme.

lettre "j", et la pente de la ligne de fond, dénotée le plus souvent par la lettre "i", soient égales. La ligne de fond est donc parallèle à la ligne de charge. Par conséquent, la charge de l'écoulement ne varie pas le long du canal. En effet, le terme de pression dynamique qui vaut $\frac{V^2}{2g}$ reste constant tout comme la hauteur d'eau. Pour rappel, la charge équivaut la distance séparant la ligne de fond et la ligne de charge dans ce cas.

Écoulement graduellement varié

Des hypothèses supplémentaires à celles énoncées au début de ce point 2.1.1 sont nécessaires :

- Les pertes de charge à prendre en compte sont identiques à celles générées dans l'écoulement uniforme, à débit et profondeur équivalents.
- Pentes de fond faibles.
- Section du canal prismatique

A nouveau, un schéma est présenté sur la figure 2.3 dans le but d'illustrer au mieux les caractéristiques avancées.

Sur ce schéma, apparaissent toutes les lignes caractéristiques permettant de distinguer ce cas d'écoulement graduellement varié du cas d'un écoulement uniforme. L'étude des pentes de chacune de ces droites va être déterminante. En effet, en vert, sont tracées les lignes liées à un écoulement uniforme compte tenu des pertes de charge données par la ligne de charge (en rouge). Pour rappel, la ligne de fond, la ligne d'eau et la ligne de charge sont parallèles dans le cas d'un écoulement uniforme, elles ont donc la même pente.

Or, ici, la pente de fond est plus forte que la pente de la ligne de charge, ce qui se traduit par des forces de frottement moins importantes comparées à la force motrice (composante du poids parallèle à la ligne de fond). Le résultat est une accélération de l'écoulement ayant un impact sur les sections d'étude suivantes. Le procédé d'analyse est itératif et est donc répété sur chaque section. En effet, par conservation de la masse, l'accélération induit une vitesse plus élevée et un abaissement de la hauteur d'eau pour garder un débit constant. Cela donne au tronçon étudié suivant un poids plus faible, et donc une force motrice moins importante. De plus, les frottements étant proportionnels au carré de la vitesse, celle-ci grandissant, les frottements sont amplifiés par la suite. Donc plus on s'éloigne de la situation de déséquilibre à l'amont, plus les forces tendent

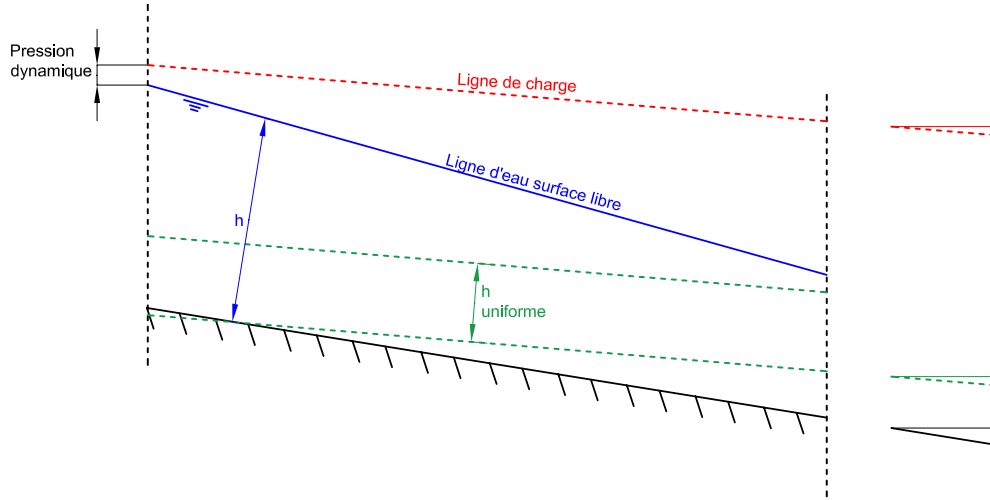


FIGURE 2.3 – Schéma d'un écoulement graduellement varié.

vers l'équilibre relatif à l'écoulement uniforme.

D'autres paramètres entrent en ligne de compte pour déterminer le comportement de l'écoulement. Ceux-ci sont déterminés par rapport à l'énergie spécifique de l'écoulement. Cette énergie spécifique est une variante de la charge hydraulique de l'écoulement, elle s'écrit :

$$E = h \cdot \cos(\alpha) + \frac{V^2}{2g} \quad (2.7)$$

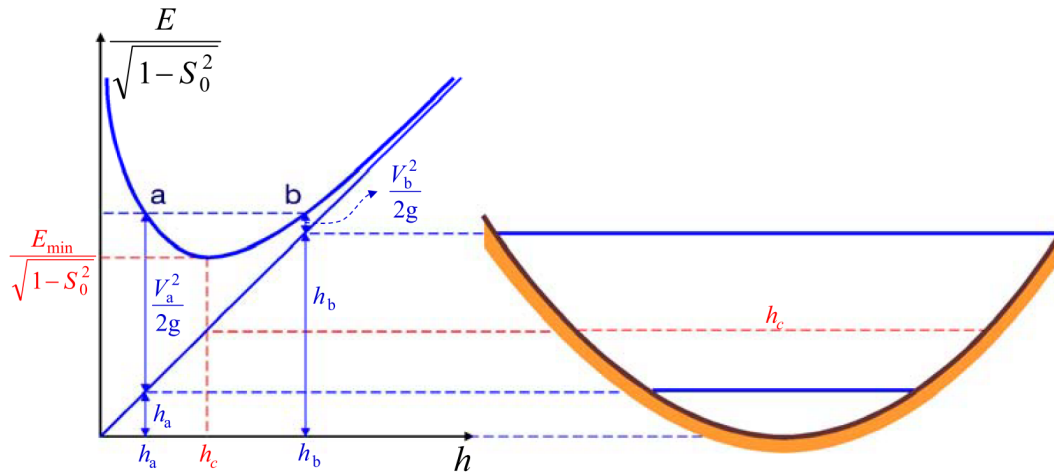


FIGURE 2.4 – Graphique de l'énergie spécifique en fonction de la hauteur d'eau pour un débit constant. Source : [Soares-Frazao, 2015]

Si l'on étudie, pour un débit fixé, la relation entre l'énergie spécifique et la hauteur d'eau, on obtient le graphe de la figure 2.4. L'énergie spécifique totale est une fonction qui s'étend entre deux asymptotes (verticale et oblique). Les comportements extrêmes auxquels elles font référence sont récapitulés ci-dessous, à un débit Q fixé correspond :

- Une hauteur infinie lorsque la vitesse, donnée par l'écart entre les deux courbes bleues, tend vers 0. (Asymptote oblique)

- Une vitesse infinie lorsque la hauteur h tend vers zéro. (Asymptote verticale)

Vu l'expression de l'énergie spécifique, cette dernière tend vers l'infini dans ces deux cas. Le point le plus important est le minimum de la fonction. En effet, il correspond à l'énergie spécifique minimum à mettre en oeuvre pour qu'un écoulement de débit fixé Q s'établisse. A cette énergie minimum correspond une hauteur d'eau appelée la hauteur critique h_c .

Analytiquement, cette recherche du minima de la fonction aboutit à l'expression :

$$\frac{Q^2 L}{g A^3} = \sqrt{1 - S_0^2} \longleftrightarrow h_c^3 = \frac{Q^2}{g \cdot \sqrt{1 - S_0^2}} \cdot \frac{l + 2 \cdot p \cdot h_c}{(l + p h_c)^3} \quad (2.8)$$

La formule étant implicite, un processus itératif est nécessaire. Cette expression est la définition même de la hauteur critique.

D'autre part, il est important également d'expliquer le concept qui se cache derrière la célérité c , aussi appelée *vitesse critique* V_c . La célérité est la vitesse avec laquelle l'information se propage dans un milieu. Elle est donnée par la formule :

$$c = \sqrt{gh} \quad (2.9)$$

Par exemple, si une goutte tombe à la surface d'un lac, elle provoque des ondes qui se propagent dans toutes les directions à la vitesse de la célérité. Autrement dit, de manière analogue, si une perturbation est introduite dans un écoulement, celle-ci se déplace vers l'amont et l'aval à la même vitesse relative à l'écoulement. Dès lors, il est important de déterminer la vitesse de l'écoulement. En effet, si l'écoulement est plus rapide que la vitesse de propagation de l'information, celle-ci ne pourra pas remonter vers l'amont, L'écoulement sera, dans ce cas-là, dit *supercritique*. Alors que dans le cas d'un écoulement plus lent, où la remontée de l'information est possible, on parle d'écoulement dit *subcritique*. Il est important de savoir qu'un écoulement établi à la vitesse critique V_c a une hauteur d'eau égale à la hauteur critique h_c également. Le type d'écoulement peut être identifié en analysant la hauteur uniforme, car le débit est constant. Si la hauteur uniforme est supérieure à la hauteur critique, l'écoulement est subcritique. A l'opposé, si cette hauteur uniforme est inférieure à h_c , l'écoulement est supercritique.

A fortiori, un écoulement supercritique est un écoulement régi par des conditions de hauteur imposées par l'amont. Alors que les conditions d'aval régissent l'écoulement subcritique.

Ces notions sont évidemment primordiales pour comprendre l'écoulement et savoir quels sont les paramètres ayant un impact sur ce dernier.

Écoulement brusquement varié

Dernière partie de rappels sur les écoulements en canal, elle n'en reste pas moins importante. En effet, il va être question de ressaut hydraulique qui peut être défini comme étant une élévation soudaine du niveau de la surface libre. Cette surélévation a une particularité : elle s'effectue d'une hauteur d'eau inférieure à la hauteur critique de l'écoulement à un niveau de surface libre supérieur à celle-ci. La surface libre traverse la hauteur critique durant ce changement brusque. De plus, ce ressaut a la particularité de se faire à énergie spécifique constante : la hauteur d'eau h_2 est appelée la *hauteur conjuguée* du niveau d'eau h_1 . Toutes ces notions sont reprises sur le schéma présent sur la Figure 2.5.

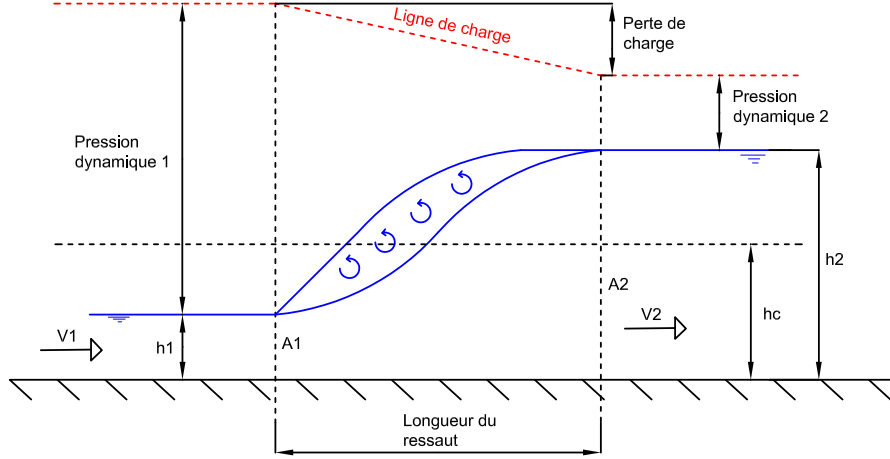


FIGURE 2.5 – Schéma d'un ressaut hydraulique. Source : [Soares-Frazao, 2015]

2.1.2 Équations du modèle à porosité

Les équations d'écoulement dans un milieu poreux ont été étudiées dans les ouvrages de Defina et al. ([Defina et al., 1994]) pour la première fois. Elles ont été développées et améliorées par une série d'hydrauliciens dont Bates ([Bates, 2000]) et Lhomme ([Lhomme, 2006]). Plusieurs objets mathématiques ont été introduits et seront étudiés ici. Par exemple, un champ de porosité anisotrope et un tenseur illustrant la traînée exercée par les bâtiments sur l'écoulement, et les pertes de charge qui en découlent.

Les équations qui gouvernent le modèle à porosité s'écrivent :

$$\frac{\partial \phi_s h}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} (\phi_x h U) + \frac{\partial}{\partial y} (\phi_y h V) = 0 \quad (2.10)$$

$$\frac{\partial \phi_s U h}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\phi_x h U^2 + \phi_x \frac{gh^2}{2} \right) + \frac{\partial}{\partial y} (\phi_y h UV) = S_{0x} + S_{fx} \quad (2.11)$$

$$\frac{\partial \phi_s V h}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} (\phi_x h UV) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\phi_y h V^2 + \phi_y \frac{gh^2}{2} \right) = S_{0y} + S_{fy} \quad (2.12)$$

Où U et V sont les vitesses dans les directions x et y respectivement, h la hauteur d'eau et g l'accélération gravitationnelle.

La définition des composantes ϕ_x et ϕ_y de la porosité dite de transport est liée à la capacité qu'a un écoulement de se développer dans les directions x et y , respectivement. Ces termes de porosité tiennent compte de caractéristiques géométriques de la ville comme l'anisotropie du réseau de rues, et engendrent des directions préférentielles dans l'écoulement. La porosité dite de *stockage* ϕ_s est quant à elle définie comme étant le rapport de l'aire disponible pour l'établissement de l'écoulement et l'aire totale de la zone étudiée :

$$\phi_s = \frac{A_{0f}}{A_0}$$

S_{0x} et S_{0y} sont les pentes du lit dans les directions x et y , respectivement. Elles sont donc étroitement liées aux caractéristiques géométriques et aux porosités de transport.

$$S_{0x} = -\phi_s g h \frac{\partial z_b}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\phi_x \frac{gh^2}{2} \right) - \phi_s \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{gh^2}{2} \right) \quad (2.13)$$

$$S_{0y} = -\phi_s g h \frac{\partial z_b}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial y} \left(\phi_y \frac{g h^2}{2} \right) - \phi_s \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{g h^2}{2} \right) \quad (2.14)$$

S_{fx} et S_{fy} sont les pentes illustrant les pertes de charge liées au frottement dans les directions x et y resp. Ces pertes de charge sont provoquées par le frottement contre les parois et le fond du lit, ainsi que par les tourbillons générés par les bâtiments et les carrefours. Elles s'écrivent :

$$\begin{bmatrix} S_{fx} \\ S_{fy} \end{bmatrix} = -h \sqrt{U^2 + V^2} \left(\frac{n^2}{h^{4/3}} + \frac{1}{2gh} \right) \begin{bmatrix} M_{xx} & 0 \\ 0 & M_{yy} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U \\ V \end{bmatrix} \quad (2.15)$$

Où n est le coefficient de Manning, relatif à la surface de frottement, M_{xx} et M_{yy} sont les composantes tourbillonnaires.

En utilisant des objets mathématiques comme les VER¹, les équations de conservation peuvent être adaptées. Dans notre cas, le milieu urbain est représenté comme un milieu poreux plan. Les buildings qui font obstacle à l'écoulement peuvent être de sections quelconques, mais doivent avoir des frontières verticales et ne peuvent être submergés. Les frontières inférieures et supérieures de l'écoulement sont respectivement le fond et la surface de l'eau.

Une fois ces hypothèses vérifiées, les équations de conservation en milieu poreux se définissent comme suit :

- Conservation de la masse

$$\phi \frac{\partial \langle h \rangle_A^f}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\phi \langle h \rangle_A^f \langle V_j \rangle_A^f \right) = 0 \quad (2.16)$$

- Conservation de la quantité de mouvement

$$\begin{aligned} & \phi \frac{\partial \langle h \rangle_A^f \langle V_i \rangle_A^f}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\phi \langle h \rangle_A^f \langle V_i \rangle_A^f \langle V_j \rangle_A^f \right) + \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\phi \frac{g \left(\langle h \rangle_A^f \right)^2}{2} \right) + \frac{\partial}{\partial x_j} (\phi d_{ij}) \\ &= \frac{g \left(\langle h \rangle_A^f \right)^2}{2} \frac{\partial \phi}{\partial x_i} - \phi g \langle h \rangle_A^f \frac{\partial z_b}{\partial x_i} + \frac{1}{A_0} \int_{C_{fs,w}} \frac{g(\delta h)^2}{2} n_i dC - \phi g \langle h \rangle_A^f S_{fi} \end{aligned} \quad (2.17)$$

Les éléments sur lesquels nous allons principalement nous concentrer sont ceux liés à la porosité ϕ et aux pertes de charge S_{fi} , elles-mêmes définies par :

$$S_{fi} = \frac{n^2 \langle V_i \rangle_A^f}{R_h^{4/3}} |\langle \mathbf{V} \rangle_A^f| \quad (2.18)$$

Où le coefficient n est le paramètre de frottement de Manning-Strickler exprimé en $s/m^{1/3}$ et R_h est le rayon hydraulique défini comme étant le rapport du volume d'eau sur l'aire d'eau en contact avec le canal à l'échelle du VER, cela se calcule :

$$R_h = \frac{V_f}{A_{fs}} = \frac{\phi \langle h \rangle_A^f A_0}{A_{fs,b} + A_{fs,w}} = \frac{\phi \langle h \rangle_A^f}{\frac{A_{fs,b}}{A_0} + \frac{A_{fs,w}}{A_0}} = \frac{\phi \langle h \rangle_A^f}{\phi + \langle h \rangle_A^f \frac{C_{fs,w}}{A_0}} \quad (2.19)$$

1. **V**olume **É**lémentaire **R**éprésentatif ou encore volume minimum d'homogénéisation : volume minimum sur lequel le calcul de la porosité donne une valeur représentative de la moyenne de la porosité totale du milieu.

2.2 Recherches précédentes

Ce TFE s'inscrit directement dans la lignée des recherches menées dans le cadre d'une thèse de doctorat à l'UCL ([Velickovic, 2012]). Cette sous-section reprend les éléments importants de cette thèse ayant servi de base à l'élaboration de ce TFE. Parmi ceux-ci, figurent le dispositif expérimental du canal et son modèle numérique, les configurations de villes étudiées, et les paramètres de simulation tels que les conditions limites et initiales, ou encore le choix du champ de porosité et du tenseur de traînée.

2.2.1 Configurations de villes considérées

Des essais ont été effectués dans un canal en laboratoire, illustré à la Figure 2.6. Des modèles réduits de villes idéalisées ont permis d'obtenir des jeux de données expérimentales pour différents réseaux de rues. Ces données expérimentales font office de référence.

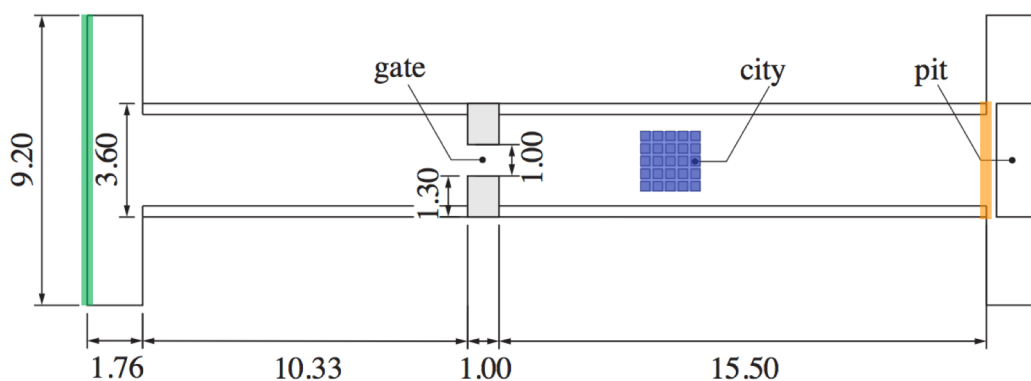


FIGURE 2.6 – Dispositif expérimental et dimensions du canal en mètres. En vert : entrée du canal (amont). En bleu : emplacement de la ville. En orange : sortie du canal (aval).

Les deux grandes variables autour desquelles s'articulent les configurations de ville sont : la dimension des rues et l'angle formé par les rues et l'écoulement. Ainsi, on distingue les cas-test de ville alignée et inclinée, et les cas-test des réseaux isotropes et anisotropes. Les cas alignés sont illustrés à la Figure 2.7 et ceux positionnés en oblique d'un angle de 22.5° par rapport au sens de l'écoulement sont illustrés à la Figure 2.8. La configuration de réseau qui présente des rues plus larges (0,135 m) dans le sens de l'écoulement est considérée comme le cas anisotrope large, alors que le cas qui présente des rues plus étroites (0,0675 m) dans le sens de l'écoulement est considéré comme le cas anisotrope étroit. Le cas isotrope présente des rues de même largeur (0,1 m) dans les deux directions. Les bâtiments quant à eux ont une taille fixe quelque soit la configuration de la ville et sont représentés par des carrés de 0,3 m de côté.

Les résultats des simulations permettent d'obtenir les profils de hauteur d'eau selon l'axe souhaité. Les données expérimentales étant disponibles au sein des rues situées dans la direction de l'écoulement, ce sont dans ces rues que les profils de hauteur sont construits avant d'être analysés. Les rues sont numérotées de bas en haut comme illustré sur la Figure 2.9.

2.2.2 Débits et conditions de hauteur d'eau à l'aval

Les débits étudiés dans les différents cas de figure sont tirés des expériences effectuées en laboratoire. A chaque débit, qui est imposé en condition limite à l'amont, correspond en sortie de canal une condition de hauteur d'eau, qui est imposée en condition limite à l'aval. Ceci est illustré à la Figure 2.10. Ces hauteurs d'eau à l'aval ont été mesurées expérimentalement pour

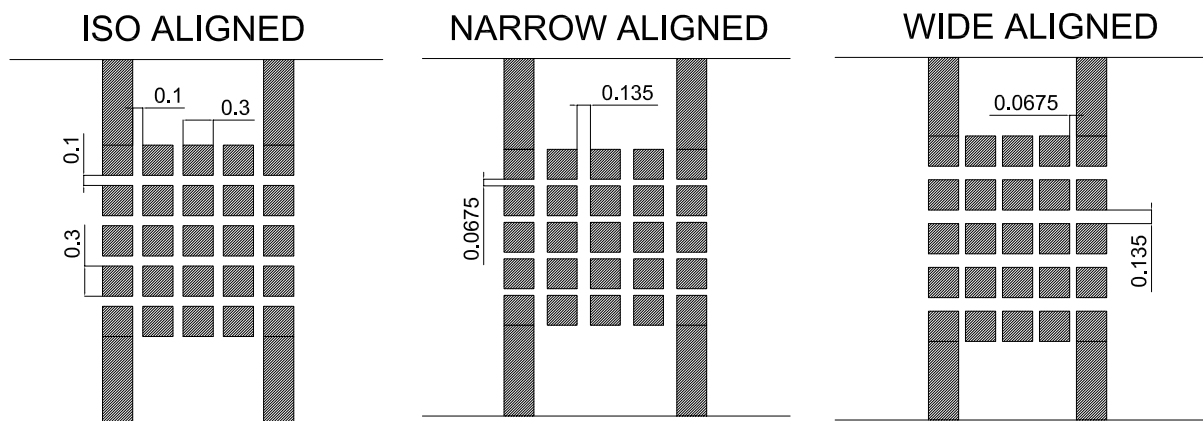


FIGURE 2.7 – Configurations des villes alignées, de gauche à droite : isotrope, anisotrope étroite et anisotrope large. Les dimensions sont indiquées en mètres.

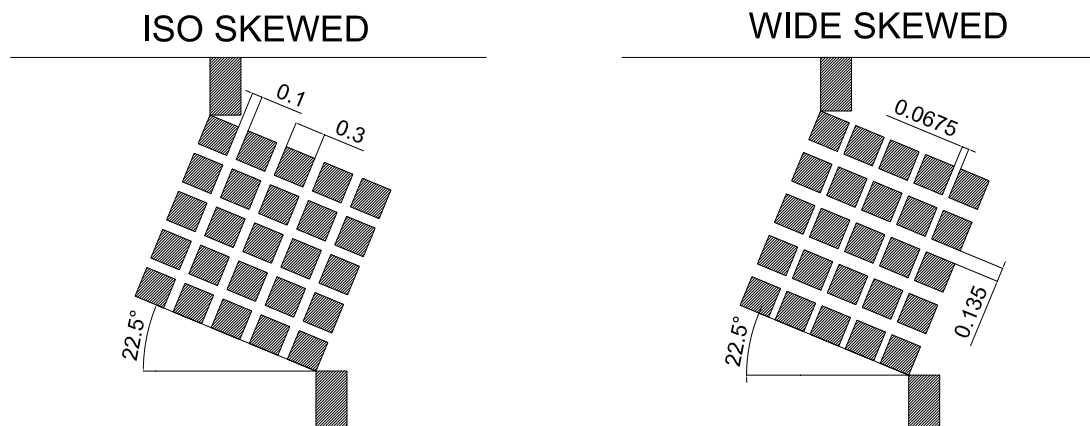


FIGURE 2.8 – Configurations des villes inclinées : à gauche le cas isotrope et à droite le cas anisotrope large. Les dimensions sont indiquées en mètres.

chacune des configurations présentées de ville. Les tableaux 2.1 à 2.5 récapitulent les valeurs des débits et les conditions à l'aval correspondantes pour toutes les configurations considérées. Les termes utilisés pour qualifier le type de condition en présence est lié au type d'écoulement au droit du déversoir en bout de canal. Deux cas sont possibles et représentés sur la Figure 2.11 :

1. Le réservoir à l'aval du canal n'est pas rempli, ce qui induit une chute d'eau au déversoir. Ce phénomène est caractérisé par une hauteur d'eau au droit du déversoir égale à la hauteur critique (voir sous-section 2.1.1). La condition sera dite *critique*.
2. Le réservoir à l'aval du canal est rempli jusqu'à une certaine hauteur dictée par la quantité d'eau présente dans le circuit. Cette hauteur est a fortiori plus importante que la hauteur critique. Elle sera qualifiée dès lors de condition *subcritique*.

Réaliser une simulation numérique nécessite d'imposer des conditions limites aux frontières, mais aussi des conditions initiales sur tout le maillage et donc sur chaque cellule de calcul qui compose ce maillage. Un exemple de maillage utilisé est illustré à la Figure 2.10.

TABLE 2.1 – Configuration isotrope alignée : condition limite de débit à l’amont, de hauteur d’eau à l’aval et le type de condition correspondante.

Configuration isotrope alignée		
$Q_{amont}(l/s)$	$h_{aval}(m)$	Type de condition
43	0.134	Subcritique
75	0.065	Subcritique
103	0.05	Hauteur critique

TABLE 2.2 – Configuration anisotrope étroite alignée : condition limite de débit à l’amont, de hauteur d’eau à l’aval et le type de condition correspondante.

Configuration anisotrope étroite alignée		
$Q_{amont}(l/s)$	$h_{aval}(m)$	Type de condition
25	0.129	Subcritique
35	0.09	Subcritique
50	0.031	Hauteur critique

TABLE 2.3 – Configuration anisotrope large alignée : condition limite de débit à l’amont, de hauteur d’eau à l’aval et le type de condition correspondante.

Configuration anisotrope large alignée		
$Q_{amont}(l/s)$	$h_{aval}(m)$	Type de condition
52	0.135	Subcritique
75	0.10	Subcritique
99	0.09	Hauteur critique

TABLE 2.4 – Configuration isotrope inclinée : condition limite de débit à l’amont, de hauteur d’eau à l’aval et le type de condition correspondante.

Configuration isotrope inclinée		
$Q_{amont}(l/s)$	$h_{aval}(m)$	Type de condition
75	0.115	Subcritique
100	0.065	Subcritique

TABLE 2.5 – Configuration anisotrope large inclinée : condition limite de débit à l’amont, de hauteur d’eau à l’aval et le type de condition correspondante.

Configuration anisotrope large inclinée		
$Q_{amont}(l/s)$	$h_{aval}(m)$	Type de condition
75	0.105	Subcritique

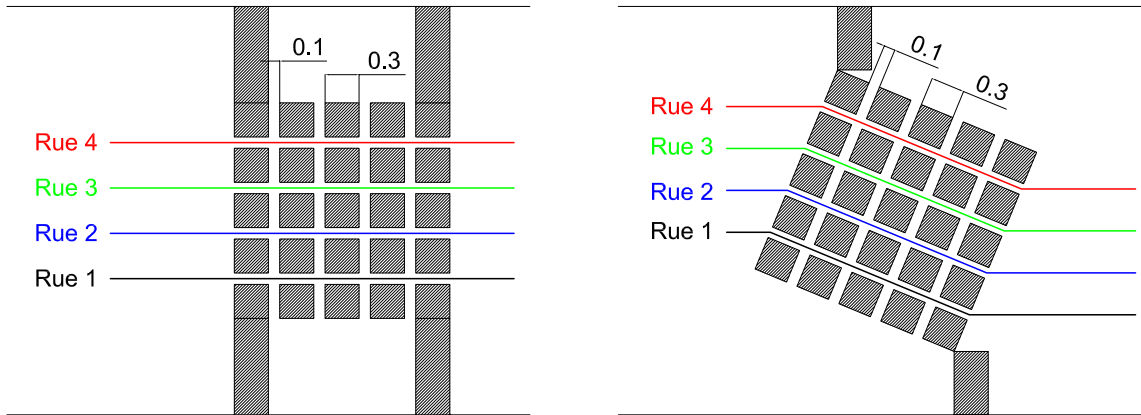


FIGURE 2.9 – Numérotation des rues pour les cas aligné à gauche et incliné à droite. Les dimensions sont indiquées en mètres.

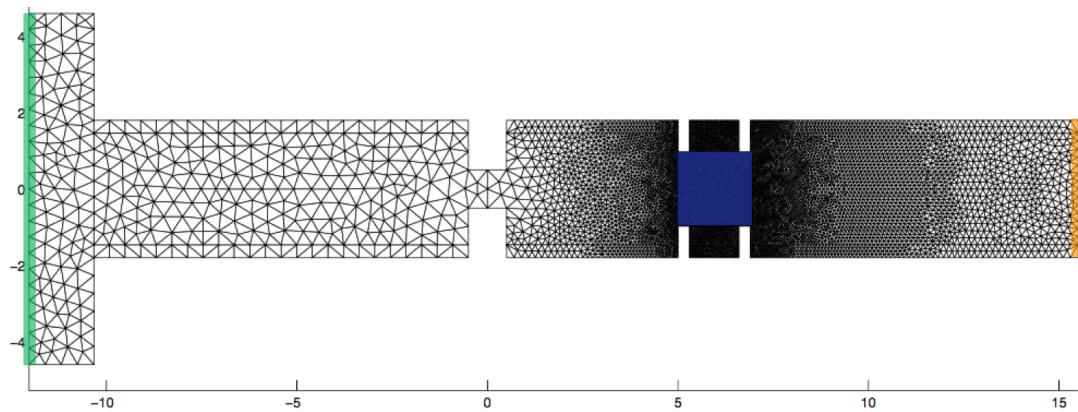


FIGURE 2.10 – Maillage du modèle numérique du canal. En vert : condition limite sur le débit à l'amont. En bleu : emplacement de la ville. En orange : condition limite sur la hauteur d'eau à l'aval.

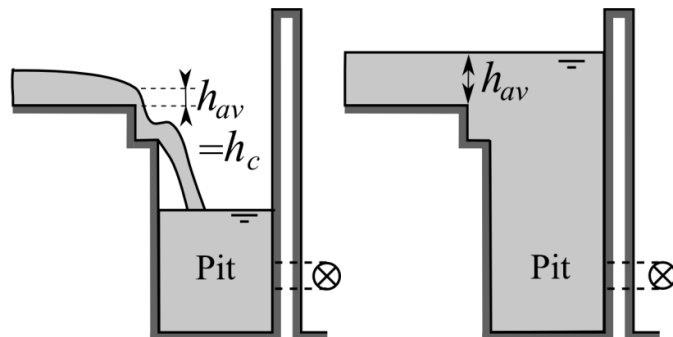


FIGURE 2.11 – Illustration des types de condition de hauteur à l'aval : condition critique (gauche) et condition subcritique (droite) [Velickovic, 2012]

Les conditions initiales utilisées pour toutes les configurations de villes sont les suivantes :

- Une hauteur d'eau de 10 *cm*
- Un débit de 0.0001 m^3/s

Cela permet de fixer un état de départ, hydrauliquement stable, à partir duquel les calculs sont développés, mais également d'accélérer la convergence vers la solution de régime.

2.2.3 Champs de porosité

Plusieurs types de champs de porosité ont été envisagés dans les différents travaux réalisés sur le sujet. On peut les répartir en trois catégories de modèles :

- Le modèle à porosité unique
- Le modèle à porosité multiple
- Le modèle à porosité macroscopique (subgrid).

Le modèle à porosité unique ne considère qu'une seule valeur de porosité, dite *de stockage*, qui est appliquée homogènement à toute la zone urbaine. Admettons une porosité de stockage valant $\phi = 0.4375$, ce qui pour rappel représente le rapport entre la surface disponible pour l'établissement de l'écoulement (les rues) et l'aire totale de la ville, la porosité passe donc d'une valeur unitaire dans le canal à une valeur de 0.4375 sans transition. Ceci est illustré à la Figure 2.12. C'est ce type de champ de porosité qui est utilisé dans la thèse [Velickovic, 2012], avec cependant, dans certains cas, une transition linéaire à la frontière de la ville.

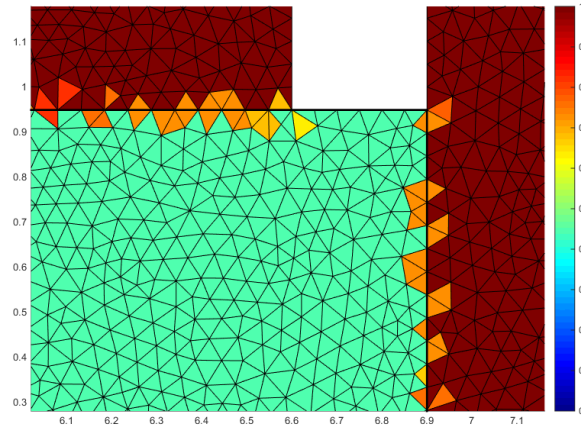


FIGURE 2.12 – Modèle à porosité unique dans la ville (ici $\phi = 0.4375$).

Le modèle à porosité multiple consiste quant à lui en la superposition de plusieurs champs de porosité, chacun étant associé à une direction bien précise des rues. Ils sont donc indépendants les uns des autres. L'idée est d'avoir, en prenant par exemple le cas d'un réseau de rues perpendiculaires, une valeur de porosité associée à chaque direction principale du réseau : ϕ_x et ϕ_y dans les directions x et y respectivement.

Enfin, le modèle de porosité macroscopique, ou *subgrid*, est un compromis entre le modèle détaillé et le modèle à porosité unique. La porosité de chaque cellule de calcul est déduite individuellement compte tenu de la surface de la cellule disponible pour l'écoulement. Ce modèle tient donc en partie compte des détails de la géométrie de la ville. C'est ce type de champ de porosité qui a été exploré dans le cadre de ce TFE.

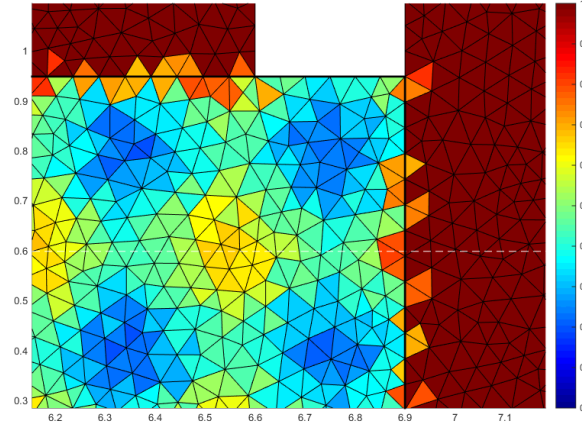


FIGURE 2.13 – Modèle de porosité macroscopique. Les cellules situées aux positions supposées des bâtiments ont une porosité plus faible, et sont marquées en bleu.

2.2.4 Tenseur de traînée

Dans [Velickovic, 2012], un tenseur de traînée a été utilisé pour le calcul des pertes de charge. Ces dernières sont essentiellement dues aux expansions et rétrécissements successifs rencontrés par l'écoulement. Ce phénomène est illustré à la Figure 2.14. Dans le cas d'une ville isotrope alignée avec la direction de l'écoulement, il est symétrique et vaut :

$$\underline{D} = \begin{bmatrix} D_{xxxx} & D_{xxxy} & D_{xxyy} \\ D_{xyxx} & D_{xyxy} & D_{xyyy} \\ D_{yyxx} & D_{yyxy} & D_{yyyy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.2 & 0 & 3 \\ 0 & 0 & 0 \\ 3 & 0 & 0.2 \end{bmatrix}$$

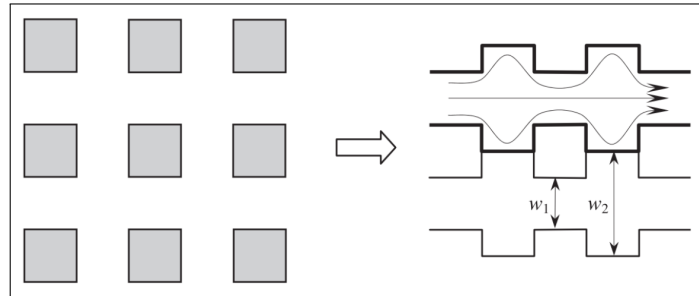


FIGURE 2.14 – Plan d'une ville idéalisée et succession d'élargissements et de rétrécissements rencontrés par l'écoulement. Source : [Guinot and Soares-Fraza, 2006]

Dans le cas d'une ville inclinée par rapport à la direction de l'écoulement, ce tenseur doit refléter les effets dus aux redistributions de vitesse qui prennent place aux carrefours. Cela induit des pertes de charge supplémentaires. Ceci est illustré à la Figure 4.29. Les éléments qui le composent se retrouvent donc dans les formules suivantes de pertes de charge :

$$\Delta H_x = \frac{\phi a_{pdc} V}{2g} (D_{xxxx} V_x + D_{xxxy} V_y)$$

$$\Delta H_y = \frac{\phi a_{pdc} V}{2g} (D_{xxxy} V_x + D_{xxyy} V_y)$$

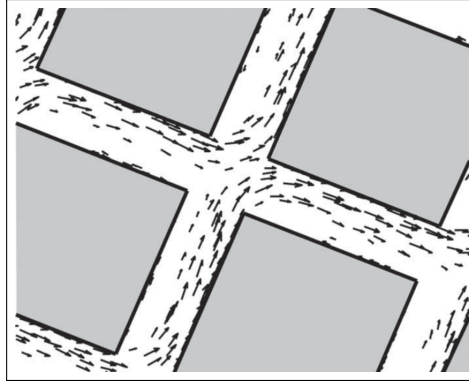


FIGURE 2.15 – Quand le sens de l’écoulement n’est pas dans l’axe des rues, une redistribution de vitesse s’opère aux carrefours, causant des pertes de charge supplémentaires. Source : [Soares-Frazao et al., 2016]

2.2.5 Temps de simulation

Le dernier paramètre présenté dans ce chapitre 2 est la durée de simulation. L’écoulement doit être étudié sur une période suffisamment longue pour garantir des résultats objectifs. Pour cela, l’écoulement doit être à l’état stationnaire. Cela signifie qu’il n’y a plus de variation de l’écoulement dans le temps. Celui-ci est considéré comme stable.

La vérification sur base des données fournies dans [Velickovic, 2012] a donné le graphe de la Figure 2.16.

Le débit a un effet sur le temps de simulation minimum permettant d’obtenir des résultats fiables et assez précis. Pour un débit de 103l/s , l’écart est plus important initialement, même si la convergence est assez rapide vers une valeur de l’ordre des 26.5cm . L’écart de hauteur entre les résultats fournis à 450s et ceux fournis à 500s est d’environ 1mm , ce qui donne une erreur relative de 3% sur un intervalle de 50s . Pour un débit de 75l/s , l’écart entre les temps 450s et 500s descend même à 0.5mm , soit une erreur relative de 2% sur un intervalle de 50s .

Il a donc été décidé de garder cette durée de simulation de 500s tout au long de l’étude.

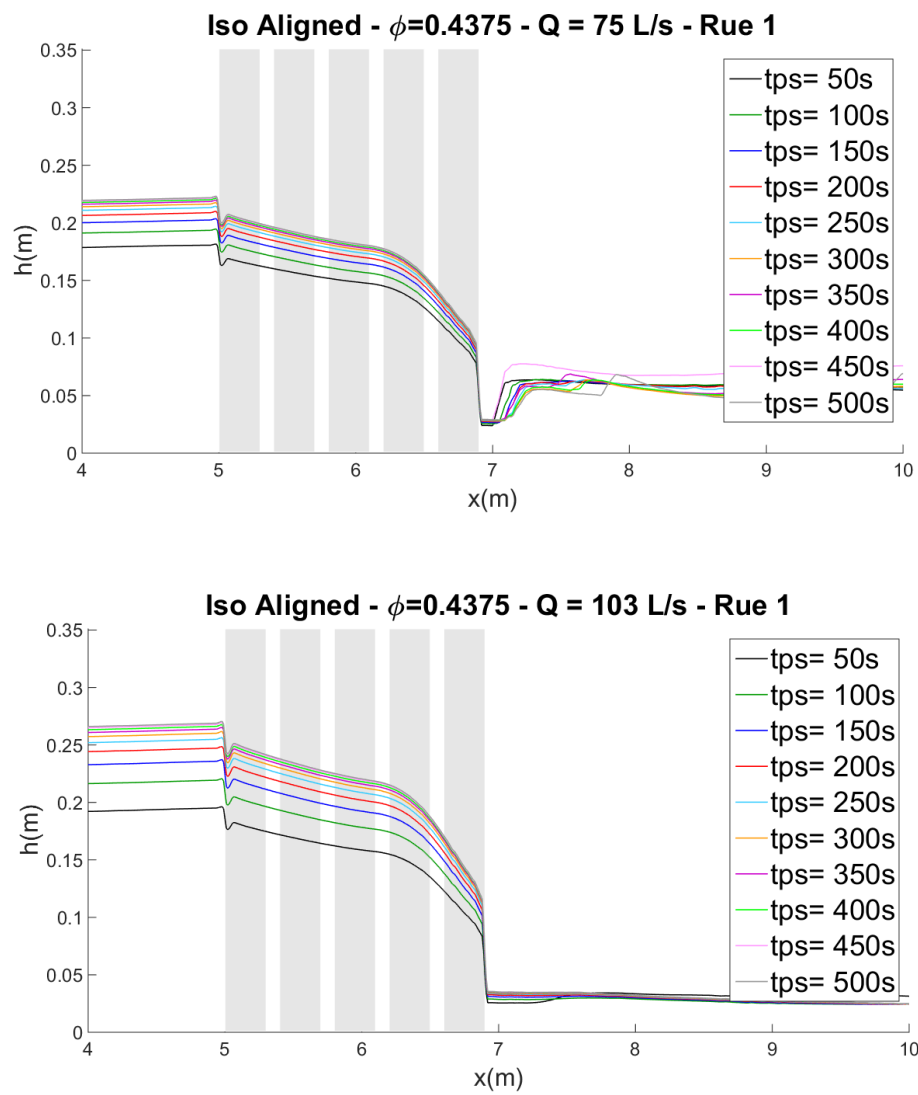


FIGURE 2.16 – Graphes des hauteurs d'eau permettant de voir l'influence du temps de simulation sur les résultats (75 et 103 l/s).

Chapitre 3

Champs de porosité

Le travail de recherche et de développement du modèle à porosité commence par l’approfondissement des possibilités qu’offrent les différents types champs de porosité. En effet, dans [Velickovic, 2012], les types de champs de porosité choisis sont ceux à porosité unique, avec ou sans transition (linéaire et bilinéaire). Or ceux-ci ont un impact limité sur les équations du modèle à porosité étant donné que les dérivées spatiales de la porosité sont nulles. C’est pourquoi les premières simulations ont été réalisées avec des champs de porosité macroscopique, en gardant systématiquement les mêmes valeurs pour le tenseur de traînée. Cela permet d’associer plus facilement les champs de porosité et leurs effets sur l’écoulement, sans que des variations du tenseurs de traînée ne viennent perturber l’analyse. Ce dernier sera étudié plus tard.

Ce chapitre présente les limites des champs de porosité utilisés dans [Velickovic, 2012]. Les paramètres de simulation y sont également repris. Finalement, ce chapitre est essentiellement constitué des descriptions des champs de porosité utilisés dans ce TFE, ainsi que des analyses correspondantes des résultats obtenus pour différentes configurations de ville.

3.1 Généralités

Le champ de porosité utilisé jusqu’à présent restait relativement basique. Dans tous les cas, la porosité était constante dans la ville et valait le rapport de la surface disponible pour l’écoulement sur l’aire totale de la zone étudiée. Les différentes configurations de villes décrites dans la section 2.2.1 présentent toutes la même superficie occupée par les rues, ainsi que la même superficie occupée par les bâtiments. Elles ont donc toutes une porosité de 0.4375. Les Figures 3.1 et 3.2 illustrent ce champ de porosité. Pour rappel, les cellules situées hors de la zone urbaine ont une porosité unitaire. Des variantes avec des transitions plus ou moins douces aux frontières ont également été implémentées.

L’impact d’un tel champ sur les équations de conservation (eq. 2.16 et 2.17) est limité puisque les termes $\frac{\partial \phi}{\partial x}$ et $\frac{\partial \phi}{\partial y}$ sont nuls pour les cellules au sein de la ville, la porosité y étant constante. Certains membres de ces équations ne sont alors pas pris en compte.

La première approche utilisée pour déduire un champ de porosité représentant plus fidèlement le comportement de l’écoulement a été d’analyser les données expérimentales collectées dans [Velickovic, 2012] et illustrées à la Figure 3.3. En effet, dans un premier temps, des tendances peuvent être dégagées intuitivement.

Quelques éléments peuvent être mis en avant visuellement. Le niveau d’eau en amont de la ville est significativement plus haut qu’à l’aval de la ville, il descend brusquement dès l’entrée dans la zone urbaine. La ville est un obstacle qui empêche l’écoulement de s’établir correctement, tel un barrage devant lequel l’eau s’accumule.

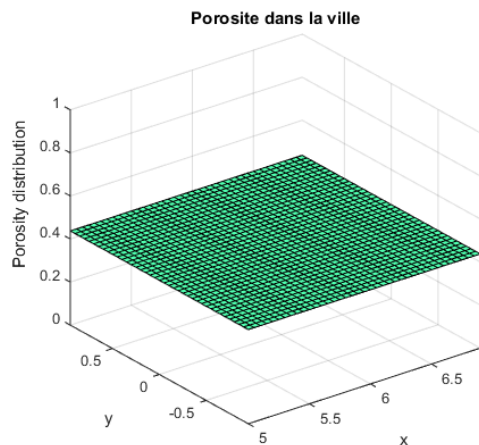


FIGURE 3.1 – Champ de porosité constant dans la ville.

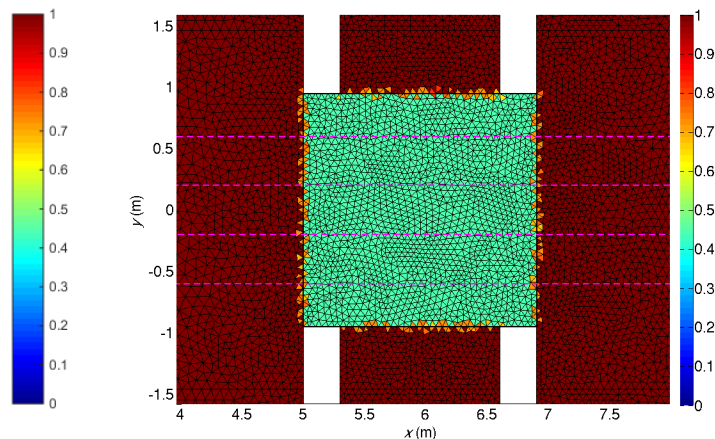


FIGURE 3.2 – Champ de porosité constant intégré au maillage du canal. Les 4 rues sont indiquées en rose.

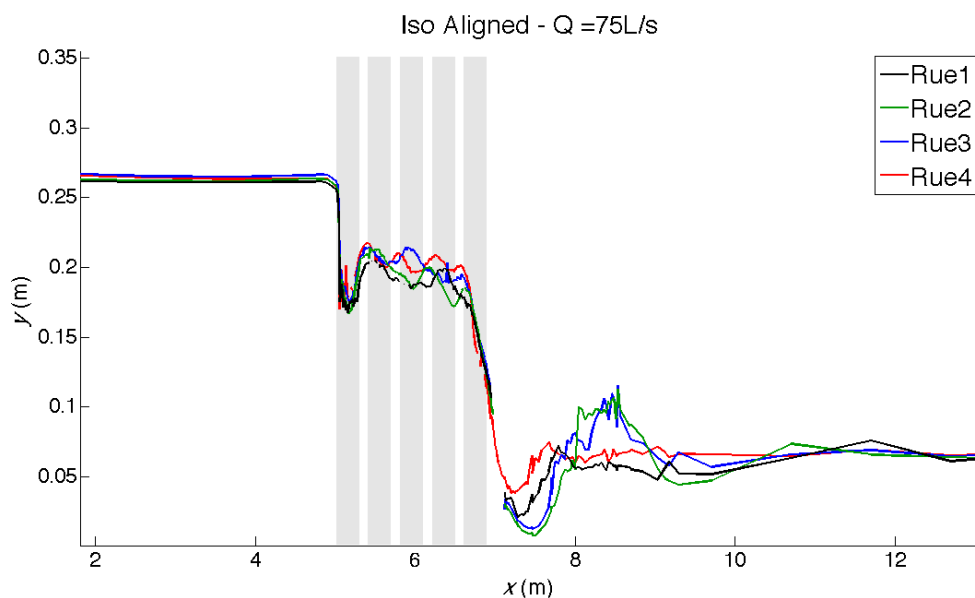


FIGURE 3.3 – Profil de la hauteur d'eau mesurée expérimentalement dans les quatre rues d'une ville isotrope alignée. Les bâtiments sont représentés en gris.

Au sein de la ville, des petites oscillations de la hauteur d'eau sont présentes. Cela s'explique par l'effet des élargissements et rétrécissements successifs que subit l'écoulement, à cause des carrefours (Figure 2.14 du chapitre précédent).

L'écoulement s'étant grossièrement établi dans la ville, milieu dans lequel les pertes de charge dues aux obstacles sont importantes, il retrouve ensuite le canal, milieu où les pertes de charge sont moindres. La conséquence de ce changement est une chute de la hauteur d'eau et une accélération de l'écoulement en sortie de ville.

Plus à l'aval de la sortie de la ville, le phénomène de ressaut hydraulique expliqué au point 2.1.1 prend place. En effet, la hauteur critique h_c reliée à un écoulement de 75l/s vaut 3.5cm dans ce canal. Or, la condition de hauteur à l'aval vaut 6.5cm . Cette condition de hauteur est dite *subcritique* puisqu'elle se situe au-dessus du niveau critique h_c et donne une vitesse

inférieure à la célérité. Cependant, à la sortie de la ville, une chute du niveau importante se produit, menant à des niveaux inférieurs à la hauteur critique. L'écoulement devient dès lors *supercritique*. L'écoulement va donc passer d'un état *supercritique*, en sortie de ville, à un état *subcritique*, à l'aval du canal. Cette jonction n'est possible que par la biais d'un ressaut hydraulique.

Enfin, on notera que les profils de hauteur d'eau des différentes rues sont très proches. Pour cette raison, la plupart des comparaisons des profils de hauteur d'eau obtenus avec différents champs de porosité s'établiront pour une seule rue.

3.2 Paramètres de simulation

Le seul paramètre qui varie dans ce chapitre est la porosité. Afin que les résultats soient comparables de manière objective, les autres facteurs influençant l'écoulement sont maintenus constants.

3.2.1 Tenseur de traînée

L'étude des champs de porosité se fera donc en gardant un tenseur de traînée D constant. Pour rappel, il se réduit sous la forme :

$$D = \begin{bmatrix} D_{xxxx} & D_{xxxy} & D_{xxyy} \\ D_{xyxx} & D_{xyxy} & D_{xyyy} \\ D_{yyxx} & D_{yyxy} & D_{yyyy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.2 & 0 & 3 \\ 0 & 0 & 0 \\ 3 & 0 & 0.2 \end{bmatrix}$$

Cette matrice permet d'établir les pertes de charge supplémentaires liées à la traînée des bâtiments et aux recirculations induites. La formule a été précédemment mise en avant dans la section 2.2. L'étude de ce tenseur en particulier est développée plus en détail dans le chapitre 4.

3.2.2 Configuration de la ville

Pour les premiers champs de porosité testés, seule la configuration de ville isotrope alignée est considérée pour dégager les tendances principales. Les autres configurations seront utilisées ultérieurement pour pousser l'analyse à un stade plus avancé. Notamment le cas d'une ville inclinée pour identifier les effets directionnels mentionnés au chapitre précédent.

3.3 Champ à porosité constante : $\phi = 0.4375$

Ce champ de porosité fait office de référence (découlant de la thèse [Velickovic, 2012]), il est présenté afin d'établir des bases saines et objectives pour les analyses suivantes. L'analyse des résultats illustrés à la Figure 3.4 tient ci-dessous en trois points :

- La hauteur d'eau à l'amont
- Le comportement dans la ville
- La hauteur d'eau à l'aval de la ville

Hauteur d'eau à l'amont

Le premier critère étudié est la hauteur d'eau à l'amont. Celle-ci est imposée par un effet de "bloc" à l'entrée de la ville. Cependant, le passage d'une porosité unitaire à une porosité égale à 0.4375 n'est pas suffisant pour obtenir une hauteur d'eau à l'amont correspondant à celle fournie par les mesures expérimentales ou par le modèle détaillé¹.

1. Pour rappel, le modèle détaillé est le modèle sans paramètre de porosité mais dont le maillage tient compte des détails géométriques de la ville. Le maillage est de ce fait très fin et le coût de calcul élevé.

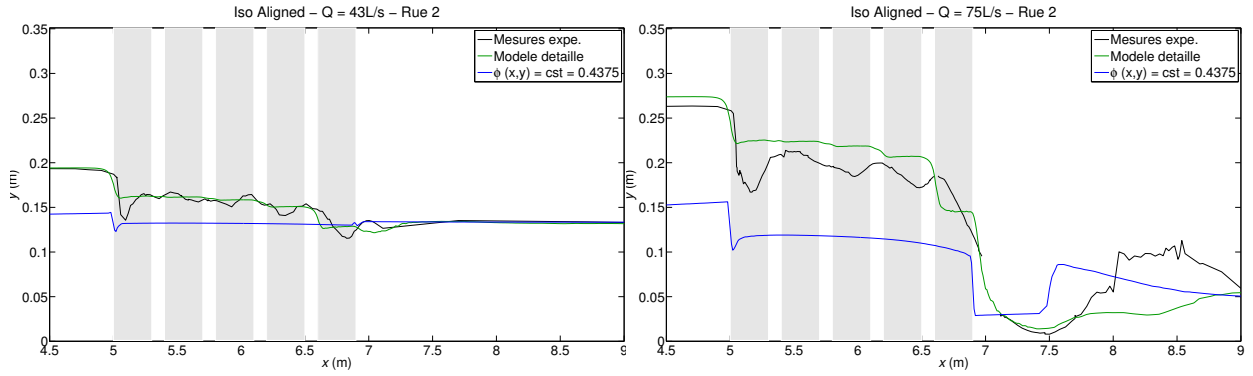


FIGURE 3.4 – Profils de hauteur d’eau dans la rue 2 d’une ville isotrope alignée, pour un champ à porosité constant et un débit de 43 L/s à gauche et 75 L/s à droite.

Comportement de l’écoulement en ville

La chute de hauteur d’eau à l’entrée de la ville est reproduite partiellement mais le niveau d’eau est nettement trop bas.

Hauteur d’eau à l’aval

A l’aval, le profil de hauteur d’eau forme un ressaut hydraulique (voir 2.1.1) qui en terme de position et d’amplitude correspond pratiquement à celui observé sur la courbe des données expérimentales.

— En résumé - $\phi = \text{cst} = 0.4375$ —

Le profil de hauteur d’eau a une allure qui suit les données expérimentales, mais globalement le niveau d’eau est trop bas. Des valeurs de porosité plus faibles sont nécessaires.

3.4 Champ de porosité du type *Plateau avec transition*

Une variation du champ à porosité constante a été testée. Celle-ci consiste à appliquer une transition linéaire entre la porosité unitaire du canal et la porosité de stockage dans la ville. La transition peut s’étaler sur une distance variable entre l’amont et l’aval de la ville, comme illustré à la Figure 3.5. Ces champs, formant graphiquement un plateau, seront dénommés *PlatTrans* et *PlatTransVariable*. Le but est d’évaluer l’intérêt d’une transition douce des valeurs de porosité à la frontière de la ville.

On constate sur la Figure 3.5 que l’effet d’une transition douce n’est pas positif, le profil est trop aplati. Il n’est pas nécessaire de pousser l’analyse plus loin.

— En résumé - *Plateau avec transition* —

L’effet général de l’ajout d’une zone de transition est de lisser l’allure du profil de hauteur d’eau, ce qui ne correspond pas au profil réel de l’écoulement. Par la suite, les transitions douces aux abords de la ville ne seront plus implémentées, seule une transition brutale sera considérée.

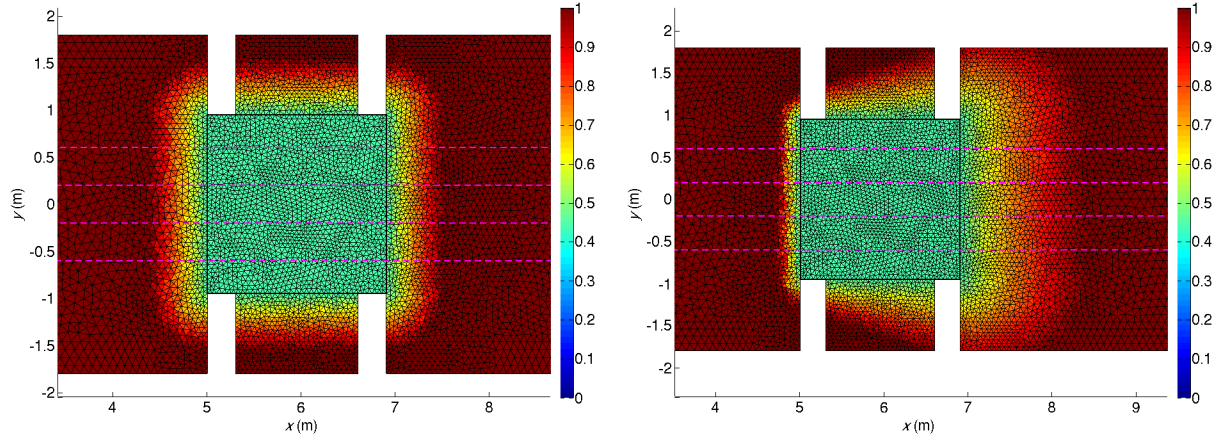


FIGURE 3.5 – Champs de porosité *PlatTrans* (à gauche) et *PlatTransVariable* (à droite) intégrés au maillage du canal. Les 4 rues sont indiquées en rose.

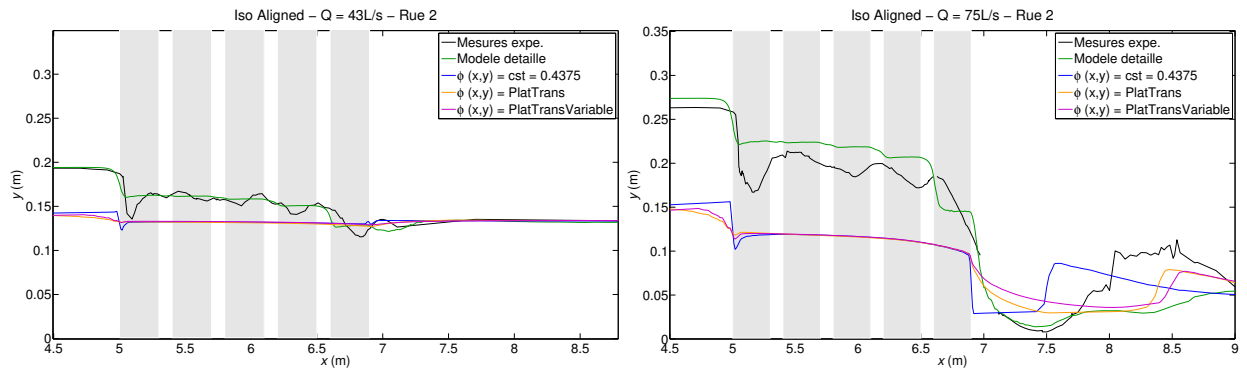


FIGURE 3.6 – Profils de hauteur d'eau dans la rue 2 d'une ville isotrope alignée, pour un champ à porosité constant avec transition aux frontières. Le débit est de 43 L/s à gauche et 75 L/s à droite.

3.5 Champ de porosité du type *CDF* - *Cumulative distribution function*

En réponse à cette observation, un champ de porosité a été défini tel que la porosité en entrée de la ville soit faible et rejoigne la porosité de stockage de 0.4375 en progressant dans la ville. Ce passage se fait par le biais d'une fonction dont l'allure est proche de celle d'une fonction normale cumulée, d'où le nom de ce champ de porosité. Le champ *CDF* est représenté à la Figure 3.7. Cela permet une transition douce entre les deux extrema. Le minimum rencontré à l'entrée de la ville est égal à la proportion de la frontière de la ville qui permet le passage de l'eau, c'est-à-dire :

$$\phi_{in} = \frac{S_f}{S_{tot}} = \frac{4 \cdot dy_{rue}}{5 \cdot dy_{batiment} + 4 \cdot dy_{rue}} = \frac{4 \cdot 0.1}{5 \cdot 0.3 + 4 \cdot 0.1} = \frac{0.4}{1.9} = 0.21 ,$$

où dy_{rue} représente la largeur des rues par lesquelles l'écoulement s'engouffre dans la ville. Elle est mesurée selon l'axe y . Pour intégrer un champ de porosité au maillage du canal, on assigne à chaque cellule du maillage située dans la ville la valeur de porosité que le champ en question donne à l'endroit du centre de gravité de la cellule. Les cellules situées hors de la ville gardent une porosité unitaire.

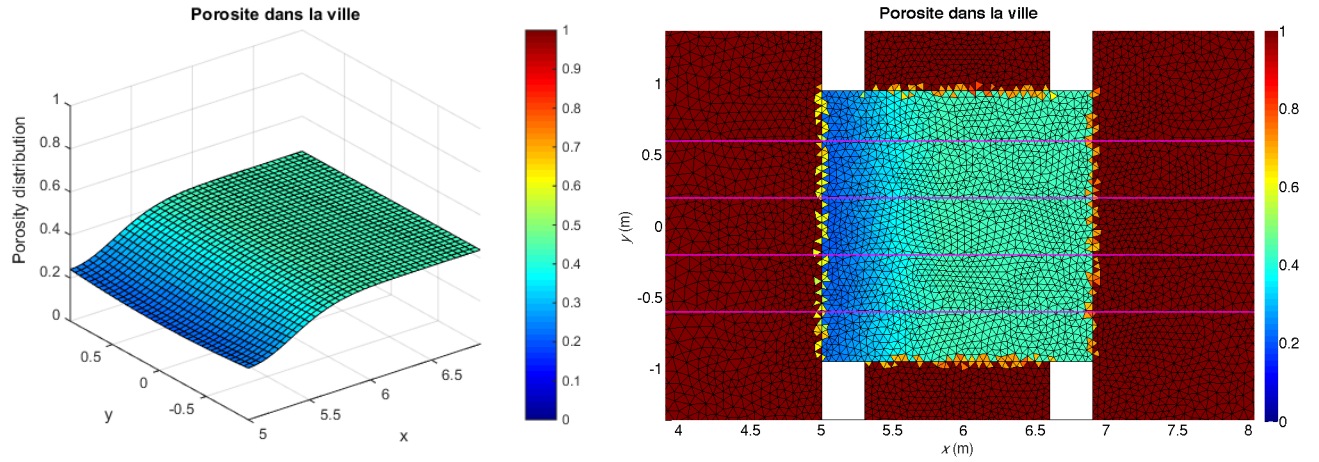


FIGURE 3.7 – Champ de porosité *CDF* isolé à gauche, et intégré au maillage du canal à droite. Les axes des rues y sont indiqués en rose.

On peut procéder à une première analyse sur base des résultats obtenus avec le champ *CDF*, le modèle détaillé, le champ constant et les données expérimentales, dans le cas d’une ville isotrope alignée. La confrontation de ces différents résultats est illustrée à la Figure 3.8.

3.5.1 Configuration de ville isotrope alignée

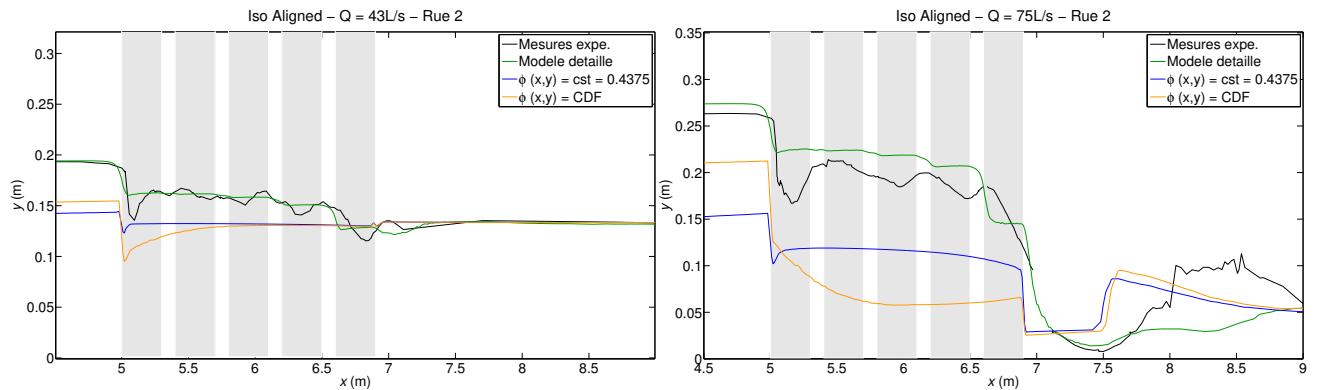


FIGURE 3.8 – Profils de hauteur d’eau dans la rue 2 d’une ville isotrope alignée pour un champ de porosité de type *CDF*. Les débits considérés valent 43 (à gauche) et 75 L/s (à droite).

Hauteur d’eau à l’amont

On observe un impact significatif sur la hauteur d’eau à l’amont de la zone urbaine, effet qui était a priori recherché. En comparaison avec le champ de porosité constante, le champ *CDF* donne une hauteur d’eau à l’amont revue à la hausse et qui se rapproche de la hauteur enregistrée durant les expériences. Ce constat est valable quelque soit le débit et la rue choisie. Il s’agit là d’un premier point positif.

Comportement de l’écoulement en ville

L’analyse des résultats pour ce point dépend du débit.

Pour un débit de 43 L/s, le niveau atteint un minima peu après l'entrée en ville. Cependant, le niveau d'eau remonte aussitôt pour se stabiliser à une hauteur d'environ 13cm, ce qui correspond à la condition limite de hauteur d'eau à l'aval. Cette élévation du niveau de l'eau s'accompagne d'un ralentissement de l'écoulement comme illustré sur la Figure 3.9 représentant le champ de vitesse.

Pour un débit de 75 L/s, le niveau d'eau chute également drastiquement dès l'entrée en zone urbaine, mais cette fois il n'y a pas de minimum très marqué. Le niveau continue de diminuer pratiquement jusqu'à avoir traversé la moitié de la ville. Cela s'explique de la façon suivante : la porosité étant non-nulle et croissante dans le sens de l'écoulement, l'espace rencontré par l'écoulement est lui aussi croissant, les pertes de charge sont de plus en plus faibles, cela induit une accélération de l'écoulement et un abaissement du niveau d'eau. Une fois que l'écoulement approche de la sortie de la ville, c'est à dire la zone où la porosité atteint la valeur seuil de 0.4375, le niveau d'eau se stabilise.

On peut donc conclure, après l'analyse de ces deux débits, que le comportement de l'écoulement, en amont et dans la ville, est fortement influencé par la condition de hauteur d'eau à l'aval. La jonction entre le niveau amont et niveau aval dépend de la différence entre ces deux valeurs. En effet, si, comme dans le cas du débit de 43l/s, la hauteur d'eau minimale est inférieure à la condition de hauteur à l'aval, alors un rehaussement progressif sera opéré par l'écoulement. L'inverse est valable pour un débit de 75l/s.

Hauteur d'eau à l'aval

A l'aval de la ville, le comportement de l'écoulement est également différent en fonction du débit. Pour un débit de 75 L/s, la chute qui s'opère à la sortie de la ville est plus brusque et plus courte que ce qui a été enregistré expérimentalement. De plus, l'amplitude de celle-ci est plus faible que les données expérimentales. Le ressaut hydraulique qui suit la chute est légèrement plus faible et plus court et sa position coïncide avec les expériences. Il n'y a pas du tout de ressaut pour un débit de 43 L/s.

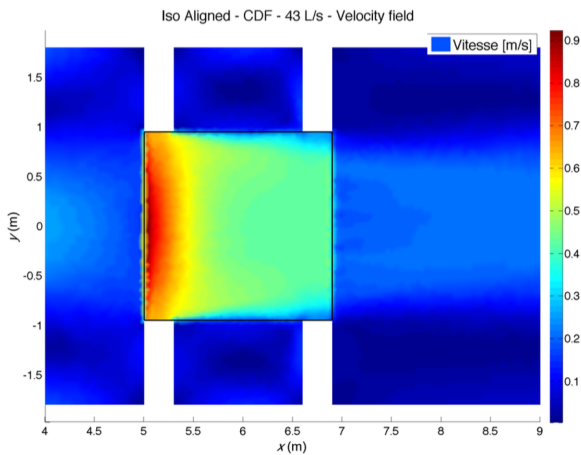


FIGURE 3.9 – Champ de vitesse dans le cas d'une ville isotrope alignée pour un champ de porosité de type *CDF*. Le débit vaut 43 L/s.

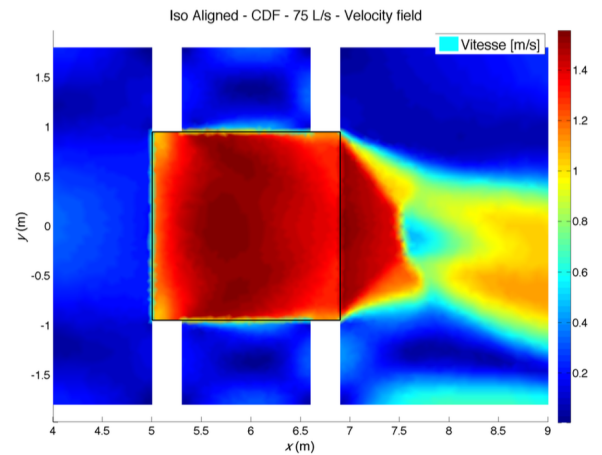


FIGURE 3.10 – Champ de vitesse dans le cas d'une ville isotrope alignée pour un champ de porosité de type *CDF*. Le débit vaut 75 L/s.

En résumé, le champ *CDF* donne lieu à un écoulement qui est plus proche des données expérimentales que celui généré avec un champ constant, uniquement en amont de la ville. De plus, l'allure du profil de hauteur d'eau est très différente selon le débit, de part les conditions de hauteur d'eau à l'aval.

3.6 Champ de porosité du type *Building Peak*

Un autre champ de porosité proposé est un champ à porosité macroscopique qui tient compte de la position des bâtiment dans la ville. Le schéma de la ville étant périodique, une combinaison de sinusoides permet de générer un champ dont les extrema sont situés aux endroits des bâtiment. C'est de cette caractéristique que ce champ tire son nom. Les sinusoides oscillent autour de la valeur de porosité de stockage, $\phi = 0.4375$, et répondent à deux critères :

- Les minima de porosité coïncident avec les centres des bâtiments (ayant une porosité réelle de 0).
- Les maxima coïncident avec les carrefours du réseau de rues (ayant une porosité réelle de 1).

Cela peut être considéré comme une évolution du champ de porosité constante. Il s'agit d'une version plus détaillée de la porosité réelle du milieu puisqu'un schéma des bâtiments et des rues apparaît dans le champ de porosité (Figure 3.11).

La porosité vaut 0.198 au droit des bâtiments et 0.676 au droit des carrefours du réseau de rues. La moyenne est de 0.4375, ce qui est la même valeur de porosité que celle utilisée dans le cas du champ à porosité constante. Mais après avoir intégré ce champ au maillage du canal, la moyenne est de 0.426. Cette différence s'explique par le fait qu'il y a plus de bâtiments que de carrefours (25 contre 16).

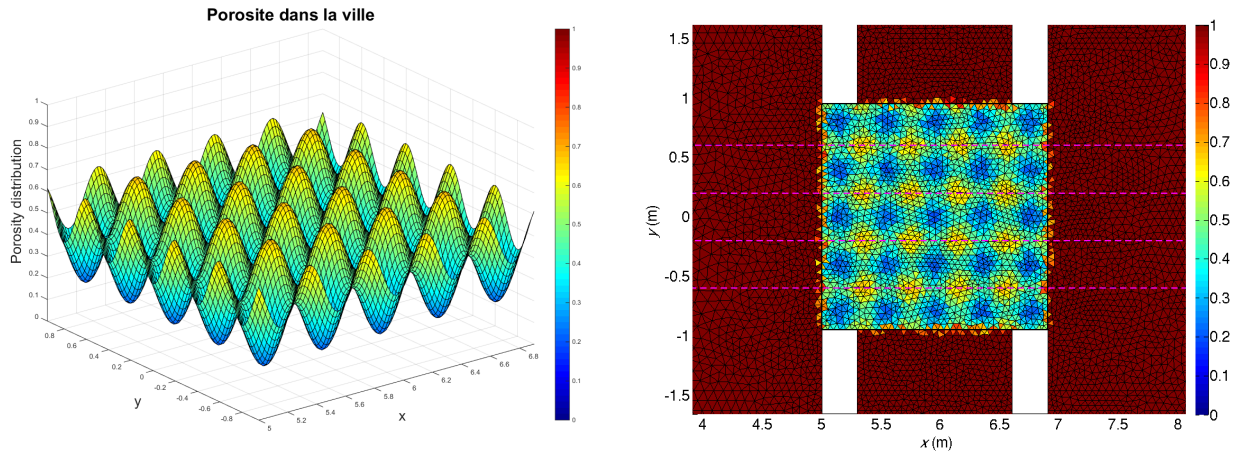


FIGURE 3.11 – Champ de porosité *Building Peak* isolé à gauche, et intégré au maillage du canal à droite. Les axes des rues y sont indiqués en rose.

3.6.1 Configuration de ville isotrope alignée

Hauteur d'eau à l'amont

Pour un débit de 43 L/s, il y a peu de différence de hauteur d'eau à l'amont avec le champ à porosité constante. Pour un débit de 75 L/s des différences plus marquées apparaissent. Le

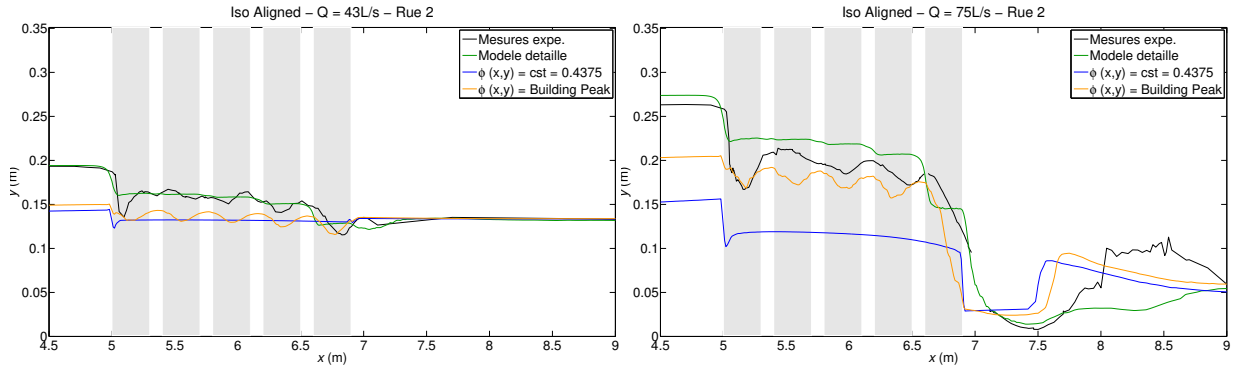


FIGURE 3.12 – Profils de hauteur d'eau dans le cas d'une ville isotrope alignée pour un champ de porosité de type *Building Peak*. Les débits considérés valent 43 (à gauche) et 75 L/s (à droite).

champ type *Building Peak* donne une hauteur d'eau plus proche de la valeur réelle que le champ à porosité constante. En réalité, un rehaussement global de la hauteur d'eau apparaît. Pour cause, la valeur de porosité moyenne dans la ville est plus faible, car la zone urbaine compte plus de minima que de maxima de porosité. On peut déduire que cela engendre une résistance accrue, ce qui augmente la hauteur d'eau à l'amont.

Comportement de l'écoulement en ville

On retrouve tout au long de la zone urbaine des oscillations dues aux carrefours. Cependant, la chute de hauteur d'eau est faible à l'entrée de la ville. L'effet de "mur" est moins marqué parce qu'à l'entrée de la ville, on a autant de porosité faible que haute sur une même ligne perpendiculaire à la direction du flux lorsqu'on progresse à l'intérieur de la ville. La figure 3.13 présente une coupe du champ de porosité perçue à l'entrée de la ville. L'écoulement peut transiter par les zones de haute porosité qui correspondent aux rues de la ville. Ceci induit un changement moins radical de hauteur d'eau dans les rues selon lesquelles les profils de hauteur sont dessinés. D'autre part, on observe une chute importante du niveau d'eau juste avant la sortie de la ville. Surtout présente pour un débit de 75 L/s, cette chute a une amplitude très proche de celle observée sur la courbe des mesures expérimentales. De manière plus générale, la hauteur d'eau est fort proche de celle mesurée lors des expériences.

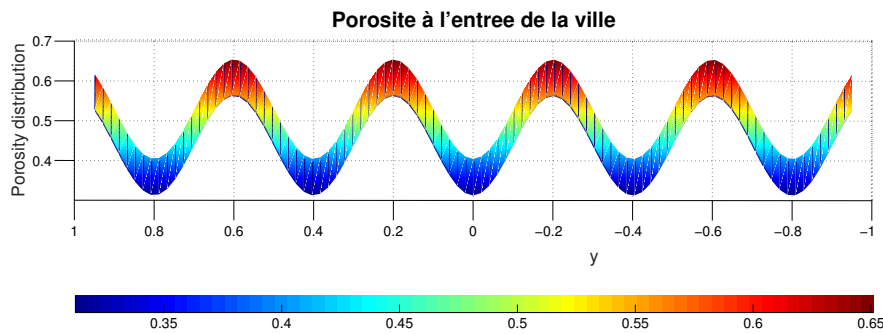


FIGURE 3.13 – Coupe du champ de porosité *Building Peak* rencontrée à l'entrée de la ville par l'écoulement.

Hauteur d'eau à l'aval

Pour un débit de 43 L/s, la hauteur d'eau est sensiblement la même à l'aval pour toutes les courbes. Pour un débit de 75 L/s, le ressaut hydraulique s'opère légèrement plus tôt qu'expérimentalement, mais a une bonne amplitude.

— En résumé - *Building Peak* - Aligné —

La hauteur d'eau est trop faible en amont, mais en aval et dans la ville, les résultats sont intéressants. Le point fort de ce champ de porosité est le comportement de l'écoulement dans la ville et à sa sortie. Celui-ci est proche de ce qui a été enregistré pendant les expériences. En sortie de ville, on remarque une chute de la hauteur d'eau qui a une amplitude correcte. Cette chute s'amorce au même endroit que pendant les expériences.

3.6.2 Configuration de ville isotrope inclinée

Le champ de porosité *Building Peak* a également été appliqué à une configuration de ville isotrope, mais cette fois disposée en oblique de 22.5° par rapport à la direction de l'écoulement, comme illustré à la Figure 3.14. Dans le cas aligné, les deux frontières latérales de la ville (celles parallèles à la direction de l'écoulement) font face à une zone de recirculation, sans être réellement traverser par le flux d'eau. Ici, il y a une différence majeure : l'entrée de l'écoulement dans la ville ne se fait plus uniquement d'un côté, mais est réparti entre deux faces. Les résultats des simulations sont cette fois-ci présentés à la Figure 3.15, pour les quatre rues. A cause de l'orientation de la ville, les profils de hauteur d'eau sont différents selon la rue choisie.

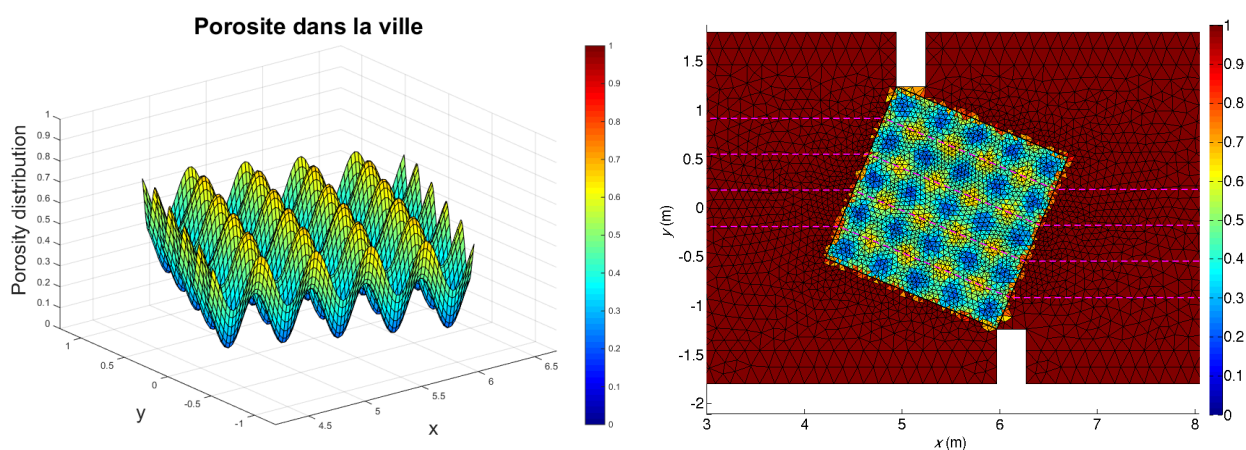


FIGURE 3.14 – Champ de porosité de type *Building Peak* isolé à gauche, et intégré au maillage du canal à droite. Les axes des rues y sont indiqués en rose.

Hauteur d'eau à l'amont

Par rapport au cas aligné, il n'y a pas de grande différence au niveau de la hauteur d'eau à l'amont. Elle reste trop faible en comparaison avec les expériences.

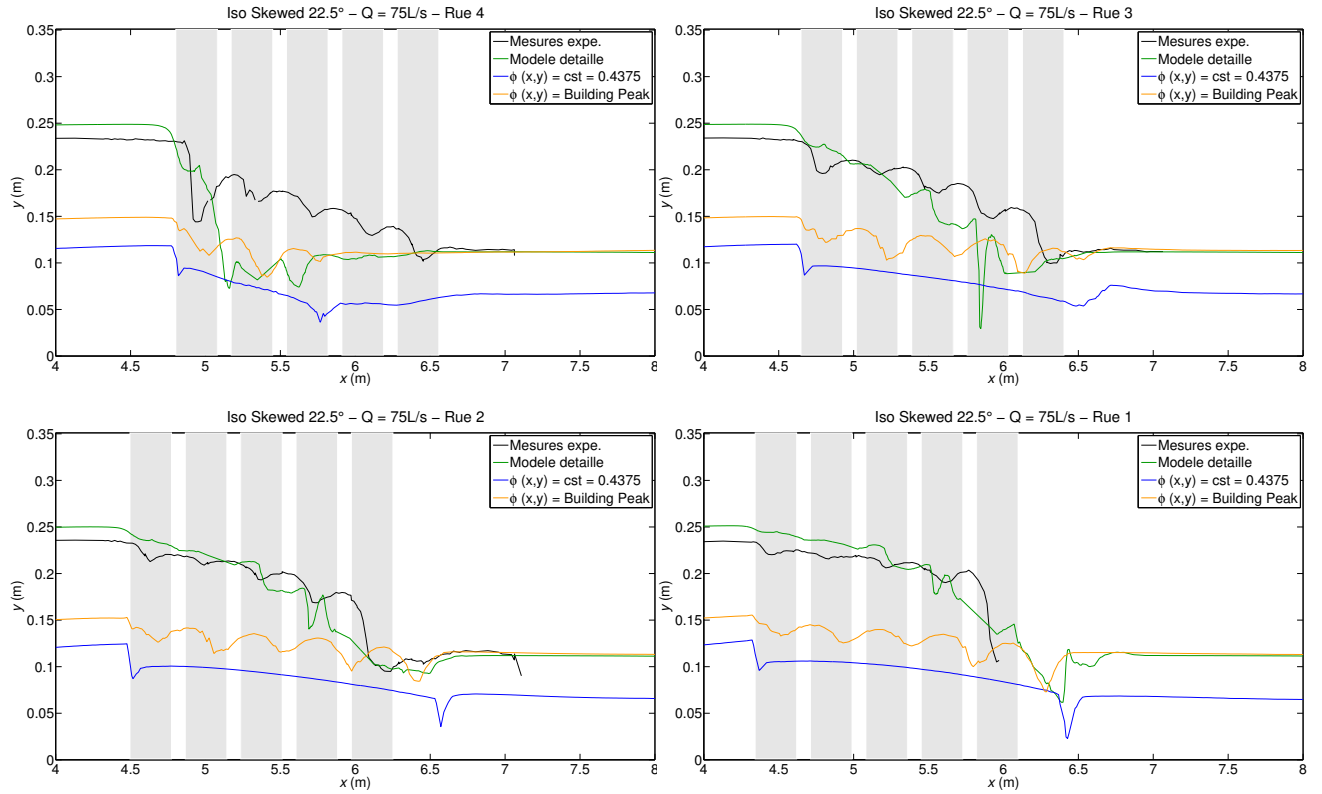


FIGURE 3.15 – Profils de hauteur d’eau dans les quatre rues d’une ville isotrope inclinée, pour un champ de porosité de type *Building Peak*. Le débit considéré vaut 75 L/s.

Comportement de l’écoulement en ville

Les résultats dans la ville varient selon la rue étudiée. L’influence des rues perpendiculaires à la direction principale de l’écoulement entre en ligne de compte puisque l’écoulement emprunte également ces rues à cause de l’orientation de la ville. On remarque une chute de hauteur d’eau en entrée de zone urbaine plus importante le long de la rue 4. En effet, la rue 4 est la rue la plus éloignée de la face inférieure par laquelle entre l’écoulement. Donc après redistribution de l’écoulement aux divers carrefours, cette rue est la moins impactée par le flux dans les rues qui lui sont perpendiculaires.

Hauteur d’eau à l’aval

A l’aval, la hauteur d’eau est similaire dans les 4 rues et vaut la condition de hauteur d’eau imposée en sortie de canal. Naturellement, elle correspond à celle des données expérimentales.

Effets directionnels

Sur la Figure 3.16, on peut remarquer qu’avec le modèle détaillé l’écoulement est séparé en deux flux principaux en sortie de ville, correspondant chacun à une direction du réseau des rues. Ces deux flux ont donc, à la frontière aval de la ville, des directions perpendiculaires. Cet effet directionnel n’est pas reconstitué par le champ *Building Peak*. En effet, les vecteurs vitesse de ce champ ont tendance à s’orienter selon la diagonale de la ville, sans se réorienter perpendiculairement aux frontières du milieu urbain.

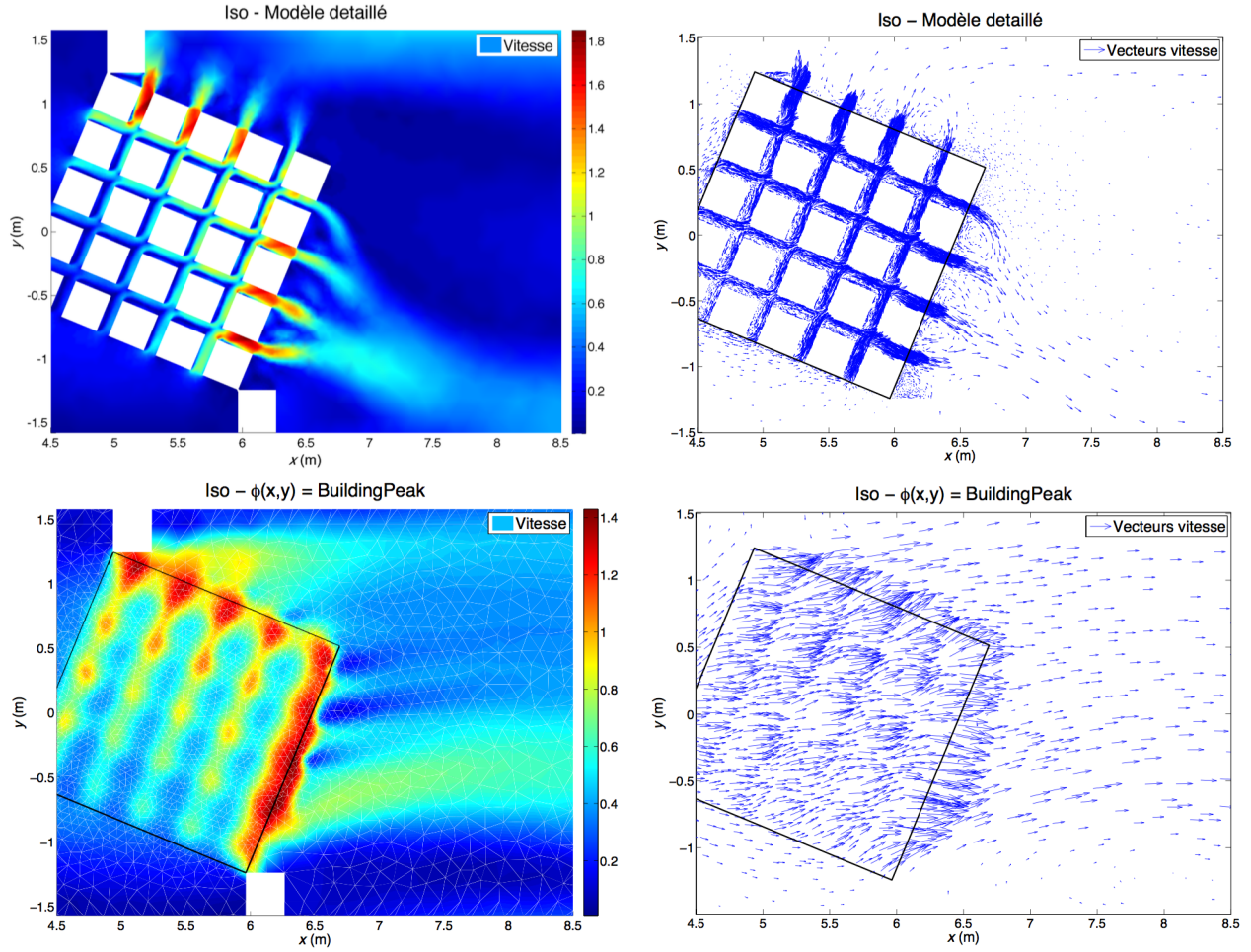


FIGURE 3.16 – Comparaison des effets directionnels obtenus avec le modèle détaillé (en haut) et le champ *Building Peak* (en bas). A gauche : le champ des vitesses interpolées ; à droite : le champ des vecteurs vitesse, les unités sont en m/s. Le débit considéré vaut 75 L/s.

En résumé - *Building Peak* - Incliné

Le niveau d'eau est nettement trop bas en amont de la ville. A l'intérieur de celle-ci, le niveau d'eau ne suit pas l'allure de la courbe expérimentale. Les effets directionnels ne sont pas non plus reproduits.

3.7 Champ de porosité du type *Building Peak translaté*

Une variante du champ de porosité présenté au point précédent a été implémentée afin de pallier au déficit de hauteur d'eau observé à l'amont de la ville. Des simulations ont été effectuées avec un champ de porosité similaire mais translaté vers des valeurs de porosité plus faibles, valant 80% des valeurs initiales, et ce en tout point. D'où le nom *Building Peak translaté*. Comme illustré à la Figure 3.17, la porosité vaut 0.158 au droit des bâtiments et 0.541 au droit des carrefours. La moyenne est de 0.341 contre 0.437 précédemment.

L'effet recherché est un rehaussement global de la hauteur d'eau. De facto, une translation d'un champ de porosité a pour effet de translater la courbe du profil de hauteur d'eau vers des valeurs plus importantes, comme illustré à la figure 3.18. La résistance globale du milieu urbain

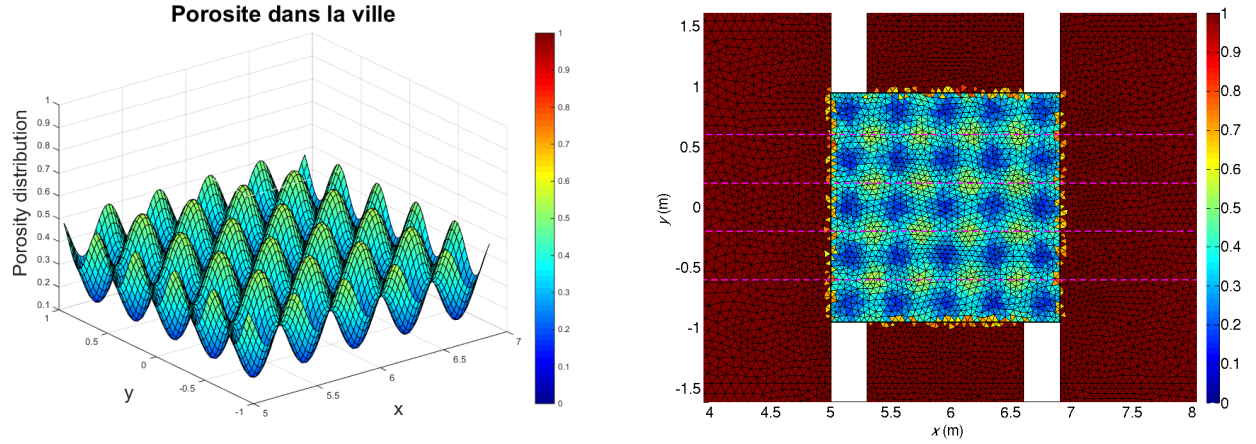


FIGURE 3.17 – Champ de porosité *Building Peak translaté* isolé à gauche, et intégré au maillage du canal à droite. Les axes des rues y sont indiqués en rose.

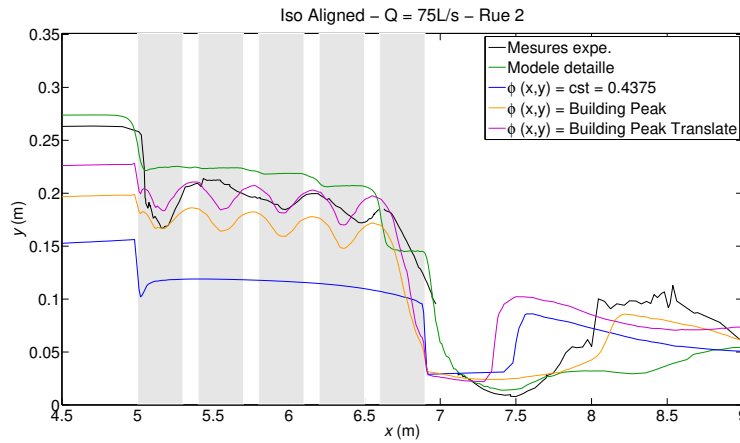


FIGURE 3.18 – Profils de hauteur d'eau dans la rue 2 d'une ville isotrope alignée, pour un champ de porosité de type *Building Peak translaté*. Le débit considéré vaut 75 L/s à droite.

étant plus élevée, la chute de la hauteur d'eau à l'entrée de la ville est sensiblement plus importante. Cela n'est malgré tout pas suffisant pour combler l'écart de niveau d'eau à l'amont de la ville.

D'autre part, l'absence de justification d'un tel choix de champ de porosité liée à la géométrie de la zone urbaine pose problème. Si ce genre de manipulations permet d'obtenir de bonnes valeurs de hauteur d'eau pour une configuration de ville idéalisée bien précise, rien ne garantit que les résultats seront aussi bons pour des schémas de ville différents. De plus, le manque de souplesse lié aux fonctions périodiques que sont les sinus ne permettra pas de reproduire un tel champ de porosité pour des configurations de ville réelles, c'est à dire qui ne seraient pas forcément périodiques et régulières.

Pour toutes ces raisons, ce type d'approche a été écarté, et un autre type de champ de porosité a été étudié. Ce dernier doit présenter des variations de porosité marquées afin de reproduire l'effet directionnel observé sur le modèle détaillé dans le cas d'une ville inclinée, mais il doit également pouvoir être adapté au plus grand panel de configurations de ville possible.

Le profil de hauteur d'eau est un peu mieux que la version précédente de *Building Peak* mais naturellement ils ont la même allure. Le choix de diminuer la porosité d'une valeur arbitraire de 20 % ainsi que l'impossibilité de modéliser une ville non-périodique posent problème.

3.8 Champ de porosité du type *Building Interpolated*

Ce dernier champ de porosité étudié est construit par interpolation. Les valeurs interpolées sont celles de la porosité des rues et des bâtiments. Il y a donc ici deux valeurs de porosité à considérer. La génération de ce champ nécessite quatre informations :

1. Vecteur des coordonnées en 2D des extrémités de chaque rue
2. Une valeur de porosité à associer aux rues
3. Vecteur des coordonnées en 2D des quatre coins des bâtiments
4. Une valeur de porosité à associer aux bâtiments

Il est alors possible de reconstituer les rues et les bâtiments, comme illustré à la Figure 3.19, et de leur assigner une valeur de porosité correspondante.

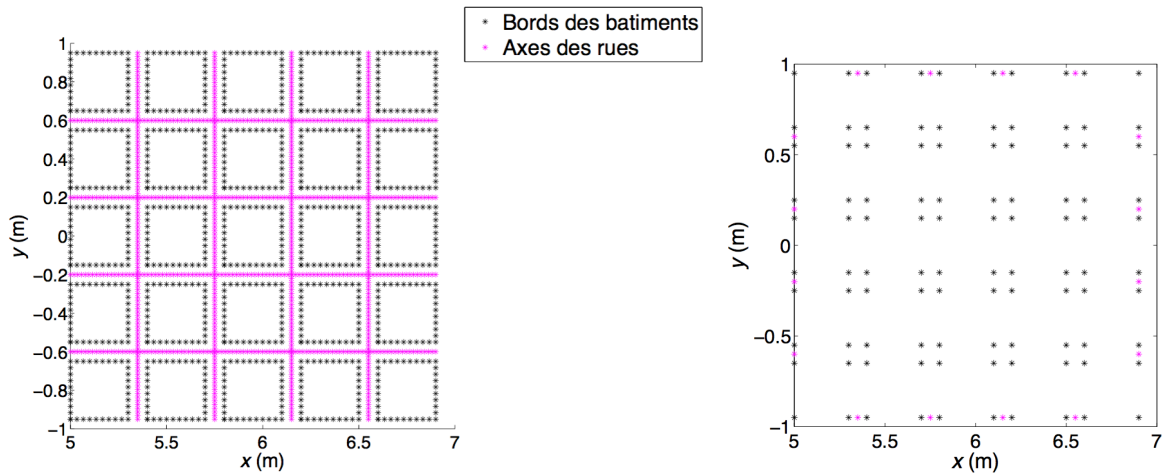


FIGURE 3.19 – Reconstitution des rues et des bâtiments d'une ville (à gauche) à partir des coordonnées des quatre coins des bâtiments et des deux extrémités des rues (à droite).

Deux jeux de valeurs de porosité ont été utilisés dans un premier temps :

- Noté *Building Interpolated* [30; 85] dans la légende des graphes :
 $\phi_{\text{bâtiment}} = 0.30$
 $\phi_{\text{rue}} = 0.85$
 Porosité moyenne de 0,408 dans la ville.
- Noté *Building Interpolated* [20; 75] dans la légende des graphes :
 $\phi_{\text{bâtiment}} = 0.20$
 $\phi_{\text{rue}} = 0.75$
 Porosité moyenne de 0,308 dans la ville.

L'interpolation est choisie linéaire pour assurer qu'aucune valeur de porosité ne dépasse les limites imposées aux rues et aux bâtiments, comme illustré à la Figure 3.20. Cela permet aussi d'avoir des transitions de porosité entre les rues et les bâtiments qui soient très marquées, ce qui renforce les effets directionnels que subit l'écoulement.

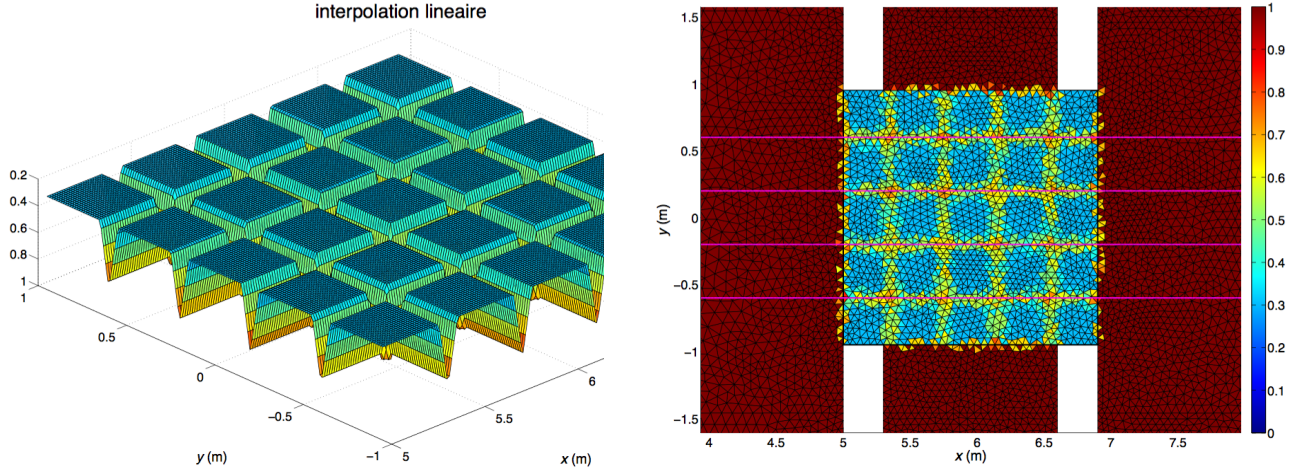


FIGURE 3.20 – Champ de porosité de type *Building Interpolated* isolé à gauche, et intégré au maillage du canal à droite. Les axes des rues y sont indiqués en rose.

Ainsi, il est possible d'établir le champ de porosité de n'importe quelle ville pour autant que ses rues soient rectilignes et ses bâtiments soient des rectangles. Le cas contraire, il est possible d'approximer une rue courbée par des segments rectilignes, ou d'adapter le code pour prendre en charge des bâtiments de section autre que rectangulaire.

3.8.1 Configuration d'une ville isotrope alignée

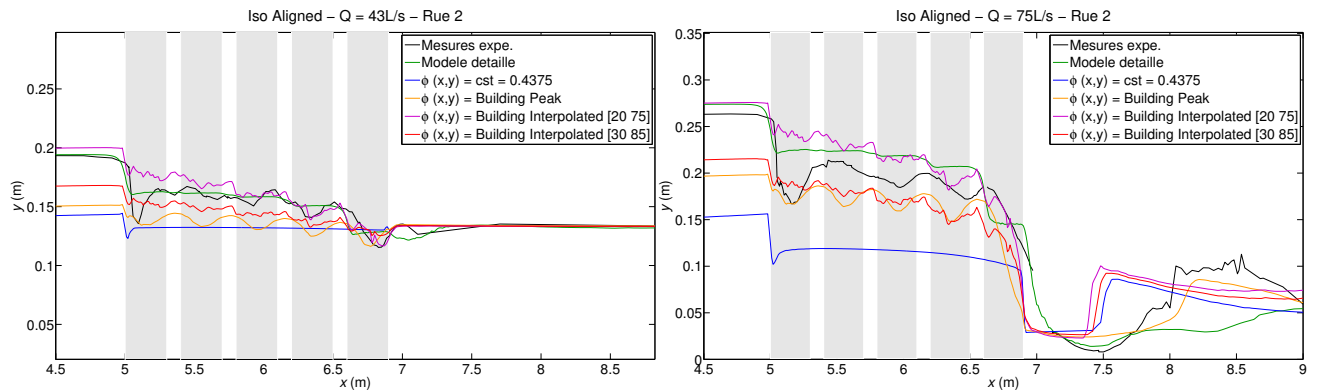


FIGURE 3.21 – Profils de hauteur d'eau dans la rue 2 d'une ville isotrope inclinée, pour un champ de porosité de type *Building Interpolated*. Le débit considéré vaut 43 L/s à gauche et 75 L/s à droite.

Hauteur d'eau à l'amont

Pour les deux débits, le champ *Building Interpolated* [20 75] est très proche des données expérimentales, alors que *Building Interpolated* [30 85] donne un profil de hauteur d'eau trop bas. Ils donnent tous les deux de meilleurs résultats que le champ *Building Peak*.

Comportement de l'écoulement en ville

Aucun des deux champs ne reproduit la chute observée directement à l'entrée de la ville, mais ils se situent de part et d'autre de la courbe des données expérimentales dans le reste de la zone urbaine.

Pour un débit de 43 L/s, le champ *Building Interpolated [30 85]* suit de très près la courbe des données expérimentales sur la deuxième moitié de la zone urbaine.

Pour un débit de 75 L/s, à la sortie de la ville, ils suivent tous les deux assez fidèlement le comportement de l'écoulement réel : la hauteur d'eau chute fortement pour atteindre un minimum situé à l'extrémité du dernier bâtiment.

Hauteur d'eau à l'aval

Pour un débit de 43 L/s, la hauteur d'eau est sensiblement la même pour toutes les courbes. Pour un débit de 75 L/s, les deux champs donnent lieu à un ressaut qui est situé trop tôt mais dont l'amplitude est correcte.

On constate que l'écart entre les deux champs *Building Interpolated [20 75]* et *[30 85]* est important à l'amont de la ville, mais cet écart diminue progressivement jusqu'à être résorbé à la fin de la ville. On peut donc conclure que diminuer la valeur moyenne de la porosité revient à translater le profil de hauteur d'eau vers des hauteurs d'eau plus élevées, et ce d'une valeur d'autant plus importante qu'on remonte vers l'amont. Sur base de ces premières observations, un champ du même type mais dont la valeur de porosité moyenne se situe entre celles de ces deux champs a également été testé.

— En résumé - *Building Interpolated* —

L'allure du profil de hauteur d'eau suit bien les données expérimentales. De plus, ce champ peut s'adapter à des villes irrégulières et non périodiques, mais les valeurs de porosité choisies pour les bâtiments et les rues doivent être justifiées sur base de la géométrie de la ville.

3.9 Champ de porosité du type *Building Interpolated* [ϕ_{bat} ; $\phi_{x,y,rue}$]

Il s'agit du dernier champ de porosité de ce chapitre, il est le plus abouti. Le profil de hauteur d'eau qu'il donne sera analysé pour toutes les configurations de ville envisagées.

3.9.1 Configuration de ville isotrope alignée

Afin d'avoir un compromis entre les deux champs présenté ci-dessus et de déterminer la porosité dans les rues et les bâtiments sur base de la géométrie de la ville, le jeu de porosité suivant a été généré :

- Noté *Building Interpolated* [ϕ_{bat} ; $\phi_{x,y,rue}$] dans la légende des graphes, Cas d'une ville isotrope :

$$\phi_{batiment} = \frac{dy_{rue}}{dy_{rue} + dy_{batiment}} = \frac{0.1}{0.1 + 0.3} = 0.25$$

$$\phi_{x,rue} = 1 - \frac{4 \cdot dx_{rue}}{4 \cdot dx_{rue} + 5 \cdot dx_{batiment}} = 1 - \frac{4 \cdot 0.1}{4 \cdot 0.1 + 5 \cdot 0.3} = 0.789$$

$$\phi_{y,rue} = 1 - \frac{4 \cdot dy_{rue}}{4 \cdot dy_{rue} + 5 \cdot dy_{batiment}} = 1 - \frac{4 \cdot 0.1}{4 \cdot 0.1 + 5 \cdot 0.3} = 0.789$$

Porosité moyenne de 0.356 dans la ville.

Où $\phi_{x,rue}$ (resp. $\phi_{y,rue}$) représente la porosité dans les rues parallèles à l'axe Ox (resp. Oy), dx_{rue} (resp. dy_{rue}) représente la largeur des rues mesurée selon l'axe Ox (resp. Oy), idem pour $dx_{batiment}$ et $dy_{batiment}$ mais pour les largeurs des bâtiments. Ces variables sont représentées à la Figure 3.22. Cette façon de déterminer la porosité permet d'obtenir $\phi_{batiment} = 0.25$, ce qui est une valeur située entre 0.2 et 0.3, qui sont les valeurs utilisées au point précédent. Cette méthode permet aussi d'obtenir une valeur de porosité dans les rues de $\phi_{x,rue} = \phi_{y,rue} = 0.789$, ce qui est également entre les valeurs du point précédent, à savoir 0.75 et 0.85 . Logiquement, la porosité moyenne n'échappe pas à la règle. L'intérêt de distinguer $\phi_{x,rue}$ et $\phi_{y,rue}$ sera mis en évidence pour le cas d'une ville anisotrope.

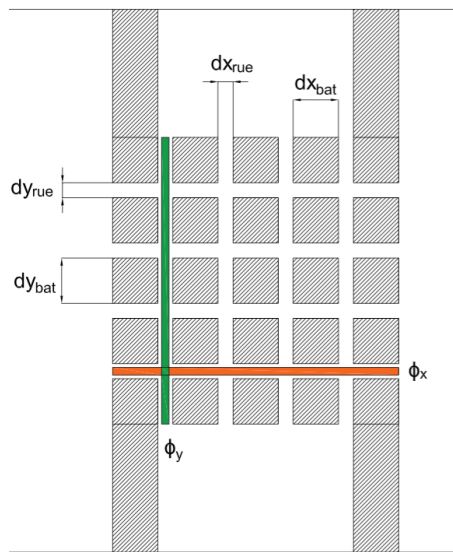


FIGURE 3.22 – Illustration des paramètres géométriques de la ville utilisés pour déterminer la porosité dans les rues et les bâtiments.

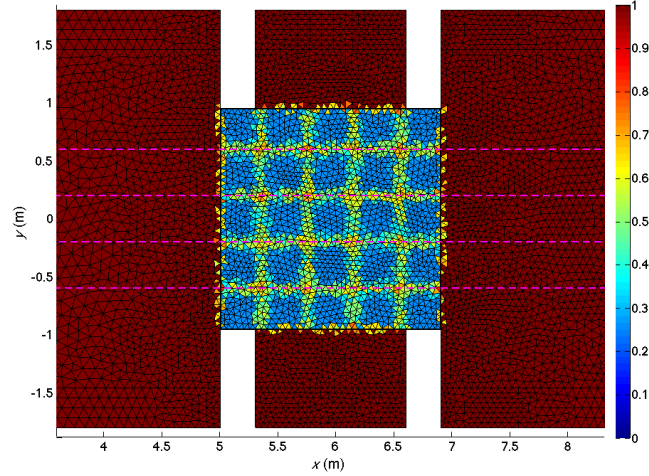


FIGURE 3.23 – Champ de porosité de type *Building Interpolated* $[\phi_{bat} ; \phi_{x,y,rue}]$ dans le cas d'une ville isotrope alignée. Les axes des rues y sont indiqués en rose

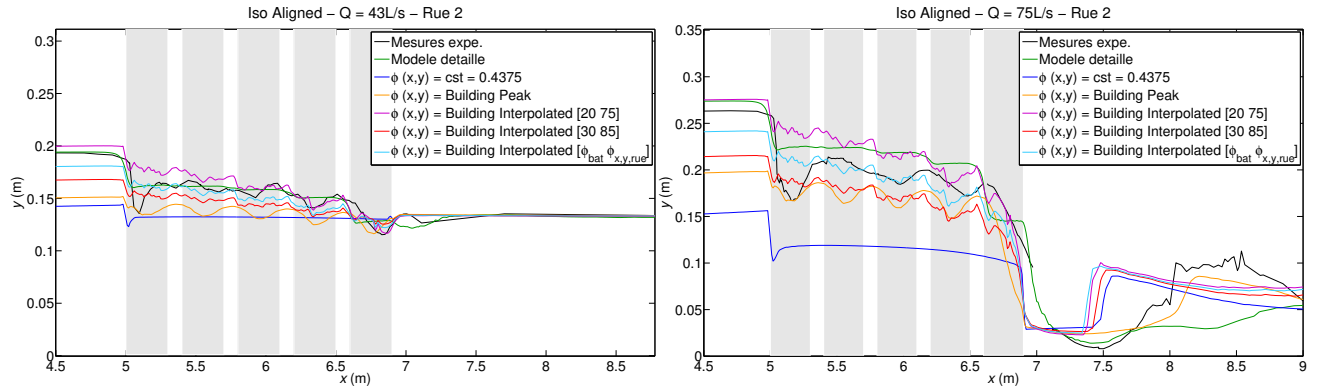


FIGURE 3.24 – Profils de hauteur d'eau dans la rue 2 d'une ville isotrope alignée, pour un champ de porosité de type *Building Interpolated* $[\phi_{bat} ; \phi_{x,y,rue}]$. Le débit considéré vaut 43 L/s à gauche et 75 L/s à droite.

Sur la Figure 3.24, on constate que l'effet recherché a été atteint. Ce nouveau champ de porosité voit son profil de hauteur d'eau venir se placer entre les deux précédents. Il ne correspond pas parfaitement à la courbe des données expérimentales, mais cette fois, le jeu de porosité utilisé se justifie sur base des caractéristiques géométriques de la ville.

3.9.2 Configuration de ville anisotrope large alignée

- Noté *Building Interpolated* $[\phi_{bat} ; \phi_{x,y,rue}]$ dans la légende des graphes,
Cas d'une ville anisotrope large :

$$\phi_{batiment} = \frac{dy_{rue}}{dy_{rue} + dy_{batiment}} = \frac{0.135}{0.135 + 0.3} = 0.310$$

$$\phi_{x,rue} = 1 - \frac{4 \cdot dx_{rue}}{4 \cdot dx_{rue} + 5 \cdot dx_{batiment}} = 1 - \frac{4 \cdot 0.0675}{4 \cdot 0.0675 + 5 \cdot 0.3} = 0.847$$

$$\phi_{y,rue} = 1 - \frac{4 \cdot dy_{rue}}{4 \cdot dy_{rue} + 5 \cdot dy_{batiment}} = 1 - \frac{4 \cdot 0.135}{4 \cdot 0.135 + 5 \cdot 0.3} = 0.735$$

Porosité moyenne de 0.407 dans la ville.

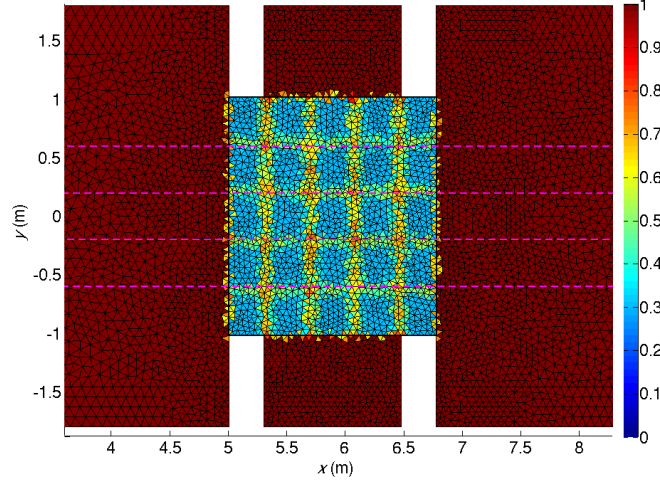


FIGURE 3.25 – Champ de porosité de type *Building Interpolated* $[\phi_{bat} ; \phi_{x,y,rue}]$ dans le cas d’une ville anisotrope large alignée. Les axes des rues y sont indiqués en rose.

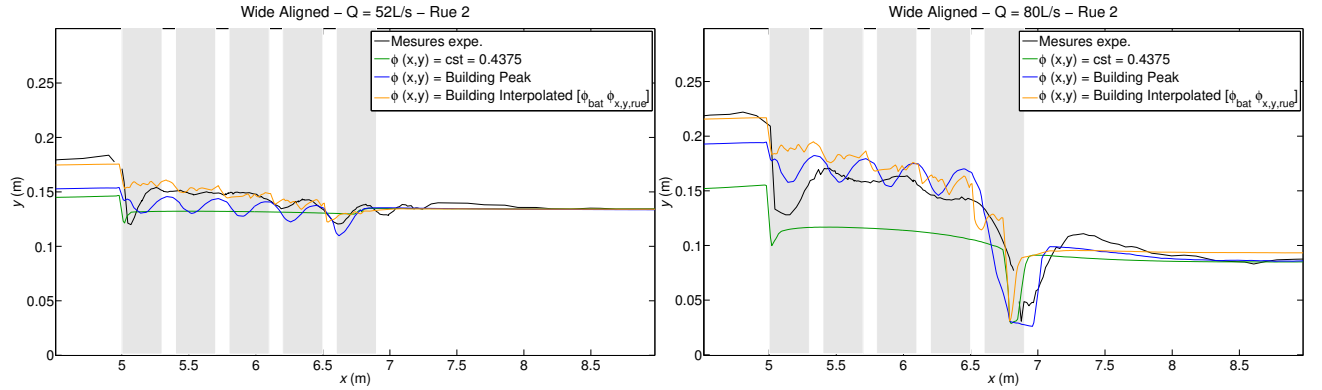


FIGURE 3.26 – Profils de hauteur d’eau dans la rue 2 d’une ville anisotrope large alignée, pour un champ de porosité de type *Building Interpolated* $[\phi_{bat} ; \phi_{x,y,rue}]$. Le débit considéré vaut 52 L/s à gauche et 80 L/s à droite.

Dans le cas d’une ville anisotrope large alignée, l’écoulement se heurte à une surface en entrée de ville plus perméable que dans le cas d’une ville isotrope, ce qui facilite sa pénétration dans la ville. Ceci est représenté, avec la méthode de génération du champ de porosité présentée ci-dessus, par des valeurs de $\phi_{batiment}$ et de $\phi_{x,rue}$ plus importantes que dans le cas d’une ville isotrope.

Cela se traduit par un profil de hauteur d’eau qui est proche des données expérimentales. Il s’en écarte cependant juste après l’entrée en ville, où apparaît un creux qui n’est pas reproduit par ce champ de porosité.

3.9.3 Configuration de ville anisotrope étroite alignée

- Noté *Building Interpolated* $[\phi_{bat} ; \phi_{x,y,rue}]$ dans la légende des graphes, Cas d'une ville anisotrope étroite alignée :

$$\phi_{batiment} = \frac{dy_{rue}}{dy_{rue} + dy_{batiment}} = \frac{0.1}{0.1 + 0.3} = 0.183$$

$$\phi_{x,rue} = 1 - \frac{4 \cdot dx_{rue}}{4 \cdot dx_{rue} + 5 \cdot dx_{batiment}} = 1 - \frac{4 \cdot 0.1}{4 \cdot 0.1 + 5 \cdot 0.3} = 0.735$$

$$\phi_{y,rue} = 1 - \frac{4 \cdot dy_{rue}}{4 \cdot dy_{rue} + 5 \cdot dy_{batiment}} = 1 - \frac{4 \cdot 0.1}{4 \cdot 0.1 + 5 \cdot 0.3} = 0.847$$

Porosité moyenne de 0.307 dans la ville.

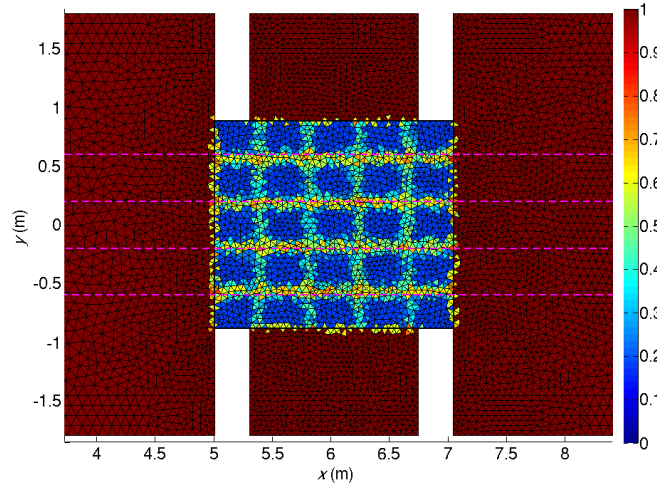


FIGURE 3.27 – Champ de porosité de type *Building Interpolated* $[\phi_{bat} ; \phi_{x,y,rue}]$ dans le cas d'une ville anisotrope étroite alignée. Les axes des rues y sont indiqués en rose.

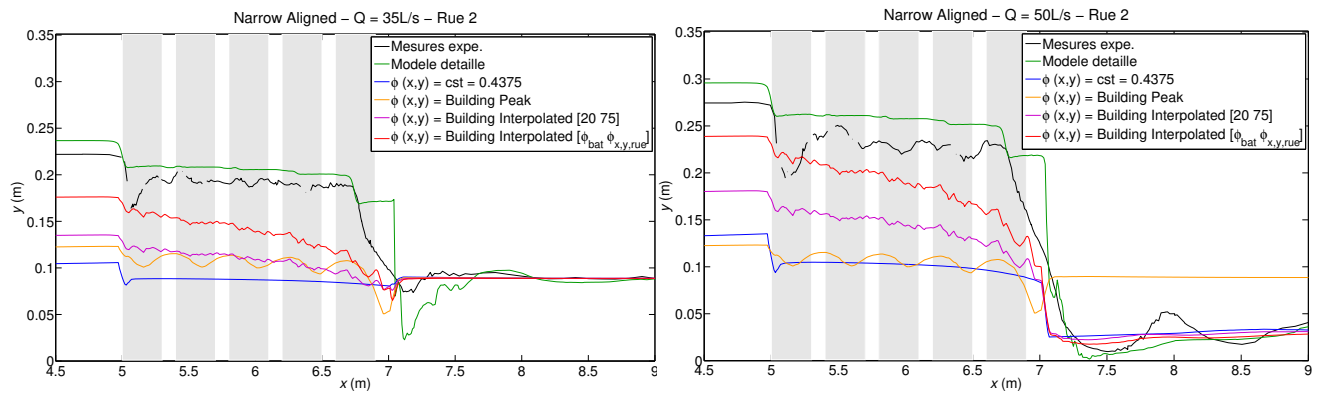


FIGURE 3.28 – Profils de hauteur d'eau dans la rue 2 d'une ville anisotrope étroite alignée, pour un champ de porosité de type *Building Interpolated* $[\phi_{bat} ; \phi_{x,y,rue}]$. Le débit considéré vaut 35 L/s à gauche et 50 L/s à droite.

Dans le cas d'une ville anisotrope étroite alignée, la surface disponible pour l'écoulement en entrée de zone urbaine est plus petite que dans le cas d'une ville isotrope. Cela freine sa pénétration dans la ville et augmente la hauteur d'eau en amont. Ceci est représenté par des

valeurs de ϕ_{batiment} et de $\phi_{x,\text{rue}}$ plus faibles que dans le cas d'une ville isotrope.

L'allure du profil de hauteur d'eau s'approche de celle des données expérimentales mais le niveau d'eau reste trop bas en amont et dans la ville. Juste après l'entrée en ville, apparaît un creux qui n'est pas reproduit par ce champ de porosité, comme pour les cas des villes isotrope et anisotrope large.

— En résumé - *Building Interpolated* [ϕ_{bat} ; $\phi_{x,y,\text{rue}}$] - Aligné —

L'intérêt principal de ce champ de porosité est que les valeurs de porosité des rues et des bâtiments peuvent être déterminées sur base des caractéristiques géométriques de la ville. Cette façon de procéder donne un profil de hauteur d'eau qui est proche des données expérimentales pour les villes isotrope et anisotrope large, mais pour la ville anisotrope étroite la hauteur d'eau reste trop faible.

3.9.4 Configuration de ville isotrope inclinée

Le champ de porosité généré pour une configuration de ville isotrope inclinée est le même que pour une ville isotrope alignée, puisque les caractéristiques géométriques des rues et des bâtiments sont identiques. La seule différence tient du fait qu'une rotation de 22.5° a été opérée sur l'ensemble du champ de porosité.

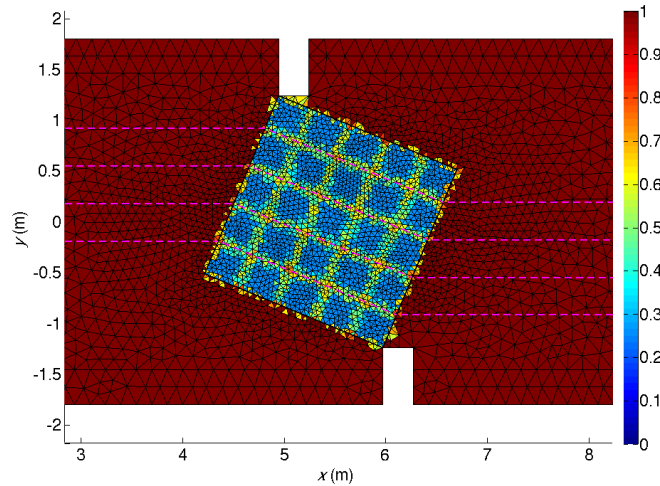


FIGURE 3.29 – Champ de porosité de type *Building Interpolated* [ϕ_{bat} ϕ_{rue}] dans le cas d'une ville isotrope inclinée. Les axes des rues y sont indiqués en rose.

Le cas de la ville isotrope inclinée renvoie à une analyse de hauteur d'eau (Figure 3.30) semblable à celle réalisée pour le champ *Building Peak*.

En amont : il n'y a pas de différence significative avec le cas aligné, la hauteur d'eau est trop faible.

En ville : elle est trop faible également et l'écart avec les données expérimentales se réduit progressivement pour être complètement résorbé en sortie de ville. La chute brutale observée en entrée de ville sur la courbe des mesures expérimentales dans la rue 4 n'est pas bien reproduite.

En aval : la hauteur d'eau est maintenue à une bonne valeur depuis la sortie de la ville.

Pour rappel, sur la Figure 4.24, on remarque qu'avec le modèle détaillé, l'écoulement est séparé en deux flux principaux correspondant chacun à une direction du réseau des rues. Cet effet

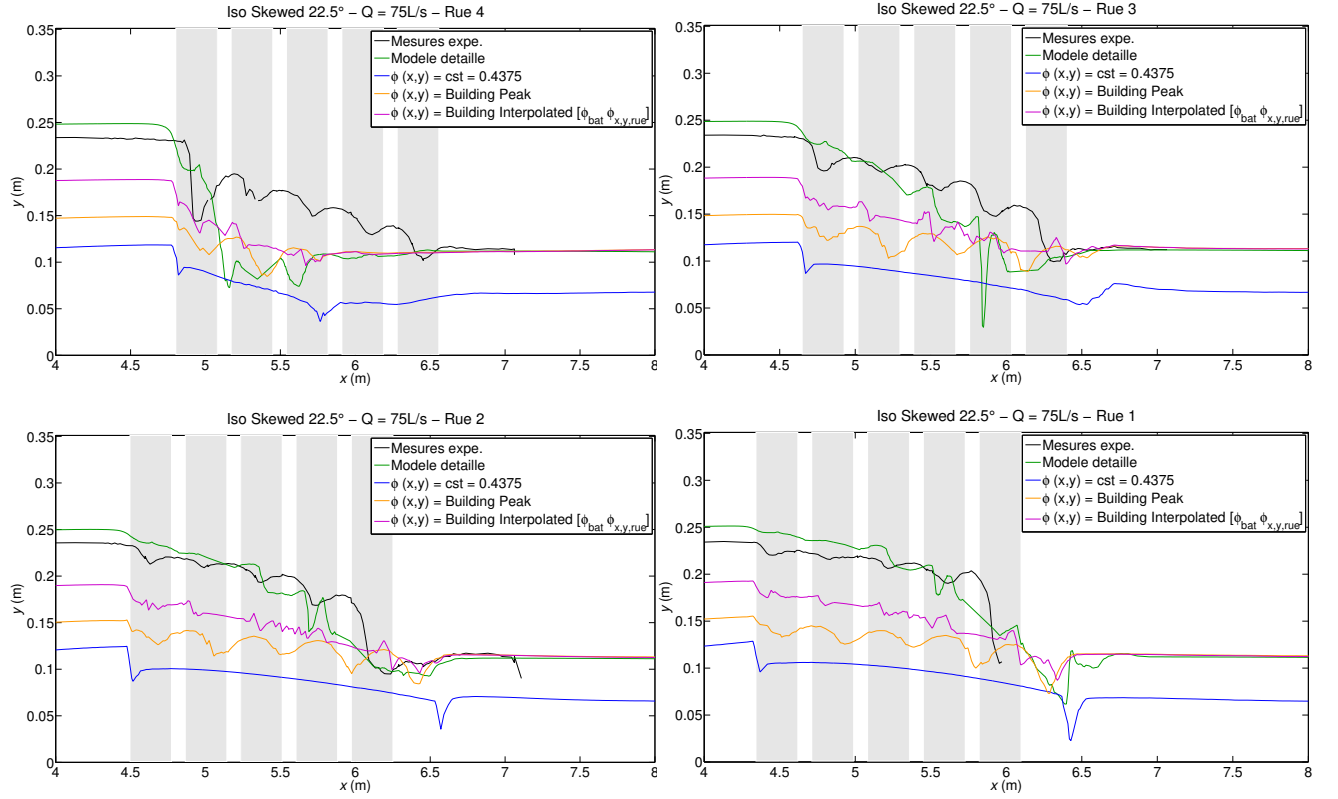


FIGURE 3.30 – Profils de hauteur d’eau dans les quatre rues d’une ville isotrope inclinée, pour un champ de porosité de type *Building Interpolated* $[\phi_{bat} ; \phi_{x,y,rue}]$. Le débit considéré vaut 75 L/s.

directionnel n’est pas bien reconstitué par le champ *Building Interpolated* $[\phi_{bat} ; \phi_{x,y,rue}]$. En effet, les vecteurs vitesse de ce champ ont tendance à rester dans l’axe du canal, c’est-à-dire suivant la diagonale de la ville. A la sortie de celle-ci, l’écoulement est concentré dans une direction principale au lieu de se séparer en deux flux distincts.

3.9.5 Configuration de ville anisotrope large inclinée

Ici également, le champ de porosité généré pour une configuration de ville anisotrope large inclinée est le même que pour une ville anisotrope large alignée.

En terme de hauteur d’eau, l’analyse établie pour la ville isotrope inclinée s’applique ici également. Le comportement de l’écoulement n’est pas bien représenté.

La seule différence notable est la proximité des profils de hauteur d’eau (Figure 3.33) des champs *Building Interpolated* $[\phi_{bat} ; \phi_{x,y,rue}]$ et *Building Peak*, leur porosité moyenne étant plus proche ici (resp. 0.407 et 0.426) que dans le cas d’une ville isotrope (resp. 0.356 et 0.425).

Les effets directionnels sont à peine visibles, comme illustré à la Figure 3.34. De nouveau, les vecteurs vitesse sont tous orientés selon une seule direction principale, alignée avec la diagonale de la ville.

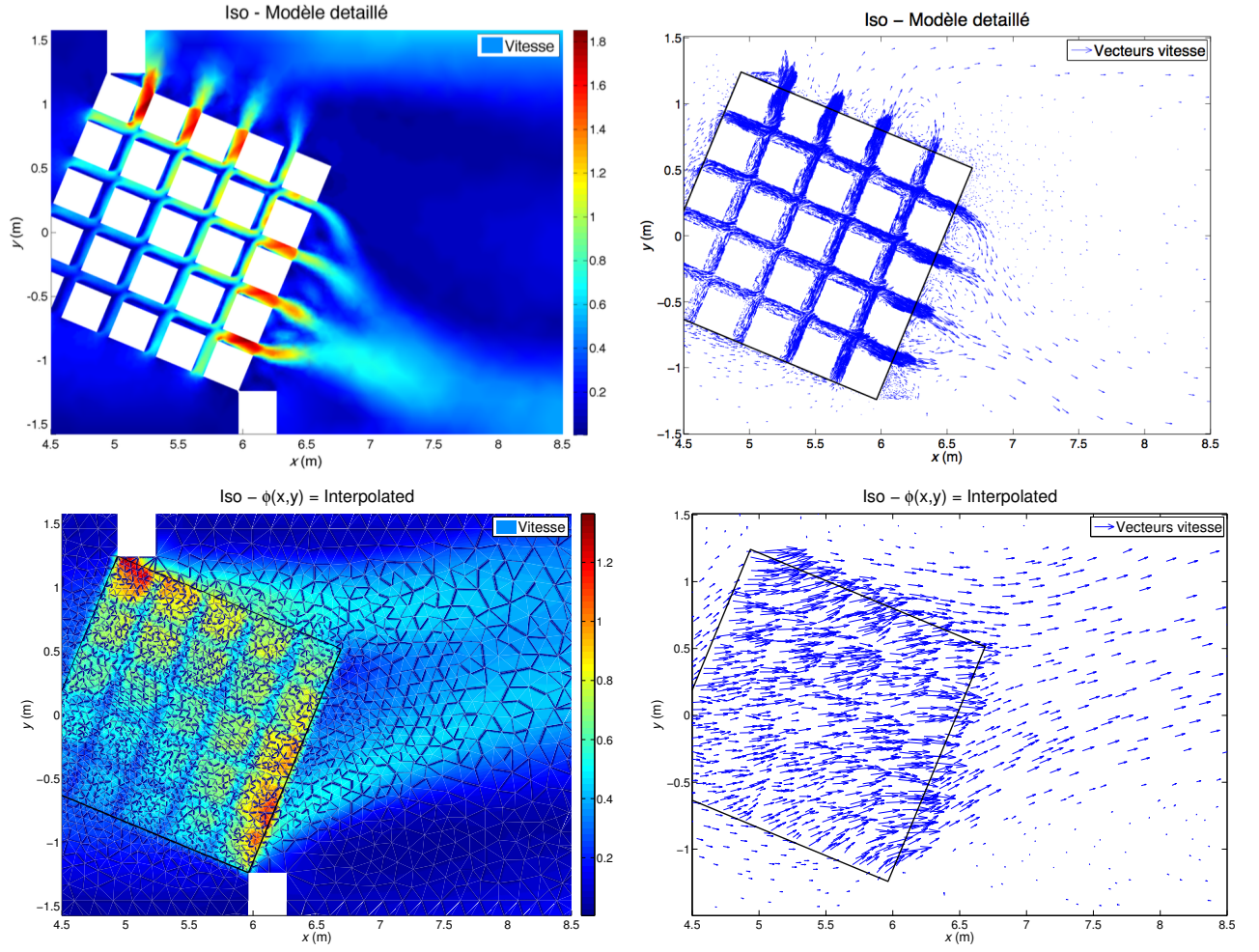


FIGURE 3.31 – Comparaison des effets directionnels obtenus avec le modèle détaillé (en haut) et le champ *Building Interpolated* $[\phi_{bat} ; \phi_{x,y,rue}]$ (en bas), dans le cas d’une ville isotrope. A gauche : le champ des vitesses interpolées ; à droite : le champ des vecteurs vitesse, les unités sont en m/s. Le débit considéré vaut 75 L/s.

En résumé - *Building Interpolated* $[\phi_{bat} ; \phi_{x,y,rue}]$ - Incliné

Le cas d’une ville inclinée met en évidence les limites d’un tel champ de porosité qui ne reproduit pas les effets directionnels. Étant donné qu’il s’agit là du champ le plus abouti, la nécessité de passer par un choix judicieux du tenseur de traînée semble évidente.

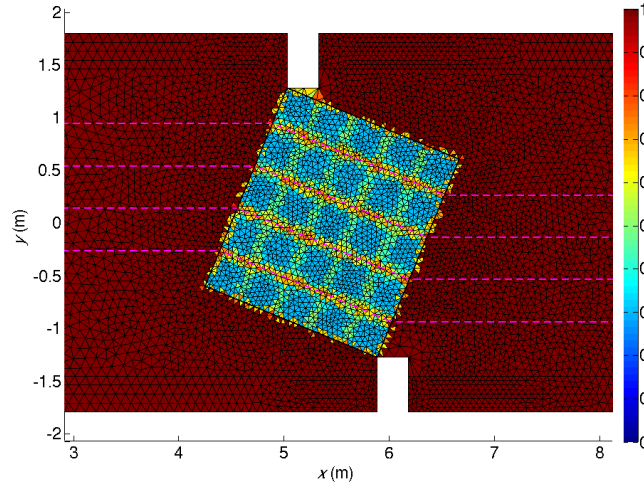


FIGURE 3.32 – Champ de porosité de type *Building Interpolated* $[\phi_{bat} ; \phi_{x,y,rue}]$ dans le cas d'une ville anisotrope large inclinée.

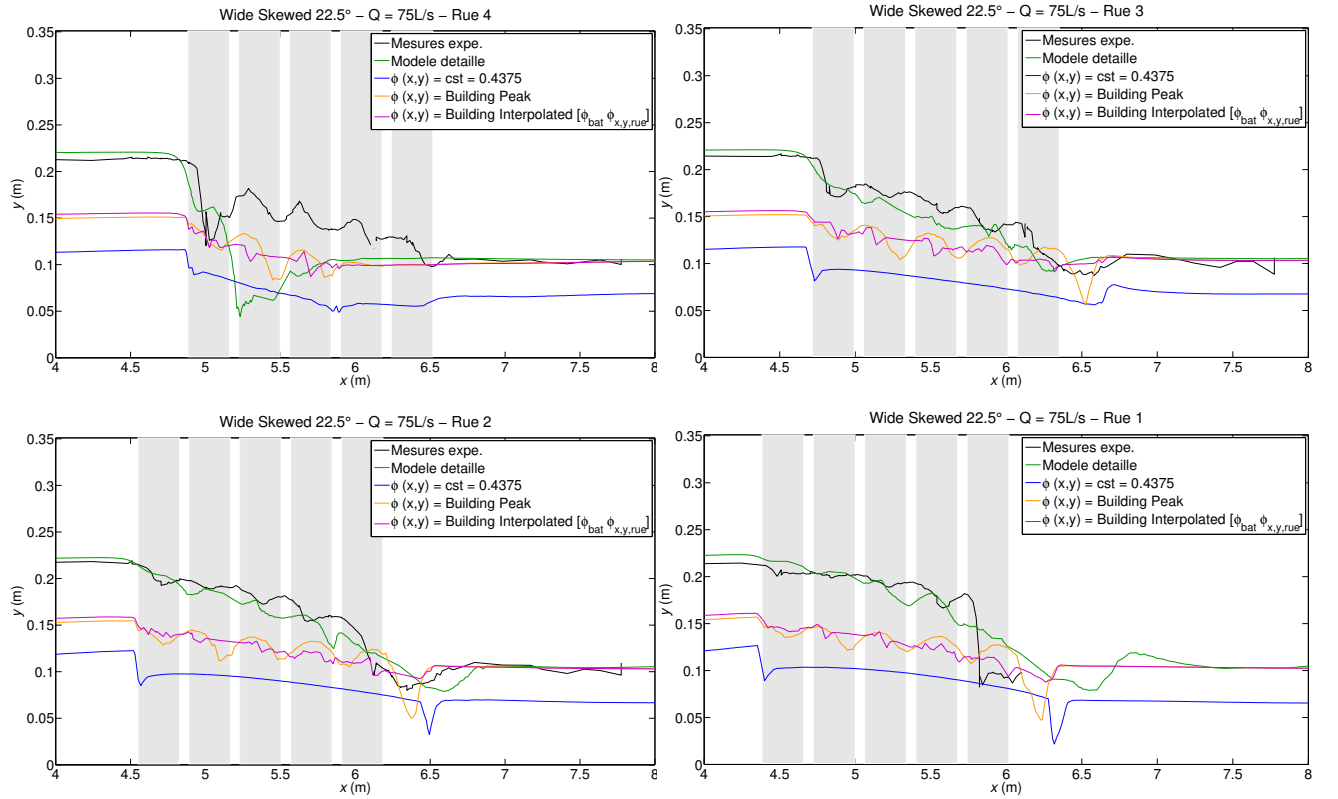


FIGURE 3.33 – Profils de hauteur d'eau dans les quatre rues d'une ville anisotrope large inclinée, pour un champ de porosité de type *Building Interpolated* $[\phi_{bat} ; \phi_{x,y,rue}]$. Le débit considéré vaut 75 L/s.

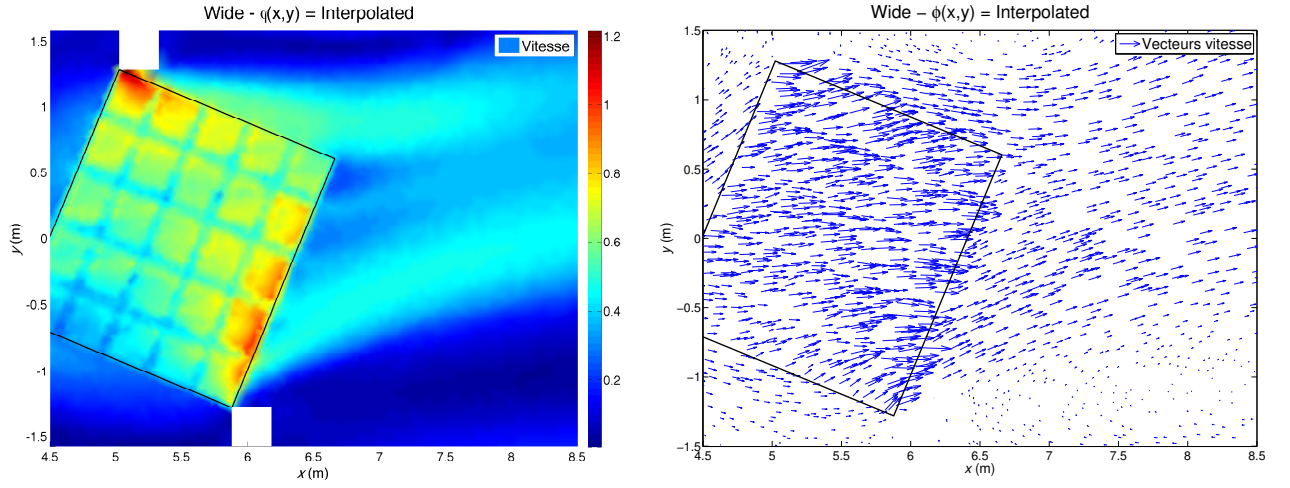


FIGURE 3.34 – Comparaison des effets directionnels obtenus avec le champ *Building Interpolated* $[\phi_{bat} ; \phi_{x,y,rue}]$, dans le cas d’une ville anisotrope large. A gauche : le champ des vitesses interpolées ; à droite : le champ des vecteurs vitesse, les unités sont en m/s. Le débit considéré vaut 75 L/s.

3.10 Conclusion

Après ce chapitre consacré aux champs de porosité, il convient de faire le point et de rassembler les enseignements principaux.

Premièrement, les simulations réalisées avec un champ de porosité constant ont révélé l'intérêt d'une transition de porosité abrupte entre le canal et la ville. Cette transition brutale induit une hauteur d'eau plus importante à l'amont et une chute de hauteur d'eau à l'entrée de la ville, ce qui correspond au comportement réel de l'écoulement. Le comportement opposé a pu être confirmé par les essais réalisés avec des champs comportant une transition douce, leurs résultats ne reflètent pas la réalité de l'écoulement.

Ensuite, le champ *CDF* a montré la faiblesse liée au caractère directionnel d'un tel champ de porosité. En effet, ce champ a sens dans la mesure où la porosité moyenne d'une section est plus faible au début qu'en fin de ville. C'est-à-dire que :

$$\frac{\partial \phi}{\partial x} > 0 \text{ \& } \frac{\partial \phi}{\partial y} = 0$$

Le profil de hauteur d'eau est de ce fait influencé dès le milieu de la ville par la condition de hauteur d'eau à l'aval, ce qui lui donne une allure radicalement différente selon le débit.

Le champ *Building Peak*, lui, a mis en évidence l'intérêt d'un champ de porosité de type *macroscopique*, ce qui, pour rappel, est un champ qui tient compte de la position des rues et des bâtiments. Il a donné des profils de hauteur d'eau très intéressants au sein de la zone urbaine. Les effets directionnels ne sont cependant pas reproduits. De plus, ce type de champ n'est applicable qu'à un milieu urbain périodique, cette caractéristique limite la diversité des cas aptes à être étudiés.

Les résultats intéressants obtenus avec *Building Peak* ont motivé la création d'un champ du même type, *Building Interpolated*. Son principal atout est sa souplesse car il peut être adapté aux cas de villes irrégulières. Néanmoins, aucune amélioration significative des profils de hauteur d'eau ou des effets directionnels n'est apparue.

Enfin, toujours dans l'idée d'un champ de porosité adaptable aux villes irrégulières, le champ *Building Interpolated* [ϕ_{bat} ; $\phi_{x,y,rue}$] permet de reproduire en partie l'effet lié à l'anisotropie d'une ville. En effet, des valeurs de porosité différentes sont attribuées aux rues selon qu'elles sont larges ou étroites. Ces valeurs dépendent d'ailleurs directement de la largeurs des rues en question. Par contre, les effets directionnels ne sont pas reproduits dans le cas d'une ville inclinée.

L'étude du tenseur de traînée a pour but de corriger l'écart de hauteur d'eau subsistant entre les simulations et les données expérimentales et surtout de reconstituer les effets directionnels dans les villes inclinées.

Chapitre 4

Tenseur de traînée

Le tenseur des pertes de charge est le deuxième paramètre de simulation qui est étudié. En effet, il ressort que les pertes de charge sont responsables des différences entre les résultats expérimentaux et ceux obtenus par simulations [Velickovic, 2012]. Un milieu urbain est composé d'un réseau de rues qui se croisent, formant des carrefours qui sont les points de rencontre de flux venant de directions différentes. Cette rencontre provoque des pertes d'énergie potentielle causées par le changement d'orientation du flux, sa dispersion, etc. L'écoulement va tendre à retrouver un état stable et perd une partie de son énergie. Dans ce cas, les pertes d'énergie potentielle portent le nom de *pertes de charge singulières*.

Comme présenté au point 2.1.1 sur les rappels théoriques, les pertes de charge sont des éléments prépondérants de la simulation, elles sont la conséquence des frottements, des zones de recirculation, des changements de géométrie, des redistributions de l'écoulement aux carrefours, etc. Les pertes de charge régulières étant induites par le frottement de l'écoulement sur les parois, cette notion est bien maîtrisée. L'évaluation des pertes de charge singulières reste quant à elle très difficile. Des formules empiriques existent pour certains cas généraux comme les pertes de charge lors du passage de l'écoulement dans un coude à 90° ou lors d'un élargissement brusque. Cependant, les pertes aux carrefours de plusieurs écoulements ne sont pas aussi faciles à quantifier, car énormément de paramètres doivent entrer en ligne de compte : les vitesses des flux, les dimensions géométriques des canaux, l'angle formé par ceux-ci, etc.

Ce chapitre contient une étude d'influence des éléments constituant le tenseur de traînée. Elle se base sur les champs vectoriels de vitesse et les hauteurs d'eau obtenus pour différentes valeurs du tenseur de traînée. Ces valeurs testées ne visent pas à modéliser l'écoulement au mieux, mais le but est d'identifier clairement leur répercussion sur l'écoulement, notamment les effets directionnels.

Dans ce chapitre, le champ de porosité appliqué à la ville est systématiquement le champ constant $\phi = 0.4375$ afin d'isoler l'effet du tenseur de traînée. Pour cette raison, seul le cas de la ville isotrope est étudié dans ce chapitre.

4.1 Généralités

Les pertes de charge interviennent dans le code de calcul sous la forme d'un terme source dans le bilan de quantité de mouvement, c'est donc directement la vitesse qui est impactée. Ces pertes de charge dépendent du tenseur de traînée qui a été défini par 9 valeurs potentiellement distinctes (colorées en vert) [Velickovic, 2012]. Ce tenseur symétrique est composé de 4 sous-matrices, elles

aussi symétriques. Dans son intégralité, il s'écrit sous la forme :

$$\left[\begin{pmatrix} D_{xxxx} & D_{xxxy} \\ D_{xxyx} & D_{xxyy} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} D_{xyxx} & D_{xyxy} \\ D_{xyyx} & D_{xyyy} \end{pmatrix} \right] \quad (4.1)$$

Dans le code de calcul, il est défini comme une matrice 3×3 ne reprenant que les valeurs distinctes :

$$D = \begin{bmatrix} D_{xxxx} & D_{xxxy} & D_{xxyy} \\ D_{xyxx} & D_{xxyy} & D_{xyyy} \\ D_{yyxx} & D_{yyxy} & D_{yyyy} \end{bmatrix} \quad (4.2)$$

Ce tenseur est caractérisé par le milieu et ne dépend pas de son orientation. Un tel tenseur est alors dit *invariant à la rotation*. Pour être appliqué à une ville qui n'est pas alignée avec le canal, le tenseur d'ordre 4 est donc multiplié par une matrice de rotation K de la manière suivante :

$$D' = K^T \cdot \begin{bmatrix} K^T \cdot \begin{pmatrix} D_{xxxx} & D_{xxxy} \\ D_{xxyx} & D_{xxyy} \end{pmatrix} \cdot K & K^T \cdot \begin{pmatrix} D_{xyxx} & D_{xyxy} \\ D_{xyyx} & D_{xyyy} \end{pmatrix} \cdot K \\ K^T \cdot \begin{pmatrix} D_{yxxx} & D_{yxxy} \\ D_{yxyx} & D_{yxyy} \end{pmatrix} \cdot K & K^T \cdot \begin{pmatrix} D_{yyxx} & D_{yyxy} \\ D_{yyyx} & D_{yyyy} \end{pmatrix} \cdot K \end{bmatrix} \cdot K \quad (4.3)$$

La matrice de rotation K qui représente le passage du système d'axes liés à la ville au système d'axes liés au canal s'écrit :

$$K = \begin{bmatrix} \cos(\beta) & \sin(\beta) \\ -\sin(\beta) & \cos(\beta) \end{bmatrix} \quad (4.4)$$

Ce qui donne, pour une rotation de 22.5° dans le sens horlogique, les valeurs suivantes :

$$K = \begin{bmatrix} \cos(-22.5^\circ) & \sin(-22.5^\circ) \\ -\sin(-22.5^\circ) & \cos(-22.5^\circ) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.924 & -0.382 \\ 0.382 & 0.924 \end{bmatrix} \quad (4.5)$$

Sur la Figure 4.1 se trouve l'illustration des systèmes d'axes global et local.

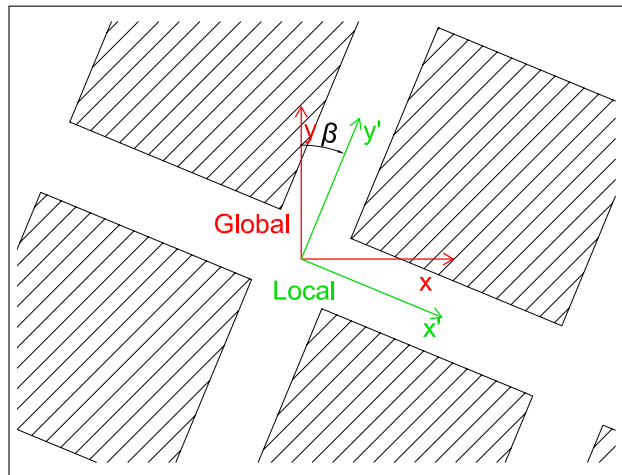


FIGURE 4.1 – Systèmes d'axes liés au canal (en rouge) et à la ville (en vert).

Durant l'étude du champ de porosité, l'expression des pertes de charge est restée inchangée :

$$\Delta H_x = \frac{\phi a_{pdc} V}{2g} (D_{xxxx} V_x + D_{xxxy} V_y) \quad (4.6)$$

$$\Delta H_y = \frac{\phi a_{pdc} V}{2g} (D_{xxy} V_x + D_{xyy} V_y) \quad (4.7)$$

Où :

- D_{xxx} , D_{xxy} et D_{xyy} sont tirés du tenseur de traînée suivant :

$$D = \begin{bmatrix} D_{xxx} & D_{xxy} & D_{xyy} \\ D_{xyx} & D_{xyy} & D_{yyy} \\ D_{yyx} & D_{yyx} & D_{yyy} \end{bmatrix} \quad (4.8)$$

- ϕ est la porosité de la cellule de calcul. Ici, son intérêt est d'appliquer la perte de charge uniquement à la proportion de la surface occupée par l'eau.
- a_{pdc} est un coefficient majorateur de pertes de charge. Il permet de tenir compte du fait que l'écoulement se confronte à plus d'obstacles dans la direction des diagonales de la ville [Soares-Frazao et al., 2016]. Il vaut :

$$a_{pdc} = 5 \cdot |\sin(2\theta)| + 1 \quad (4.9)$$

Où l'angle θ , qui représente l'angle formé par l'axe x' de la ville et le vecteur vitesse, est donné par l'expression :

$$\theta = \beta - \arctan\left(\frac{V_y}{V_x}\right) \quad (4.10)$$

avec β l'angle de rotation de la ville par rapport au canal dans le sens trigonométrique, il vaut 22.5° dans ce qui suit.

Ce coefficient a_{pdc} varie entre 1 pour $\theta = 0^\circ$ et 6 pour $\theta = 45^\circ$, comme illustré à la Figure 4.2.

- V est la valeur de la vitesse absolue de l'écoulement. V_x et V_y sont les vitesses selon les axes x et y .

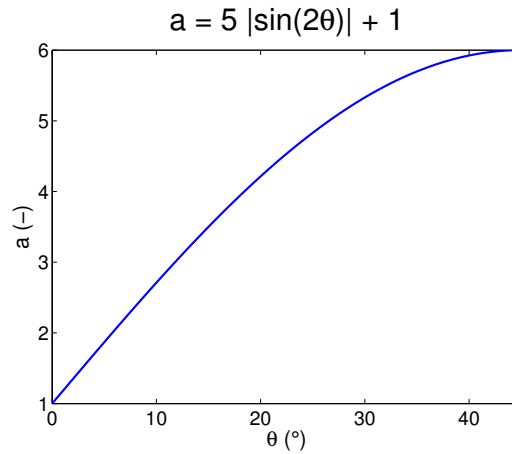


FIGURE 4.2 – Coefficient majorateur de pertes de charge a_{pdc} en fonction de θ (l'angle formé par le vecteur vitesse et le réseau de rues).

Cette vision des pertes de charge est en réalité réductrice sur de nombreux points. En effet, 9 composantes du tenseur sont potentiellement différentes, et seules 3 interviennent dans les formules. De plus, dans le cas d'une ville dont le réseau de rues est aligné avec l'écoulement, les pertes de charge évaluées dans une direction ne tiennent compte que de la vitesse dans cette même direction.

Une représentation plus complète des pertes de charge fait intervenir tous les éléments du tenseur sans exception. Quelque soit la direction étudiée, chaque composante de vitesse influence la génération des pertes de charge. Une telle expression s'écrit [Velickovic, 2012] :

$$\Delta H_x = \frac{\phi a_{pdc}}{2gV} \cdot [V_x \cdot (D_{xxxx}V_xV_x + D_{xxxy}V_xV_y + D_{xxyy}V_yV_y) + V_y \cdot (D_{xyxx}V_xV_x + D_{xyxy}V_xV_y + D_{xyyy}V_yV_y)] \quad (4.11)$$

$$\Delta H_y = \frac{\phi a_{pdc}}{2gV} \cdot [V_x \cdot (D_{xyxx}V_xV_x + D_{xyxy}V_xV_y + D_{xyyy}V_yV_y) + V_y \cdot (D_{yyxx}V_xV_x + D_{yyxy}V_xV_y + D_{yyyy}V_yV_y)] \quad (4.12)$$

La cohérence de cette formulation est garantie par vérification des unités qui correspondent avec la formule générale des pertes de charge de Borda, qui s'écrit :

$$\Delta H = \xi \cdot \frac{V^2}{2g} \quad (4.13)$$

Puisque les pertes de charge singulières ne se retrouvent que dans le milieu urbain, le tenseur de traînée D est bien entendu nul hors de ce milieu. Seules les pertes de charge régulières liées au frottement avec les parois du canal sont prises en compte hors de la ville. Chaque cellule de la ville se voit attribuer un tenseur de traînée en plus d'une valeur de porosité. Le même tenseur est utilisé sur tout le milieu urbain.

4.2 Influence des composantes du tenseur sur la ville isotrope alignée

Afin de mettre en avant l'impact que le tenseur de traînée a sur l'écoulement, des simulations sont effectuées en ne générant les pertes de charge que dans une direction. Pour cela, certaines valeurs du tenseur sont choisies et appliquées séparément pour les éléments D_{xxxx} et D_{yyyy} , le reste du tenseur étant nul. En effet, ce sont les composantes les plus intuitives du tenseur. La valeur arbitraire qui est attribuée séparément à ces éléments est égale à 50. Dans l'expression de la perte de charge selon l'axe x , les termes ne tenant compte que de la vitesse selon l'axe x sont colorés en vert :

$$\Delta H_x = \frac{\phi a_{pdc}}{2gV} \cdot [V_x \cdot (\textcolor{green}{D_{xxxx}}V_xV_x + D_{xxxy}V_xV_y + D_{xxyy}V_yV_y) + V_y \cdot (D_{xyxx}V_xV_x + D_{xyxy}V_xV_y + D_{xyyy}V_yV_y)] \quad (4.14)$$

Imposer une valeur importante à l'élément D_{xxxx} uniquement permet d'isoler son effet et ainsi de l'analyser plus facilement. Littéralement, de cette façon, la perte de charge selon l'axe x est générée par la vitesse selon l'axe x uniquement.

Dans le cas où seule la composante D_{xxxx} est non-nulle, l'expression devient :

$$\Delta H_x = \frac{\phi a_{pdc}}{2gV} \cdot [D_{xxxx} \cdot V_x^3] \quad (4.15)$$

La même démarche est opérée concernant les pertes de charge selon l'axe y . Le terme prenant en compte uniquement la vitesse selon l'axe y est coloré en vert :

$$\Delta H_y = \frac{\phi a_{pdc}}{2gV} \cdot [V_x \cdot (D_{xyxx}V_xV_x + D_{xyxy}V_xV_y + D_{xyyy}V_yV_y) + \textcolor{green}{V_y} \cdot (D_{yyxx}V_xV_x + D_{yyxy}V_xV_y + \textcolor{green}{D_{yyyy}}\textcolor{green}{V_y}V_y)] \quad (4.16)$$

De la même manière, la perte de charge selon l'axe y est générée par la vitesse selon l'axe y uniquement.

Dans le cas où seule la composante D_{yyyy} est non-nulle, l'expression se résume à :

$$\Delta H_y = \frac{\phi a_{pdc}}{2gV} \cdot [D_{yyyy} \cdot V_y^3] \quad (4.17)$$

Si ces dernières expressions sont développées pour être exprimées en fonction de la norme de la vitesse et de l'angle θ que le vecteur vitesse forme avec la direction x' de la ville, on obtient :

$$\begin{aligned} \Delta H_x &= \frac{\phi a_{pdc}}{2gV} \cdot [D_{xxxx} \cdot V_x^3] \\ &= \frac{\phi (1 + 5 \cdot |\sin(2\theta)|)}{2gV} \cdot [D_{xxxx} \cdot V^3 \cdot \cos(\theta)^3] \\ &= \frac{\phi \cdot V^2}{2g} \cdot [D_{xxxx} \cdot \cos(\theta)^3 \cdot (1 + 5 \cdot |\sin(2\theta)|)] \end{aligned} \quad (4.18)$$

Ce développement peut être réalisé sur l'expression des pertes de charge selon y de manière analogue. La Figure 4.3 représente l'évolution du terme $[\cos(\theta)^3 \cdot (1 + 5 \cdot |\sin(2\theta)|)]$ en fonction de θ . Ce terme peut être considéré comme le coefficient total majorateur de pertes de charge.

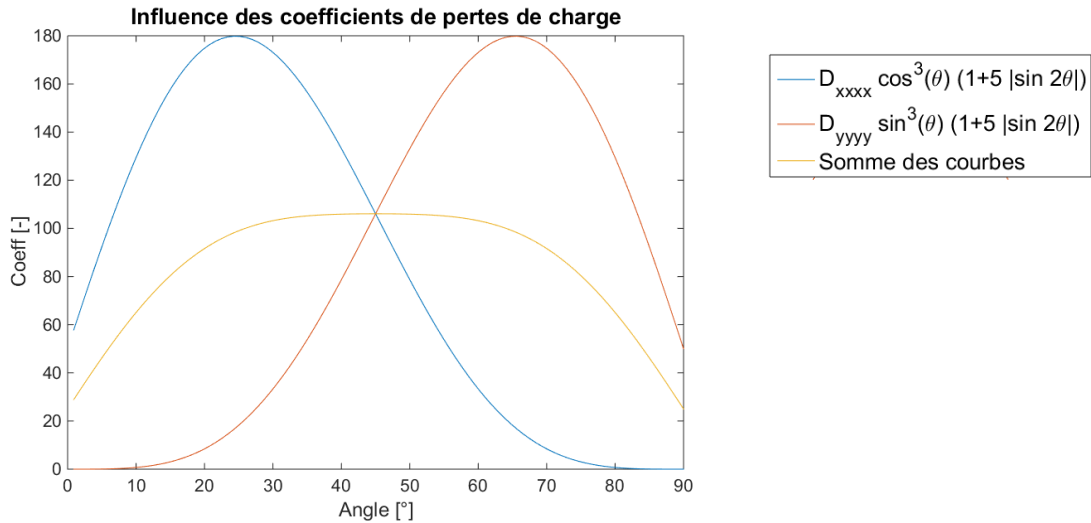


FIGURE 4.3 – Coefficient total majorateur de pertes de charge en fonction de θ , l'angle formé par l'axe x' de la ville et le vecteur vitesse, compte tenu d'une composante $D_{xxxx} = 50$ en bleu, d'une composante $D_{yyyy} = 50$ en rouge et de la somme des deux en jaune.

Sur ce graphique, on remarque que le terme majorateur atteint un maximum pour un angle θ différent de 45° , ce qui est l'angle donnant une valeur de a_{pdc} maximum. La direction de pertes de charge maximum tend à se rapprocher de la direction x (resp. y) pour $D_{xxxx} = 50$ (resp. $D_{yyyy} = 50$).

Un autre point mérite d'être mis en avant : la symétrie du canal dans la configuration d'une ville alignée. Mathématiquement, les résultats sont donc eux aussi symétriques par rapport à l'axe des abscisses. Cette propriété peut être appliquée aux champs de vitesse comme aux champs de hauteur d'eau. Les résultats sont donc identiques le long des rues extérieures (rues 1 et 4) ainsi que dans les rues centrales (rues 2 et 3). Cette symétrie est illustrée à la Figure 4.7.

Les points suivants récapitulent l'influence de ces éléments visibles sur les résultats des simulations.

4.2.1 Impact sur la vitesse

Cas $D = 0$

Une mise en lumière des effets du tenseur de traînée doit s'opérer de manière objective. Le cas de référence qui est utilisé pour voir les variations est le cas de la ville isotrope dans laquelle le tenseur de traînée est nul. C'est le cas où aucun incrément de perte de charge n'y est généré, c'est-à-dire que les pertes de charge dues à la dispersion de l'écoulement et aux zones de recirculation sont ignorées. Les pertes de charge se limitent, dès lors, exclusivement aux pertes par frottement dénotées par le coefficient S_f et calculées par la formule de Manning (2.18). La seule influence exercée par le milieu urbain sur l'écoulement prend directement sa source dans le terme de porosité ϕ . C'est aussi le seul terme qui distingue le canal de la ville. Le champ vectoriel de vitesse généré par cette configuration est illustré sur la Figure 4.4. L'écoulement traverse la ville sans qu'il y ait de changement de trajectoire notable, étant donné que le milieu est complètement homogène.

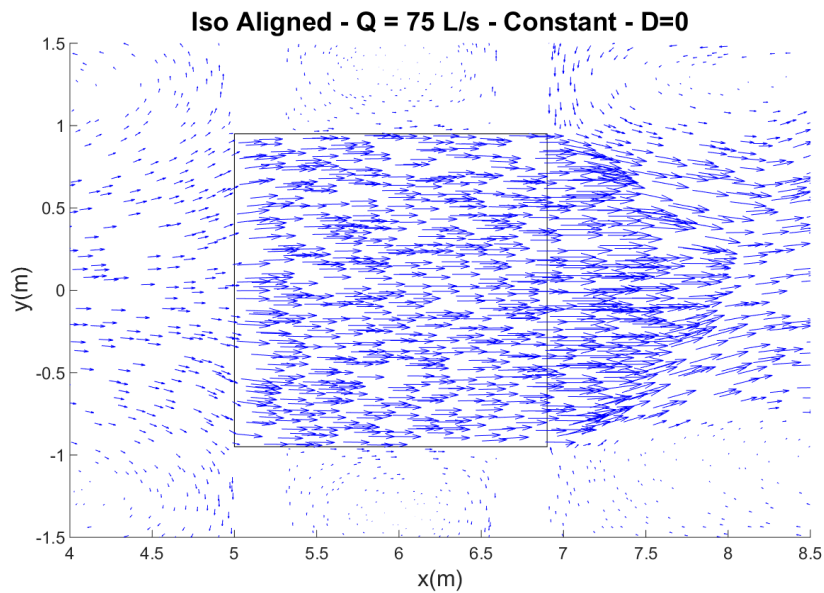


FIGURE 4.4 – Champ vectoriel de vitesse - $D=0$ - Ville isotrope alignée - Champ de porosité constant - 75L/s

Cas $D = 0$ sauf $D_{xxx} = 50$

Avec une telle valeur de D_{xxx} , la vitesse dans la direction x génère une importante perte de charge dans cette même direction. Dès lors, le flux a tendance à s'aligner avec l'axe des y puisque c'est l'axe selon lequel il est le moins freiné. Le champ vectoriel de vitesse est illustré sur la Figure 4.5.

Cependant, dans le cas où la ville est alignée, la géométrie de la ville comporte des blocs d'obstruction visant à canaliser le flux dans la ville, ce qui réduit également la circulation d'eau dans les rues verticales. Une illustration de cette particularité de la ville alignée est disponible à la Figure 4.6. Une zone de recirculation est d'ailleurs visible sur la Figure 4.7. Pour cette raison, l'écoulement subit une divergence en entrée de ville et une convergence à sa sortie. Cela explique l'incompatibilité avec le comportement prédit d'un point de vue théorique. Même si l'écoulement s'écarte dans la mesure du possible de l'axe x , il est forcé de converger pour sortir de la zone urbaine.

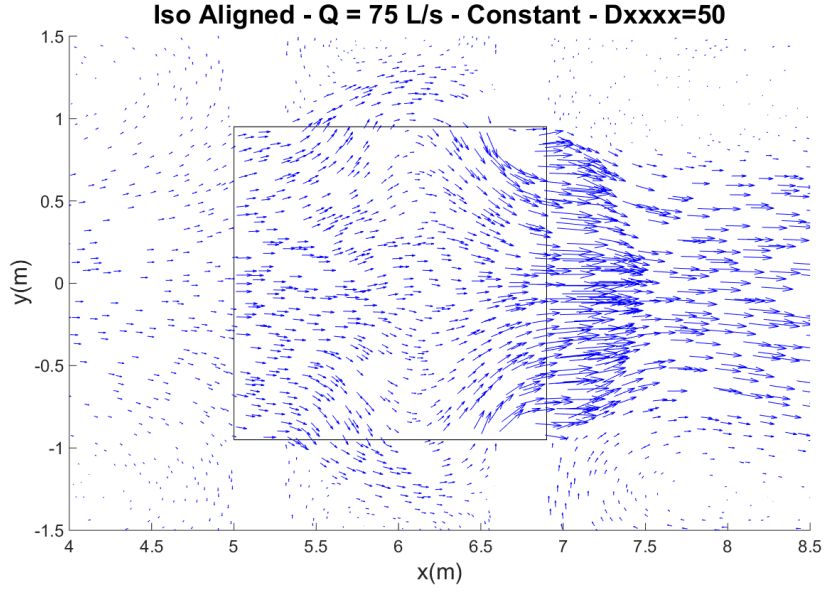


FIGURE 4.5 – Champ vectoriel de vitesse - $D_{xxxx} = 50$ - Ville isotrope alignée - Champ de porosité constant - 75L/s

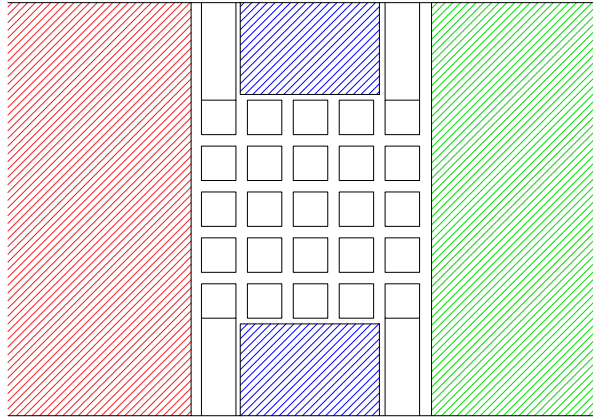


FIGURE 4.6 – Présence d'une zone d'eaux mortes (bleue) entre les zones d'écoulement en amont (rouge) et aval (verte) dans le cas d'une ville alignée.

En analysant les champs scalaires de vitesse illustrés sur la Figure 4.7, de grandes différences sont visibles. Dans le cas où $D_{xxxx} = 50$, l'écoulement est beaucoup plus lent que lorsque le tenseur de traînée est nul. En l'occurrence, au sein de la ville, la vitesse moyenne est de l'ordre de $0.4m/s$ contre une vitesse moyenne de $0.8m/s$ pour le tenseur de traînée nul. Ce comportement est dû au terme a_{pdc} également, car pour s'aligner avec la direction y , l'écoulement doit dévier petit à petit de l'axe x , et donc passer par l'axe diagonal de la ville. Il est alors confronté aux pertes de charge de la diagonale de la ville qui sont augmentées via ce terme a_{pdc} . Ceci reproduit le comportement qui a été observé dans le cas d'une ville réelle [Guinot and Soares-Fraza, 2006]. Par ailleurs, les zones de recirculation visibles entre les blocs d'obstruction sont nettement plus marquées dans le cas $D_{xxxx} = 50$ que dans le cas d'un tenseur $D = 0$.

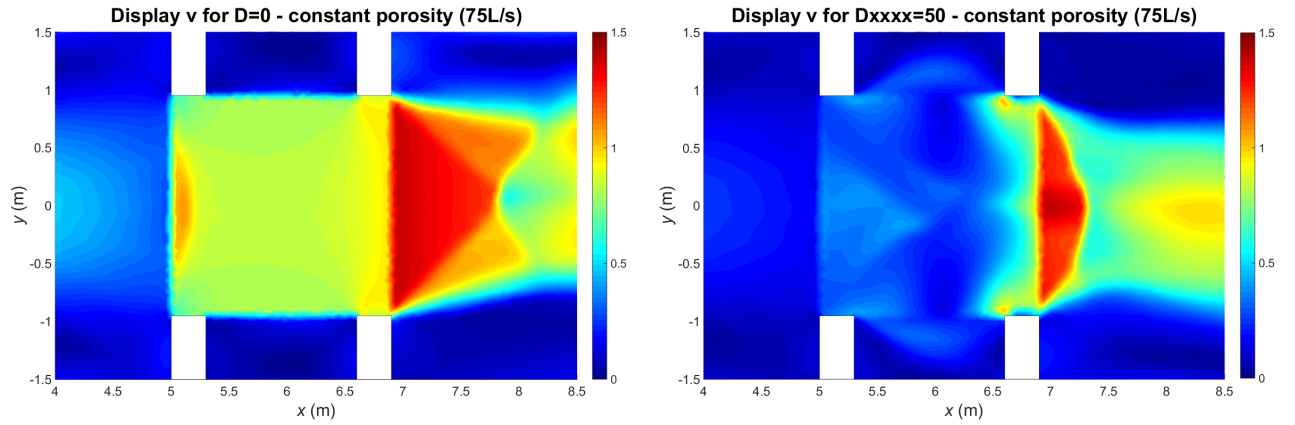


FIGURE 4.7 – Champ de vitesse (en m/s) - $D=0$ (gauche) et $D_{xxxx} = 50$ (droite) - Ville isotrope alignée - Champ de porosité constant - 75L/s

Cas $D = 0$ sauf $D_{yyyy} = 50$

Cette fois, c'est la vitesse dans la direction y qui génère des pertes de charge dans cette même direction. Après analyse de l'expression mathématique, le comportement de l'écoulement attendu a priori est un alignement des vecteurs vitesse avec la direction x , direction pour laquelle les pertes de charge sont moindres. Ce champ vectoriel des vitesses est présenté à la Figure 4.8.

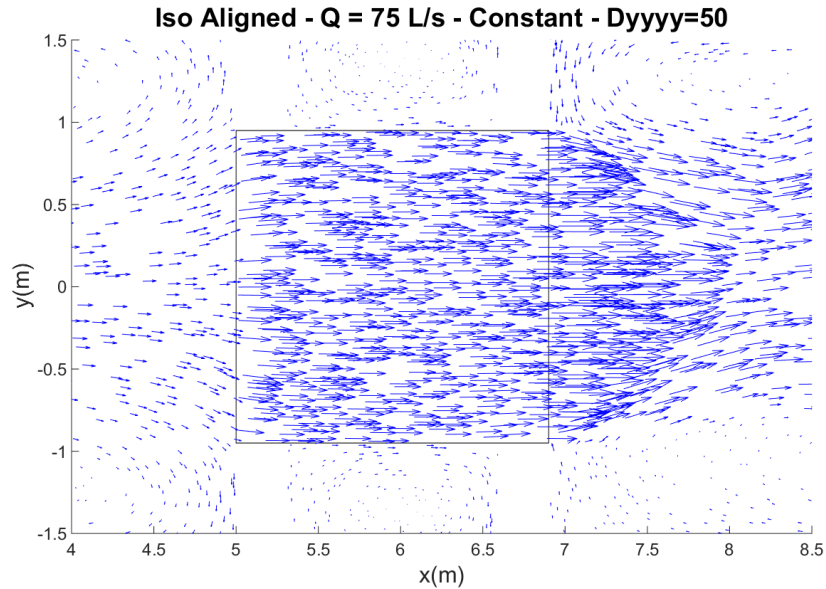


FIGURE 4.8 – Champ vectoriel de vitesse - $D_{yyyy}=50$ - Ville isotrope alignée - Champ de porosité constant - 75L/s

Les vecteurs vitesse s'alignent parfaitement avec la direction x , comme attendu. Ce comportement est plus visible que dans le cas $D_{xxxx} = 50$ car la direction x est la direction initiale de l'écoulement, un débit de 75l/s est maintenu dans cette direction. Avec un tenseur de traînée tel qu'il est défini ici, aucun changement de trajectoire n'est à relever.

La Figure 4.9 laisse transparaître une égalité presque parfaite en terme de norme de vitesse. Imposer ou non une perte de charge importante dans la direction y n'a pas d'influence sur l'écoulement.

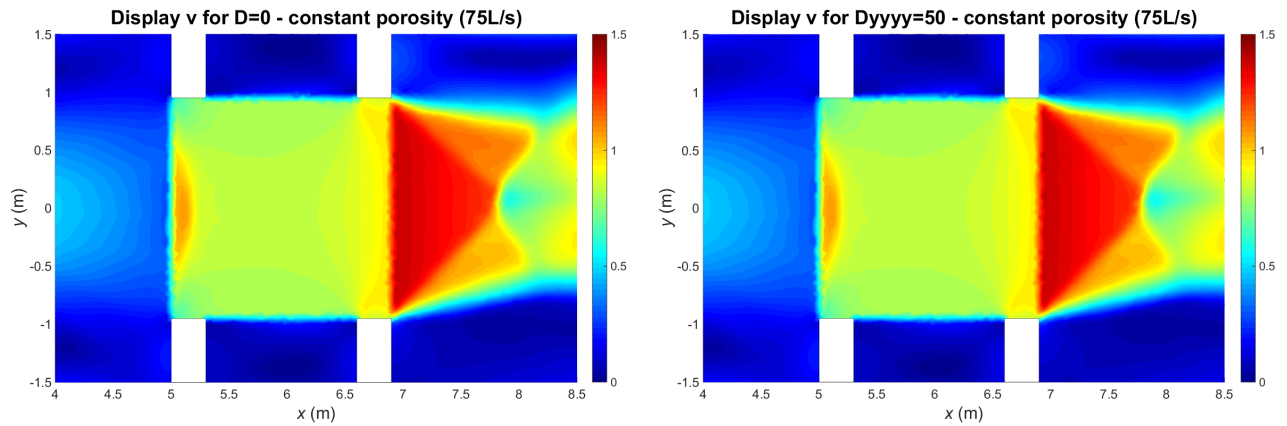


FIGURE 4.9 – Champ de vitesse (en m/s) - $D=0$ (gauche) et $D_{yyyy} = 50$ (droite) - Ville isotrope alignée - Champ de porosité constant - 75L/s

— En résumé - Vitesse dans la ville alignée —

L'orientation des vecteurs de vitesse tend vers la direction des pertes de charge minimum. Pour $D_{xxx} = 50$, l'écoulement s'établit suivant l'axe y , et selon l'axe x pour $D_{yyy} = 50$. Cependant, les blocs d'obstruction ne permettent pas d'écoulement dans les rues verticales. Freiner l'écoulement selon l'axe y n'a pas d'effet significatif.

4.2.2 Impact sur la hauteur d'eau

Cas $D = 0$ sauf $D_{xxx} = 50$

L'analyse du champ de vitesse laisse supposer que la composante D_{xxx} a un effet considérable sur la hauteur d'eau. De fait, en situation stationnaire, la conservation de la masse implique une hauteur d'eau plus élevée lorsque la vitesse diminue, et une hauteur d'eau plus basse lorsque la vitesse augmente. La Figure 4.10 illustre les profils de hauteur d'eau dans les rues 1 et 2¹. Par rapport au cas où les pertes de charge singulières sont négligées (cas $D = 0$), les pertes de charge intensifiées selon l'axe x provoquent de nombreuses variations :

- *Comportement à l'amont* : Le niveau d'eau est nettement relevé. Il se confond avec le niveau d'eau enregistré durant les expériences. La résistance accrue qu'exerce le milieu, via les pertes de charge accentuées, provoque une accumulation de l'eau en amont de la ville. Cet effet de "barrage" est comparable à ce qui ressorti de l'étude du champ de porosité CDF au point 3.5 du chapitre précédent. La charge de l'écoulement à l'amont est principalement statique, la vitesse étant assez faible.
- *Comportement dans le milieu urbain* : La chute de niveau d'eau à l'entrée de la ville est atténuée. C'est en ce point que le profil s'écarte le plus de la courbe expérimentale. A partir d'une valeur d'abscisse d'environ $x = 6.5m$, la courbe suit l'allure des données

1. Par symétrie, les résultats dans les rues 1 et 4 (rues extérieures) sont les mêmes. Idem pour les rues 2 et 3 (rues intérieures). Pour cette raison, seuls les profils de hauteur d'eau dans les rues 1 et 2 sont illustrés dans ce qui suit.

expérimentales avec un léger décalage jusqu'à la sortie de la ville.

- *Comportement à l'aval* : La chute du niveau d'eau en sortie de la ville est bien reproduite dans son amplitude. Et contrairement au cas de référence, la longueur du creux ne varie que très peu d'une rue à l'autre. Le ressaut qui suit ce creux a une amplitude comparable à celui obtenu avec le cas de référence ($D = 0$). Cependant, sa position est trop proche de la zone urbaine.

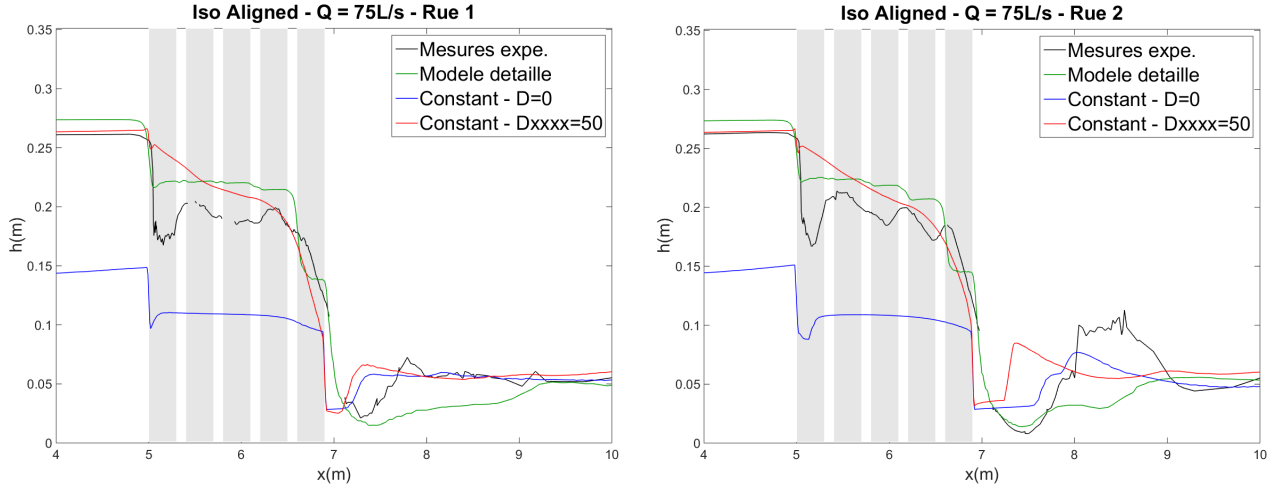


FIGURE 4.10 – Profils de hauteur d'eau - $D_{xxxx} = 50$ - Champ de porosité constant - Ville isotrope alignée - 75L/s - Rues 1 et 2

Cas $D = 0$ sauf $D_{yyyy} = 50$

Les champs de vitesse analysés au point précédent (4.2.1) permettent d'évaluer a priori le profil de hauteur d'eau. En effet, puisque le cas $D_{yyyy} = 50$ donne un champ de vitesse identique à celui du cas de référence, le profil de hauteur d'eau est aussi identique, les courbes rouge et bleue de la Figure 4.11 sont parfaitement confondues. Comme pour le champ de vitesse, imposer ou non une perte de charge importante dans la direction y n'a pas d'effet sur la hauteur d'eau non plus.

— En résumé - Hauteur d'eau dans la ville alignée —

Lorsque $D_{xxxx} = 50$, la direction initiale de l'écoulement est celle générant le plus de pertes de charge. Cela donne une hauteur d'eau à l'amont de la ville plus importante. Par contre, les profils de hauteur d'eau du cas $D_{yyyy} = 50$ et $D = 0$ sont confondus.

4.3 Influence des composantes du tenseur sur la ville isotrope inclinée

Il est plus facile d'interpréter les effets du tenseur de traînée dans le cas d'une ville inclinée. En effet, contrairement au cas aligné, les blocs d'obstruction sont placés de façon à laisser l'écoulement s'effectuer dans les deux directions principales du réseau de rues, comme illustré à la Figure 4.12. De plus, dans la réalité, l'inclinaison de la ville induit une répartition de l'écoulement dans les deux directions des rues. Une redistribution accrue de l'écoulement prend place aux carrefours, cela accentue les pertes de charge.

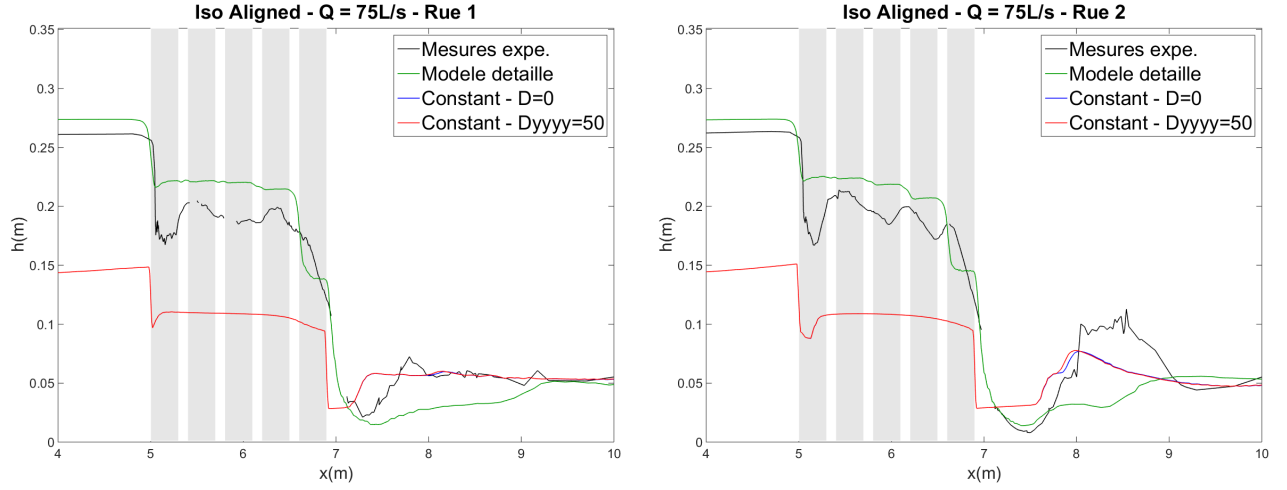


FIGURE 4.11 – Profils de hauteur d'eau - $D_{yyyy} = 50$ - Champ de porosité constant - Ville isotrope alignée - 75L/s - Rues 1 et 2

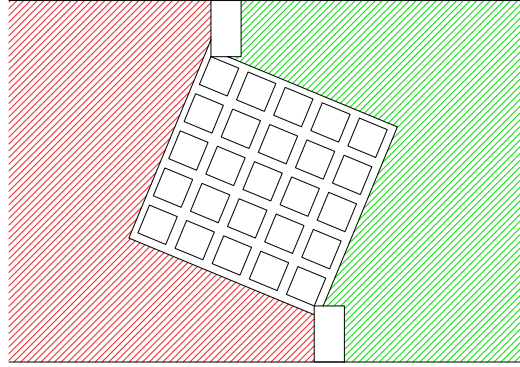


FIGURE 4.12 – Absence de zone d'eaux mortes entre les zones d'écoulement en amont (rouge) et aval (verte) dans le cas d'une ville inclinée.

C'est dans le but de prendre en compte ces redistributions aux carrefours qu'a été ajouté le terme a_{pdc} [Soares-Frazaio et al., 2016]. En effet, dans le cas de la ville réelle, l'axe de la diagonale est celui selon lequel l'écoulement aurait été soumis à des redistributions à répétitions. Ce terme a_{pdc} dépend de l'angle formé par le vecteur vitesse et le réseau de rues de la ville. Il est maximum lorsqu'il est aligné avec une diagonale. Or, dans le cas de la ville inclinée, les diagonales ne forment plus un angle de 45° avec le canal. En l'occurrence, a_{pdc} devient maximum pour $\theta = 22.5^\circ$ et 67.5° dans le cas incliné. Ces angles sont illustré sur la Figure 4.13.

Contrairement au point 4.2, la configuration du canal n'est plus symétrique, et a fortiori, les résultats attendus non plus.

4.3.1 Impact sur la vitesse

Cas $D' = 0$

Comme pour le cas d'une ville alignée, le tenseur de traînée nul fait office de référence.

Puisque $D = 0$ dans le canal et dans la ville aussi, seule la porosité distingue la ville du reste du canal. Cette porosité est constante et le milieu urbain est homogène sur toute sa surface. Cependant, l'écoulement subit une légère déviation par rapport à l'axe x du canal, comme illustré à la Figure 4.14. Cet effet est dû à l'inclinaison de la ville. En effet, même si le milieu urbain

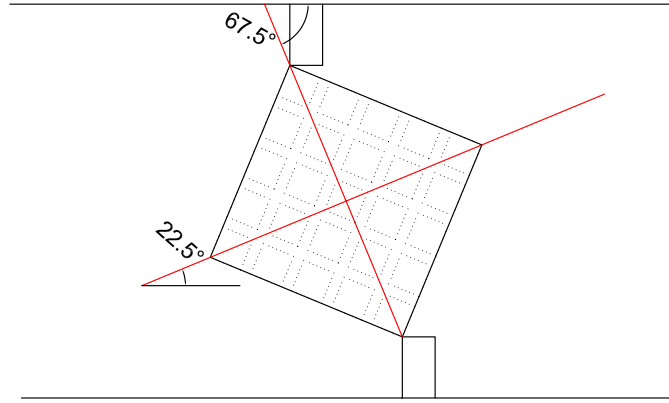


FIGURE 4.13 – Schéma de la ville inclinée sur lequel sont reprises en rouge les diagonales, directions de fortes pertes de charge intrinsèques à la ville.

est homogène, il exerce une résistance sur l'écoulement. Ce dernier a un comportement qui s'apparente à un contournement du coin d'attaque du milieu urbain, avant d'être obligé, par les blocs d'obstruction, de rentrer dans la ville.

D'autre part, l'écoulement suit une trajectoire en S pour contourner les blocs d'obstruction puisqu'ils ne sont pas situés à la même valeur en x au sein du canal. Ces blocs jouent le rôle de chicane.

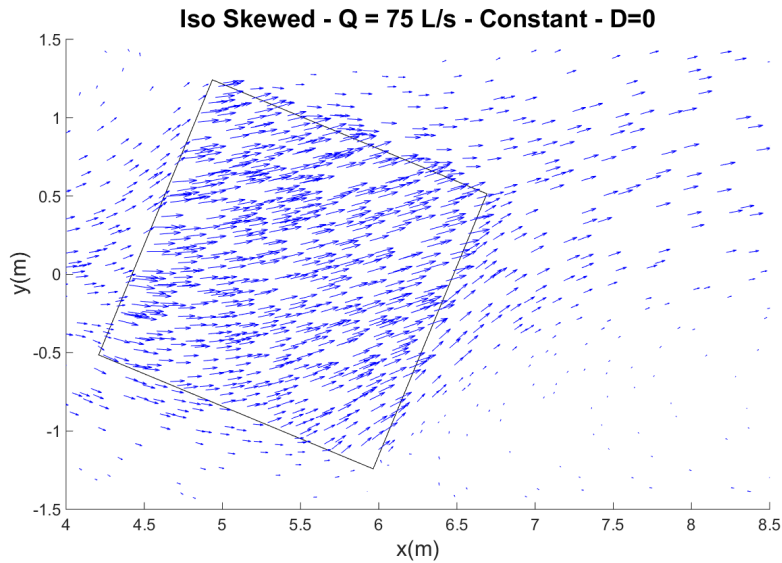


FIGURE 4.14 – Champ vectoriel de vitesse - $D' = 0$ - Champ de porosité constant - Ville isotrope inclinée - 75L/s

Cas $D' = 0$ sauf $D'_{xxx} = 50$

Le repère local de la ville est incliné par rapport au repère du canal, le tenseur exprimé en coordonnées locales se traduit comme suit en coordonnées globales :

$$D' = \begin{bmatrix} 50 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \xrightarrow{\theta=22.5^\circ} D = \begin{bmatrix} D_{xxxx} & D_{xxxy} & D_{xxyy} \\ D_{xyxx} & D_{xyxy} & D_{xyyy} \\ D_{yyxx} & D_{yyxy} & D_{yyyy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 36.42 & -15.08 & 6.25 \\ -15.08 & 6.25 & -2.58 \\ 6.25 & -2.58 & 1.07 \end{bmatrix}$$

Dans le cas d'un élément D'_{xxxx} ² du tenseur de traînée égal à 50, la vitesse dans la direction x' génère des pertes de charge importantes dans cette même direction. Ceci est visible sur le champ vectoriel des vitesses représenté à la Figure 4.15. La différence avec le cas d'une ville alignée est qu'ici x' et x ne sont plus parallèles. L'écoulement s'oriente dans la direction y' . Cette orientation est favorisée également par le coefficient a_{pdc} amplifiant les pertes de charge dans la direction de la diagonale.

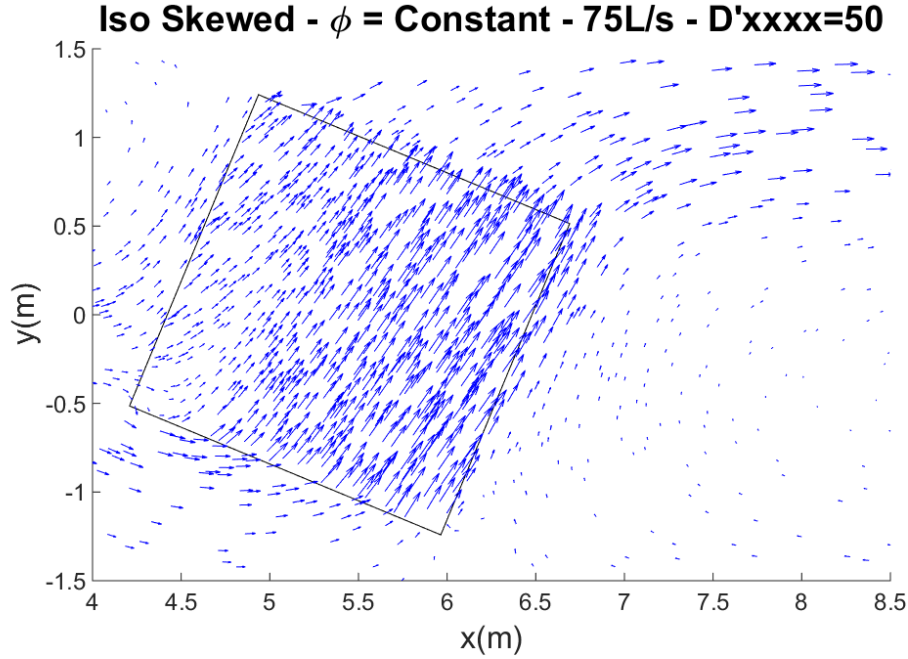


FIGURE 4.15 – Champ vectoriel de vitesse - $D'_{xxxx} = 50$ - Champ de porosité constant - Ville isotrope inclinée - 75L/s

Cas $D' = 0$ sauf $D'_{yyyy} = 50$

Les diverses remarques mises en avant pour le cas d'une ville alignée s'appliquent également à la configuration inclinée. De nouveau, le tenseur exprimé en coordonnées locales se traduit comme suit en coordonnées globales :

$$D' = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 50 \end{bmatrix} \xrightarrow{\theta=22.5^\circ} D = \begin{bmatrix} D_{xxxx} & D_{xxxy} & D_{xxyy} \\ D_{xyxx} & D_{xyxy} & D_{xyyy} \\ D_{yyxx} & D_{yyxy} & D_{yyyy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1.0723 & 2.5888 & 6.25 \\ 2.5888 & 6.25 & 15.088 \\ 6.25 & 15.088 & 36.4277 \end{bmatrix}$$

Les vecteurs vitesse de la Figure 4.16 ne suivent plus tout à fait la diagonale de la ville comme c'était le cas pour $D' = 0$. En réalité, deux phénomènes interviennent. D'une part, ils tendent à être parallèles à x' à cause du blocage de la direction y' . D'autre part, le gradient de pression selon x les pousse à s'aligner avec cette même direction. Au final, ils sont orientés entre x et x' .

2. La notation ' est utilisée pour faire référence à un élément exprimé dans le repère de la ville. La notation D'_{xxxx} est privilégiée à $D_{x'x'x'x'}$ par souci de lisibilité. Les axes x' et y' sont ceux du repère de la ville ; x et y étant liés au canal.

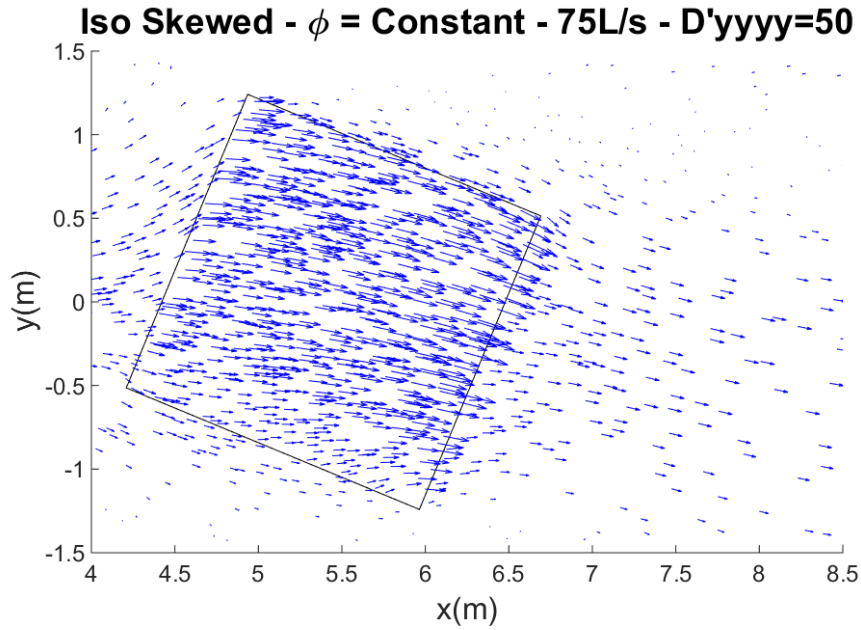


FIGURE 4.16 – Champ vectoriel de vitesse - $D'_{yyyy} = 50$ - Champ de porosité constant - Ville isotrope inclinée - 75L/s

En résumé - Vitesse dans la ville inclinée

Dans la configuration inclinée, l'écoulement a la possibilité de s'établir selon les deux axes x' et y' de la ville. L'inclinaison du milieu urbain induit à elle seule une tendance des vecteurs à s'aligner avec la diagonale de la ville. L'orientation des vecteurs vitesse est à nouveau liée à la direction des pertes de charge minimum.

4.3.2 Impact sur la hauteur d'eau

Cas $D' = 0$ sauf $D'_{xxxx} = 50$

L'analyse des profils de hauteur d'eau illustrés à la Figure 4.17 permet de décrire le comportement de l'écoulement en trois endroits distincts : à l'amont, dans le milieu urbain et à l'aval.

- *Comportement à l'amont* : Un rehaussement de la hauteur d'eau est assez net. Cela traduit une augmentation de la résistance totale qu'exerce le milieu urbain sur l'écoulement par rapport au cas $D = 0$.

La comparaison avec le cas d'une ville alignée peut être développée également. Dans le cas aligné, la hauteur d'eau dans les deux premières rues de la ville est beaucoup plus importante, 26cm (Figure 4.10) contre 13.5cm dans le cas incliné. Les blocs d'obstruction sont responsables de cet écart. La hauteur d'eau est plus faible lorsque la section de passage est plus importante. Or, dans le cas incliné, les blocs d'obstruction sont plus petits et leur position donne lieu à une section de passage plus grande puisqu'il s'agit de la diagonale de la ville.

Durant les expériences, la hauteur d'eau à l'amont s'établit toujours à un niveau proche des 25cm dans les cas de figure aligné et incliné. Dans le cas des simulations, le niveau amont stagne à une valeur proche des 25cm pour une ville alignée, et proche des 15cm dans le cas incliné.

- *Comportement dans le milieu urbain* : Ici, le comportement est linéaire et décroissant jusqu'à atteindre la condition de hauteur d'eau aval. Le profil ne diffère de celui du cas sans pertes de charge singulières que par une pente plus importante. Les instabilités, à l'entrée et à la sortie de la ville par exemple, ne sont que très légères.
- *Comportement à l'aval* : La chute du niveau caractéristique en sortie de la ville n'est marquée dans aucune des rues. Il n'y a pas de ressaut car l'écoulement est subcritique. En outre, le champ scalaire de hauteur d'eau, illustré à la Figure 4.18, révèle un gradient de hauteur dirigé dans la direction y' pour le cas $D = 0$ et suivant la diagonale pour le cas $D_{xxx} = 50$.

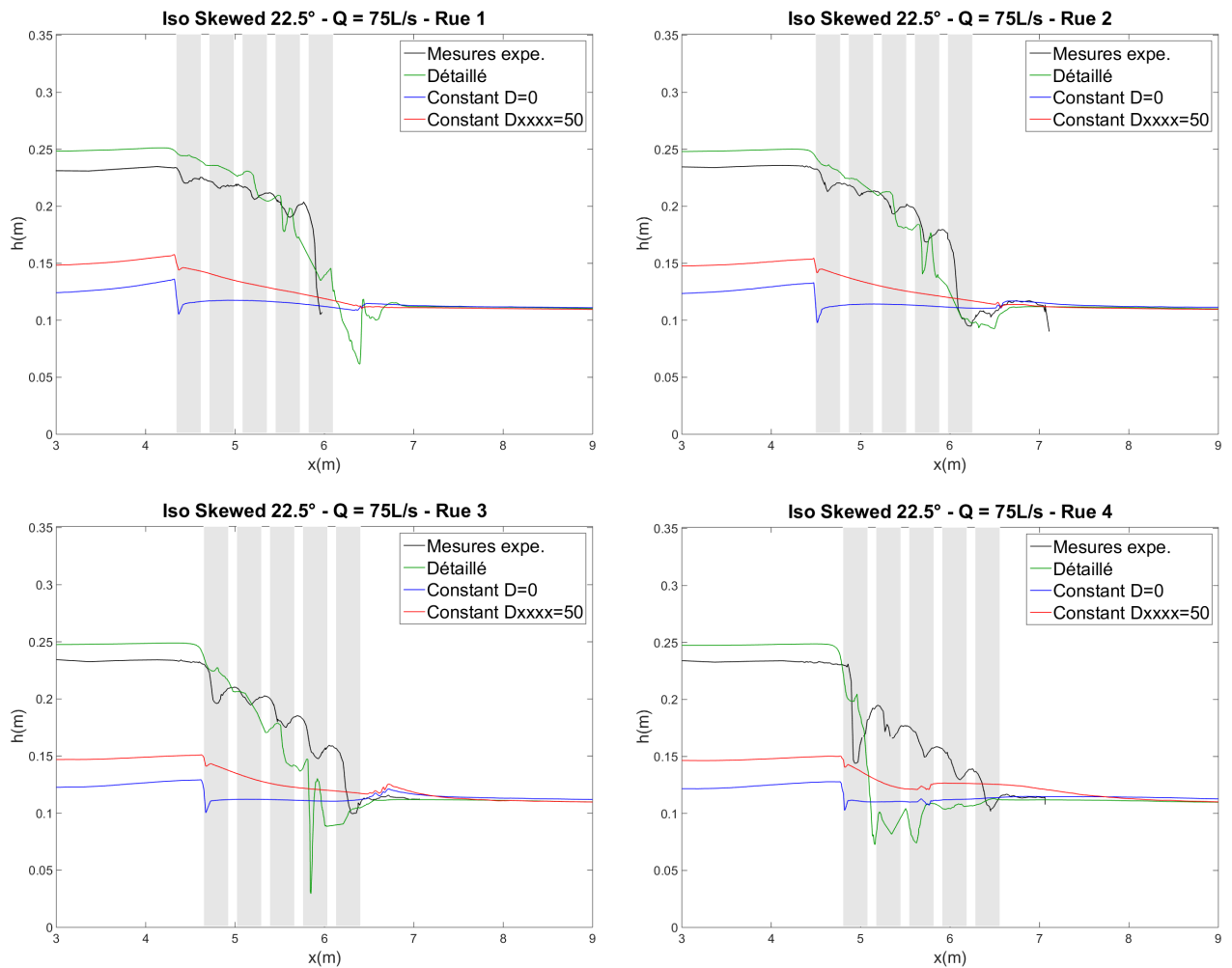


FIGURE 4.17 – Profils de hauteur d'eau dans les 4 rues - $D'_{xxx} = 50$ - Champ de porosité constant - Ville isotrope inclinée - 75L/s

Cas $D' = 0$ sauf $D'_{yyyy} = 50$

Dans le cas d'une ville alignée, un tel tenseur donne un profil de hauteur d'eau strictement identique au cas $D = 0$. Pour une ville inclinée, le profil de hauteur d'eau obtenu avec $D'_{yyyy} = 50$ est légèrement plus haut, comme illustré sur la Figure 4.19.

Plus précisément, la pente est légèrement plus marquée au pour le cas $D'_{yyyy} = 50$,

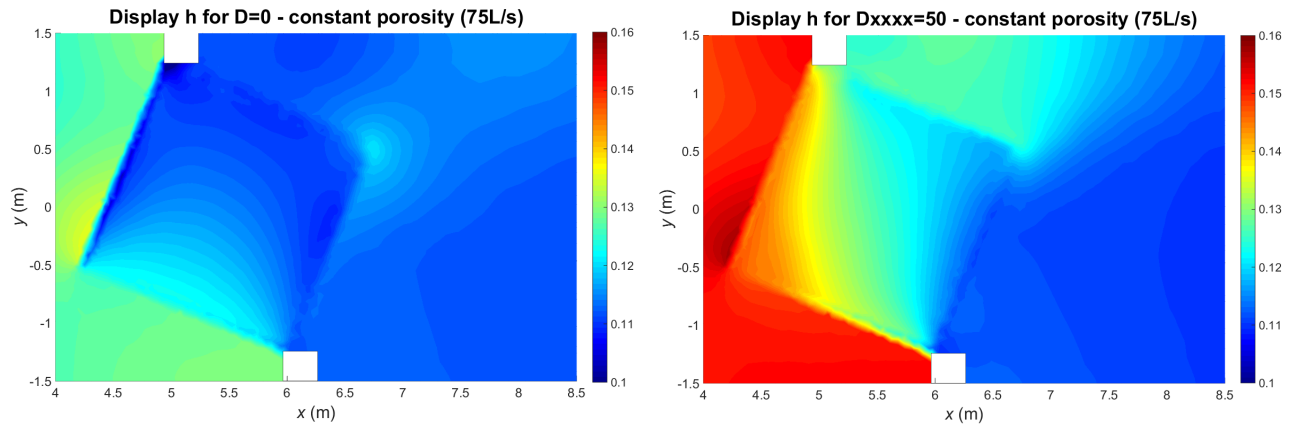


FIGURE 4.18 – Champ de la hauteur d’eau - Champ de porosité constant - $D' = 0$ (gauche) et $D'_{xxxx} = 50$ (droite) - Ville isotrope inclinée - 75L/s

sein de la ville. Cette tendance est visible pour la rue 1 et s’estompe au fur et à mesure qu’on s’éloigne de la frontière inférieure de la ville.

— En résumé - Hauteur d’eau dans la ville inclinée —

La hauteur d’eau dans la ville inclinée se caractérise par des courbes très lisses. Les variations brusques rencontrées dans le cas aligné, comme la chute du niveau à l’entrée du milieu, sont inexistantes ici. Le ressaut hydraulique en sortie de ville ne se produit pas non plus.

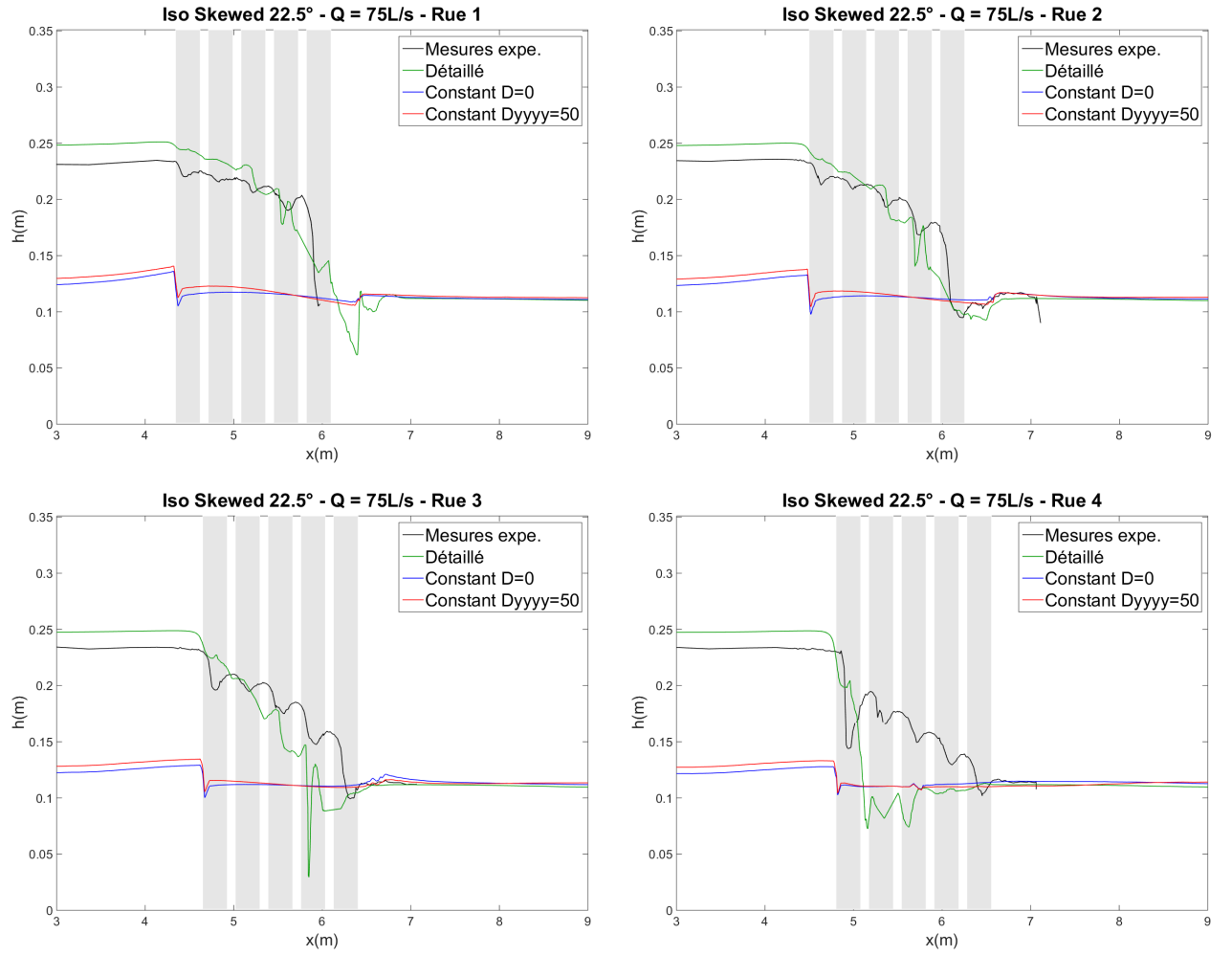


FIGURE 4.19 – Profils de hauteur d'eau dans les 4 rues - $D'_{yyyy} = 50$ - Champ de porosité constant - Ville isotrope inclinée - 75L/s

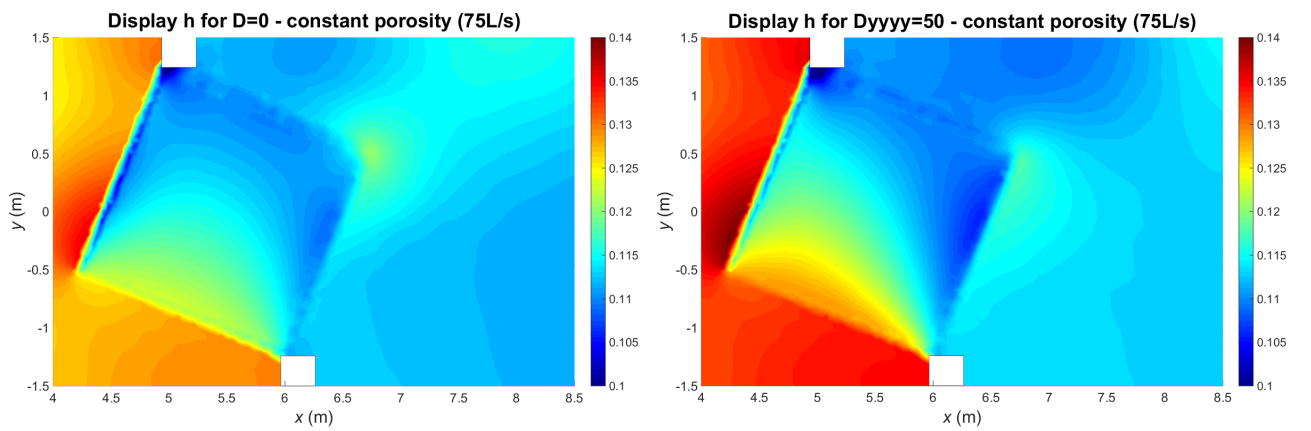


FIGURE 4.20 – Champ de la hauteur d'eau - $D' = 0$ (gauche) et $D'_{yyyy} = 50$ (droite) - Champ de porosité constant - Ville isotrope inclinée - 75L/s

4.4 Combinaison des éléments D'_{xxxx} et D'_{yyyy}

Le fait d'étudier séparément les deux éléments D'_{xxxx} et D'_{yyyy} permet d'isoler leurs effets respectifs. Cependant, cela ne permet pas de reproduire un écoulement proche de la réalité. La combinaison de ces deux éléments est dès lors nécessaire pour obtenir des résultats plus fiables. La valeur choisie est la même pour les deux directions : $D'_{xxxx} = D'_{yyyy} = 25$. Les résultats sont présentés pour les cas de villes isotropes, l'une alignée et l'autre inclinée.

4.4.1 Ville isotrope alignée - Cas $D' = 0$ sauf $D'_{xxxx} = D'_{yyyy} = 25$

Les vecteurs vitesse illustrés à la Figure 4.21 ont des orientations similaires au cas $D'_{xxxx} = 50$. Ils évitent le centre de la ville jusqu'à atteindre les zones de recirculation situées entre les blocs d'obstruction. L'écoulement est ensuite canalisé vers la frontière aval de la ville.

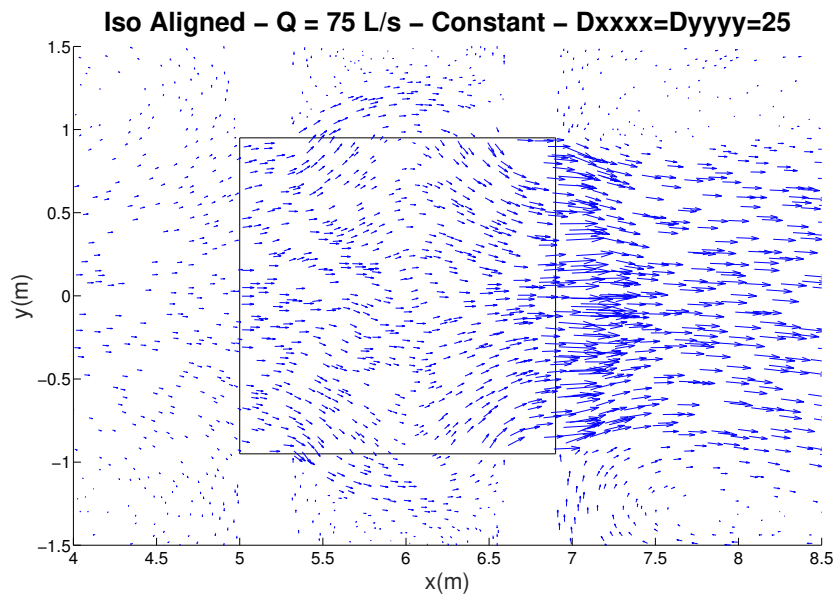


FIGURE 4.21 – Champ vectoriel de vitesse - $D'_{xxxx} = D'_{yyyy} = 25$ - Champ de porosité constant - Ville isotrope alignée - 75L/s

Les profils de hauteur d'eau ont également une allure similaire au cas $D'_{xxxx} = 50$, comme illustré sur la Figure 4.22. La différence, ici, est que la résistance globale à l'écoulement est plus importante. La hauteur d'eau à l'amont est en effet plus élevée. Cet écart diminue au sein de la ville pour être réduit à zéro à l'aval.

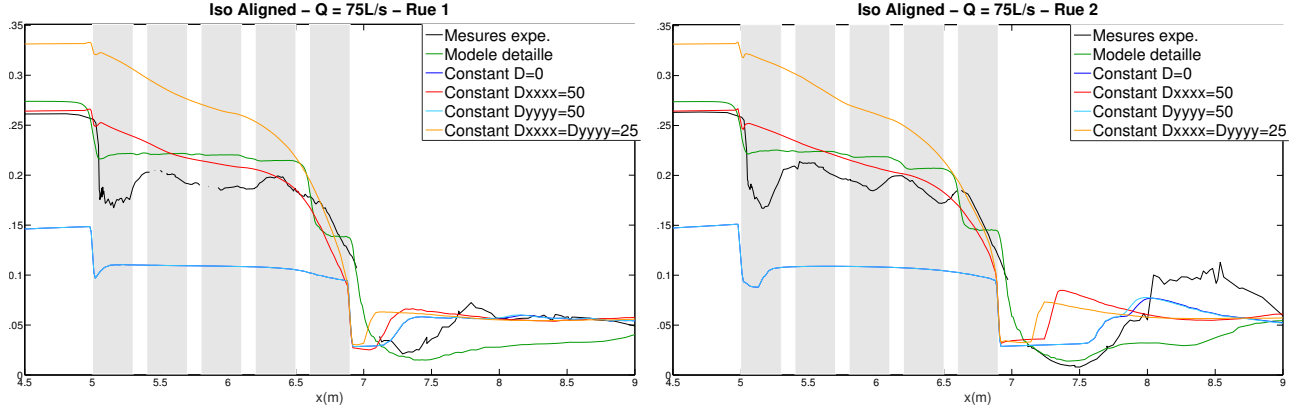


FIGURE 4.22 – Hauteur d’eau dans les rues 1 et 2 - $D'_{xxx} = D'_{yyy} = 25$ - Champ de porosité constant - Ville isotrope alignée - 75L/s

4.4.2 Ville isotrope inclinée - Cas $D' = 0$ sauf $D'_{xxx} = D'_{yyy} = 25$

Le cas développé ici, d’un tenseur dont les composantes D'_{xxx} et D'_{yyy} valent 25, a pour but de mettre en relation les différents cas spécifiques étudiés précédemment. Il est important de déterminer comment les effets se combinent les uns aux autres. Or, il est clair que les vecteurs vitesse tendent à s’aligner avec la diagonale, comme illustré à la Figure 4.23. Appliqués séparément, les éléments D'_{xxx} et D'_{yyy} font varier la direction des vecteurs vitesse. En revanche, appliqués simultanément, ces éléments donnent lieu à un ralentissement global de l’écoulement sans variation de la direction. Ceci est visible en comparant la Figure 4.23 à la Figure 4.14.

Ce comportement s’explique mathématiquement. En effet, on peut faire le calcul des pertes de charge ΔH_x et ΔH_y dans le cas où le vecteur vitesse est orienté selon la diagonale de la ville, c’est-à-dire que $V_{x'} = V_{y'} = 1$ par exemple. On obtient :

$$\Delta H_x = \frac{\phi a_{pdc}}{2gV} \cdot [V_{x'} \cdot (D'_{xxx} V_{x'} V_{x'} + 2D'_{xxy} V_{x'} V_{y'} + D'_{xyy} V_{y'} V_{y'}) + V_{y'} \cdot (D'_{xyx} V_{x'} V_{x'} + 2D'_{xyy} V_{x'} V_{y'} + D'_{yyy} V_{y'} V_{y'})] \quad (4.19)$$

$$= \frac{\phi a_{pdc}}{2gV} \cdot [V_{x'} \cdot (D'_{xxx} V_{x'} V_{x'})] \quad (4.20)$$

$$= \frac{0.4375 \cdot 6}{2g\sqrt{2}} \cdot [1 \cdot (D'_{xxx} \cdot 1 \cdot 1)] \quad (4.21)$$

$$= \frac{0.4375 \cdot 6}{2g\sqrt{2}} \cdot D'_{xxx} \quad (4.22)$$

$$(4.23)$$

$$\Delta H_y = \frac{\phi a_{pdc}}{2gV} \cdot [V_x \cdot (D'_{xyxx} V_x V_x + 2D'_{xyxy} V_x V_y + D'_{xyyy} V_y V_y) + V_y \cdot (D'_{yyxx} V_x V_x + 2D'_{yyxy} V_x V_y + D'_{yyyy} V_y V_y)] \quad (4.24)$$

$$= \frac{\phi a_{pdc}}{2gV} \cdot [V_{y'} \cdot (D'_{yyyy} V_{y'} V_{y'})] \quad (4.25)$$

$$= \frac{0.4375 \cdot 6}{2g\sqrt{2}} \cdot [1 \cdot (D'_{yyyy} \cdot 1 \cdot 1)] \quad (4.26)$$

$$= \frac{0.4375 \cdot 6}{2g\sqrt{2}} \cdot D'_{yyyy} \quad (4.27)$$

$$(4.28)$$

Pour $D'_{xxxx} = D'_{yyyy}$, les pertes de charge sont identiques en x et en y . Puisqu'elles sont appliquées à la vitesse, cela signifie que l'orientation initiale du vecteur vitesse au sein de la ville ne sera pas modifiée après avoir appliqué les pertes de charge, seule son amplitude est réduite. L'écoulement est ralenti et l'angle de 45° avec l'axe x' de la ville reste inchangé.

Ce comportement ne correspond pas à l'effet directionnel observé à la Figure 4.24 du modèle détaillé faisant office de comportement recherché.

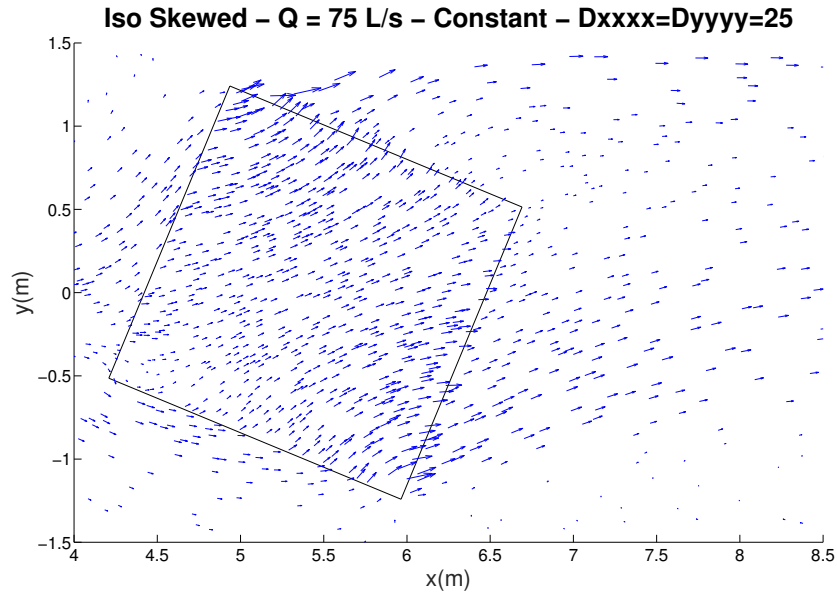


FIGURE 4.23 – Champ vectoriel de vitesse - $D'_{xxxx} = D'_{yyyy} = 25$ - Champ de porosité constant - Ville isotrope inclinée - 75L/s

Concernant le profil de hauteur d'eau, il est proche des mesures expérimentales dans les 4 rues. Ceci est illustré à la Figure 4.25. Il chute cependant un peu trop tôt dans la rue 4, mais ceci est également le cas pour les autres modèles affichés, en particulier pour le modèle détaillé.

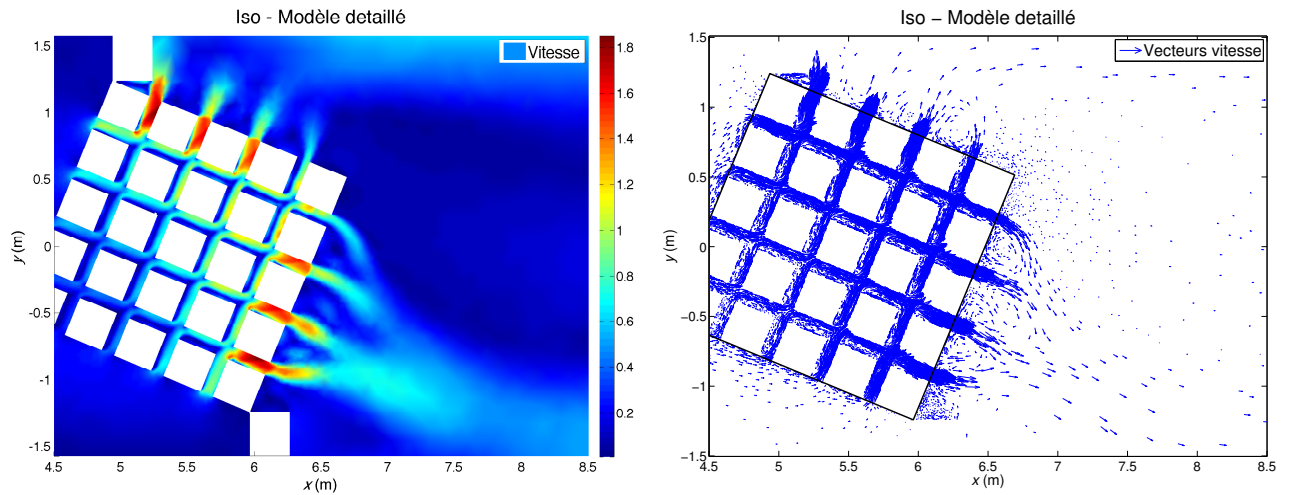


FIGURE 4.24 – Effets directionnels obtenus avec le modèle détaillé dans le cas d’une ville isotrope inclinée. A gauche : le champ des vitesses interpolées ; à droite : le champ des vecteurs vitesse. Le débit considéré vaut 75 L/s.

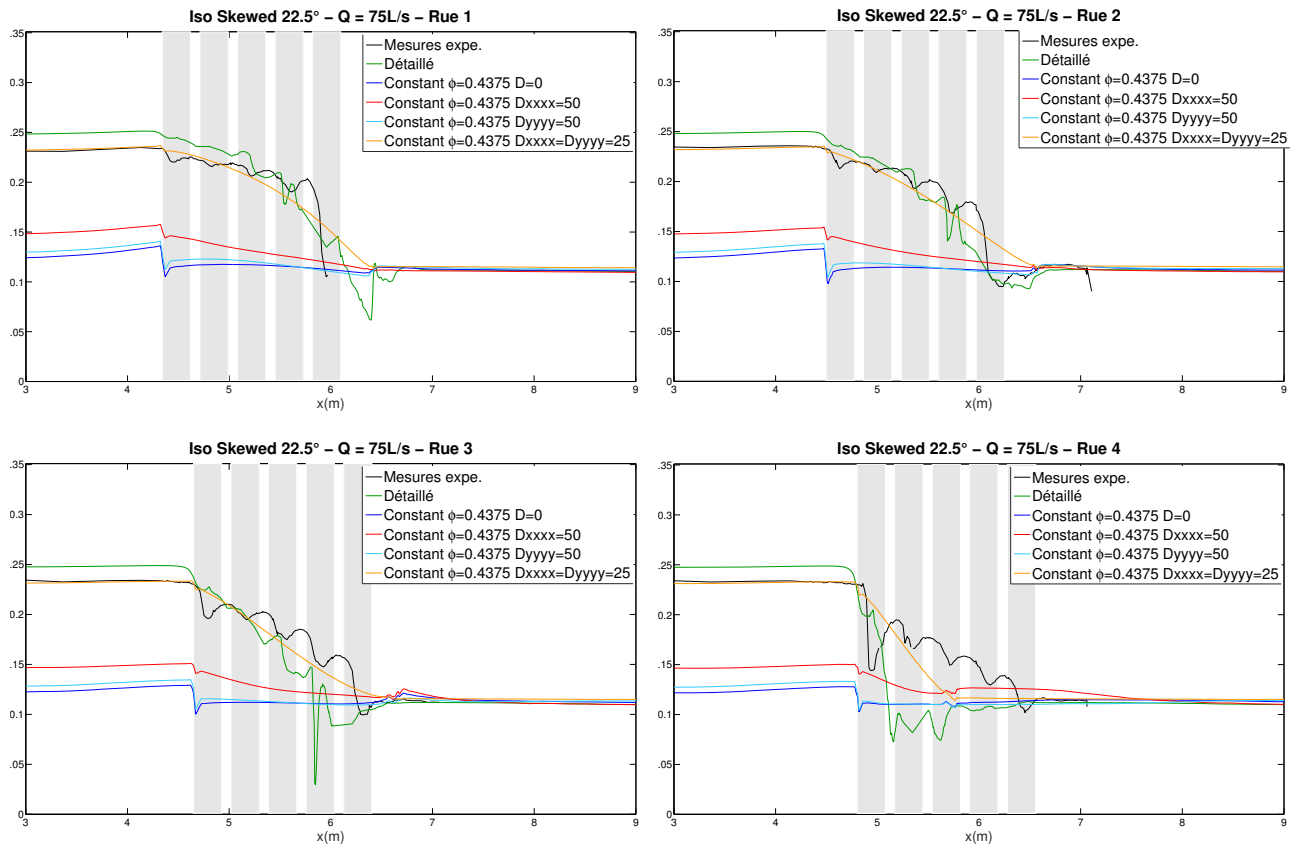


FIGURE 4.25 – Hauteur d’eau dans les 4 rues - $D'_{xxx} = D'_{yyy} = 25$ - Champ de porosité constant - Ville isotrope inclinée - 75L/s

Il n'y a pas de gros changements concernant la ville alignée, si ce n'est que la résistance globale à l'écoulement est plus importante. Il n'y a en effet pas de direction x ou y à minimum de perte de charge faisant office d'échappatoire.

Dans le cas d'une ville inclinée, l'écoulement traverse le milieu urbain suivant la diagonale et est donc ralenti. L'effet directionnel est un point absent. Le comportement réel de l'écoulement n'est pas retranscrit même si le profil de hauteur d'eau est proche des données expérimentales.

4.5 Combinaison des éléments D'_{xxx} et D'_{yyy} avec effets directionnels

La formulation des pertes de charge telle que donnée à la section 4.1 Généralités ne permet pas de représenter les effets directionnels. Une solution à ce problème est présentée ici. Pour ce faire, l'orientation préférentielle de l'écoulement est subdivisée en 3 sous-problèmes :

1. Forcer l'écoulement à éviter les diagonales de la ville
2. Engendrer des pertes de charge dans l'axe des rues pour répartir le flux de passage selon l'anisotropie éventuelle du réseau de rues
3. Orienter l'écoulement vers l'axe de rue le plus proche de sa direction initiale

La résolution de ces sous-problèmes est détaillée dans les 3 sous-sections ci-dessous.

4.5.1 Pertes de charge dans la direction de la diagonale de la ville

Dans la configuration réelle de la ville, l'écoulement peut s'établir exclusivement selon les rues du réseau. En effet, la présence des bâtiments disposés selon un quadrillage régulier provoque des pertes de charge importantes selon la direction diagonale [Velickovic, 2012]. Ce constat est illustré par la Figure 4.26.

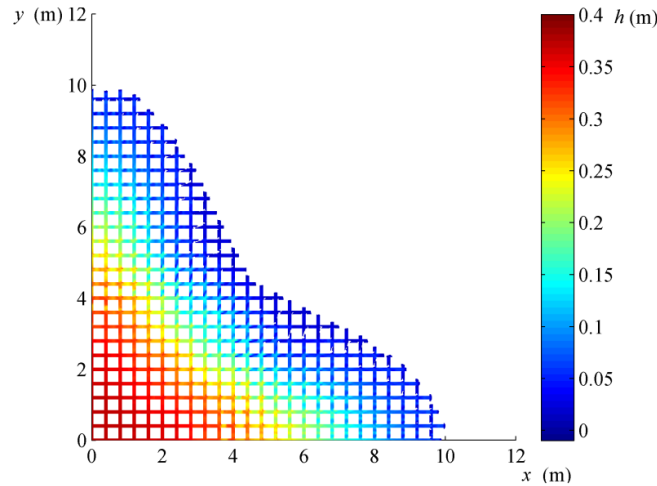


FIGURE 4.26 – Hauteur d'eau enregistrée en situation transitoire après un intervalle de temps Δt lors d'une rupture de barrage circulaire dont le centre est situé à l'origine [Velickovic, 2012].

Pour traduire ce comportement mathématiquement, des fonctions ayant un extremum pour une valeur de θ proche de $\pm 45^\circ$ sont nécessaires. Dans l'expression des pertes de charge (eq. 4.11

et 4.12), les termes répondant à cette caractéristique sont ceux contenant les produits $V_x \cdot V_y^2$ et $V_x^2 \cdot V_y$. Cette tendance est démontrée graphiquement à la Figure 4.27.

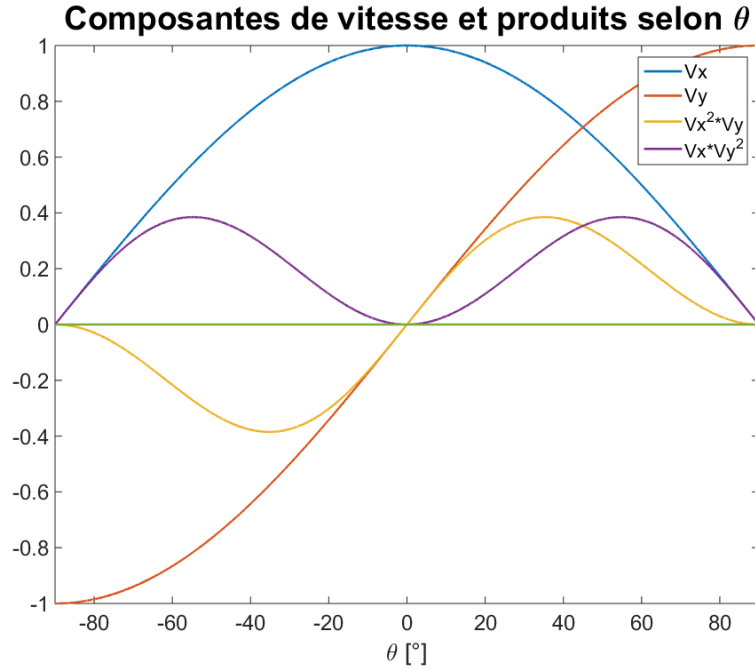


FIGURE 4.27 – Allure des fonctions $V_x(\theta)$ et $V_y(\theta)$, ainsi que leurs produits $V_x \cdot V_y^2$ et $V_x^2 \cdot V_y$, pour un vecteur vitesse de norme constante et unitaire.

Les composantes du tenseur de traînée liées à ces termes sont ceux colorés de vert :

$$D = \begin{bmatrix} D_{xxxx} & D_{xxxy} & D_{xxyy} \\ D_{xyxx} & D_{xyxy} & D_{xyyy} \\ D_{yyxx} & D_{yyxy} & D_{yyyy} \end{bmatrix} \quad (4.29)$$

Du fait de leur effet dissipatif, il est important que les pertes de charge provoquent une diminution de la quantité de mouvement. Les composantes ΔH_x et ΔH_y doivent s'opposer aux composantes V_x et V_y , or pour $\theta \in [0^\circ; 90^\circ]$, V_x et V_y sont positifs, alors que pour $\theta \in [0^\circ; -90^\circ]$, V_x est positif et V_y est négatif. La courbe jaune, qui est impaire, convient pour les pertes de charge selon y via la variation de la composante D_{yyxx} , tandis que la mauve, qui est paire, convient pour les pertes de charge selon x via la composante D_{xxyy} .

4.5.2 Pertes de charge dans l'axe des rues

La redistribution du fluide à travers le réseau crée de nombreuses perturbations. Elles se manifestent, aux carrefours, sous la forme des effets de cisaillement, de turbulence, de tourbillons,... Cela représente des pertes de charge. C'est pourquoi, même lorsque la vitesse est orientée selon un axe de rue, des pertes de charge singulières doivent être calculées. Les fonctions qui permettent de traduire cela présentent un maximum pour un angle de 0° pour celles responsables des pertes ΔH_x , et un maximum pour un angle de 90° pour celles responsables des pertes ΔH_y .

Dans l'expression des pertes de charge, les termes répondant à cette caractéristique sont ceux contenant V_x^3 et V_y^3 , ils correspondent aux courbes jaune et mauve de la Figure 4.28.

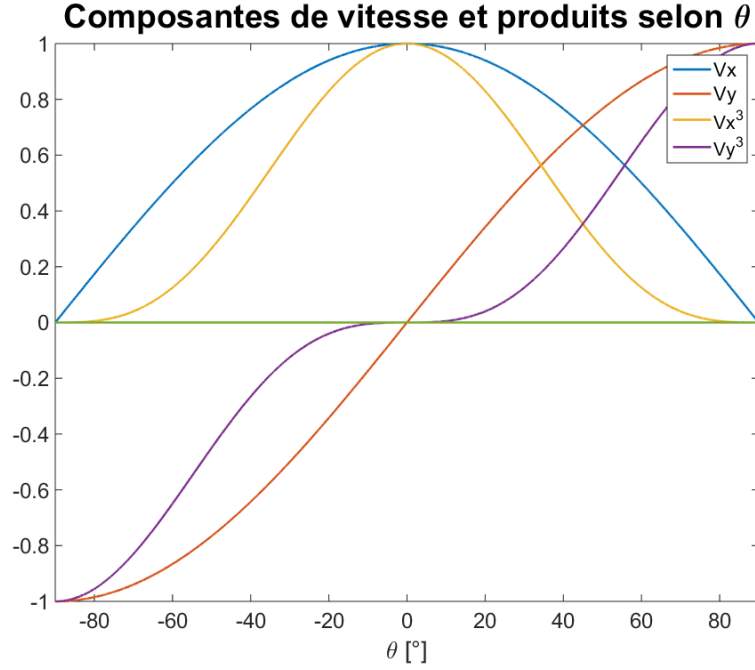


FIGURE 4.28 – Allure des fonctions $V_x(\theta)$ et $V_y(\theta)$, ainsi que leurs produits V_x^3 et V_y^3 , pour un vecteur vitesse de norme constante et unitaire.

On peut donc faire varier l'importance des pertes de charge selon les axes x et y par le biais des composante D_{xxxx} et D_{yyyy} , et rendre compte de l'anisotropie du milieu urbain par des valeurs de D_{xxxx} et D_{yyyy} différentes.

4.5.3 Esquive de la diagonale et orientation selon les rues

Le phénomène illustré à la Figure 4.29 reste à être modéliser. Cette réorientation des vecteurs vitesse ne peut pas se faire en jouant uniquement sur les valeurs des composantes du tenseur de traînée.

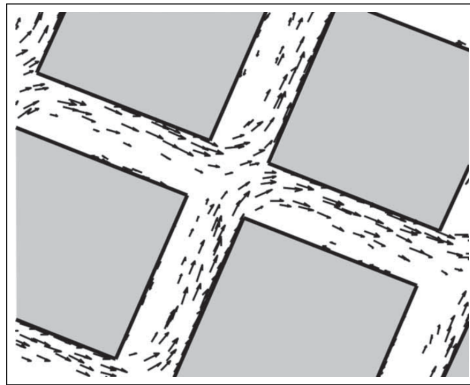


FIGURE 4.29 – Redistribution du flux aux carrefours. Source : [Soares-Frazao et al., 2016].

La méthode proposée ici consiste à répartir les vecteurs vitesse en deux groupes selon leur orientation, et de leur appliquer une réorientation différente :

1. Pour $\theta \in [-45^\circ; 45^\circ]$, le flux est forcé de s'aligner avec la direction la plus proche qui est

l'axe x' de la ville. Ce cas est représenté par une orientation délimitée par le quadrant bleu sur la Figure 4.30.

2. Pour $\theta \in [45^\circ; 135^\circ]$ et $\theta \in [-90^\circ; -45^\circ]$, le flux est forcé de s'aligner avec l'axe y' . Ceci correspond au quadrant orangé de la même figure.

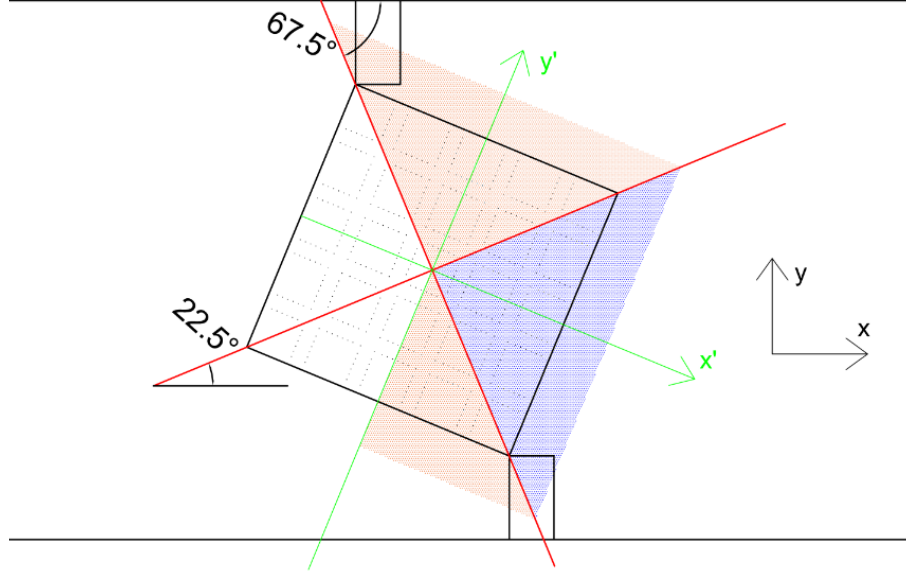


FIGURE 4.30 – Schéma illustrant la répartition des vecteurs vitesse en fonction du quadrant relatif à leur orientation.

Pour garantir un comportement bidirectionnel, un coefficient est introduit. Ce coefficient, noté *split* en rapport avec son effet, a pour but d'atténuer les pertes de charges dans la direction à privilégier et d'amplifier les pertes dans la direction à éviter. Il fait intervenir le rapport entre l'angle du vecteur vitesse et l'orientation de la diagonale à éviter. Selon le cas considéré, il vaut :

1. Pour $\theta \in [-45^\circ; 45^\circ]$:

$$split_x = \left(1 + \left(\frac{\theta}{45}\right)^2\right)^m \quad (4.30)$$

$$split_y = \left(1 - \left(\frac{\theta}{45}\right)^2\right)^m \quad (4.31)$$

2. Pour $\theta \in [45^\circ; 135^\circ]$ et $\theta \in [-90^\circ; -45^\circ]$:

$$split_x = \left(1 + \left(\frac{90 - \theta}{45}\right)^2\right)^m \quad (4.32)$$

$$split_y = \left(1 - \left(\frac{90 - \theta}{45}\right)^2\right)^m \quad (4.33)$$

avec θ exprimé en degrés et où l'exposant m est à calibrer. Plus celui-ci est important, plus la réorientation est marquée.

Ainsi, on calcule de nouvelles pertes de charge amplifiées ou réduites (selon le cas) :

$$\rightarrow \Delta H_{x,new} = \Delta H_{x,old} \cdot split_x \quad (4.34)$$

$$\rightarrow \Delta H_{y,new} = \Delta H_{y,old} \cdot split_y \quad (4.35)$$

Graphiquement, la Figure 4.31 illustre l'allure de $split_x$ et $split_y$ pour $m = 2$ et $m = 4$.

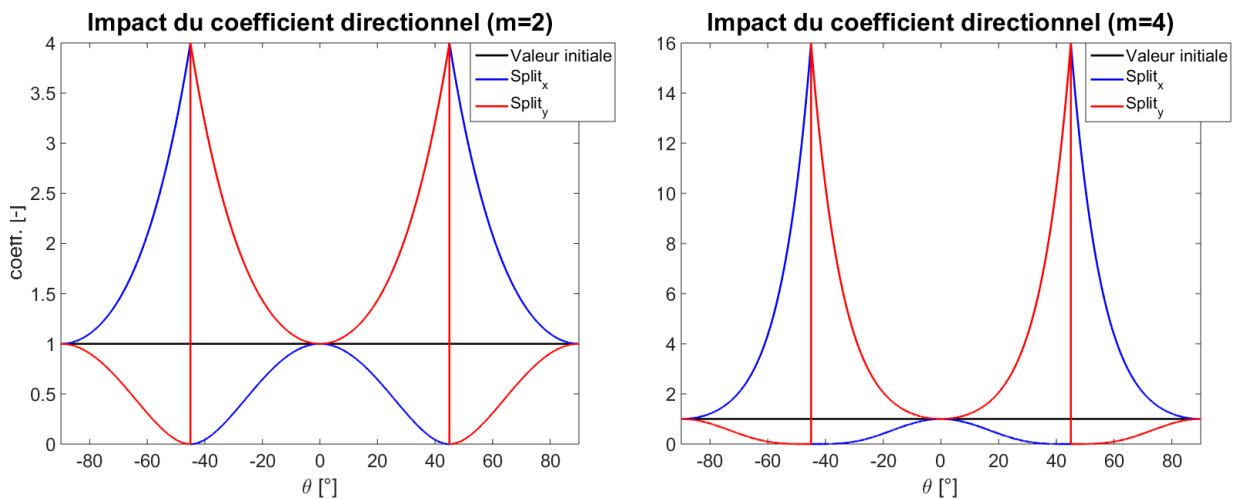


FIGURE 4.31 – Coefficient d'amplification et de réduction des pertes de charges $split_x$ et $split_y$ selon les axes x et y pour $m=2$ à gauche et $m=4$ à droite.

L'effet de ce coefficient sur l'écoulement est illustré sur la Figure 4.32. Le suivi des deux axes principaux du réseau de rues est plus ou moins marqué selon la valeur de l'exposant m . Plusieurs observations découlent de l'analyse graphique de ces champs vectoriels :

Dans le cas où $m = 2$: Le flux entrant par la frontière inférieure de la ville est forcé de s'aligner selon y' à cause du bloc d'obstruction. En rentrant dans la ville, ce flux rencontre alors le flux principal, qui, lui, est orienté essentiellement selon x' et qui a un débit plus important. Cela a pour effet de garder l'écoulement dans sa direction naturelle x' . Le coefficient $split$ a une valeur trop faible que pour produire les effets directionnels désirés, l'écoulement au niveau de la frontière supérieure de la ville ne s'oriente pas perpendiculairement à cette frontière.

Dans le cas où $m = 4$: L'impact de $split$ est naturellement plus marquée que pour $m = 2$. Une zone de changement d'orientation prend place sur toute la diagonale (Nord-Sud). Dans la partie inférieure de la ville, une zone de basses vitesses est visible.

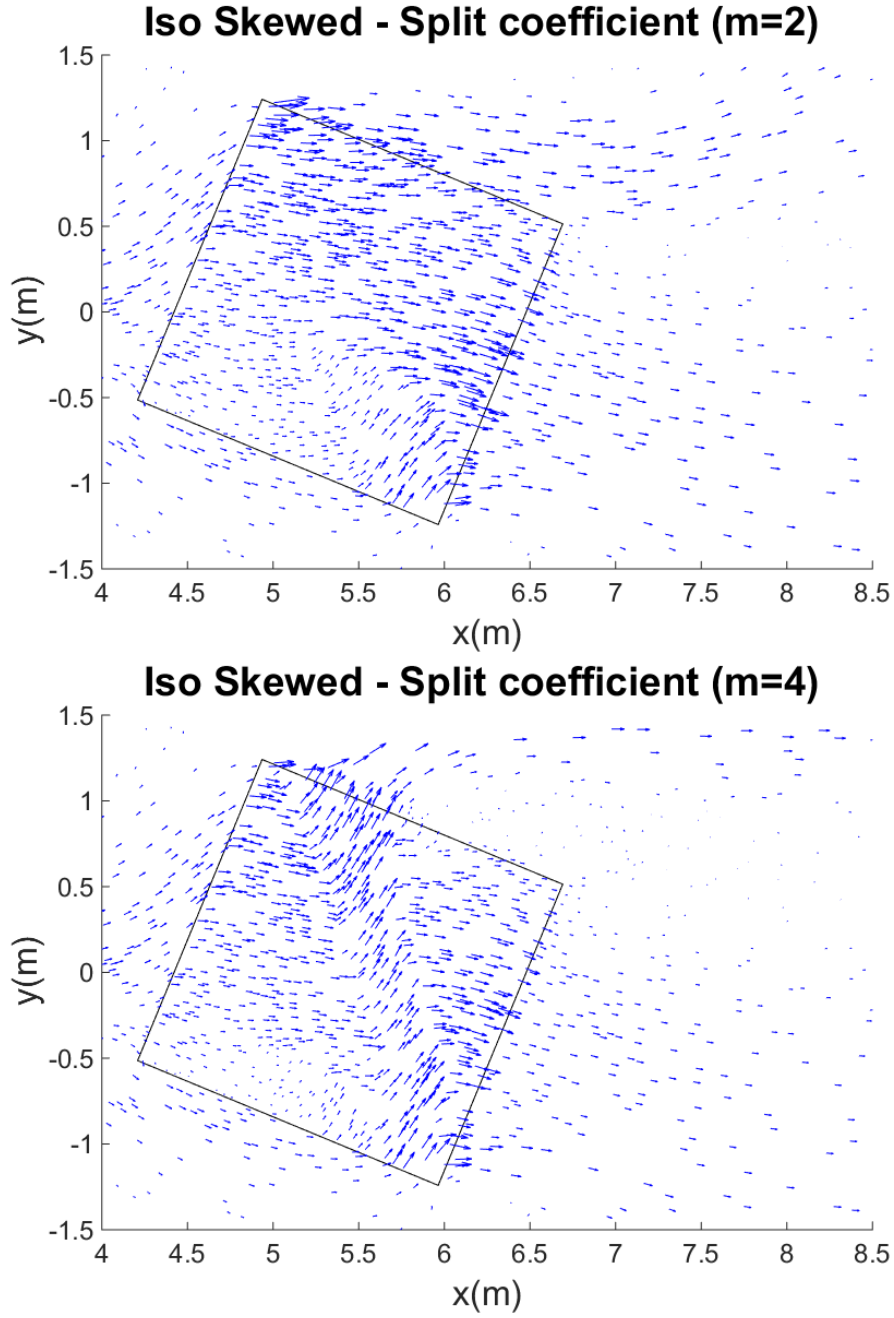


FIGURE 4.32 – Champs vectoriel de vitesse après application du coefficient *split* aux pertes de charge pour un coefficient $m = 2$ en haut et $m = 4$ en bas. Les composantes non-nulles du tenseur de traînée sont $D'_{xxyy} = D'_{yyxx} = 20$ et $D'_{xxxx} = D'_{yyyy} = 5$.

4.5.4 Influence des composantes du tenseur D sur la hauteur d'eau

En prévision du chapitre 5 dont le but est de trouver une solution globale au problème, une comparaison de plusieurs tenseurs de traînée est faite dans ce point. Tout d'abord, l'effet des composantes du tenseur sur les courbes de hauteur d'eau dans le cas de la ville alignée est déterminé. Sur la Figure 4.33, un premier détail est bien visible : la courbe bleue (relative à un tenseur D nul) et rouge (relative au cas $D_{xxyy} = D_{yyxx} = 30$) sont superposées. Les courbes de hauteur d'eau sont donc indépendantes de ces composantes D_{xxyy} et D_{yyxx} dans le cas d'une ville alignée.

Par ailleurs, les composantes D_{xxxx} et D_{yyyy} ont une influence considérable sur la hauteur d'eau

au sein et en amont de la ville.

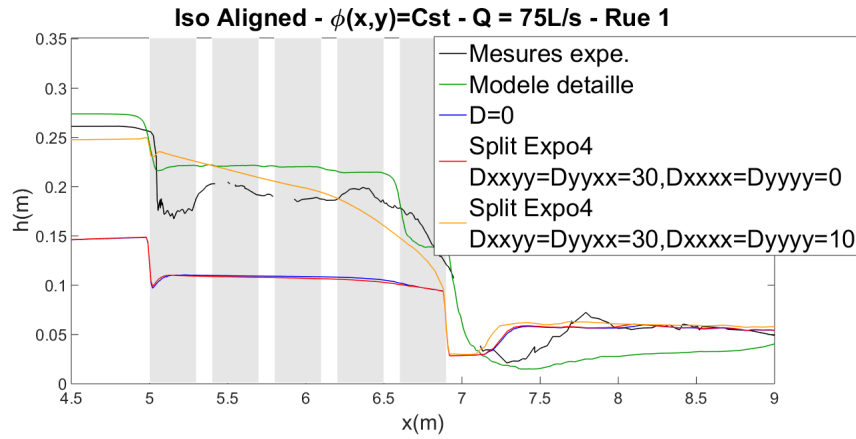


FIGURE 4.33 – Comparaison de hauteurs d’eau dans la rue 1 pour le cas d’une ville isotrope alignée pour des tenseurs de traînée distincts.

Enfin, pour le cas d’une ville inclinée par rapport à l’écoulement, la même démarche est opérée. Différents tenseurs ayant été appliqués à cette configuration du réseau de rues, les courbes de hauteur d’eau sont reprises ci-dessous sur la Figure 4.34. Contrairement au cas aligné, ici, les deux jeux de composantes, soient $D_{xxxx} - D_{yyyy}$ et $D_{xxyy} - D_{yyxx}$, ont un impact sur la hauteur. Cette dernière est dépendante de toutes les composantes.

Mathématiquement, ces constatations sont déductibles aussi. En effet, les composantes D_{xxyy} et D_{yyxx} régissent des fonctions non-nulles entre 0° et 90° et nulles en ces mêmes bornes. Lors d’un écoulement *aligné* par rapport aux rues, l’angle formé par l’écoulement et l’axe x vaut 0° , les fonctions de vitesses relatives à ces composantes sont nulles et leur impact également. Alors que l’angle est de 22.5° , pour un tenseur nul appliqué à une ville *inclinée*, l’action de détourner ce flux de son orientation initiale crée des pertes de charge qui se soldent par une augmentation du niveau d’eau (et un ralentissement de l’écoulement).

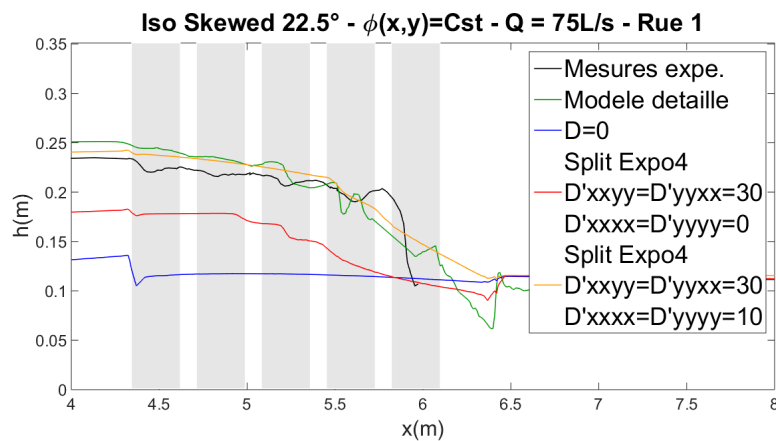


FIGURE 4.34 – Comparaison de hauteurs d’eau dans la rue 1 pour le cas d’une ville isotrope inclinée pour des tenseurs de traînée distincts.

Le problème des pertes de charge selon la diagonale est résolu en amplifiant le rôle des facteurs $V_x^2 \cdot V_y$ et $V_x \cdot V_y^2$ par le biais de valeurs de D_{xxyy} et D_{yyxx} plus importantes.

Celui des pertes de charge selon les axes principaux des rues est résolu en amplifiant cette fois le rôle des facteurs V_x^3 et V_y^3 par le biais de valeurs de D_{xxxx} et D_{yyyy} plus importantes.

Enfin, l'esquive de la diagonale et l'orientation du flux selon les rues sont obtenues par un coefficient majorateur/réducteur de pertes de charge qui permet de scinder l'écoulement selon deux axes principaux.

4.6 Conclusion

Cette conclusion du chapitre 4 consiste en un récapitulatif des enseignements principaux qui ressortent de l'étude du tenseur de traînée. Ils sont présentés séparément pour les vecteurs vitesse et la hauteur d'eau. L'utilité de la combinaison des éléments D'_{xxx} et D'_{yyy} ainsi que D'_{xyy} et D'_{yyx} dans le but d'obtenir un effet directionnel est également reprise.

4.6.1 Impact sur la vitesse

Les résultats obtenus concernant la vitesse de l'écoulement sont faciles à mettre en lien avec les comportements prévus analytiquement. En effet, les pertes de charge ne dépendent que de deux termes qui sont susceptibles de varier : les deux composantes de la vitesse, V_x et V_y . Les autres paramètres entrant en ligne de compte sont de nature géométrique, et donc constants. Un changement de vitesse (d'orientation et/ou de norme) induit un changement dans les pertes de charge générées, mais la réciproque est également valable : les pertes de charge influent sur la vitesse, de part la définition de la charge. Ces paramètres sont directement liés.

Le tenseur de traînée a tendance à provoquer un alignement des vecteurs vitesse dans la direction de la perte de charge minimum. Par conséquent, $D'_{xxx} = 50$ oriente l'écoulement selon l'axe y' de la ville, alors que $D'_{yyy} = 50$ l'oriente selon x' de la ville. L'impact directionnel du tenseur de traînée dépend également de la configuration de la ville : son orientation et la présence de blocs d'obstructions ou non.

En effet, la présence des blocs d'obstruction joue un rôle important. D'une part, dans le cas de la ville alignée, car ils limitent très fortement le flux dans les rues verticales. Naturellement, l'écoulement ne peut que s'établir dans la direction x . D'autre part, dans le cas de la ville inclinée, car ils forcent l'écoulement à suivre une trajectoire en S, telle une chicane.

4.6.2 Impact sur la hauteur d'eau

Le constat général est que des pertes de charge importantes dans le milieu urbain provoquent une forte accumulation d'eau à l'amont, et que la hauteur d'eau chute dès l'entrée en ville.

Pour cette raison et dans le cas d'une ville alignée, lorsque $D_{xxx} = 50$, la direction initiale de l'écoulement est celle générant le plus de pertes de charge, et la hauteur d'eau à l'amont de la ville est plus élevée. Les résultats sont d'ailleurs très proches des données expérimentales. Par contre, les profils de hauteur d'eau du cas $D_{yyy} = 50$ et $D = 0$ sont confondus et sont bien en dessous des valeurs réelles.

Dans la ville inclinée, la hauteur d'eau a un profil très lisse, sans variation brusque. Il n'y a pas de chute du niveau d'eau à l'entrée de la ville, ni de ressaut hydraulique à sa sortie. L'explication est que, grâce à l'inclinaison de la ville, l'écoulement a plus facile à éviter la direction qui le freine le plus et à s'aligner plus naturellement sur celle présentant des pertes de charge minimum.

Il est important de garder à l'esprit que la hauteur d'eau et la vitesse de l'écoulement sont liées par la loi de conservation de la masse qui impose un débit constant tout le long de l'écoulement en situation stationnaire.

4.6.3 Combinaison des éléments D'_{xxxx} et D'_{yyyy}

L'effet global d'une combinaison de ces deux éléments est une augmentation de la résistance à l'écoulement, que ce soit dans le cas d'une ville alignée ou inclinée. Les pertes de charge sont effectives dans les deux directions x' et y' . Le fait de combiner des valeurs distinctes de D'_{xxxx} et D'_{yyyy} permet de créer un effet unidirectionnel léger dans le cas d'une ville inclinée. Si les deux composantes sont égales, un ralentissement global est notable sans changement de direction. Le coefficient a_{pdc} joue un rôle important à ce propos, car il a tendance à amplifier les pertes de charge selon la diagonale.

Cependant, l'effet directionnel qui est clairement observable dans le cas du modèle détaillé n'est pas reproduit. Pour le modéliser, un coefficient a été introduit dans la définition des pertes de charge et a pour but de les accentuer ou de les atténuer. Ce coefficient tient compte de l'orientation du vecteur vitesse. Si celui-ci a une orientation plus proche de la direction x' de la ville, alors les pertes de charge selon y' seront accentuées et celles selon x' seront atténuées, et inversement pour une orientation du vecteur vitesse proche de l'axe y' . Cela dirige ainsi le flux vers l'un des deux axes principaux. Grâce à cette modification, les flux sortant de la ville sont perpendiculaires aux frontières, ce qui se rapproche du comportement mis en évidence lors des expériences et des simulations sur le modèle détaillé.

Chapitre 5

Validation du modèle

Précédemment, le champ de porosité et le tenseur de traînée ont été étudiés séparément en utilisant :

- Des champs de porosité accompagnés d'un tenseur de traînée faible et constant.
- Des tenseurs de traînée accompagnés d'un champ de porosité constant.

Ce dernier chapitre rassemble ces deux paramètres. Le but est de les combiner pour obtenir des formulations du modèle à porosité qui s'approchent au maximum des valeurs obtenues expérimentalement, que ce soit en terme de hauteur d'eau ou d'effet directionnel.

Pour ce faire, les champs de porosité utilisés ici sont le champ constant, *Building Peak* et *Building Interpolated* $[\phi_{bat} ; \phi_{x,y,rue}]$ ¹. Le choix de ces champs se justifie comme suit :

- **Le champ constant** parce qu'il fait office de référence.
- ***Building Peak*** pour ses résultats de hauteur d'eau, en particulier parce qu'il induit des oscillations dans le milieu urbain qui se rapprochent du comportement expérimental.
- ***Building Interpolated*** car il génère un niveau moyen de hauteur d'eau proche de ce qui a été trouvé expérimentalement et parce qu'il est construit sur base des caractéristiques géométriques de la ville, ce qui lui donne une certaine souplesse intrinsèque.

Dans le chapitre 4 dédié au tenseur de traînée, l'influence des principales composantes de ce tenseur ainsi que leur association ont été examinées. Il a été montré qu'il est possible d'appliquer une division de l'écoulement dans les deux directions principales en utilisant des valeurs judicieuses du tenseur de traînée. La notion de direction préférentielle est alors introduite ici. En effet, dans la réalité, l'anisotropie du milieu urbain impacte la division de l'écoulement en favorisant la direction des rues larges, au détriment de la direction des rues étroites. Il reste à reproduire ce comportement dans le modèle à porosité à l'aide du tenseur de traînée. Le tenseur nul et une formulation du tenseur de traînée basée sur des caractéristiques géométriques de la ville sont testés sur chacun des trois champs de porosité retenus.

Ce cinquième chapitre se divise en différentes sections appelées *associations*, chacune étant consacrée à la combinaison d'un champ de porosité et d'un jeu de valeurs du tenseur de traînée.

1. L'appellation de ce champ se limitera dorénavant à *Building Interpolated* par simplicité

5.1 Formulation 1 : Combinaison du tenseur de traînée avec le champ de porosité constant

Cette partie est dédiée au champ de porosité constant auquel a été ajouté un tenseur de traînée dont les valeurs sont justifiées sur base des caractéristiques du réseau de rues. D_{xxxx} et D_{yyyy} sont obtenus en multipliant par 10 le rapport des largeurs des rues, alors que D_{xxyy} et D_{yyxx} ne dépendent pas de la configuration de ville et sont fixés à 30 :

$$D_{xxxx} = 10 \cdot \frac{dx_{rue}}{dy_{rue}} \quad (5.1)$$

$$D_{yyyy} = 10 \cdot \frac{dy_{rue}}{dx_{rue}} \quad (5.2)$$

$$D_{xxyy} = 30 \quad (5.3)$$

$$D_{yyxx} = 30 \quad (5.4)$$

Cette façon très simple de calculer le tenseur donne les valeurs reprises au tableau 5.1 pour les trois configurations de ville.

TABLE 5.1 – Composantes du tenseur de traînée de la *Formulation 1*

Configuration de la ville	D_{xxxx}	D_{yyyy}	D_{xxyy}	D_{yyxx}
Isotrope	10	10	30	30
Anisotrope large	5	20	30	30
Anisotrope étroite	20	5	30	30

5.1.1 Ville alignée avec l'écoulement

Il est possible d'utiliser les résultats du chapitre 4 sur le tenseur de traînée pour avoir une idée a priori des résultats de cette partie.

Pour rappel, l'augmentation des pertes de charge selon y n'a aucun effet sur l'écoulement. En cause, cette direction n'est pas celle empruntée naturellement par l'écoulement. D'autre part, les produits de composantes de vitesse associées aux termes D_{xxyy} et D_{yyxx} sont des fonctions de θ ayant une racine pour $\theta = 0^\circ$. Leur effet est donc neutralisé également pour un alignement du flux avec l'axe x' . Seule la composante D_{xxxx} est effective pour ce cas de figure.

Résultats pour la ville isotrope

Ici, les valeurs de D_{xxxx} et D_{yyyy} valent 10. Les hauteurs d'eau obtenues avec ces paramètres sont illustrées à la Figure 5.1.

L'analyse des deux profils de hauteur permet de mettre en avant ces caractéristiques :

En amont de la ville, la hauteur d'eau est relativement bien approximée (5% d'erreur relative).

Au sein de la ville, la chute d'eau à l'entrée de la ville n'est pas bien représentée et les oscillations visibles durant les expériences ne sont pas reproduites mais la tendance générale de la courbe approxime plutôt bien les valeurs expérimentales.

En aval de la ville, la chute d'eau se déroule toujours trop brusquement et le plateau précédant le ressaut hydraulique est trop court.

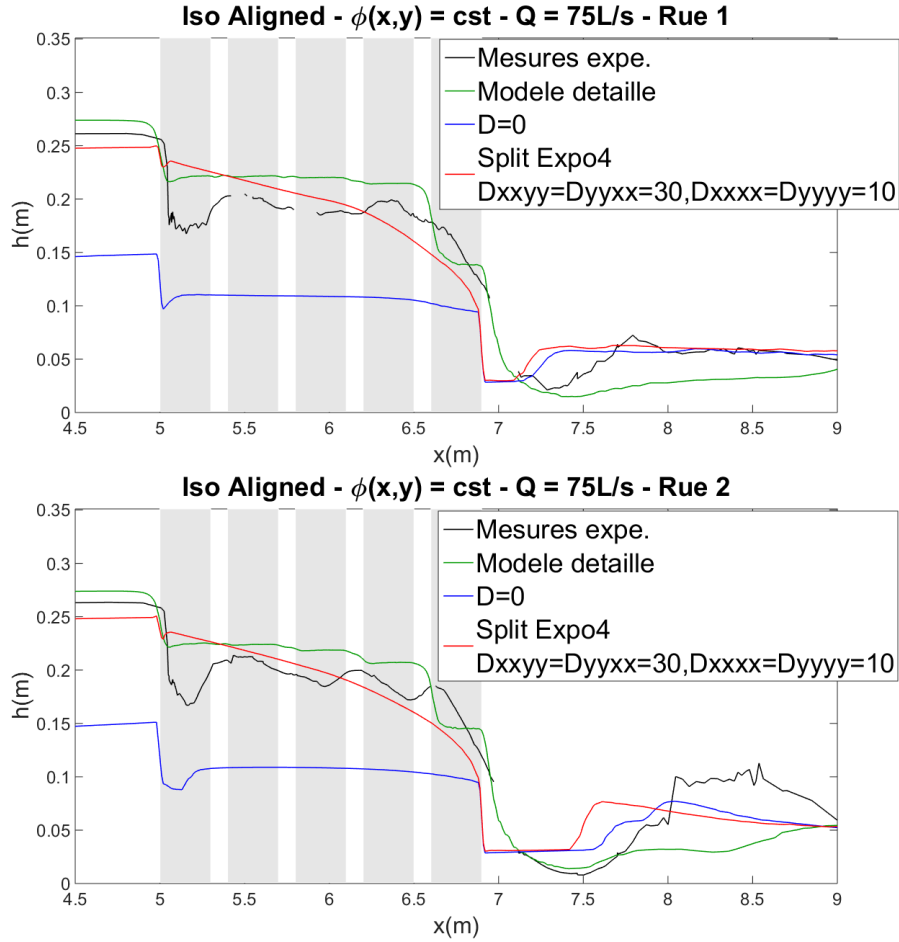


FIGURE 5.1 – Hauteurs d’eau dans les rues 1 et 2 dans le cas d’une ville isotrope alignée avec l’écoulement, pour un débit de 75L/s et un champ de porosité constant.

Résultats pour la ville anisotrope

Les Figures 5.2 et 5.3² illustrent les hauteurs d’eau dans le cas d’un réseau de rues anisotrope.

Dans le cas où les rues étroites sont alignées avec le canal (Figure 5.2), des particularités peuvent être mises en avant :

En amont de la ville, la hauteur d’eau est légèrement trop faible (8% d’erreur relative).

De plus, la chute d’eau à l’entrée de la ville n’est pas assez suffisante.

Au sein de la ville, la tendance générale de la courbe est inférieure aux valeurs expérimentales.

Si les rues larges sont alignées avec l’écoulement (Figure 5.3), les caractéristiques suivantes peuvent être exposées :

En amont de la ville, la hauteur d’eau a une bonne valeur (2.5% d’erreur relative).

Au sein de la ville, hormis à son entrée où la chute d’eau est absente, la tendance générale de la courbe approxime bien les valeurs expérimentales.

2. Les données fournies par le modèle détaillé n’étant pas exploitables pour le cas d’une ville anisotrope large, elles ont été écartées.

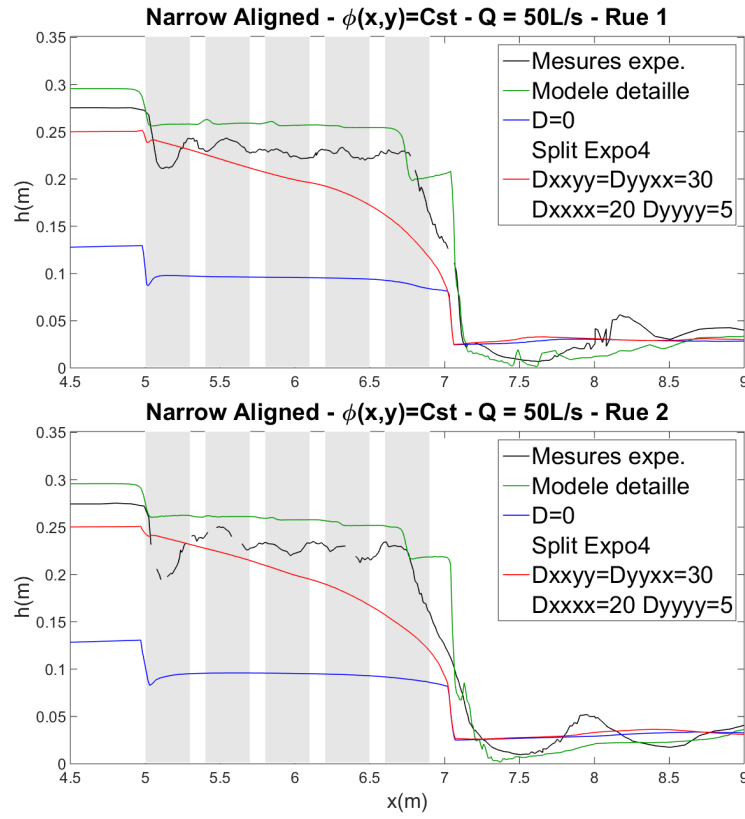


FIGURE 5.2 – Hauteurs d’eau dans les rues 1 et 2 dans le cas d’une ville anisotrope étroite alignée avec l’écoulement, pour un débit de 50L/s et un champ de porosité constant.

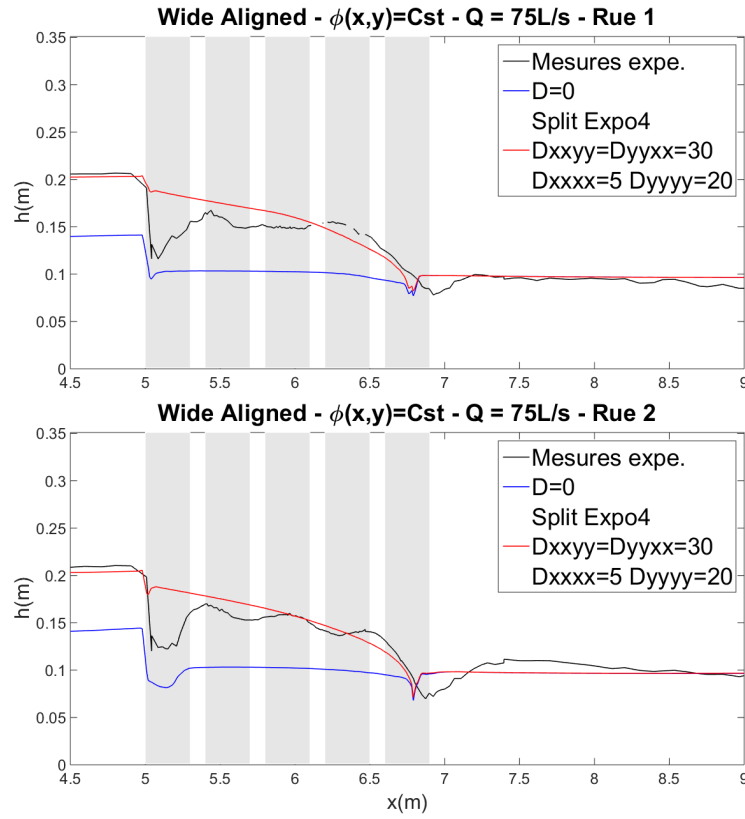


FIGURE 5.3 – Hauteurs d’eau dans les rues 1 et 2 dans le cas d’une ville anisotrope large alignée avec l’écoulement, pour un débit de 75L/s et un champ de porosité constant.

5.1.2 Ville inclinée par rapport à l'écoulement

L'impact du tenseur de traînée sur la hauteur d'eau est plus difficile à anticiper qu'au point précédent. Les résultats des simulations sont décrits ci-dessous.

Résultats pour la ville isotrope

La symétrie de la ville n'est plus d'application pour le cas incliné. Pour cette raison, les 4 rues sont reprises sur la Figure 5.4.

Les résultats sont relativement fidèles à la réalité :

En amont de la ville, la hauteur d'eau est bien approximée pour chacune des 4 rues (2.4% d'erreur relative).

Au sein de la ville, une chute de hauteur est présente. La localisation de celle-ci dépend de la rue. En effet, plus on se rapproche de l'aval, plus la chute se produit tôt. Les oscillations remarquées expérimentalement ne sont pas représentées.

Résultats pour la ville anisotrope

L'unique configuration anisotrope testée expérimentalement est celle dont les rues larges sont proches de la direction du flux amont. Les courbes de hauteur d'eau sont représentées sur la Figure 5.5. Dans ce cas, les profils de hauteur d'eau sont moins fidèles aux données expérimentales que dans le cas de la ville isotrope.

En amont de la ville, la hauteur d'eau est bien trop importante pour chacune des 4 rues (26% d'erreur relative).

Au sein de la ville, une chute importante de la hauteur d'eau est présente. Elle est similaire à celle observée dans le cas de la ville isotrope.

Concernant cette chute importante au sein de la ville, elle apparaît au droit de la zone de changement de direction du flux. Cette zone est visible sur les champs vectoriels de vitesse représentés sur la Figure 5.6 où sont comparés les cas isotrope et anisotrope large. La zone de changement de direction s'établit selon la diagonale de la ville. C'est la raison pour laquelle la position de la chute de hauteur d'eau n'est pas la même pour les 4 rues.

Un autre élément apparaît en particulier sur cette Figure 5.6 : le flux selon la direction y' est plus marquée pour la ville anisotrope large en comparaison avec la ville isotrope. Cet élément pose question et est approfondi dans la sous-section suivante.

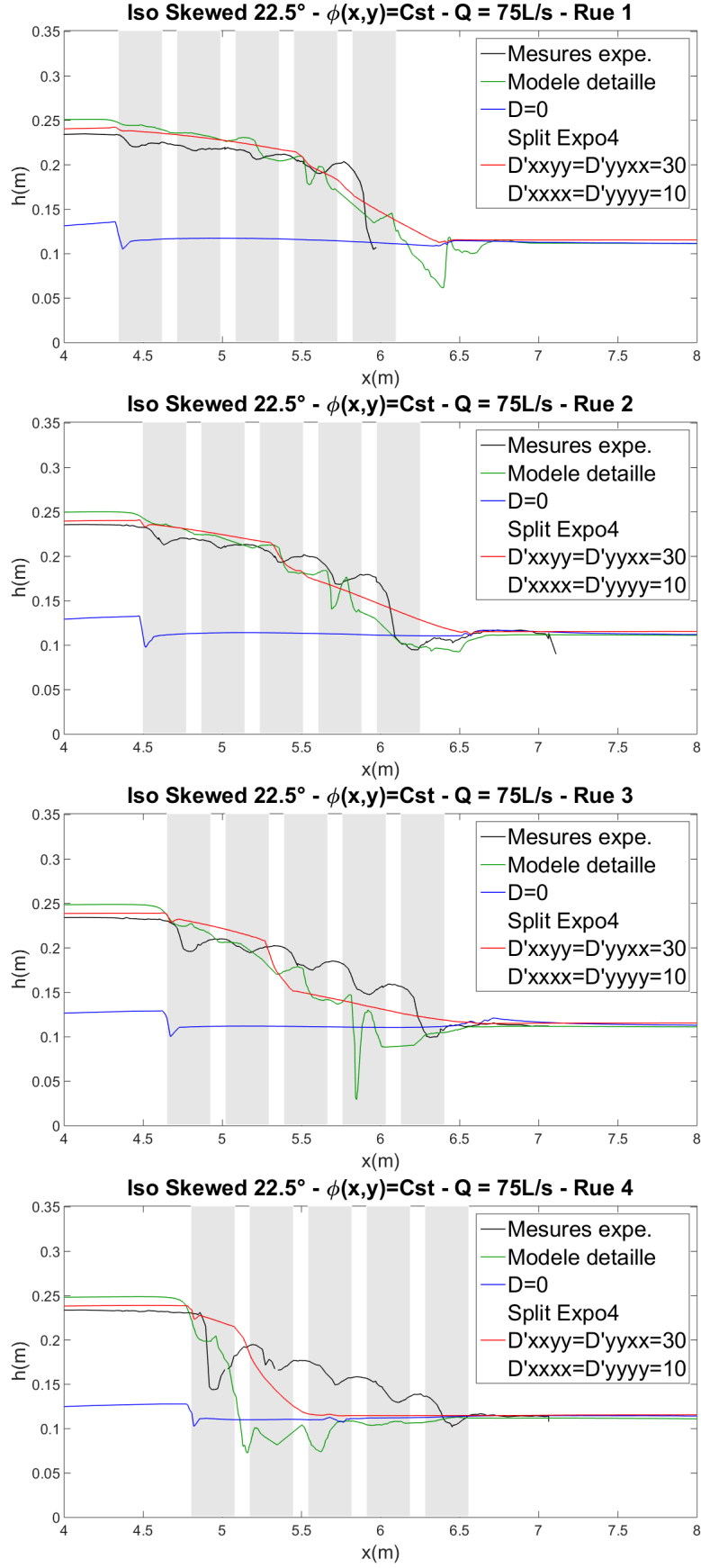


FIGURE 5.4 – Hauteurs d'eau dans les 4 rues d'une ville isotrope inclinée par rapport à l'écoulement, pour un débit de 75L/s et un champ de porosité constant.

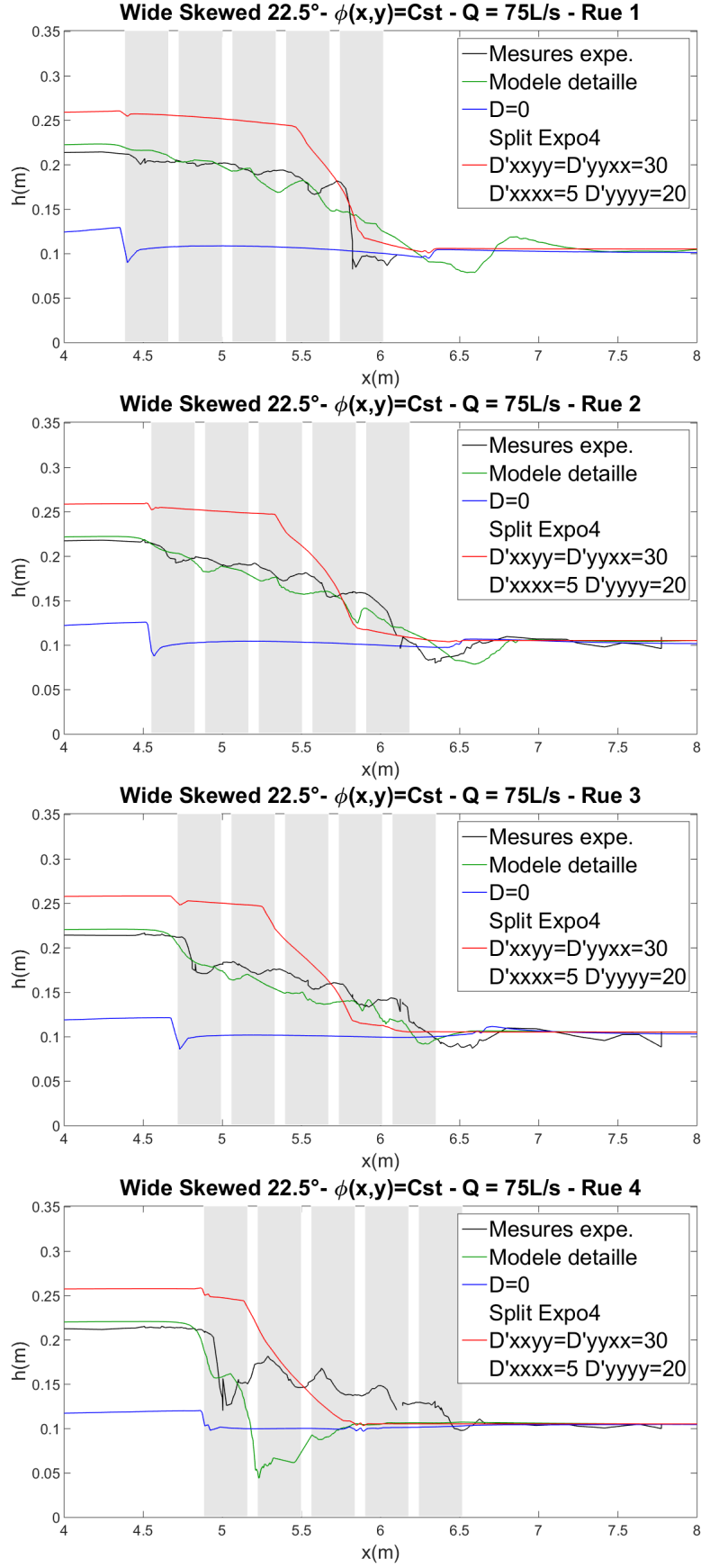


FIGURE 5.5 – Hauteurs d'eau dans les 4 rues d'une ville anisotrope large inclinée par rapport à l'écoulement pour un débit de 75L/s et un champ de porosité constant.

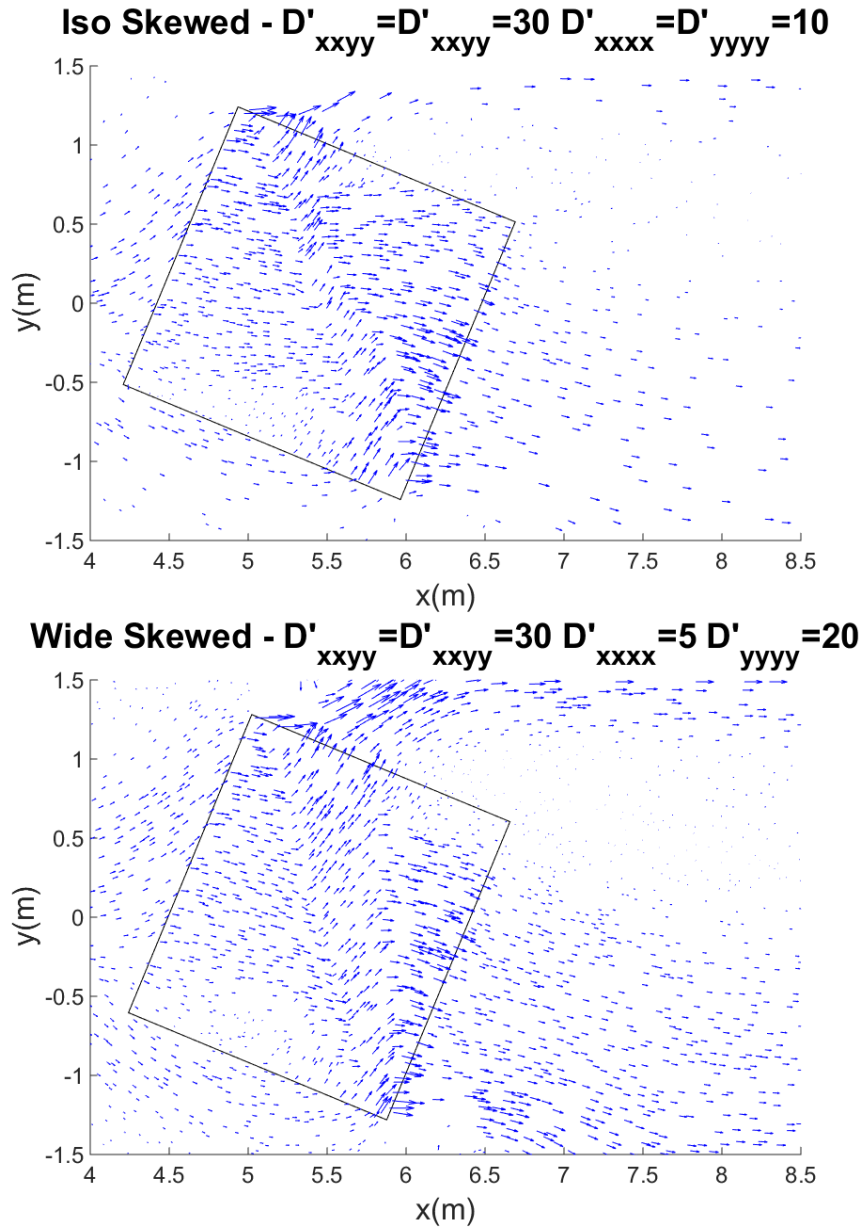


FIGURE 5.6 – Champs vectoriels de vitesse rencontrés dans le cas d’une ville isotrope inclinée et anisotrope large inclinée sur lesquelles est appliquée un champ de porosité constant.

5.1.3 Résultats d'un point de vue des directions préférentielles

Le résultat recherché ici est une division du flux selon les deux directions principales. Sa répartition doit se faire en fonction de l'anisotropie du milieu. C'est-à-dire que le flux doit être plus important dans la direction des rues plus larges. Il s'agit de la direction préférentielle. Seul le tenseur de traînée peut donner lieu à un tel effet directionnel. Dans un premier temps, deux tenseurs sont utilisés : celui du cas anisotrope large et celui du cas anisotrope étroit (voir tableau 5.1). Le but est de mettre en évidence l'existence d'une direction préférentielle représentant l'anisotropie du milieu. Les simulations sont réalisées sur le maillage de la ville isotrope et leurs résultats sont comparés entre-eux puisqu'il n'existe pas de données expérimentales pour le cas d'une ville anisotrope étroite inclinée.

La Figure 5.7 illustre le champ vectoriel de vitesse³ en fonction du tenseur de traînée. Le cas $D_{xxxx} = 5$ et $D_{yyyy} = 20$ (resp. $D_{xxxx} = 20$ et $D_{yyyy} = 5$) représente le cas où les rues larges sont orientées selon x' (resp. y') et les rues étroites selon y' (resp. x'). Cependant, les différences de débit selon les axes x' et y' entre les cas large et étroit ne sont pas visibles. Pour mettre ces comportements en évidence, une version du tenseur de traînée dont les composantes sont accentuées est testée. Les résultats sont exposés sur la Figure 5.8. L'apparition d'une direction préférentielle est alors nettement visible. Le débit est plus important dans la direction des rues larges et plus faible dans les rues étroites.

Ceci confirme la faisabilité d'imposer une direction préférentielle en accord avec l'anisotropie du milieu. Cependant, de telles valeurs du tenseur de traînée ne donnent pas de bonnes valeurs de hauteur d'eau. Il faut donc faire un choix entre faire apparaître une direction préférentielle et avoir un bon profil de hauteur d'eau.

En résumé - Formulation 1

Le problème de la hauteur d'eau à l'amont de la ville est résolu pour les configurations alignées, sauf pour le cas anisotrope large incliné : la résistance due au tenseur de traînée est trop forte car la hauteur d'eau est trop élevée.

Dans la ville inclinée, le fait de forcer l'écoulement à suivre les directions principales du réseau de rues provoque une chute de la hauteur d'eau au droit de la zone de redirection. De plus, l'influence de l'anisotropie du réseau de rues sur la direction préférentielle n'est pas assez marquée.

3. Le champ vectoriel des débits unitaires est sensiblement identique, pour cette raison, seul le champ vectoriel de vitesse est illustré.

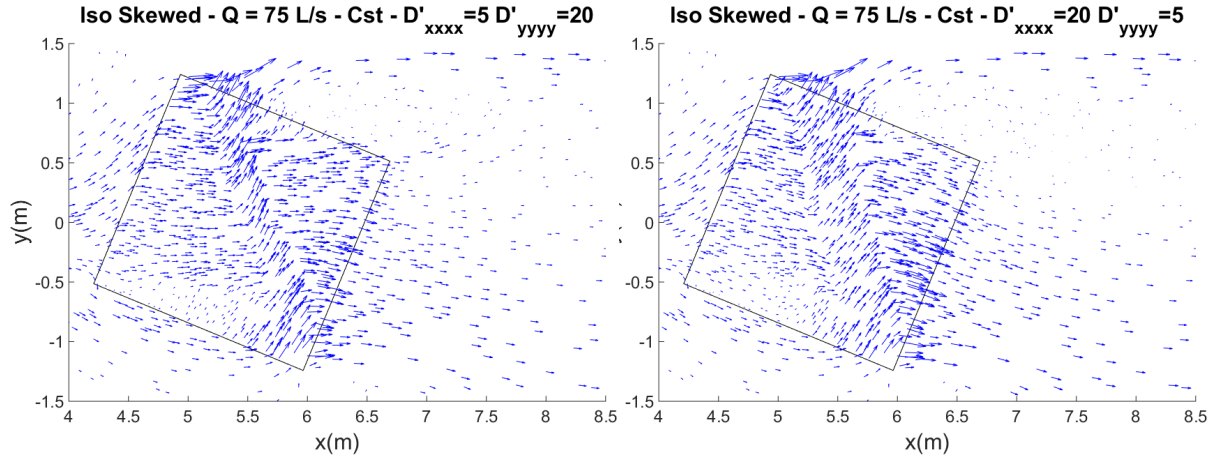


FIGURE 5.7 – Champs vectoriels de vitesse pour un tenseur représentant une ville anisotrope large à gauche ($D'_{xxxx} = 5$ et $D'_{yyyy} = 20$) et étroite à droite ($D'_{xxxx} = 20$ et $D'_{yyyy} = 5$). Dans les deux cas, $D'_{xxyy} = D'_{yyxx} = 30$ et le champ de porosité est le champ constant. Aucune direction préférentielle n'apparaît.

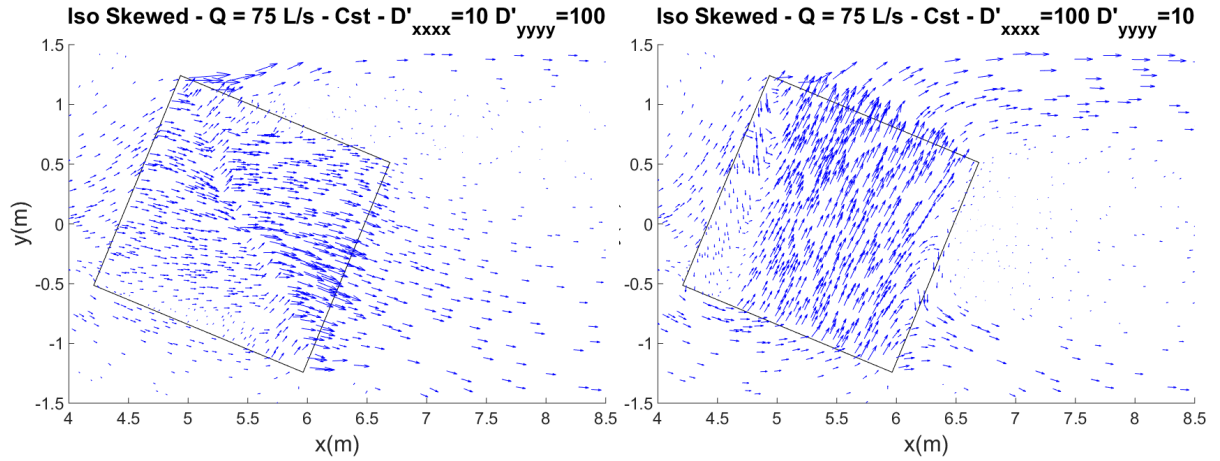


FIGURE 5.8 – Champs vectoriels de vitesse pour un tenseur représentant une ville anisotrope large à gauche ($D'_{xxxx} = 10$ et $D'_{yyyy} = 100$) et étroite à droite ($D'_{xxxx} = 100$ et $D'_{yyyy} = 10$). Dans les deux cas, $D'_{xxyy} = D'_{yyxx} = 30$ et le champ de porosité est le champ constant. Cette fois, on relève l'apparition d'une direction préférentielle selon le cas : x' à gauche et y' à droite.

5.2 Formulation 2 : Combinaison du tenseur de traînée avec le champ de porosité *Building Peak*

Les oscillations de hauteur d'eau au sein de la ville ont pu être recréées avec le champ *Building Peak* (voir section 3.6). En revanche, la hauteur d'eau en amont du milieu urbain est nettement trop faible. L'objectif est de corriger ce point par un tenseur de traînée adéquat.

La porosité moyenne du champ constant est de 0.4375, celle du champ *Building Peak* est de 0.426. La différence étant faible, le même tenseur de traînée est utilisé pour les *Formulations 1* et *2*, par souci de simplicité. Pour rappel, les composantes de D sont les suivantes :

$$D_{xxxx} = 10 \cdot \frac{dx_{rue}}{dy_{rue}} \quad (5.5)$$

$$D_{yyyy} = 10 \cdot \frac{dy_{rue}}{dx_{rue}} \quad (5.6)$$

$$D_{xxyy} = 30 \quad (5.7)$$

$$D_{yyxx} = 30 \quad (5.8)$$

Ces valeurs sont reprises, pour les différentes configurations de villes, dans le tableau 5.2.

TABLE 5.2 – Composantes du tenseur de traînée de la *Formulation 2*

Configuration de la ville	D_{xxxx}	D_{yyyy}	D_{xxyy}	D_{yyxx}
Isotrope	10	10	30	30
Anisotrope large	5	20	30	30
Anisotrope étroite	20	5	30	30

5.2.1 Ville alignée avec l'écoulement

Résultats pour la ville isotrope

Les caractéristiques suivantes sont déduites de l'analyse des courbes de hauteur d'eau (Figure 5.9) :

En amont de la ville, la hauteur d'eau à l'amont un peu trop élevée (4% d'erreur relative).

La résistance globale de la ville est légèrement trop importante.

Au sein de la ville, la chute à son entrée n'est pas représentée, un décalage avec les données expérimentales est observé dans tout le milieu urbain. Ce décalage se résorbe au fur et à mesure qu'on avance dans la ville.

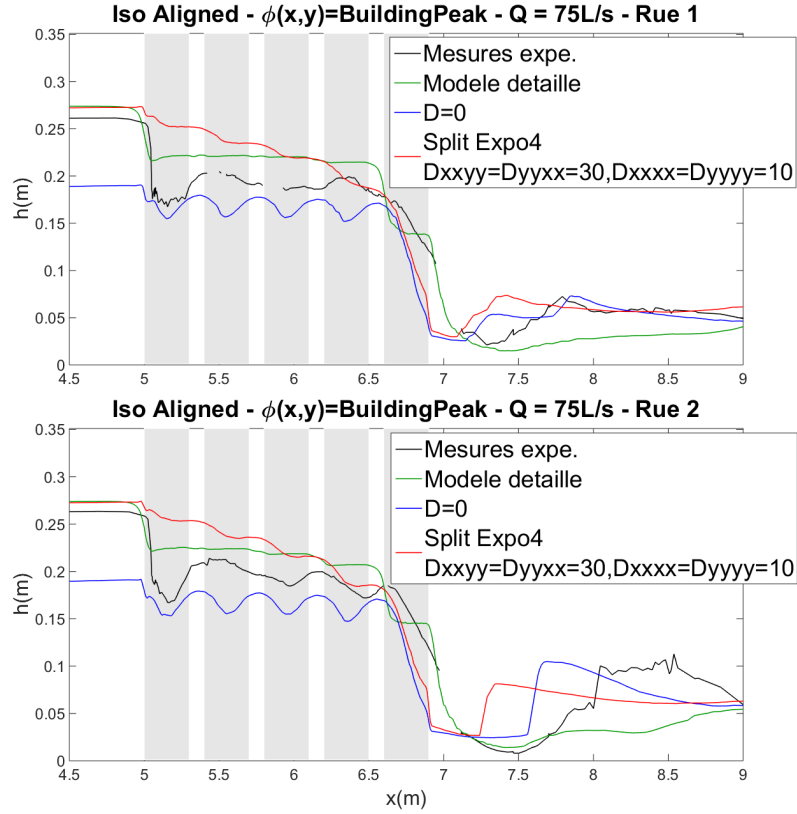


FIGURE 5.9 – Hauteurs d’eau dans les rues 1 et 2 dans cas d’une ville isotrope alignée avec l’écoulement pour un débit de 75L/s et un champ de porosité *Building Peak*.

Résultats pour la ville anisotrope

Pour le cas d’une ville anisotrope alignée, les graphes de hauteur d’eau sont repris aux Figures 5.10 et 5.11 :

En amont de la ville, la hauteur d’eau est légèrement trop faible (3.6% d’erreur relative) pour la ville étroite et trop importante (12% d’erreur relative) pour la ville large.

Au sein de la ville, les pertes de charge selon l’axe x ont un impact sur l’amplitude des oscillations au sein de la ville. En effet, les courbes sont lissées en comparaison avec le cas du tenseur $D = 0$. Les oscillations sont cependant moins estompées dans le cas anisotrope large que dans le cas étroit. Plus les pertes de charge selon x sont importantes, plus les oscillations sont atténuées.

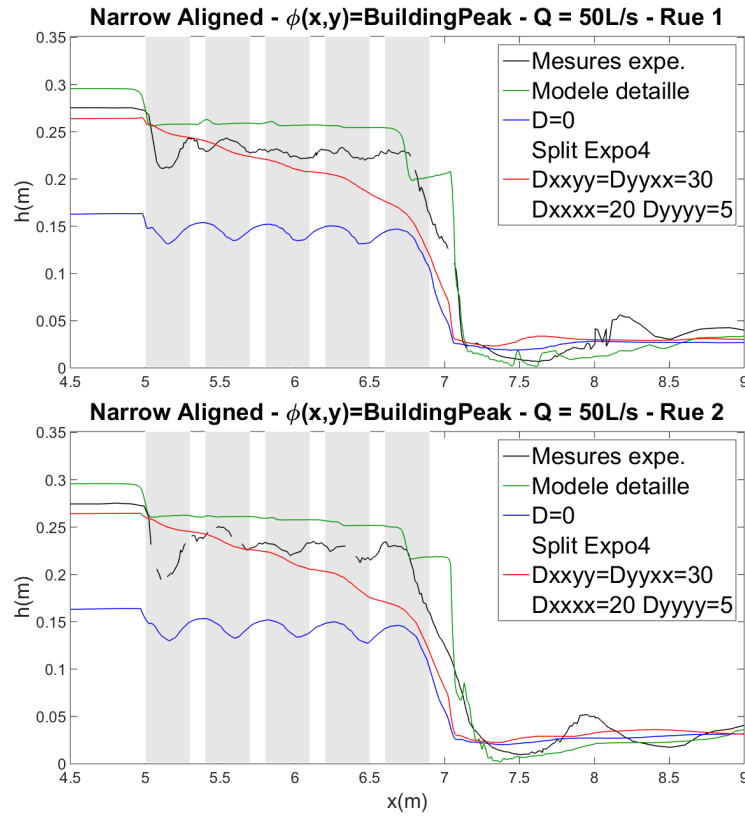


FIGURE 5.10 – Hauteurs d’eau dans les rues 1 et 2 dans le cas d’une ville anisotrope étroite alignée avec l’écoulement pour un débit de 50L/s et un champ de porosité *Building Peak*.

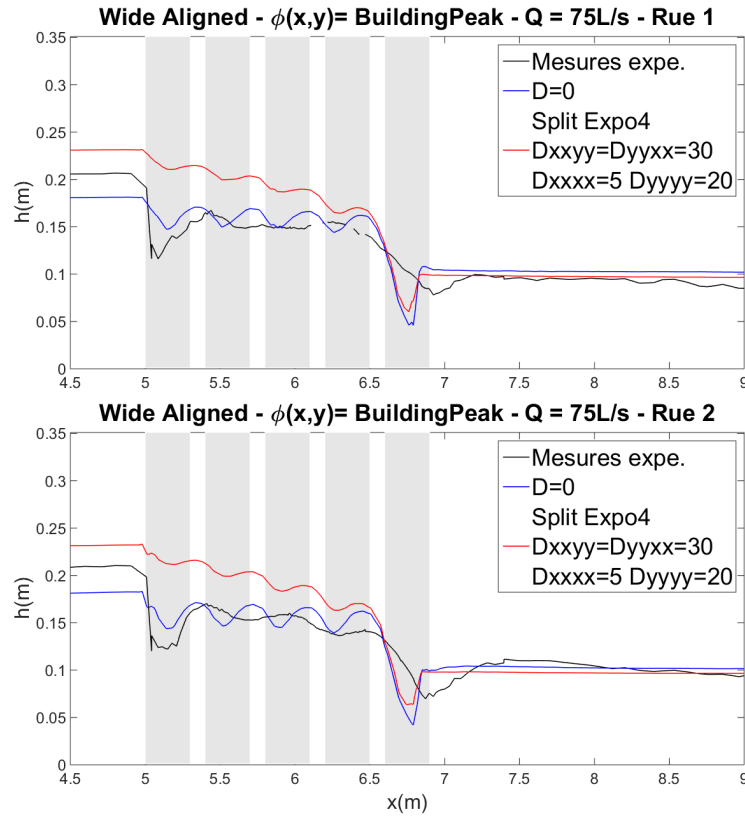


FIGURE 5.11 – Hauteurs d’eau dans les rues 1 et 2 dans le cas d’une ville anisotrope large alignée, avec l’écoulement pour un débit de 75L/s et un champ de porosité *Building Peak*.

5.2.2 Ville inclinée par rapport à l'écoulement

Résultats pour la ville isotrope

Les résultats de la ville isotrope sont repris sur les 4 graphiques de la Figure 5.12.

Les observations des courbes de hauteur d'eau sont les suivantes :

En amont de la ville, la hauteur d'eau est bien approximée, légèrement au-dessus de la valeur expérimentale (4% d'erreur relative).

Au sein de la ville, la redirection du flux selon le réseau de rues provoque une chute de hauteur d'eau comme évoqué précédemment. La localisation de cette chute se situe aux zones où l'écoulement change de direction. Plus on se rapproche de la frontière supérieure de la ville, plus la hauteur d'eau chute tôt. Les oscillations remarquées expérimentalement et bien reproduites pour le cas $D = 0$ sont ici gommées par tenseur de traînée.

Résultats pour la ville anisotrope

Pour la configuration anisotrope large dont les profils de hauteur d'eau sont illustrés sur la Figure 5.13, les mêmes caractéristiques que celles rencontrées pour le cas du champ de porosité constant sont observées : les profils de hauteur d'eau sont moins fidèles aux données expérimentales que dans le cas de la ville isotrope.

En amont de la ville, la hauteur d'eau est trop importante pour chacune des 4 rues (11% d'erreur relative).

Au sein de la ville, une chute importante de la hauteur d'eau est présente. Elle est similaire à celle observée dans le cas de la ville isotrope.

En résumé - *Formulation 2*

Les résultats sont similaires à ceux de la *Formulation 1* puisque le même tenseur de traînée est appliqué et que la porosité moyenne est proche de celle de la formulation précédente. Le niveau d'eau à l'amont est correct pour la plupart des cas.

Par contre, la chute de hauteur d'eau en entrée de ville n'est jamais bien reproduite. Concernant les oscillations, plus la valeur de D'_{xxxx} est grande, plus elles sont atténuées.

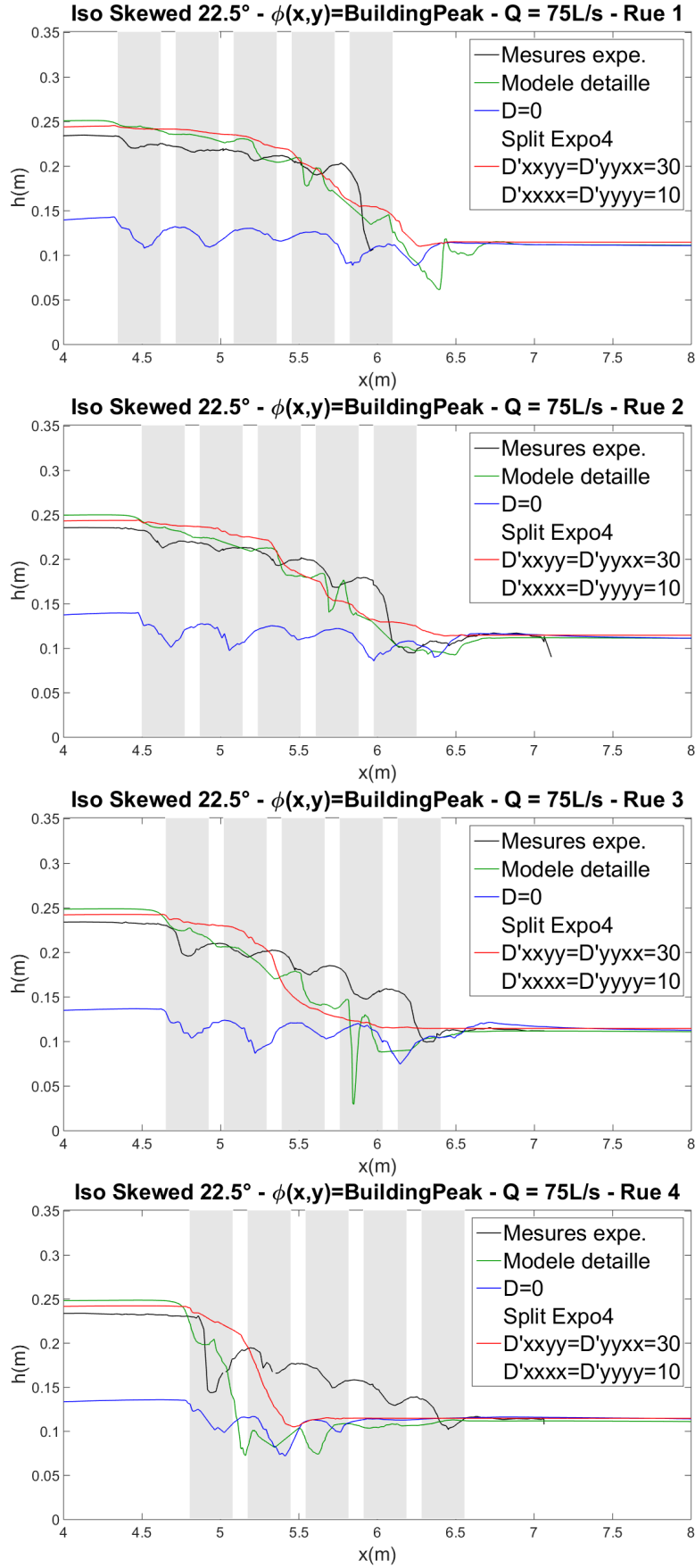


FIGURE 5.12 – Hauteurs d'eau dans les 4 rues d'une ville isotrope inclinée par rapport à l'écoulement, pour un débit de 75L/s et un champ de porosité *Building Peak*.

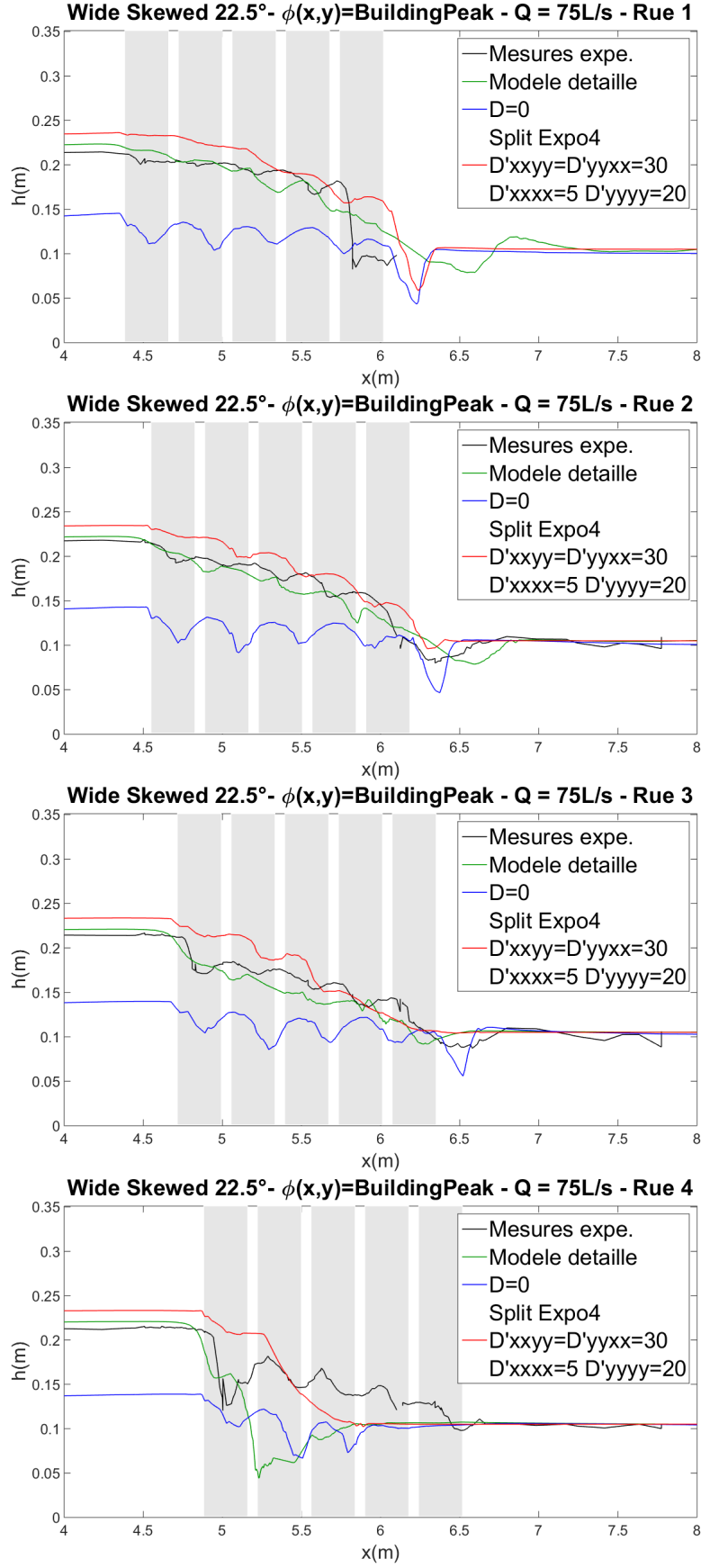


FIGURE 5.13 – Hauteurs d’eau dans les 4 rues dans le cas d’une ville anisotrope large inclinée par rapport à l’écoulement, pour un débit de 75L/s et un champ de porosité *Building Peak*.

5.3 Formulation 3 : Combinaison du tenseur de traînée avec le champ de porosité *Building Interpolated*

Le champ *Building Interpolated* est décrit à la section 3.9. L'avantage de ce champ est d'être applicable à tout type de ville, contrairement à *Building Peak*.

Dans le cas d'un champ de porosité constant, la porosité moyenne vaut 0.4375, alors que pour *Building Interpolated* elle vaut 0.356. Cela représente une diminution de 18%. Pour cette raison, même si le calcul du tenseur de traînée est similaire, les valeurs utilisées ici sont plus faibles. Le but est de garder une résistance à l'écoulement globalement identique aux *Formulations 1* et *2*.

Le choix des valeurs s'est fait de manière empirique. Pour la ville isotrope, les valeurs retenues sont :

$$\begin{aligned} D_{xxxx} &= 1 & D_{xxyy} &= 10 \\ D_{yyyy} &= 1 & D_{yyxx} &= 10 \end{aligned}$$

Pour les villes anisotropes, ces valeurs sont adaptées de la même façon que pour les deux formulations précédentes :

$$D_{xxxx} = 1 \cdot \frac{dx_{rue}}{dy_{rue}} \quad (5.9)$$

$$D_{yyyy} = 1 \cdot \frac{dy_{rue}}{dx_{rue}} \quad (5.10)$$

$$D_{xxyy} = 10 \quad (5.11)$$

$$D_{yyxx} = 10 \quad (5.12)$$

Le tableau 5.3 récapitule l'ensemble des composantes non-nulles du tenseur de traînée pour les trois configurations de villes.

TABLE 5.3 – Composantes du tenseur de traînée

Configuration de la ville	D_{xxxx}	D_{yyyy}	D_{xxyy}	D_{yyxx}
Isotrope	1	1	10	10
Anisotrope large	0.5	2	10	10
Anisotrope étroite	2	0.5	10	10

5.3.1 Ville alignée avec l'écoulement

Dans le cas d'une ville alignée, les composantes D_{xxyy} et D_{yyxx} ont, pour rappel, un impact très limité.

Résultats pour la ville isotrope

Dans le cas d'un réseau de rues isotrope, les courbes de hauteur d'eau sont rassemblées sur la Figure 5.14. Les caractéristiques suivantes sont observées :

En amont de la ville, la hauteur d'eau est acceptable (3.8% d'erreur relative).

Au sein de la ville, on remarque l'absence de chute de hauteur d'eau à son entrée. Mais la hauteur d'eau est proche des données expérimentales à partir du milieu de la ville.

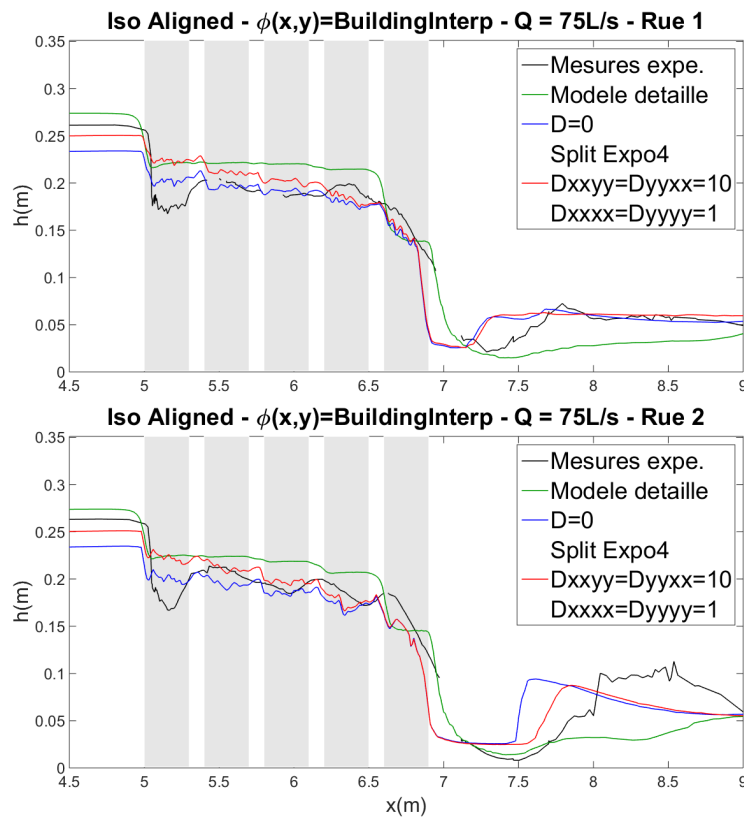


FIGURE 5.14 – Hauteurs d'eau dans les rues 1 et 2 dans le cas d'une ville isotrope alignée avec l'écoulement, pour un débit de 75L/s et un champ de porosité *Building Interpolated*.

Résultats pour la ville anisotrope

Les résultats du réseau anisotrope étroit ont illustrés sur la Figure 5.15 :

En amont de la ville, la hauteur d'eau trop faible (7% d'erreur relative).

Au sein de la ville, l'absence de chute en entrée de ville est à nouveau à noter et le niveau diminue tout au long du milieu urbain alors que les données expérimentales ont un niveau plutôt constant jusqu'au dernier bâtiment.

Concernant la configuration anisotrope large, les résultats illustrés à la Figure 5.16 sont meilleurs :

En amont de la ville, la hauteur d'eau est correcte (2.4% d'erreur relative).

Au sein de la ville, l'absence de chute est à nouveau à relever et cette fois la hauteur d'eau suit mieux la courbe des données expérimentales jusqu'au dernier bâtiment.

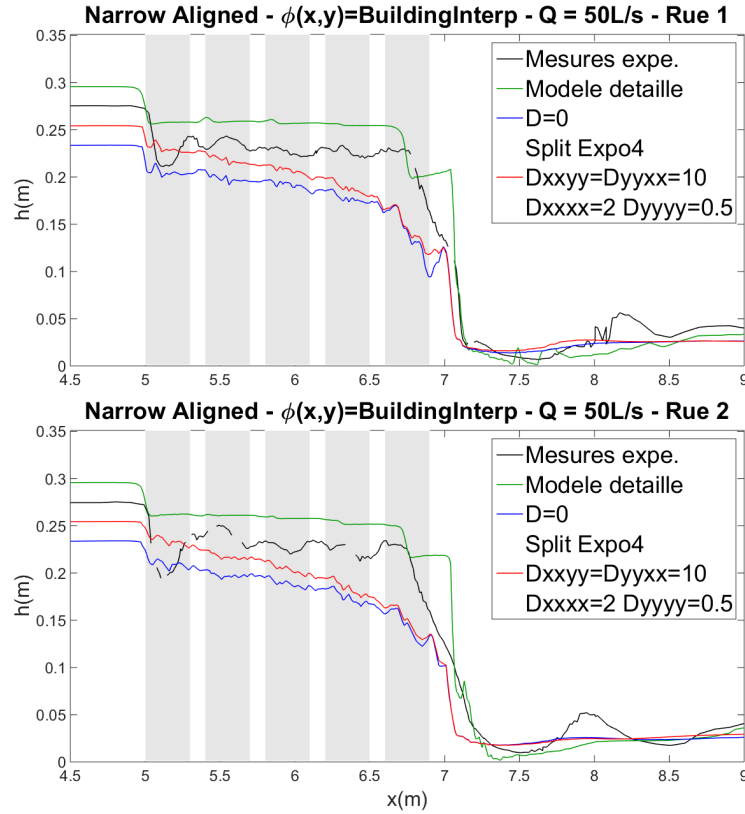


FIGURE 5.15 – Hauteurs d'eau dans les rues 1 et 2 dans le cas d'une ville anisotrope étroite alignée avec l'écoulement, pour un débit de 50L/s et un champ de porosité *Building Interpolated*.

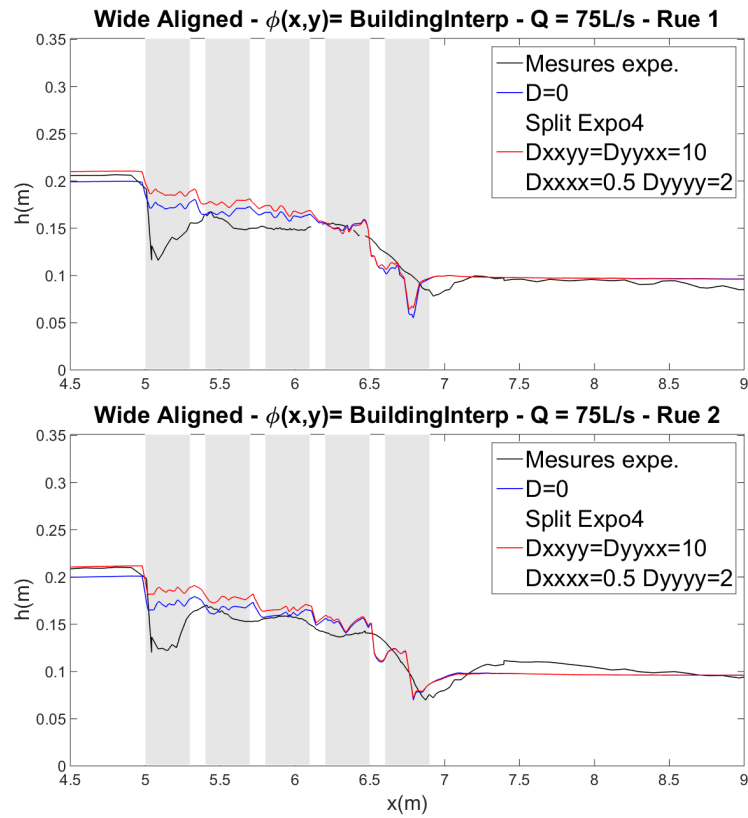


FIGURE 5.16 – Hauteurs d'eau dans les rues 1 et 2 dans le cas d'une ville anisotrope large alignée avec l'écoulement, pour un débit de 75L/s et un champ de porosité *Building Interpolated*.

5.3.2 Ville inclinée par rapport à l'écoulement

Résultats pour la ville isotrope

C'est sur la configuration de ville isotrope inclinée que différentes valeurs de tenseur ont été testées avant de garder celles reprises dans le tableau 5.3 situé au début de cette section. Les profils de hauteur d'eau sont illustrés à la Figure 5.17. Par souci de complétude, les autres valeurs des éléments D_{xxyy} et D_{yyxx} ayant été testées y sont également intégrées. Les caractéristiques suivantes sont remarquées :

En amont de la ville, la hauteur d'eau est la même que celle des données expérimentales (0.3% d'erreur relative).

Au sein de la ville, le niveau d'eau est vraiment très proche des mesures expérimentales pour les rues 1 à 3. Pour la rue 4, le niveau chute trop tôt.

Résultats pour la ville anisotrope

Les résultats sont illustrés à la Figure 5.18 :

En amont de la ville, la hauteur d'eau est trop faible (14% d'erreur relative).

Au sein de la ville, la hauteur d'eau est également trop faible dans toute la ville et pour les 4 rues. Pour la rue 4 en particulier, le niveau chute trop tôt.

— En résumé - *Formulation 3* —

De manière générale, des valeurs plus faibles du tenseur de traînée ont permis de compenser l'effet d'une porosité moyenne plus basse et d'obtenir des hauteurs d'eau acceptables.

Le fait d'avoir calibré le tenseur de traînée sur le cas de la ville isotrope inclinée permet naturellement d'obtenir de très bons résultats pour ce même cas, sans pénaliser le cas anisotrope incliné en comparaison avec les deux autres formulations (*Formulation 1* : 26% d'erreur relative; *Formulation 2* : 11%; *Formulation 3* : 14%). C'est la *Formulation 3* qui donne les résultats les plus proches des données expérimentales pour une ville inclinée.

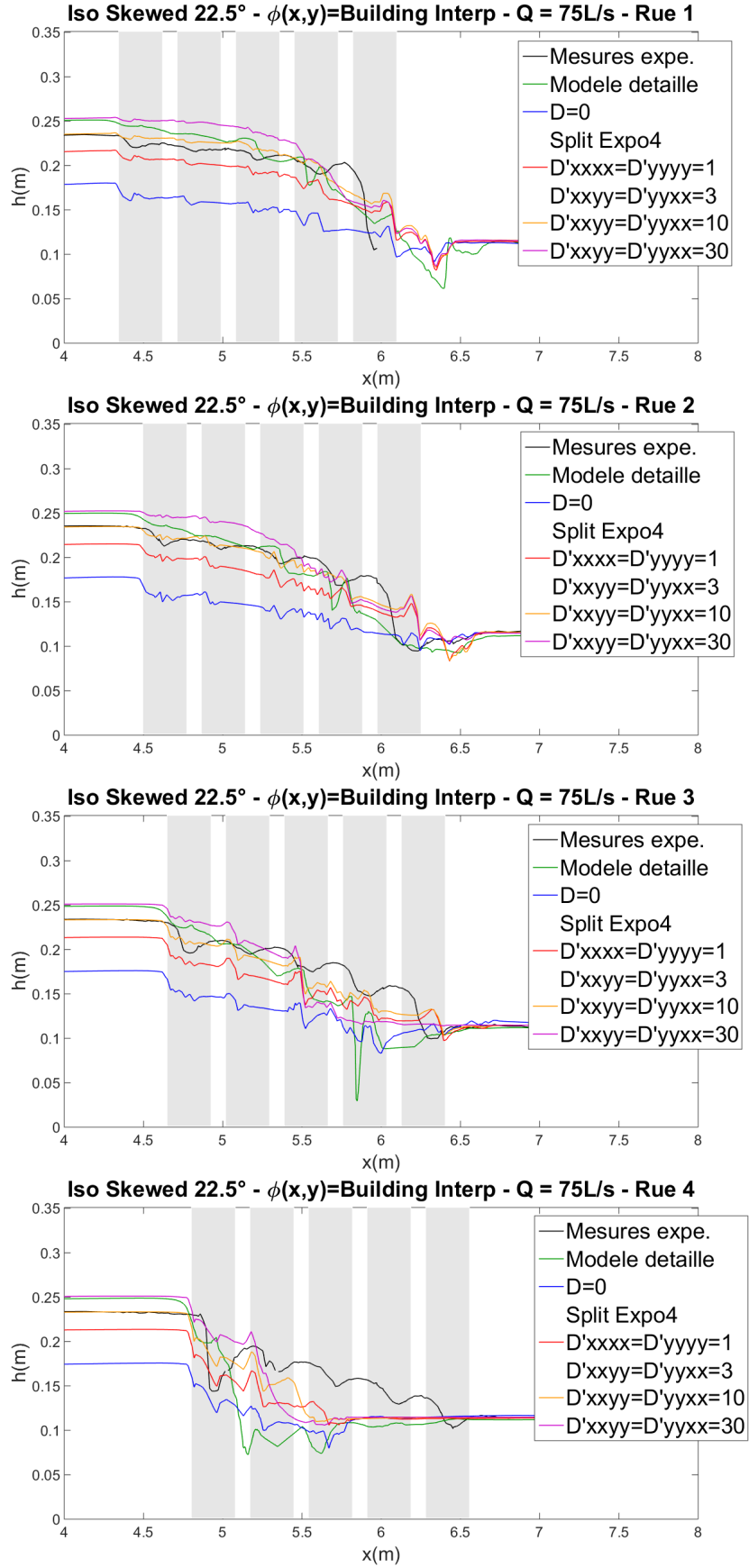


FIGURE 5.17 – Hauteurs d’eau dans les 4 rues dans le cas d’une ville isotrope inclinée par rapport à l’écoulement, pour un débit de 75L/s et un champ de porosité *Building Interpolated*. Le seul paramètre qui diffère entre les courbes rouge, orange et mauve est le duo de composantes $D'_{xxyy} - D'_{yyxx}$. Pour alléger la légende, seuls ces éléments sont y repris.

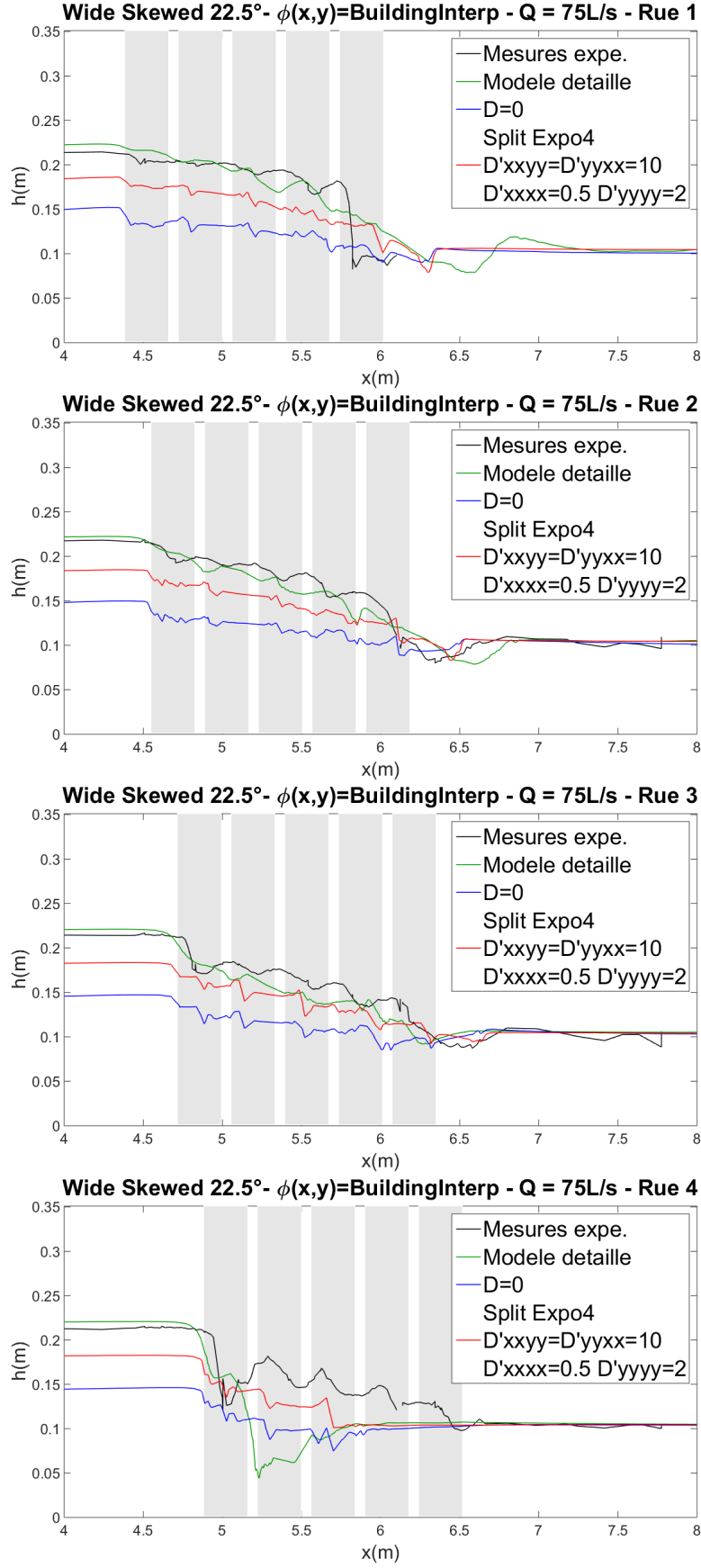


FIGURE 5.18 – Hauteurs d'eau dans les 4 rues d'une ville anisotrope large inclinée par rapport à l'écoulement pour un débit de 75L/s et un champ de porosité *Building Interpolated*.

5.4 Conclusion

Afin de comparer les performances des trois formulations présentées dans ce chapitre, le tableau 5.4 reprend les erreurs relatives de la hauteur d'eau en amont de la ville. Pour chaque formulation, certains cas donnent de bons résultats, mais au moins une configuration de ville pose problème. Cette constatation met en évidence la nécessité d'un compromis entre les performances sur les différentes configurations de villes.

Ceci vient du fait que la formulation du tenseur de traînée est simple. Or, cette simplicité est souvent synonyme de robustesse et est nécessaire afin d'éviter un ajustement au cas par cas. C'est pourquoi le critère de simplicité a été adopté ici, et la méthode de calcul du tenseur de traînée a été choisie la plus générale possible.

Si on regarde la moyenne des erreurs relatives sur les cinq configurations, la troisième formulation est la plus fidèle des trois. Cette façon d'évaluer les trois formulations en est une parmi d'autres, évaluer les performances séparément pour les cas aligné et incliné serait pertinent également.

TABLE 5.4 – Tableau récapitulatif des erreurs relatives des hauteurs d'eau à l'amont pour les 5 cas de ville de chaque formulation.

Configuration de la ville		Formulation 1	Formulation 2	Formulation 3
Alignée	Isotrope	5 %	4 %	3.8 %
	Anisotrope large	2.5 %	12 %	2.4 %
	Anisotrope étroite	8 %	3.6 %	7 %
Inclinée	Isotrope	2.4 %	4 %	0.3 %
	Anisotrope large	26 %	11 %	14 %
-				
Moyenne sur les 5 cas		8.8 %	6.9 %	5.5 %

Il est plus difficile de comparer les trois formulations pour leur performance au sein de la ville, faute de données chiffrées et précises qui permettent une comparaison objective. Néanmoins, force est de constater que la chute de hauteur d'eau en entrée de ville n'est reproduite pour aucune des trois formulations.

Les effets directionnels sont reproduits, comme expliqué et illustré à la section consacrée à la *Formulation 1*. Par contre, aucune direction préférentielle n'apparaît clairement pour les valeurs du tenseur de traînée testées ici. Pour ce faire, d'autres valeurs sont nécessaires, mais dans ce cas, les profils de hauteurs d'eau ne sont plus satisfaisants. A nouveau, il s'agit d'un compromis. Dans ce chapitre, la priorité a été donnée aux profils de hauteurs d'eau, les champs vectoriels de vitesse ont donc été volontairement écartés lors de l'analyse de résultats.

Chapitre 6

Conclusion

En situation d'urgence, lorsqu'une digue ou un barrage menace de s'effondrer, il est important d'anticiper la propagation des eaux et d'évaluer les zones potentiellement inondables dans les plus brefs délais. Afin de réduire le temps nécessaire à la simulation de l'écoulement, l'utilisation d'un modèle simple, pouvant être exécuté sur un maillage grossier, constitue une solution appropriée. C'est dans ce but qu'a été introduit le concept de porosité dans les modèles numériques permettant de simuler ce type d'écoulements.

Dans le cadre d'une thèse de doctorat [Velickovic, 2012] menée à l'Université Catholique de Louvain, un code de calcul a été développé pour résoudre les équations à porosité par un schéma de volumes finis. Le paramètre de porosité y est défini comme étant le rapport de l'aire disponible pour l'écoulement et celle occupée par les bâtiments du milieu urbain. Ce dernier est alors simplifié par un milieu macroscopique homogène caractérisé par un paramètre de porosité. En effet, un milieu urbain peut être assimilé à un milieu poreux du point de vue de l'écoulement : les rues constituent les pores dans lesquelles l'écoulement peut prendre place, et le bâti constitue les diverses obstructions à l'écoulement. Les nouveaux développements qui constituent le corps de ce présent document ont été réalisés sur base de cette thèse de doctorat.

L'intérêt du modèle à porosité réside donc dans la rapidité d'exécution que permet l'utilisation d'un maillage grossier. En effet, un milieu urbain est un milieu très détaillé : les rues et les bâtiments représentent autant de détails géométriques qui requièrent un maillage très fin. Cela alourdit considérablement le temps de calcul. A titre d'illustration, un maillage fin correspondant au modèle détaillé qui compte 47503 cellules voit ce nombre être réduit à 10349 cellules pour le modèle à porosité. Concernant le temps de simulation, on passe de 90500 secondes à 6800.

Si la modélisation macroscopique permet des temps de calcul beaucoup plus courts, elle a des conséquences sur la qualité des résultats également. L'objectif de ce travail est de réduire au maximum les différences entre les résultats réels et ceux obtenus par la simulation numérique. Cet objectif tient en quatre questions principales découlant de l'état de l'art au moment du commencement de ce travail :

- Comment permettre au modèle de rendre fidèlement les hauteurs d'eau enregistrées expérimentalement ?
- Comment laisser transparaître l'effet directionnel imposé par les axes des rues de la ville ?
- Comment traduire une direction préférentielle liée à l'anisotropie éventuelle du réseau ?
- Comment exprimer les pertes de charge singulières dues à la redistribution du flux à chaque carrefour ?

Pour répondre à ces questions, la démarche a été d'étudier les deux paramètres qui constituent le fer de lance du modèle à porosité : le champ de porosité et le tenseur de traînée. Ces deux paramètres ont été étudiés séparément dans un premier temps, en comparant les résultats des simulations numériques avec des données provenant de cas-tests expérimentaux.

1. L'étude du champ de porosité a mis en évidence l'intérêt d'un champ de porosité de type macroscopique, ce qui, pour rappel, est un champ qui tient compte de la position des rues et des bâtiments. Deux champs ont été retenus : *Building Peak* et *Building Interpolated*. Ils ont donné des profils de hauteur d'eau très intéressants au sein de la zone urbaine. *Building Interpolated* permet de reproduire en partie l'effet lié à l'anisotropie d'une ville puisque des valeurs de porosité différentes sont attribuées aux rues larges et étroites. Ces valeurs dépendent d'ailleurs directement de la largeur des rues en question. Il est également applicable à des villes non régulières. Mais aucun champ testé n'a permis de reproduire les effets directionnels engendrés par le réseau de rues orthogonales.
2. L'étude du tenseur de traînée a révélé le rôle des ses composantes. L'écoulement a tendance à s'aligner dans la direction de la perte de charge minimum. Par conséquent, la composante $D'_{xxx} = 50$ oriente l'écoulement selon l'axe y' de la ville, alors qu'une composante $D'_{yyy} = 50$ l'oriente selon x' de la ville. L'effet global d'une combinaison de ces deux éléments est une augmentation de la résistance à l'écoulement, que ce soit dans le cas d'une ville alignée ou inclinée car les pertes de charges sont effectives dans les deux directions x' et y' . Le coefficient a_{pdc} joue un rôle important à ce propos, il a tendance à amplifier les pertes de charges selon la diagonale.

Pour modéliser la division du flux selon les deux axes de rues, un coefficient a été introduit dans la définition des pertes de charge. Ce coefficient tient compte de l'orientation du vecteur vitesse. Si celui-ci a une orientation plus proche de la direction x' (resp. y') de la ville, alors les pertes de charge selon y' (resp. x') seront accentuées et le vecteur vitesse s'orientera selon x' (resp. y'). Grâce à cette modification dans le calcul des pertes de charge, les flux sortant de la ville sont perpendiculaires aux frontières, ce qui se rapproche du comportement mis en évidence lors des expériences et des simulations sur le modèle détaillé. Les composantes D'_{xxx} et D'_{yyy} peuvent alors rendre compte de l'anisotropie du réseau de rues en favorisant soit la direction x' , soit y' , comme expliqué ci-dessus.

Ensuite, ces deux paramètres ont été combinés dans le but d'obtenir des résultats les plus fidèles possibles aux données expérimentales, que ce soit pour le profil de hauteur d'eau ou l'orientation des vecteurs vitesse. Cela a révélé la nécessité d'un compromis entre plusieurs éléments :

- Entre les configurations de ville car un bon niveau d'eau pour une certaine configuration ne garantit pas des résultats aussi bons pour les autres configurations ;
- Entre les profils de hauteur d'eau et les effets directionnels car un effet directionnel bien reproduit nécessite un tenseur de traînée qui ne donne pas des valeurs convenables de hauteurs d'eau.

Suggestions d'amélioration

Le modèle peut être amélioré en matière de qualité des résultats, de vitesse de calcul, d'adaptabilité et de robustesse.

Notamment, les deux paramètres géométriques qui varient d'une configuration de ville à une autre sont l'orientation de la ville et l'anisotropie du réseau de rues. Il pourrait être intéressant d'étudier d'autres cas. Par exemple, des rues formant des angles non-droits. La redistribution du flux qui s'opère à chaque carrefour serait alors différente, ainsi que les pertes de charge induites par cette redistribution. Un exemple de réseau de rues formant un angle de 65° est présenté sur la Figure 6.1.

D'autre part, l'angle d'inclinaison de la ville, ici 22.5° , a également son importance. Tester un angle de 45° , de sorte qu'il y ait une symétrie par rapport à la direction principale de l'écoulement, permettrait de voir apparaître une direction préférentielle qui aurait pour origine uniquement l'anisotropie du réseau de rues et non le fait qu'elle soit favorisée par cette inclinaison de la ville. En effet, seule la configuration d'une ville anisotrope large a été étudiée pour le cas d'une ville inclinée. Or, avec un angle de 22.5° , l'écoulement s'aligne naturellement plus facilement avec l'axe x' . Le cas d'une ville anisotrope étroite inclinée pourrait apporter des éléments nouveaux. Le type de bâtiments présents dans le milieu va aussi avoir une influence sur les pertes de charge lorsqu'ils sont cylindriques par exemple, comme représenté sur la Figure 6.2. L'écoulement dans le milieu urbain se fera plus facilement par exemple.

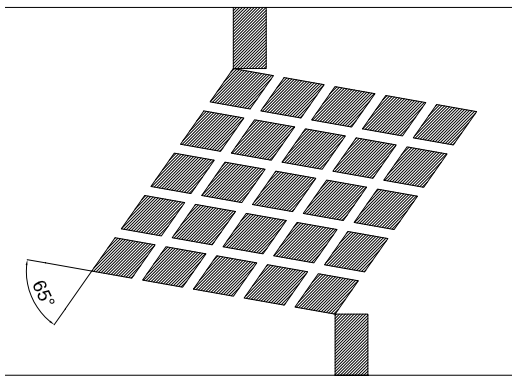


FIGURE 6.1 – Exemple de configurations de ville dont le réseau de rues n'est pas orthogonal.

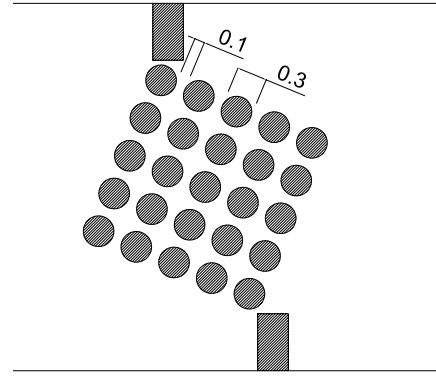


FIGURE 6.2 – Exemple de configurations de ville dont les bâtiments sont cylindriques.

Ensuite, la question de la présence des blocs d'obstruction se pose. S'ils forcent le flux à passer entièrement dans la ville sans la contourner, ce qui est nécessaire pour évaluer correctement les pertes de charge, cela biaise l'analyse des champs de vitesse. En effet, dans le cas d'une ville alignée avec l'écoulement, seules les rues horizontales peuvent présenter un écoulement puisque les rues verticales mènent à un cul-de-sac. Dans le cas d'une ville inclinée, le flux suit une trajectoire en S pour contourner les blocs d'obstruction car ils ne sont pas positionnés à la même valeur en x au sein du canal.

Enfin, l'élément récurrent dans l'analyse des courbes de hauteur d'eau est l'absence de chute d'eau à l'entrée de la ville. Pour créer un tel effet, il faudrait accentuer les pertes de charge localement à l'entrée du milieu urbain. Une façon de faire serait d'appliquer un tenseur de traînée différent aux cellules selon leur position dans la ville. Cela revient à considérer un champ de tenseurs de traînée macroscopique à appliquer sur tout le milieu urbain, comme cela a été

développé pour le paramètre de porosité.

Ces différentes suggestions vont dans le sens d'une complexification du modèle, alors que l'un des atouts du modèle à porosité est sa simplicité. Il s'agit donc de nouveau de positionner le curseur sur la droite qui relie précision d'un côté et simplicité de l'autre, comme illustré à la Figure 6.3. Il serait d'ailleurs intéressant d'évaluer l'impact d'une diminution du nombre de cellules de calcul sur la précision des résultats. Effectivement, le temps de calcul est directement lié au nombre de cellules du maillage. Ce nombre pourrait être adapté en fonction du degré de précision souhaité.

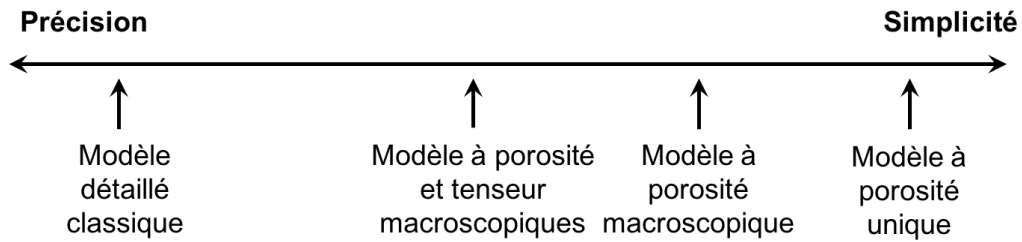


FIGURE 6.3 – Classification de différents modèles selon leur degré de précision et de simplicité.

Bibliographie

- [Bates, 2000] Bates, P. D. (2000). Development and testing of a subgrid-scale model for moving-boundary hydrodynamic problems in shallow water. *Hydrological Processes*, 14(11-12).
- [Collman, 2017] Collman, A. (2017). Two dead and dozens more rescued : Most powerful storm to hit southern california in years barrels in bringing up to 10 inches of rain and 70mph winds. <http://www.dailymail.co.uk/news/article-4233496/Southern-California-faces-powerful-storm.html>.
- [CRED, 2016] CRED (2016). Em-dat - the international disaster database. http://emdat.be/emdat_db.
- [Defina et al., 1994] Defina, A., D'alpaos, L., and Mattichio, B. (1994). A new set of equations for very shallow-water and partially dry areas suitable to 2d numerical domains. In *Proceedings of the Specialty Conference Modelling of flood propagation over initially dry areas*, Milano, Italy.
- [Guinot and Soares-Frazaio, 2006] Guinot, V. and Soares-Frazaio, S. (2006). Flux and source term discretization in two-dimensional shallow water models with porosity on unstructured grids. *International Journal of Numerical Methods in Fluids*, 50 :309–345.
- [Guinot et al., 2007] Guinot, V., Soares-Frazaio, S., Lhomme, J., and Zech, Y. (2007). Modélisation à grande échelle des inondations urbaines et modèle 2d à porosité. *La Houille Blanche*, 04 :104–110.
- [K Jha et al., 2012] K Jha, A., Bloch, R., and Lamond, J. (2012). Villes et inondations - guide de gestion intégrée du risque d'inondation en zone urbaine pour le xxie siècle. Résumé à l'intention des décideurs.
- [Lhomme, 2006] Lhomme, J. (2006). *Modélisation des inondations en milieu urbain : approches unidimensionnelle, bidimensionnelle et macroscopique*. PhD thesis, Université Montpellier 2.
- [Mason et al., 2007] Mason, D., Horritt, M., Hunter, N., and Bates, P. (2007). Use of fused airborne scanning laser altimetry and digital map data for urban flood modeling. *Hydrological Processes*, 21 :1436–1447.
- [Network, 2017] Network, L. C. (2017). Canada : les inondations forcent des évacuations en masse. <http://www.la-croix.com/Monde/Canada-inondations-forcent-evacuations-masse-2017-05-07-1300845147>.
- [Saint-Laurent, 2008] Saint-Laurent, D. (2008). Inondations en milieux urbains et périurbains. *Environnement Urbain*, 2 :2–3.
- [Soares-Frazaio, 2015] Soares-Frazaio, S. (2015). *LAUCE 2151 - Hydraulique Appliquée (Notes de cours)*. Service d'impression du Cercle industriel.
- [Soares-Frazaio et al., 2016] Soares-Frazaio, S., Velickovic, M., and Zech, Y. (2016). Steady-flow experiments in urban areas and anisotropic porosity model. *Journal of Hydraulic Research*.
- [Sutton and Cullinane, 2017] Sutton, J. and Cullinane, S. (2017). Angry public, insistent media uncloaking oroville dam repair secrecy. <http://edition.cnn.com/2017/05/08/americas/canada-floods-quebec-montreal/>.

- [Terhaar, 2017] Terhaar, J. (2017). Angry public, insistent media uncloaking oroville dam repair secrecy. <http://www.sacbee.com/opinion/opn-columns-blogs/joyce-terhaar/article151397137.html>.
- [Velickovic, 2012] Velickovic, M. (2012). *Macroscopic modeling of urban flood with a porosity model*. PhD thesis, UCL - Université de Louvain-La-Neuve.

