



HAL
open science

Étude de la capacité des modèles numériques à reproduire les caractéristiques des écoulements d'inondations urbaines pour des régimes stationnaires et transitoires

Cyril Guyot

► **To cite this version:**

Cyril Guyot. Étude de la capacité des modèles numériques à reproduire les caractéristiques des écoulements d'inondations urbaines pour des régimes stationnaires et transitoires. Sciences de l'ingénieur [physics]. 2021. dumas-03603018

HAL Id: dumas-03603018

<https://dumas.ccsd.cnrs.fr/dumas-03603018>

Submitted on 9 Mar 2022

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

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

Mémoire de fin d'études
présenté pour l'obtention du diplôme d'Ingénieur de l'ENGEEES

Etude de la capacité des modèles numériques à reproduire les caractéristiques des écoulements d'inondations urbaines pour des régimes stationnaires et transitoires

Cyril GUYOT

Maitre de stage : Guilhem DELLINGER

Tuteur école : Gilles ISENMANN

Stage réalisé entre le 18 janvier et le 16 juillet 2021

Résumé

Etude de la capacité des modèles numériques à reproduire les caractéristiques des écoulements d'inondations urbaines pour des régimes permanents et transitoires.

Lors des études des inondations, des logiciels de modélisations des écoulements à surface libre sont utilisés. Ces derniers résolvent généralement des équations en 1D (sur la longueur de l'écoulement) ou en 2D (sur un plan horizontal). Or dans des zones fortement urbanisées, les écoulements qui s'y développent sont tridimensionnels. Face à cette contradiction, cette étude s'intéresse aux performances de différents modèles numériques pour reproduire les caractéristiques des écoulements (hauteur, vitesse) en milieu urbain. Pour cela, on va réaliser une modélisation numérique du pilote inondation du laboratoire ICUBE avec trois logiciels différents : Dassflow (2D), Telemac2D et OpenFoam (3D) ; et amener une comparaison inter-logiciels à partir des données expérimentales. L'étude va se dérouler en trois parties : une étude de sensibilité afin de déterminer les paramètres optimaux pour chaque modèle, une étude en régime permanent et une étude en régime transitoire.

L'étude de sensibilité a montré que la condition aux limites aval et l'intégration d'un modèle de turbulence jouait un rôle important sur la qualité des résultats. Pour la répartition des débits, de bons résultats peuvent être obtenus avec un maillage correct. Un maillage plus raffiné est nécessaire pour obtenir de bons résultats sur les paramètres locaux (hauteurs d'eau et les vitesses).

En comparant les valeurs numériques et expérimentales, l'étude en régime permanent a montré que les résultats fournis par le modèle 3D sont meilleurs en tous points que ceux fournis par les modèles 2D. L'implémentation d'un modèle de turbulence est essentielle pour une modélisation correcte des paramètres locaux.

Seuls les débits ont été étudiés dans la partie sur le régime transitoire. Les différents codes de calcul réalisent une bonne modélisation des phénomènes transitoires, même si les faiblesses observées dans les parties précédentes sont logiquement conservées.

Abstract

Study of the ability of numerical models to reproduce the characteristics of urban flood flows for permanent and transient scenarios.

As part of flood studies, the software used for modeling flows usually solve 1D equations (on the longitudinal dimension of the flow) or 2D equations (on a horizontal plane). However, inside heavily urbanized areas, the flow that may develop during floods are known to be three-dimensional. Based on this opposition, this study focuses on the ability of different software to reproduce the characteristics of the flow (height, speed) inside heavily urbanized areas. In this purpose, a numerical modelling of the experimental flood rig of the ICUBE laboratory will be made for three software: Dassflow (2D model), Telemac2D (2D model) and OpenFoam (3D model). The objective is to do a comparison between the results from the three software and from the results from the experimental rig to understand the strengths and the limits of these models. The study is divided in three parts: a sensibility analysis which aims to identify the optimal parameters of each model, a steady-state study and finally a transient study.

The sensibility analysis reveals that the downstream boundary condition and the presence of a model of turbulence has a significant influence on the quality of the result. About the flow repartition, good results could be obtained from a correct mesh. A more refined mesh was needed to ensure better results for local parameters (height, speed).

The steady-state study led to the conclusion that the results from the 3D model are head and shoulders better than the other models. Moreover, this study underlines that the presence of a turbulence model is crucial to get a good modelling of the local parameters.

The evolution and repartition of flows were the only parameters studied in the transient section. The different models achieve a good modelling of the transient phenomena, even if the weaknesses observed in the previous sections are logically preserved.

Table des matières

Introduction.....	1
1.1. Contexte général :	1
1.2. Problématique.....	2
1.3. Objectifs et démarche	3
Bibliographie	4
1.1. Application de modèles numériques dans des études d'inondation urbaines.....	4
1.2. Comparaison de modèles numériques.....	5
1.3. Modèles expérimentaux dans le cadre de l'étude des inondations urbaines	6
1.4. Bilan.....	7
Présentation des codes de calcul	8
1.1. Codes de calcul pour le modèle 3D	8
1.2. Codes de calcul des modèles 2D	10
Construction du maillage et des conditions aux limites	11
1.1. Modèles 2D	11
1.2. Modèle 3D.....	13
Analyse de sensibilité.....	14
1.1. Analyse de sensibilité des modèles 2D.....	14
1.1.1. Analyse de sensibilité aux conditions aux limites avals	14
1.1.2. Analyse de sensibilité au maillage	18
1.1.3. Analyse de sensibilité au coefficient de friction	28
1.1.4. Analyse de sensibilité au modèle de turbulence	30
1.2. Analyse de sensibilité du modèle 3D.....	32
1.1.1. Analyse de sensibilité au maillage	32
1.1.2. Analyse de sensibilité au modèle de turbulence	37
Etude en régime permanent	42
1.1. Etude de la modélisation des débits.....	42
1.2. Etude de la modélisation des hauteurs d'eau.....	46
1.3. Etude de la modélisation des vitesses	49
1.4. Conclusion.....	51
Etude en régime transitoire	52
1.1. Etude en régime transitoire pour une consigne de type sinusoïdale.....	52
1.2. Etude en régime transitoire pour une consigne de type triangulaire	55
1.3. Conclusion.....	56
Conclusion	57
Bibliographie	59
Annexe	60

Table des figures

Figure 1 : Schéma (à gauche) et photographie (à droite) du pilote inondation de ICUBE	7
Figure 2 : Construction de la géométrie et du maillage sur GMSH	12
Figure 3 : Capture d'écran du maillage 3D du pilote	13
Figure 4: Comparaison des lois de seuil pour la sortie C	15
Figure 5 : Influence des courbes de tarage sur la répartition des débits de sortie sur Telemac2D	16
Figure 6 : Position des points de mesure de hauteurs d'eau sur le pilote	17
Figure 7 : Répartition des débits de sortie (à gauche) et évolution des hauteurs d'eau (à droite) en fonction de la courbe de tarage utilisée	18
Figure 8 : Illustration des différents maillages créé sur GMSH au niveau du carrefour C-4 (nombre de mailles de gauche à droite : 3k, 30k, 150k)	20
Figure 9 : Evolution de la répartition des débits de sortie en fonction du raffinement du maillage sur Dassflow	20
Figure 10 : Evolution de la différence des résultats par rapport au maillage le plus fin	21
Figure 11 : Evolution de la hauteur en fonction du maillage (à gauche) et évolution de la différence par rapport au maillage le plus fin (à droite) sur Dassflow	21
Figure 12: Evolution de la vitesse en fonction du maillage (à gauche) et évolution de la différence par rapport au maillage le plus fin (à droite) sur Dassflow	22
Figure 13: Evolution du profil de vitesse en fonction du maillage, réalisé sur Dassflow dans la rue 4 en aval du carrefour avec la rue F	22
Figure 14 : Evolution du temps de calcul en fonction du nombre de mailles pour Dassflow	23
Figure 15 : Evolution de la répartition des débits en fonction du raffinement au maillage sur Telemac2D	24
Figure 16 : Evolution de la différence de la répartition des débits par rapport au maillage le plus fin sur Telemac2D.....	25
Figure 17 : Evolution de la hauteur en fonction du maillage (à gauche) et évolution de la différence par rapport au maillage le plus fin (à droite) sur Telemac2D.....	25
Figure 18 : Evolution de la vitesse en fonction du maillage (à gauche) et évolution de la différence par rapport au maillage le plus fin (à droite) sur Telemac2D.....	26
Figure 19 : Evolution d'un profil de vitesse en fonction du raffinement du maillage sur Telemac2D ..	26
Figure 20 : Evolution de la durée de simulation en fonction du nombre de mailles sur Telemac2D....	27
Figure 21 : Evolution des débits relatifs en sortie en fonction de l'évolution du coefficient de Strickler sur Dassflow	28
Figure 22: Evolution des hauteurs d'eau (à gauche) et des vitesses (à droite) en fonction du coefficient de Strickler sur Dassflow.	29
Figure 23 : Répartition des débits de sortie en fonction du modèle de turbulence utilisé sur Telemac2D	30
Figure 24 : Influence du modèle de turbulence utilisé sur les vitesses sur Telemac2D, à gauche : situation avec le modèle de turbulence k-epsilon utilisé, à droite : sans modèle de turbulence	31
Figure 25 : Exemple de maillage généré avec la fonction blockMesh de OpenFoam (à gauche : 500 k mailles, à droite : 8 millions de mailles).....	33
Figure 26 : Evolution de la répartition des débits en sortie (à gauche) et de l'erreur par rapport au maillage le plus fin (à droite) en fonction du raffinement du maillage sur OpenFoam.....	34
Figure 27 : Histogramme de l'évolution des hauteurs en fonction du raffinement au maillage (à gauche) et évolution de la différence par rapport au maillage le plus fin (à droite) sur OpenFoam	35

Figure 28: Histogramme de l'évolution des vitesses en fonction du raffinement au maillage (à gauche) et évolution de la différence par rapport au maillage le plus fin (à droite) sur OpenFoam	35
Figure 29 : Evolution du profil de vitesse en fonction du maillage sur OpenFoam	36
Figure 30 : Evolution du temps de calcul total en fonction du nombre de mailles sur OpenFoam	37
Figure 31 : Répartition des débits de sortie en fonction du modèle de turbulence utilisé sur OpenFoam	38
Figure 32 : Evolution des hauteurs d'eau le long de la rue 4 en fonction du modèle de turbulence sur OpenFoam	39
Figure 33 : Influence du modèle de turbulence utilisé sur les vitesses sur OpenFoam, à gauche : situation avec le modèle de turbulence RAS - komegaSST utilisé, à droite : sans modèle de turbulence	39
Figure 34 : Comparaison des profils de vitesse avec et sans modèle de turbulence sur OpenFoam dans la rue 4 en aval du carrefour C-4	40
Figure 35 : Comparaison de la répartition des débits de sortie entre les différents modèles et les valeurs expérimentales.....	42
Figure 36 : Placement des sections de mesure de débits	43
Figure 37 : Cartographie de la répartition des débits et des erreurs relatives par rapport aux valeurs expérimentales en fonction du logiciel utilisé.....	44
Figure 38: Evolution de la charge spécifique et de la hauteur d'eau modélisée sur Dassflow le long de la rue 4	47
Figure 39 : Evolution de la hauteur d'eau le long de la rue 4 en fonction du modèle numérique.....	47
Figure 40 : Comparaison de l'évolution de la surface libre dans la rue C entre les données expérimentales et numériques	48
Figure 41 : Cartographie de profils de vitesse modélisés par différents logiciels dans la rue C en aval du carrefour C-4	49
Figure 42 : Cartographie de profils de vitesse modélisés par différents logiciels dans la rue 4 en aval du carrefour C-4	50
Figure 43 : comparaison des vitesses horizontales expérimentales et numériques en aval du carrefour C-4 dans la rue C.....	51
Figure 44 : Hydrogramme utilisé pour l'étude en régime transitoire pour les rues C et 1	52
Figure 45 : Hydrogramme en sortie de rue C entre 280 et 400 secondes	53
Figure 46 : Hydrogramme d'entrée appliqué à la rue C.....	55
Figure 47 : Comparaison de l'évolution du débit de sortie dans la rue 4 en fonction du code de calcul utilisé.....	55

Table des tableaux

Tableau 1 : Conditions aux limites utilisées sur Dassflow et Telemac2D.....	12
Tableau 2 : Caractéristiques des différents maillages testés pour l'analyse de sensibilité au maillage sur Dassflow.....	19
Tableau 3 : Vitesse moyenne sur une section en fonction du maillage dont le profil de vitesse est issu (Dassflow).....	23
Tableau 4 : Vitesse moyenne sur une section en fonction du maillage dont le profil de vitesse est issu (Telemac2D).....	27
Tableau 5 : Caractéristique des différentes mailles du maillage créé pour le modèle 3D.....	33
Tableau 6 : Evolution des vitesses moyennes du profil de vitesse sur la rue 4 en aval du carrefour avec la rue C sur OpenFoam.....	36
Tableau 7 : Comparaison des écarts moyens et maximums pour la répartition des débits de sortie entre les différents modèles et les valeurs expérimentales.....	43
Tableau 8 : Différence des débits de sortie modélisés par rapport aux valeurs expérimentales.....	43
Tableau 9 : Somme des erreurs relatives entre les débits modélisés et les débits expérimentaux sur l'intégralité des rues modélisées.....	45
Tableau 10 : Valeurs moyenne et maximale de perte pour les bilans de masse sur un carrefour en fonction du modèle utilisé.....	45
Tableau 11 : Volume sortant pour une période de sinusoïde.....	54

Introduction

1.1. Contexte général :

Dans le domaine des catastrophes naturelles, le risque est défini comme le produit d'un aléa et d'un enjeu. L'aléa est le phénomène qui est susceptible de causer des dégâts comme par exemple un séisme, une tornade ou un glissement de terrain. L'enjeu est constitué des éléments ou personnes qui pourraient subir des dommages. Dans le cas de notre sujet d'étude, à savoir les inondations, l'aléa est l'inondation elle-même dont la définition est "une submersion temporaire, par l'eau, de terres qui ne sont pas submergées en temps normal, quelle qu'en soit l'origine"¹. Avec son régime climatique varié et sa morphologie unique, le territoire français est soumis à plusieurs types d'inondations, par exemple les inondations par débordement de cours d'eau, les inondations par remontée de nappe, les inondations par crue torrentielle ou encore les inondations par submersion marine.

Au cours de l'histoire, les villes se sont développées près des points d'eau et cela pour des raisons logistiques (accès à l'eau potable, assainissement, transport). Aujourd'hui, une grande part de la population vit encore dans ces zones et est donc exposée aux risques d'inondations. En effet d'après le site ecologie.gouv.fr, en France 17,1 millions d'habitants permanents seraient exposés aux différentes conséquences par débordement de cours d'eau. Le risque inondation est d'ailleurs considéré comme le premier risque naturel en termes de dommages causés : les inondations représentent 55% des 21 milliards d'euro d'indemnisations versées entre 1982 et 2019 par le fond CATNAT, plus qu'aucune autre catastrophe naturelle sur cette période².

Dans le cas des inondations urbaines, un certain nombre de facteurs ont fait accroître le risque depuis plusieurs décennies : avec l'exode rural, de plus en plus de personnes vivent en ville, et cela augmente la vulnérabilité car il faut protéger ces personnes et leurs biens. De plus, cette croissance de la population a comme conséquence l'augmentation de la surface occupée par des zones imperméables, accentuant les conditions favorables aux inondations. Un autre facteur qui a participé à l'augmentation du risque est le changement climatique. En effet, on observe depuis plusieurs années une augmentation de la fréquence et de l'intensité des précipitations³, et cela participe globalement à la création de crues et d'inondations plus sévères, même si ces phénomènes dépendent d'autres facteurs (gestion et entretien des cours d'eau, mesures de protection, ...). Les inondations sont des phénomènes naturels impossibles à arrêter. Néanmoins, il est possible de limiter leurs conséquences en mettant en place des systèmes de prévision et de protection. Pour mettre en place ces mesures, il est nécessaire de comprendre au mieux les phénomènes physiques qui régissent les écoulements d'inondation.

Des Plans de Prévention des Risques (PPR) sont mis en place avec comme objectif la prévention contre les risques naturels majeurs, et dans le cas des inondations, on parle de PPR Inondation (PPRI). Ce type de document a pour but de délimiter les zones inondables afin de limiter la vulnérabilité des biens et des personnes. Pour ce faire, des cartes de zones à enjeux et de zones inondables sont réalisées. Cette dernière est obtenue à partir de logiciels de modélisation d'écoulements à surface libre avec comme

¹ D'après le site du gouvernement, 2021, <https://www.gouvernement.fr/risques/inondation>

² Chiffres issus de la caisse centrale de réassurance, 2021, <https://catastrophes-naturelles.ccr.fr>

³ D'après le rapport du sénat sur la gestion des risques climatiques et l'évolution de nos régimes d'indemnisation, 2021, <https://www.senat.fr/rap/r18-628/r18-6282.html>

événement considéré une crue de période de retour au moins centennale. Les logiciels de modélisations généralement utilisés résolvent les équations de Barré de Saint Venant en 1D (seulement sur la longueur de l'écoulement) ou 2D (sur un plan horizontal) en fonction des écoulements concernés et de la géomorphologie.

Toute modélisation numérique nécessite une étape de validation afin de s'assurer que les résultats numériques représentent fidèlement la réalité. Toutefois les données de terrains pour les événements exceptionnels (sur lesquels on se base pour la phase de validation) ne sont pas souvent disponibles. En effet une instrumentation de qualité demande beaucoup de moyens pour peu de résultats (dans le sens où l'instrumentation doit couvrir un maximum d'endroits intéressant et doit comporter une fréquence d'échantillonnage assez faible bien que les événements extrêmes surviennent rarement). Pour pallier ce problème, des dispositifs expérimentaux ont été mis en place. En effet, ces derniers permettent de fournir des jeux importants de résultats expérimentaux pour des conditions hydrauliques et géométriques variées. Ces jeux de données permettent, par la suite, de valider ou non différents modèles numériques. C'est dans cette optique que le pilote inondation du laboratoire ICUBE a été conçu : simuler les inondations extrêmes en milieu urbain grâce à un assemblage de 64 îlots représentant un quartier type européen.

1.2. Problématique

Les logiciels de modélisations utilisés lors des PPRI ont été créés pour la modélisation des écoulements de cours d'eau (majoritairement unidirectionnels), toutefois on sait que dans des zones fortement urbanisées, de nombreux paramètres peuvent venir influencer les écoulements et les rendre tridimensionnels, et ainsi remettre en question leur modélisation avec des modèles 1D ou 2D. Comme paramètre pouvant entraver la bonne modélisation, on peut citer par exemple les échanges avec les réseaux d'eaux usées, l'infiltration dans les bâtiments ou encore les réseaux de carrefour. C'est ce dernier point qui va pouvoir être étudié sur le pilote inondation de ICUBE, grâce auquel il est possible d'avoir accès à des données expérimentales concernant un réseau de carrefours.

Les écoulements présents dans les carrefours mettent en jeu des phénomènes hydrauliques complexes : la répartition des débits et les zones de recirculation sont par exemple des paramètres complexes à modéliser. Bien que les comportements hydrauliques d'un seul carrefour soient maintenant plutôt bien documentés grâce à diverses études numériques et expérimentales, le comportement hydraulique d'un réseau de carrefours possède encore plusieurs zones d'ombre à explorer. La difficulté réside notamment sur l'interconnexion de ces carrefours : les caractéristiques de l'écoulement d'un carrefour peuvent avoir une influence sur les caractéristiques des autres carrefours. Dans ce cas, si la modélisation est erronée il est possible que cette erreur se propage sur l'ensemble de la modélisation. De ce fait, une mauvaise modélisation pourrait par exemple amener des erreurs importantes dans les PPRI, et potentiellement sous-estimer des risques et mettre en danger la population. Le but de cette étude sera de s'intéresser aux performances des différents modèles numériques, possédant chacun leurs particularités, pour la reproduction des caractéristiques des écoulements (hauteurs et vitesses) en milieu urbain.

1.3. Objectifs et démarche

Notre étude sur la capacité des modèles numériques à reproduire les caractéristiques des écoulements d'inondations urbaines va s'articuler en plusieurs parties :

En premier lieu, une étude bibliographique va permettre d'avoir un point de vue global sur les travaux qui ont été réalisés en matière de modélisation d'écoulements urbains, de comparaison de codes de calcul et de maquettes expérimentales.

Dans une seconde partie, les codes de calcul considérés dans cette étude seront présentés.

La troisième partie sera consacrée à la construction des modèles numériques, à savoir la création des maillages et l'imposition des conditions aux limites sur les différents logiciels utilisés.

Une étude de sensibilité sera réalisée pour différents paramètres afin de déterminer l'influence de chacun et d'en déterminer les conditions optimales pour le reste de l'étude.

La cinquième partie sera consacrée à une étude en régime permanent. Une comparaison entre les résultats numériques et résultats expérimentaux sera établie afin de déterminer les points forts et les faiblesses de chaque logiciel.

La dernière partie portera sur la modélisation de phénomènes transitoires. L'objectif est là aussi de comparer les résultats numériques et expérimentaux afin d'apporter un constat sur les performances de chaque logiciel.

Bibliographie

A travers cette bibliographie, divers thèmes vont être explorés afin de fournir un contexte sur les travaux qui ont déjà été réalisés et d'en tirer des connaissances qui seront utiles pour cette étude. Trois grands thèmes vont être explorés : l'utilisation de modèles numériques dans le cadre d'études sur les inondations urbaines, la comparaison de modèles numériques d'écoulement à surface libre, et enfin l'utilisation de modèles expérimentaux dans le cadre d'études sur les inondations.

1.1. Application de modèles numériques dans des études d'inondation urbaines

Dans cette partie, on s'intéressera à des études d'ingénierie portant sur le thème des inondations urbaines. Le but en étudiant ces études, est d'avoir un premier aperçu de l'utilisation des logiciels de modélisation pour une étude d'ingénierie concrète, de découvrir quelles sont les bonnes et mauvaises pratiques et quels sont les objectifs de ces modélisations afin de mieux cibler les paramètres d'intérêts à modéliser. Pour cela, on va s'intéresser à cinq cas d'étude, quatre issus du livre suivant '*Traité d'hydraulique environnementale : Application des modèles numériques en ingénierie* (Tanguy 2009)', et le dernier issu de l'étude '*Modelling floods in a dense urban area using 2D shallow water equation* (E. Mignot 2006)'. On va dans un premier temps présenter sommairement les différents cas.

Toutes les études ont pour but de modéliser un évènement catastrophique à partir d'un évènement réellement survenu ou bien un scénario fictif, dans le but d'anticiper les conséquences probables et de prévoir des moyens de protection. Sur les cinq études, des inondations d'origines diverses sont étudiées. On compte une inondation par débordement de cours d'eau dans la ville de Carcassonne, deux cas suite à une rupture de digue (à Lyon et à Amboise) et enfin deux cas dû au ruissellement de pluies extrêmes (ville de Nîmes et de Marseille). Ces études ont été réalisées par différents acteurs : des bureaux d'études, des laboratoires scientifiques ou encore service déconcentré de l'Etat français.

A travers ces différentes études, voici les conseils retenus qui nous seront utiles pour la modélisation du pilote inondation :

- Code de calcul : les codes de calculs utilisés dans ces études sont Telemac2D et REFLUX2D, deux codes de calcul résolvant les équations de Barré de Saint Venant dans le plan horizontal. Toutefois, pour l'étude portant sur le bassin versant du port de Marseille, la piste de logiciel de modélisation en 1D a été explorée mais abandonnée, en effet les lois de répartition des débits dans les carrefours ne fournissaient pas des résultats assez justes. Pour la même étude, une modélisation avec un modèle 1D couplée à un modèle 2D a été explorée, mais abandonnée aussi car ce mode de fonctionnement se révélait plus contraignant qu'un modèle 2D : un nombre de maille plus élevé et un pas de temps qui devait être plus faible conduisait à des temps de calcul plus élevés. A partir de ces résultats, on décide de modéliser les écoulements de type inondation urbaines avec au minimum un code de calcul 2D.
- Modélisation de la condition aux limites amont : les études portant sur des phénomènes de ruptures de digues ne nous apportent rien pour la modélisation du pilote inondation. Les deux études où des précipitations extrêmes sont à l'origine des inondations fournissent en entrée des hydrogrammes et non pas des pluviogrammes, car le modèle n'était pas prévu pour effectuer cette tâche. Des incertitudes existent lors du passage de l'un à l'autre, c'est pourquoi

au cours des deux études, une analyse de sensibilité a été menée afin de constater l'influence de la condition aux limites amonts. Les résultats obtenus montrent que le modèle est sensible aux conditions aux limites amonts : si les pics des hydrogrammes varient légèrement, les hauteurs d'eau varieront légèrement aussi, de même si les pics varient fortement, les hauteurs d'eau observées varieront fortement.

- Modélisation de la condition aux limites aval : seule l'étude issue de *Mignot et al, 2006* s'intéresse réellement à l'influence de la condition aux limites aval. Plusieurs conditions ont été testées : imposition d'écoulement critique, sortie libre, prise en compte de l'influence de zones aval à l'étude. Les résultats montrent que la modification de ces conditions à une grande influence sur les paramètres hydrauliques proches de ces zones aval mais aussi parfois plus en amont dans la zone d'étude.
- Maillage : Les différentes études montrent que le raffinement du maillage a une influence sur la qualité des résultats mais aussi sur le temps de calcul. Des différences concernent aussi bien les hauteurs d'eau maximales observées que la distribution des débits. A travers les différentes études on retiendra qu'il est nécessaire de placer au moins 4 mailles dans la largeur des rues pour une bonne modélisation des phénomènes hydrauliques.
- Coefficient de rugosité : seule l'étude issue de *Mignot et al, 2006* s'intéresse réellement à l'influence du coefficient de rugosité. Les résultats montrent que la variation du coefficient de viscosité a très peu d'influence sur les résultats. A l'opposé le coefficient de friction a une grande influence, sa variation entraîne des changements pour les hauteurs d'eau maximales atteintes, pour la distribution des débits et même parfois le régime d'écoulement. Ce paramètre devrait être calé en fonction des zones car il n'a pas la même influence sur les petites et grandes rues.

Les différents points abordés dans ces études nous fournissent une idée assez précise de comment calibrer les paramètres des codes de calcul 2D afin de modéliser correctement les phénomènes hydrauliques dans le pilote inondation.

1.2. Comparaison de modèles numériques

Cette partie s'intéresse à la méthodologie employée pour établir une comparaison de modèles numériques dans le cadre de l'étude des inondations urbaine. L'article scientifique suivant a servi de base pour cette partie : *Étude comparative de modèles numériques 2D pour la modélisation des inondations urbaines* (Hunter et al. 2008).

Cette étude a pour but de comparer les performances de six modèles numériques d'écoulement à surface libre à reproduire une inondation qui a eu lieu à Glasgow (Écosse) le 30 juillet 2002. La zone considérée couvre une surface d'environ 1 km² et se trouve dans un quartier hyper urbain de la ville de Glasgow. La topologie du site d'étude n'a pas été choisie au hasard, lors de l'inondation divers phénomènes hydrauliques vont s'y dérouler : fortes pentes et possiblement écoulement torrentiel, zones de dépression qui vont permettre le stockage de l'eau. Cela constitue une bonne épreuve pour la comparaison des performances des modèles numériques.

L'étude se déroule en deux parties. Dans un premier temps, une comparaison des résultats entre les différents modèles a été établie en fournissant pour chaque modèle les mêmes paramètres géométriques et numériques. Puis dans un second temps, une étude de sensibilité a été menée pour déterminer si les différences obtenues dans la partie précédente peuvent être corrigées ou non, tout en gardant des paramètres cohérents avec les valeurs physiques.

Parmi les six codes de calculs utilisés, les différences qui les séparent portent sur de nombreux paramètres, dont notamment les équations résolues, la modélisation de la turbulence, le solveur utilisé, le contrôle du pas de temps.

La comparaison des modèles s'est basée sur l'étude de l'évolution de la hauteur d'eau en certains points caractéristiques (dont notamment une zone de stockage d'eau, une zone d'écoulement torrentiel et une zone de convergence de deux rues) ainsi que sur la zone maximale d'étendue d'eau. Le temps de propagation du pic de crue ainsi que l'apparition d'instabilités locales ont aussi été étudiés. L'étude ne s'est pas intéressée à la comparaison des vitesses.

Après calage, bien que tous les modèles aient fourni des résultats cohérents, les auteurs observent de légères différences entre les différents modèles. Ces différences ont tendance à être similaires pour les modèles partageant des points communs avec leurs particularités numériques. Toutefois ces différences inter-modèles sont négligeables en comparaison aux erreurs obtenues en fournissant des données topographiques grossières. Si aujourd'hui la qualité des données topographiques s'est bien améliorée (et particulièrement en ville) ce n'est globalement pas le cas des données sur les inondations utiles au calage des modèles, d'où l'utilité des modèles expérimentaux que nous allons présenter dans la partie suivante.

1.3. Modèles expérimentaux dans le cadre de l'étude des inondations urbaines

Cette partie est consacrée aux maquettes expérimentales destinées à l'étude des inondations urbaines. Même si le domaine d'étude des inondations urbaines peut être considéré un domaine très spécifique, la diversité des maquettes existantes témoigne de leur nécessité pour l'étude des phénomènes hydrauliques, des reviews présentent d'ailleurs une partie des maquettes existantes (Emmanuel Mignot, Li, et Dewals 2019). Chaque maquette est rendue unique par de nombreux éléments qui la constituent : la géométrie des canaux d'écoulements, et donc les phénomènes hydrauliques qui s'y développent, par la prise en compte ou non des échanges avec les égouts ou bâtiments, par la gestion des conditions aux limites, mais aussi par l'instrumentation et les paramètres hydrauliques d'intérêts pour l'étude.

Comme on l'a vu précédemment dans l'étude menée pour les villes de Marseille et Nîmes, la gestion de la condition aux limites d'entrée a été faite par une injection de débit car la modélisation de la pluviométrie était encore limitée. L'auteur constate que cette condition aux limites d'entrée avait une forte influence sur les résultats. Dans une étude coréenne, (Seong, Rhee, et Park 2020), les chercheurs utilisent une maquette recréant directement la pluie. La maquette utilisée représente un quartier de Seoul (Corée du Sud), la particularité est que cette maquette permet de reproduire la pluviométrie grâce à un système de buse. Cette maquette a permis de recréer avec précisions des inondations survenues dans le quartier, d'identifier à partir de quel événement de réels dangers apparaissent et d'identifier les zones à risques avec la perspective de réaliser des aménagements dans le futur.

Les maquettes peuvent représenter des lieux réels où se sont déroulés des inondations ou bien des endroits imaginaires pensés spécialement pour la mise en place de certains phénomènes hydrauliques. De nombreuses maquettes créées à partir de quartiers idéalisés ont notamment vu le jour durant la dernière décennie. La maquette qui est au centre de notre étude est le pilote inondation du laboratoire ICUBE. Elle a été créée il y a une dizaine d'année pour étudier les inondations urbaines. Le pilote inondation est une maquette à l'échelle 1/200 qui représente un quartier urbain fictif de 1 km². Ce dernier est composé de 64 îlots formés à partir du croisement de sept rues orientées selon la direction

Nord-Sud et de sept rues orientées selon l'axe Ouest-Est. Ces rues de différentes largeurs et orientations forment un réseau de carrefour, la figure ci-dessous représente la maquette. Au sein de cette maquette, l'instrumentation mise en place rend possible la mesure de hauteur d'eau, de profils de vitesse et des débits en sortie de rue.

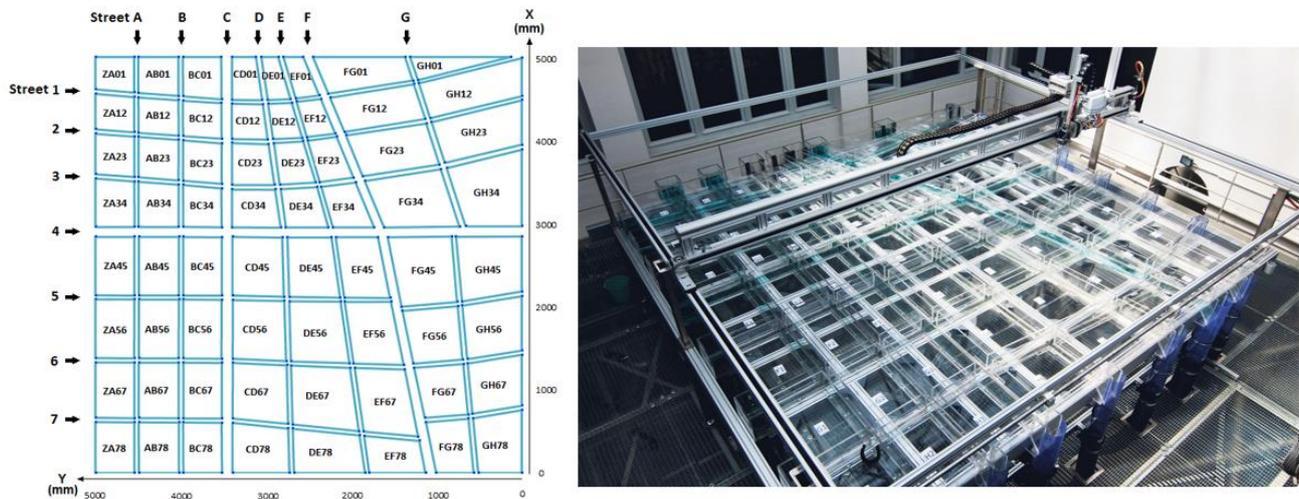


Figure 1 : Schéma (à gauche) et photographie (à droite) du pilote inondation de ICUBE

Depuis sa création, de nombreuses études ont été réalisées à partir de ce pilote, plusieurs études se sont intéressées au fonctionnement hydraulique du pilote inondation, et ont permis de mettre en avant les phénomènes suivants : dans une configuration d'injection des débits dites « classique » (c'est-à-dire où le débit est réparti à 50% entre les faces Nord et Ouest, puis pour chaque rue de ces faces au prorata de la largeur), les hauteurs d'eau sont réparties selon un gradient Nord-Ouest vers Sud-Est (Finaud-Guyot et al. 2018). Concernant la répartition des débits, le réseau de carrefour est très complexe, la seule connaissance de la géométrie ne permet pas de prédire les résultats des débits en sortie. Toutefois certains phénomènes sont observés pour chaque expérience : pour des débits d'entrées entre 20 et 100 m³/h, la répartition des débits de sortie est quasi-identique si la configuration en entrée est la même. Autre phénomène, ce sont les rues les plus larges qui drainent le plus de débits, la face Sud va drainer environ 60% des débits et la face Est seulement 40%, il semble y avoir une relation entre la largeur des rues et les débits en sortie (Araud et al. 2012), (Finaud-Guyot et al. 2019). Les profils de vitesse observés sont plutôt plats pour les rues étroites tandis que pour les larges rues ils sont asymétriques. Cela vient des zones de recirculations qui se développent en aval des carrefours qui sont bien plus volumineuses pour les grands axes.

1.4. Bilan

Cette étude bibliographique a permis d'avoir un premier aperçu de l'utilisation des codes de calcul 2D dans le cadre d'études concernant les inondations urbaines. Ces études ont amené des conseils à suivre pour la suite de notre travail pour une bonne modélisation des phénomènes. La deuxième partie concernait la mise en place d'une comparaison entre différents logiciels pour une étude des performances des différents codes de calcul. Et enfin, la dernière partie s'intéressait aux différentes maquettes existantes mais surtout au pilote inondation du laboratoire ICUBE, qui est au cœur de notre étude, ce travail nous a permis d'avoir une première idée du fonctionnement hydraulique de cette maquette à partir des différents articles scientifiques et travaux réalisés.

Présentation des codes de calcul

L'objectif de cette partie est de présenter les codes de calcul utilisés dans cette étude à savoir Dassflow, Telemac2D et OpenFoam. Ces trois modèles numériques permettent de modéliser les écoulements à surface libre, toutefois la méthode de modélisation utilisée par chacun est unique, et c'est ce qui va être présenté dans cette partie. Parmi les trois codes de calcul cités plus haut, deux sont des modèles 2D, ils modélisent les écoulements seulement sur le plan horizontal tandis que le modèle 3D modélise les écoulements dans les trois dimensions comme son nom l'indique.

Avant d'exposer les équations résolues derrière ces codes de calcul, présentons le contexte et les créateurs de ces logiciels.

- Dassflow qui tire son nom de 'Data Assimilation for Free Surface Flows', est un logiciel développé par un groupe constitué de plusieurs acteurs : le groupe INSA, l'Université de Toulouse, le CNES et le CS corp. Plusieurs versions existent : 1D, 2D, et même 3D. La version utilisée dans cette étude est Dassflow-2DShallow. Cette version résout les équations de Barré de Saint-Venant avec le schéma numérique des Volumes Finis. Les noyaux de calculs ont été écrits en Fortran90 (Couderc et al. 2013).
- Telemac2D est un logiciel faisant partie de la suite de code de calcul développé par TELEMAC-MASCARET. Le code de calcul de Telemac2D résout lui aussi les équations de Barré de Saint-Venant, avec cette fois la liberté de choisir le schéma numérique utilisé (EDF - DRD 2010).
- OpenFoam est un code de calcul multi-physique distribué par OpenCFD principalement utilisé pour les cas de mécanique des fluides. Son domaine d'utilisation est très large, dans notre cas nous utiliserons le solveur 'interFoam' qui permet la résolution des équations de Navier Stokes pour des écoulements multiphasiques avec un schéma numérique des Volumes Finis.

Les logiciels utilisés dans cette étude sont des logiciels libres, ils présentent donc l'avantage d'être gratuit ainsi que la possibilité d'effectuer librement des modifications du code source. Outre le fait qu'ils soient libres, un des autres avantages que partagent ces logiciels est que pour chacun il est possible de réaliser les calculs en parallèle, réduisant ainsi le temps de calcul en fonction de la puissance numérique mobilisée. L'inconvénient majeur de ces logiciels est le manque d'interface : la définition des paramètres se fait au sein de fichiers textes et l'interaction pour le lancement des calculs se déroule dans un terminal de commande.

Intéressons-nous dans un premier temps aux codes de calcul du modèle 3D.

1.1. Codes de calcul pour le modèle 3D

Comme mentionné ci-dessus, dans cette étude nous allons utiliser le solveur 'interFoam'. Il résout les équations de Navier Stokes pour deux fluides incompressibles isothermes et non miscibles. Son algorithme de résolution est basé sur la méthode 'volume of fluid' (VOF) avec laquelle il est possible de déterminer la fraction volumique relative de l'ensemble biphasique. Les deux fluides considérés dans notre cas sont l'air et l'eau. Que ce soit pour les modèles 2D ou 3D, les équations de Navier Stokes forment la base d'une grande partie des codes de calculs pour la modélisation des écoulements. Elles sont issues de la loi de conservation de la masse (équation 1) et de la loi de conservation de la quantité de mouvement (équations 2, 3 et 4) que l'on retrouve à la suite.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \text{div}(\rho \vec{u}) = 0 \quad (\text{équation 1})$$

$$\frac{\partial \rho u}{\partial t} + \text{div}(\rho u \vec{u}) = \frac{\partial p}{\partial x} + \text{div}(\overline{\mu \text{grad}}(u)) \quad (\text{équation 2})$$

$$\frac{\partial \rho v}{\partial t} + \text{div}(\rho v \vec{u}) = \frac{\partial p}{\partial y} + \text{div}(\overline{\mu \text{grad}}(v)) \quad (\text{équation 3})$$

$$\frac{\partial \rho w}{\partial t} + \text{div}(\rho w \vec{u}) = \frac{\partial p}{\partial z} + \text{div}(\overline{\mu \text{grad}}(w)) + g \quad (\text{équation 4})$$

Avec :

ρ la masse volumique du fluide

μ la viscosité dynamique du fluide

$\vec{u} = (u, v, w)$ le vecteur vitesse

p la pression

g l'accélération de la pesanteur

En plus des équations de Navier Stokes, le modèle *Volume of Fluid* (VOF) permet de gérer le caractère multiphasique de notre écoulement. Pour cela un nouveau paramètre est introduit : la fraction volumique en eau notée α . L'équation sur laquelle on se base est la suivante :

$$\frac{\partial \alpha}{\partial t} + \text{div}(\alpha \vec{u}) = 0 \quad (\text{équation 5})$$

Les propriétés du fluide multiphasique sont calculées en pondérant les propriétés de chaque phase par leur fraction volumique. Ce qui donne :

$$\rho = \alpha \rho_1 + (1 - \alpha) \rho_2 \quad (\text{équation 6})$$

$$\mu = \alpha \mu_1 + (1 - \alpha) \mu_2 \quad (\text{équation 7})$$

La surface libre est définie par l'iso-surface où $\alpha = 0,5$

En complément des équations qui régissent les écoulements présentés ci-dessus, le modèle de turbulence dénommé k-omega SST ('Shear Stress Transport') a été utilisé. Il permet de combiner les modèles de turbulence k-epsilon et k-omega en conservant les avantages de chacun. Voici ci-dessous les équations régissant ce modèle de turbulence.

$$\frac{D}{DT}(\rho \omega) = \nabla \cdot (\rho D_\omega \nabla \omega) + \frac{\rho \gamma G}{\nu} - \frac{2}{3} \rho \gamma \omega (\nabla \cdot u) - \rho \beta \omega^2 - \rho (F_1 - 1) C D_{k\omega} + s_\omega \quad (\text{équation 8})$$

$$\frac{D}{DT}(\rho k) = \nabla \cdot (\rho D_k \nabla k) + \rho G - \frac{2}{3} \rho k (\nabla \cdot u) - \rho \beta^* \omega k + s_k \quad (\text{équation 9})$$

$$\nu_t = \frac{a_1 k}{\max(a_1 \omega, b_1 F_{23} S)} \quad (\text{équation 10})$$

Avec :

ρ la masse volumique du fluide

ω le taux spécifique de dissipation de la turbulence

ν_t la viscosité turbulente

k l'énergie cinétique turbulente

D_i la diffusivité effective pour le paramètre i

S_i le terme source interne pour le paramètre i

ν la viscosité cinématique du fluide

G le taux de production d'énergie cinétique turbulente dû à la partie anisotrope du tenseur de

contrainte de Reynolds

F_1, β, γ et C sont des coefficients du modèle

Pour une turbulence isotrope, l'énergie cinétique de la turbulence k et le taux spécifique de dissipation de la turbulence ω peuvent être estimés par les formules ci-dessous :

$$k = \frac{3}{2} (I|u_r|)^2 \quad (\text{équation 11})$$

$$\omega = \frac{k^{0.5}}{C_\mu^{0.25} L} \quad (\text{équation 12})$$

Avec :

I l'intensité

u_r la vitesse de référence

L l'échelle de longueur de référence

C_μ une constante du modèle

1.2. Codes de calcul des modèles 2D

Les équations résolues par les modèles 2D de notre étude sont les équations de Barré de Saint-Venant (équations 13, 14 et 15). Elles sont obtenues par intégration dans la dimension verticale des équations de Navier Stokes présentées précédemment, toutefois pour la simplification de ces équations, plusieurs hypothèses ont été réalisées :

- L'eau est un fluide incompressible.
- La répartition des pressions est hydrostatique ce qui équivaut à négliger les vitesses verticales devant l'effet de la gravité. C'est cette hypothèse qui permet de réaliser l'intégration des équations de Navier Stokes sur la dimension verticale.
- L'écoulement est en régime turbulent.
- Les effets du vent et les effets de Coriolis sont négligés.

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial q}{\partial x} + \frac{\partial r}{\partial y} = 0 \quad (\text{équation 13})$$

$$\frac{\partial q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{q^2}{h} + \frac{1}{2} g h^2 \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{qr}{h} \right) = gh(S_{0,x} - S_{f,x}) \quad (\text{équation 14})$$

$$\frac{\partial r}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{qr}{h} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{r^2}{h} + \frac{1}{2} g h^2 \right) = gh(S_{0,y} - S_{f,y}) \quad (\text{équation 15})$$

Avec : q le débit unitaire selon la direction Ox ; $q = h \cdot u$

r le débit unitaire dans la direction Oy ; $r = h \cdot v$

h la hauteur d'eau

(u, v) les composantes de la vitesse dans les directions Ox et Oy

g l'accélération de la pesanteur.

Les termes $S_{0,x}$ et $S_{0,y}$ correspondent aux pentes du fond dans les directions Ox et Oy et les termes $S_{f,x}$ et $S_{f,y}$ les pentes des frottements dans les directions Ox et Oy .

Maintenant que les codes de calculs ont été présentés, on va s'intéresser à la construction du maillage et des conditions aux limites.

Construction du maillage et des conditions aux limites

Après avoir présenté les différents codes de calcul utilisés dans cette étude, il est temps de s'intéresser à la construction du maillage et des conditions aux limites. Ces étapes sont cruciales car elles constituent la base d'une simulation numérique. En effet un bon maillage et une bonne gestion des conditions aux limites sont essentiels pour obtenir la modélisation correcte des phénomènes hydrauliques.

Chaque logiciel de modélisation utilise des formats particuliers pour les fichiers d'entrées (géométrie, maillage, condition aux limites), pour cette étude il a fallu utiliser trois programmes différents pour générer ces fichiers d'entrées. Ci-dessous une courte présentation des programmes utilisés :

- GMSH : le maillage utilisé pour la modélisation numérique sur Dassflow a été créé avec le logiciel GMSH, un logiciel libre développé par C. Geuzaine et J-F. Remacle. Il est utilisé pour générer des maillages par éléments finis en 2D et 3D, les formats de sortie sont compatibles avec divers logiciels de CFD (Dassflow, OpenFoam et Matlab CFD par exemple). Selon les besoins, il est possible de générer des maillages structurés ou non structurés avec GMSH. Ce logiciel fonctionne par interface ou par ligne de code.
- Blue Kenue : le maillage utilisé pour la modélisation numérique sur Telemac2D a été créé avec le logiciel Blue Kenue, un logiciel libre développé par le conseil national de recherche du Canada. Il est utilisé pour générer des maillages structurés ou non structurés en 2D et 3D pour divers logiciels de CFD (dont Telemac2D, ADCIRC ou encore HydroSim). Il fonctionne par interface. Ce logiciel a aussi été utilisé pour la définition des conditions aux limites.
- OpenFoam : le maillage a été créé à l'aide de programmes internes du logiciel, à savoir blockMesh et snappyHexMesh. Ces deux programmes ne disposent pas d'interface. Ils sont utilisés pour générer des maillages structurés en 3D.

Dû aux similitudes existantes dans la méthodologie de construction des maillages entre les modèles 2D, on séparera ce chapitre en deux parties : dans un premier temps la construction du maillage et des conditions aux limites pour les modèles 2D, et ensuite pour le modèle 3D.

1.1. Modèles 2D

La première étape pour la construction du maillage est la construction de la géométrie. Pour un modèle 2D, seul le plan horizontal est nécessaire. La géométrie du pilote a été construite en définissant chaque point se situant sur une extrémité ou un carrefour, puis en reliant ces points de telle sorte à former les contours du pilote. Une fois la géométrie créée, il est possible de générer le maillage. Il faut dans un premier temps choisir le type de maillage (non structuré dans notre cas), puis la principale caractéristique à définir est la taille des mailles (qui conditionnera le nombre de mailles). La figure ci-dessous illustre les différentes étapes de la création du maillage sur GMSH.

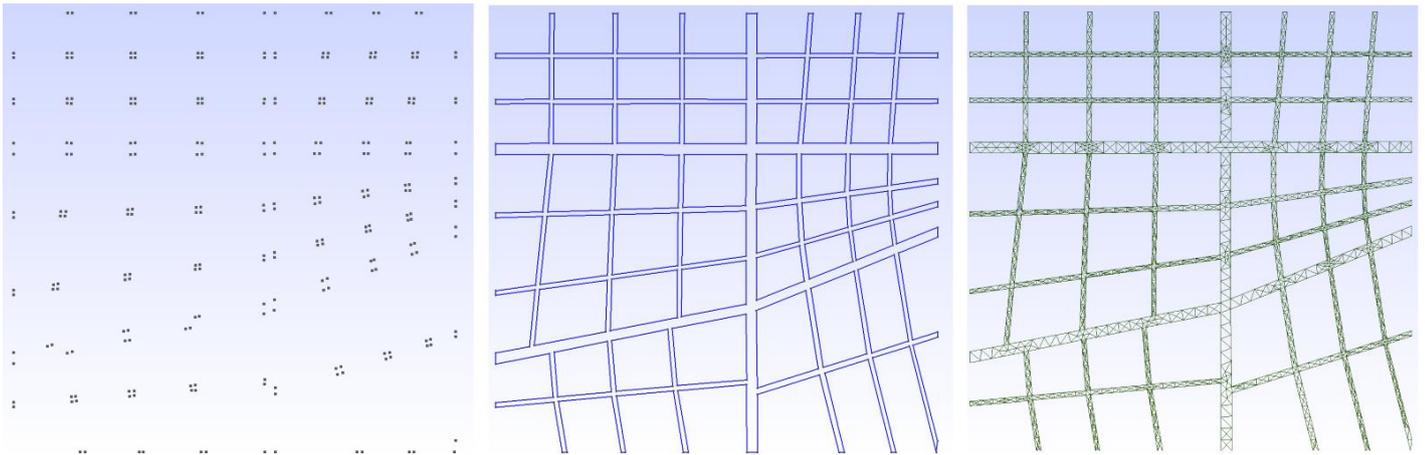


Figure 2 : Construction de la géométrie et du maillage sur GMSH

L'étape suivante est la définition des conditions aux limites. Il faut dans un premier temps définir quels segments auront une condition aux limites particulière et ensuite spécifier le type de condition. Cette étape se fait directement sur le logiciel de maillage pour Telemac2D tandis que pour Dassflow, on ne se sert de GMSH seulement pour sélectionner les segments, la définition de la condition se faisant dans un fichier texte relatif à Dassflow. Au-delà de cette différence, le principe de définition des conditions aux limites reste le même pour les deux logiciels.

Dans notre cas voici les conditions aux limites utilisées en fonction du logiciel :

Tableau 1 : Conditions aux limites utilisées sur Dassflow et Telemac2D

Condition aux limites	Dassflow	Telemac2D
Entrée	'Discharg1' : un débit est imposé, la hauteur d'eau en entrée est calculée avec une courbe de remous.	'Open boundary with prescribed Q' : un débit d'entrée est imposé.
Sortie	'Ratcurve' : une courbe de tarage est associée à la sortie, le débit de sortie est calculé en fonction de la hauteur d'eau.	'Open boundary with prescribed H' : une courbe de tarage est associée à la sortie.

Les valeurs des débits d'entrées et les courbes de tarages sont renseignées dans des fichiers textes. En travaillant sur des logiciels 2D, la modélisation de l'influence du seuil comme condition aux limites se fait à travers une courbe de tarage. Le détail de la construction de cette courbe de tarage et son influence sur les écoulements dans le pilote sera détaillée dans l'analyse de sensibilité.

En plus des conditions aux entrées et sorties, il est nécessaire de définir les conditions de type murs. Pour Telemac2D - Blue Kenue, tous les segments auxquels aucune condition aux limites n'a été spécifiée sont automatiquement considérés comme des murs, tandis que pour Dassflow - GMSH il est nécessaire de créer cette condition aux limites.

1.2. Modèle 3D

Comme mentionné précédemment, la construction de la géométrie et la création du maillage s'effectuent dans des sous-programmes de OpenFoam. Ces programmes fonctionnent avec le principe suivant : il faut dans un premier temps définir des points qui forment chaque extrémité du futur volume, et ensuite créer plusieurs volumes (hexaèdres) qui, une fois assemblés les uns aux autres, forment la géométrie du pilote.

Pour la création du maillage, il faut définir le nombre de mailles selon les axes x, y et z pour chaque sous volume et tout cela en gardant une cohérence entre deux sous volumes voisins (il faut que les sommets des mailles soient alignés), car pour rappel OpenFoam utilise un maillage structuré. Pour le bon déroulement des simulations, il est recommandé d'avoir des mailles qui tendent à être de forme cubique. On a essayé de respecter ce critère pour les différents maillages comme on peut le voir sur la figure ci-dessous qui représente une capture d'écran du maillage du pilote.

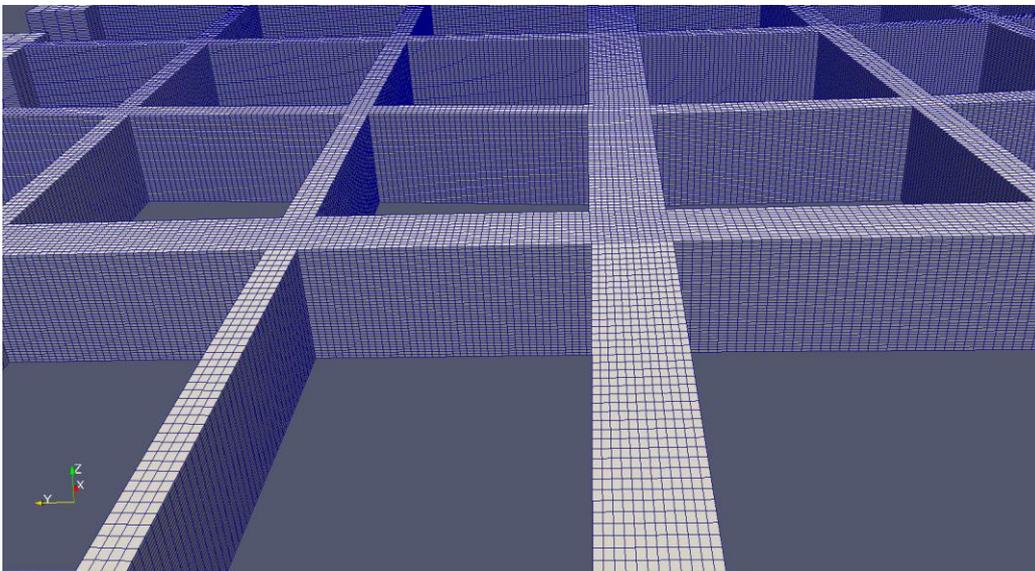


Figure 3 : Capture d'écran du maillage 3D du pilote

Concernant la modélisation des conditions aux limites, l'avantage des modèles 3D par rapport aux modèles 2D est que l'on peut reproduire toute la géométrie du pilote, l'objectif est donc d'être le plus fidèle à la géométrie afin de reproduire avec justesse les phénomènes qui s'y déroulent. Ainsi pour les entrées, on a modélisé les bacs dans lesquels l'eau arrive en sortie de pompes. Le débit d'injection d'eau est imposé sur le fond de ces bacs. En sortie, on a modélisé les seuils (avec une hauteur de crête de 3 cm) suivi d'une courte conduite d'une trentaine de centimètres qui mène à une sortie libre. L'influence hydraulique des seuils est donc directement modélisée par le logiciel, et non pas à travers une courbe de tarage comme pour les modèles 2D.

Une différence par rapport aux modèles 2D est que sur la dimension verticale, on compte maintenant deux frontières (fond et plafond). Une condition de type 'mur' est logiquement associée au fond du pilote, tandis que pour le plafond on a assigné la même condition qu'en aval des seuils : une sortie libre.

Maintenant que les maillages et les conditions aux limites ont été créés, les différents modèles sont prêts à être lancés. La prochaine étape porte sur l'analyse de sensibilité des modèles à divers paramètres.

Analyse de sensibilité

Au cours des différentes étapes de la création d'une modélisation, un nombre important de paramètres sont à définir, aussi bien au niveau de la création de la géométrie ou du maillage (forme et nombre de mailles, définition des conditions aux limites) ou bien au niveau des paramètres numériques du modèle (schéma numérique, temporel et spatial, équation résolues, modèles particuliers).

Les différents choix effectués vont avoir une influence sur la qualité des résultats. L'analyse de sensibilité va permettre de visualiser l'influence de chaque paramètre et ainsi de déterminer le paramètre optimal pour les simulations. Le but est d'avoir les meilleurs résultats pour un temps de calcul qui reste cohérent. Cette étape est donc très importante car les paramètres choisis à la fin de cette partie constitueront la base de notre étude.

Par soucis de similitude, cette étude sera divisée en deux parties : la première partie concernera les modèles 2D : Dassflow et Telemac2D, puis la seconde partie concernera le modèle 3D OpenFoam.

1.1. Analyse de sensibilité des modèles 2D

Dans cette partie consacrée aux modèles bidimensionnels seulement, nous allons dans un premier temps étudier l'influence des conditions aux limites, puis l'influence du raffinement du maillage, l'influence du coefficient de friction, et enfin l'impact de l'intégration d'un modèle de turbulence.

1.1.1. Analyse de sensibilité aux conditions aux limites aval

Sur le pilote expérimental, la condition aux limites de sortie est imposée par un seuil placé en aval de la dernière rue. C'est un seuil frontal (excepté pour la sortie 1) qui possède une crête de 3 cm. La modélisation de cette condition aux limites dépend du logiciel utilisé : pour Dassflow et TELEMAC 2D aucun seuil n'est réellement modélisé, ce sont des courbes de tarage qui simulent l'influence du seuil.

Afin d'avoir une bonne modélisation des écoulements, il est essentiel que la condition aux limites de sortie soit bien définie. En effet, la majorité des écoulements étant en régime fluvial, ils sont pilotés par la condition aux limites aval (que représentent les seuils). Une mauvaise calibration de la courbe de tarage pourrait avoir une grande influence sur les écoulements dans le pilote. En effet la condition aux limites de sortie a une grande influence sur les écoulements en amont puisque les écoulements dans le pilotes inondations sont grandement influencés par la hauteur d'eau en aval (Chen et al. 2018).

Dans cette partie deux courbes de tarage ont été testées : la première courbe de tarage a été créée à partir d'une loi de déversoir à crête mince en fonctionnement dénoyé provenant de la Notice Déversoir CETMEF (CETMEF 2005) dont l'équation est la suivante :

$$Q = \mu C_v L (h_1)^{3/2} \sqrt{2g} \quad (\text{équation 16})$$

Avec :

Q le débit (m³/s)

μ le coefficient de débit (sans dimension)

C_v le coefficient de vitesse d'approche du déversoir

g accélération due à la gravité (g=9,81m/s²)

h_1 la hauteur d'eau amont au-dessus du seuil (m)

L la largeur du canal en amont du déversoir (m).

Par soucis de simplicité on fera l'approximation suivante : $\mu C_v = 0,42$, une valeur souvent adoptée comme valeur moyenne.

La deuxième courbe de tarage a été obtenue à partir de valeurs expérimentales : des débits d'entrées compris entre 30 et 100 m³/h ont été injectés dans le pilote inondation et pour chaque sortie les couples hauteur d'eau en amont du seuil/ débit ont été relevés. La figure ci-dessous représente un exemple de courbe de tarage.

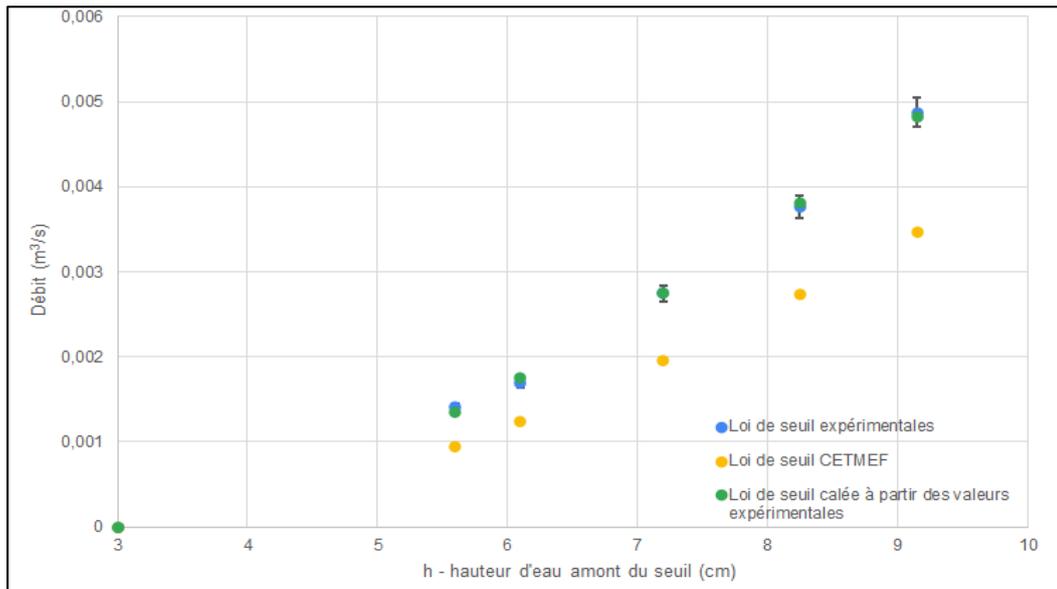


Figure 4: Comparaison des lois de seuil pour la sortie C

On observe assez logiquement que si la hauteur d'eau à l'amont du seuil est inférieure à 3 cm, aucun débit ne transite. Sur le graphique on a fait apparaître les incertitudes liées à la mesure de débits. D'après la thèse de Q. ARAUD (Araud et al. 2012), ces incertitudes sont de l'ordre de 3,5%. Pour la majorité des courbes de tarage, on constate que les débits des lois de seuils obtenus avec la notice CETMEF sont inférieurs à ceux issus des lois de seuils construites à partir des valeurs expérimentales. Cela signifie que pour une même hauteur d'eau, moins de débit transitera à travers la rue si on utilise la courbe de tarage construite à partir de la notice CETMEF. Et inversement, à débit identique la loi de seuil obtenue avec la notice CETMEF mènera à des hauteurs d'eau plus importantes que pour une simulation où l'on utilise les lois de seuil calées à partir des valeurs expérimentales.

On va maintenant comparer l'influence des conditions limites aval. Pour cela on comparera pour les deux courbes de tarage la répartition des débits de sortie et les hauteurs d'eau en certains points du pilote avec les données expérimentales. Pour les simulations : issues de Telemac2D et de Dassflow, les paramètres numériques suivants ont été utilisés :

- Durée simulée : 5 minutes
- Débit entrant : 80m³/h - réparti à 50% sur chaque face puis à chaque rue au prorata de la largeur
- Maillage utilisé : 150 k mailles
- Pente nulle
- Hauteur d'eau initiale : 5 cm

- Pas de temps : Telemac2D = 0,005s ; Dassflow = pas de temps adaptatif avec un nombre de courant fixé à 0,8
- Coefficient de Strickler Ks = 90
- Modèle de turbulence : k-epsilon (seulement disponible pour Telemac2D)

Entre les deux codes de calcul 2D, l'influence des conditions aux limites aval est bien différente. Voici dans un premier temps les résultats de la comparaison entre les valeurs numériques issues de Telemac2D et les valeurs expérimentales.

Telemac2D

Répartition des débits de sortie

La principale influence de la modification des courbes de tarage auquel on s'attend concerne la répartition des débits de sortie. Conformément à nos prévisions, des résultats bien plus proches des valeurs expérimentales ont été obtenus avec la courbe de tarage créée à partir des valeurs expérimentales. En effet pour toutes les sorties sauf deux (rue 7 et A), on obtient des résultats similaires ou mieux comme on peut le constater sur la figure ci-dessous.

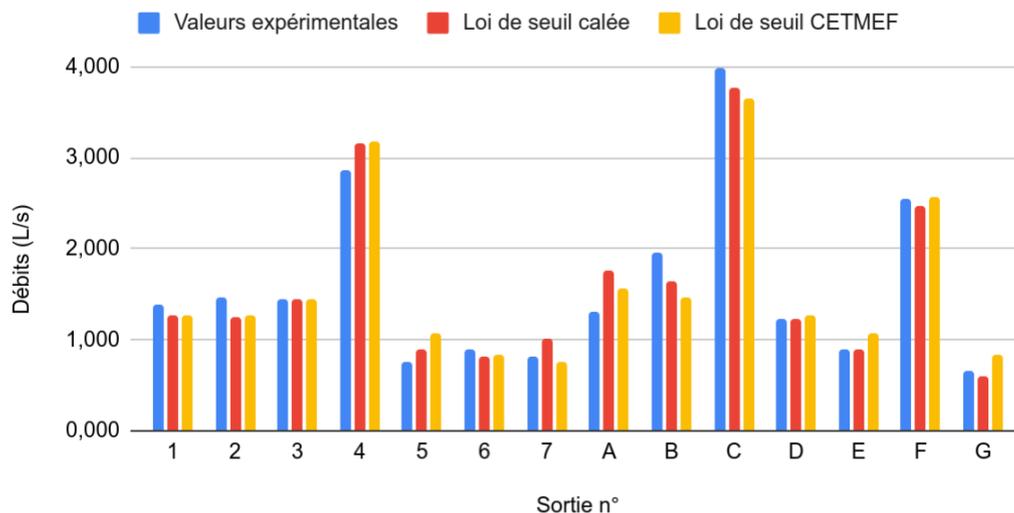


Figure 5 : Influence des courbes de tarage sur la répartition des débits de sortie sur Telemac2D

Dans cette étude, pour évaluer la différence entre les résultats numériques et les résultats expérimentaux, on s'est appuyé sur le critère suivant : on calcule la somme carrée des erreurs relatives à partir de la formule ci-dessous.

$$E = \sum_i \left(\frac{(Q_{exp,i} - Q_{num,i})}{Q_{exp,i}} \right)^2 \quad (\text{équation 17})$$

Avec :

$Q_{exp,i}$ la $i^{\text{ème}}$ valeur expérimentale

$Q_{num,i}$, la $i^{\text{ème}}$ valeur numérique

Pour observer l'influence de la modification de la courbe de tarage, on s'est donc appuyé sur le critère présenté ci-dessus. La situation est nettement meilleure avec la courbe de tarage calée à partir des valeurs expérimentales, en effet cette erreur est passée de **0,41** pour les valeurs obtenues avec la courbe de tarage du CETMEF à **0,30** pour les valeurs obtenues avec la courbe de tarage calée à partir des valeurs expérimentales.

Hauteurs d'eau

Concernant les hauteurs d'eau maintenant : les écoulements traversant le pilote sont en régime fluvial et donc pilotés par l'aval. La modification des courbes de tarages va modifier cette influence aval et par conséquent influencer sur différentes caractéristiques en amont, c'est le cas notamment pour les hauteurs d'eau.

Pour évaluer l'impact des courbes de tarages sur les hauteurs d'eau, on va étudier l'évolution de ce paramètre à différents points du pilote. Pour cela sept points ont été sélectionnés, on a représenté leur position sur le pilote dans la figure ci-dessous.

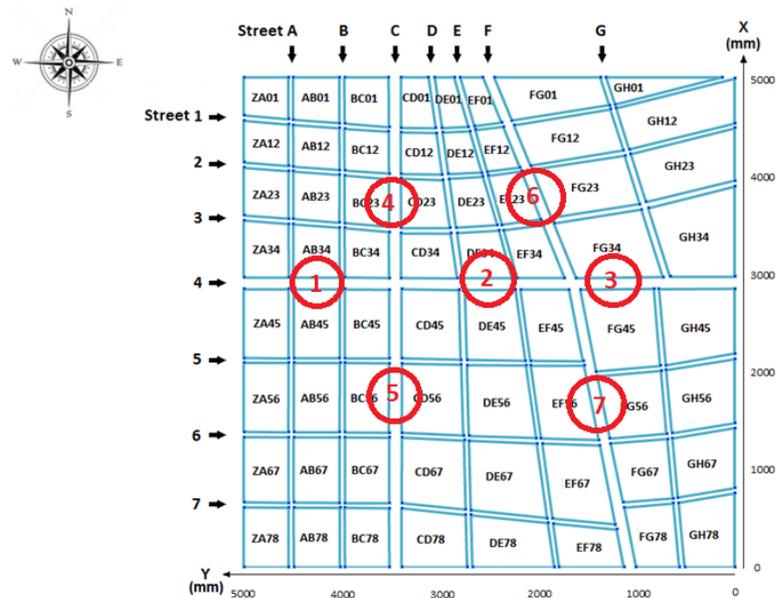


Figure 6 : Position des points de mesure de hauteurs d'eau sur le pilote

Ces sept points se situent tous dans les grands axes au milieu d'une section. Pour chaque axe, on a placé un point en amont et en aval du/des croisements avec un autre grand axe.

En comparant les valeurs de hauteurs obtenues avec les deux courbes de tarage aux valeurs expérimentales, on remarque une influence positive des courbes de tarages calées pour ce paramètre. Des meilleurs résultats sont obtenus avec les lois de seuils calées pour la totalité des sept points de mesure, la somme des erreurs relatives au carré est notamment divisée par un facteur 10 en passant de **0,071** (loi de seuil initiale) à **0,006** (loi de seuil calée). Un histogramme présentant les hauteurs d'eau aux différents points en fonction des courbes de tarage utilisées est présenté en [Annexe 1](#).

Dassflow

Répartition des débits de sortie

Voici les résultats de la comparaison entre les résultats numériques issus de Dassflow et les résultats expérimentaux.

L'influence des courbes de tarage est moins flagrante en ce qui concerne la répartition des débits de sortie (voir figure 6). En effet, les courbes de tarages calées empirent même la situation : la somme carrée des erreurs relatives passe de **0,29** à **0,31**. Bien que cette différence reste très faible, les résultats globaux se dégradent. On remarque toutefois une légère amélioration locale des résultats : pour huit des débits de sortie, l'erreur relative calculée par rapport aux valeurs expérimentales est plus faible avec la loi de seuil calée.

Hauteurs d'eau

Si la courbe de tarage créée à partir des valeurs expérimentales n'améliore pas spécialement les résultats des débits, elle a une influence positive pour les hauteurs d'eau dans le pilote. Pour la totalité des sept points de mesure, les valeurs issues de la simulation avec la loi de seuil calée sont plus proches des valeurs expérimentales (voir figure 7), la somme carrée des erreurs relatives passe de **0,040 à 0,008**. On remarque que pour chaque point de mesure, la hauteur d'eau issue de la simulation où la loi de seuil CETMEF a été utilisée est supérieure à celle où l'on a utilisé la loi de seuil à partir des valeurs expérimentales, ce qui confirme notre analyse des courbes de tarage faites sous la figure 4 qui lie hauteur d'eau et débit en fonction de la loi de seuil utilisée.

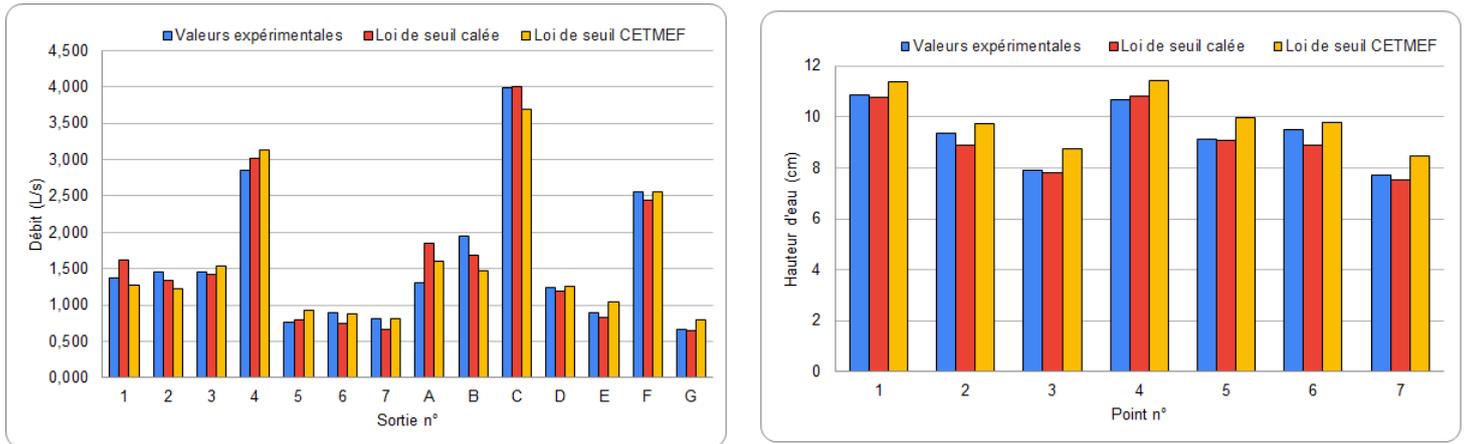


Figure 7 : Répartition des débits de sortie (à gauche) et évolution des hauteurs d'eau (à droite) en fonction de la courbe de tarage utilisée

Conclusion

En conclusion, que ce soit pour Dassflow ou Telemac2D, **la modification des courbes de tarage a une réelle influence sur les écoulements à l'intérieur du pilote inondation**. Les courbes de tarage calées seront préférées aux courbes de tarage obtenues avec la formule issue du CETMEF car on a constaté qu'elles permettaient d'obtenir des résultats similaires ou mieux que ce soit pour la répartition des débits de sortie ou pour les hauteurs d'eau.

1.1.2. Analyse de sensibilité au maillage

L'objectif de cette partie est d'étudier l'influence du raffinement du maillage sur les résultats des simulations. Les enjeux de modélisations liés au nombre de mailles sont : la bonne modélisation des phénomènes physiques et la durée de simulation. Un maillage grossier ne permettra pas de bien représenter les différents phénomènes tandis que pour un maillage très raffiné, la simulation nécessitera des ressources et une durée de calcul importante. Dans un souci d'efficacité il est donc essentiel de déterminer le bon maillage.

Pour évaluer le nombre de mailles idéal, plusieurs maillages vont être testés : en partant d'un maillage très grossier jusqu'à un maillage très fin, les résultats des différentes simulations seront comparés afin de déterminer à partir de quel maillage les résultats n'évoluent plus, signe que les résultats sont indépendants du nombre de mailles au-delà de ce maillage. Les points de comparaisons entre les simulations seront :

- La répartition des débits de sortie.

- Les hauteurs d'eau et vitesses à différents points.
- Un profil de vitesse.
- Le temps de calcul.

Les points pour les mesures de hauteur et vitesse/profil de vitesse, sont les mêmes que ceux utilisés dans l'analyse de sensibilité aux conditions aux limites aval (voir figure 6). La section où le profil de vitesse a été réalisée se situe au point numéro 3 (rue 4 en aval du croisement avec la rue F).

Comme dans le cas de l'analyse de sensibilité à la condition aux limites aval, afin d'avoir une analyse de sensibilité valide, seul le nombre de mailles doit varier, par conséquent les autres paramètres de simulations ont donc été fixés. Parmi les paramètres fixés il y a les conditions aux limites : en entrée 80 m³/h ont été injectés au total, ce débit est réparti à parts égales entre les faces nord et ouest. Puis pour chaque rue, le débit est attribué au prorata de la largeur relative de la rue par rapport à la largeur totale des rues de la face. La condition aux limites de sortie est créée par des seuils de 3 cm placés à l'extrémité de la dernière rue. Suite aux conclusions de la sous partie précédente, on utilisera les courbes de tarages calées à partir des valeurs expérimentales. En plus des conditions aux limites, les paramètres physiques suivants ont aussi été fixés et sont communs aux deux modèles : la pente du pilote fixée à 0 m/m, le coefficient de Strickler fixé à 90 m^{1/3}.s⁻¹, et enfin la hauteur d'eau initiale dans le pilote fixée à 5 cm. Pour cette étude, on simulera 5 minutes d'écoulement afin que les écoulements atteignent un régime permanent.

On réalisera dans un premier temps l'analyse de sensibilité au maillage sur Dassflow puis ensuite sur Telemac2D.

Dassflow

Les mêmes paramètres numériques que pour l'étude de sensibilité à la condition aux limites aval ont été utilisés dans cette partie, à savoir : un pas de temps adaptatif conditionné par un nombre de courant fixé à 0,8 ; un schéma temporel de Euler et le schéma spatial du premier ordre 'first b1'. Pour rappel, Dassflow utilise le schéma numérique des volumes finis.

Pour cette analyse de sensibilité, sept maillages ont été testés. Le tableau ci-dessous résume les caractéristiques des différents maillages.

Tableau 2 : Caractéristiques des différents maillages testés pour l'analyse de sensibilité au maillage sur Dassflow

Nombre de mailles (en milliers)	Nombre de mailles dans une rue	Nombre de maille dans une artère	Taille caractéristique d'une maille (cm)
3	≈ 2	≈ 2	5
10	2	5	3
30	3 - 4	≈ 7	2
100	8	15	1
150	8	20	0.8-0.9
200	8	20	0.7
300	10	>20	0.5-0.6

Le premier maillage, qui compte seulement 3 000 mailles, peut être caractérisé de grossier. En effet il comporte seulement 2 mailles par rue lorsque de précédent travaux sur le pilote inondation en recommande au minimum cinq (Payet 2018). C'est ce que l'on peut constater sur la figure ci-dessous qui offre un aperçu des différents maillages.

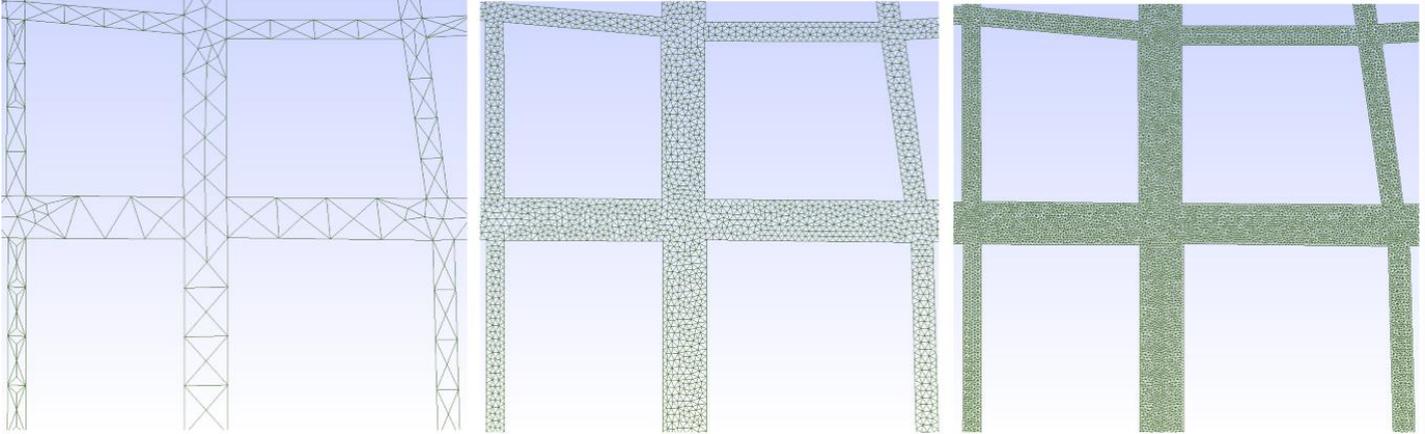


Figure 8 : Illustration des différents maillages créé sur GMSH au niveau du carrefour C-4 (nombre de mailles de gauche à droite : 3k, 30k, 150k)

Répartition des débits de sortie

Maintenant que les paramètres numériques ont été spécifiés et que les maillages ont été présentés, on peut passer à l'analyse des différents résultats, avec en premier lieu l'analyse de la répartition des débits, ce qui est illustré sur la figure ci-dessous.

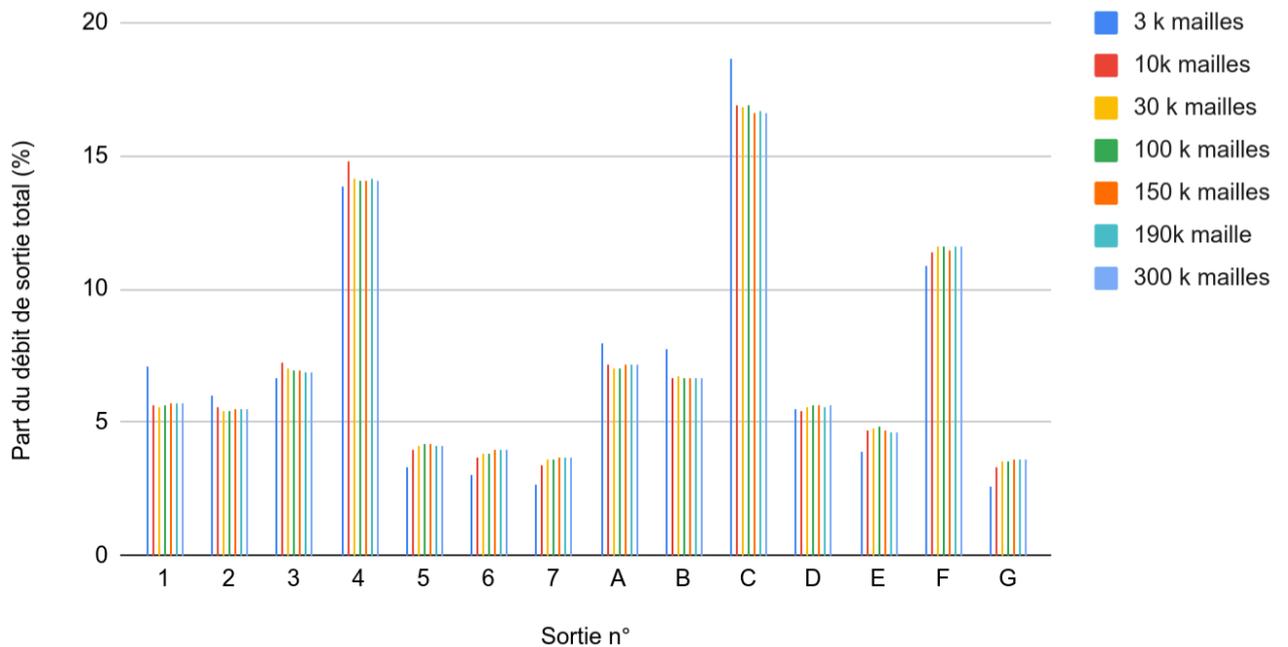


Figure 9 : Evolution de la répartition des débits de sortie en fonction du raffinement du maillage sur Dassflow

On remarque que mis à part les maillages les plus grossiers (3 et 10k mailles), la répartition des débits de sortie semble converger assez rapidement. En effet, en excluant les maillages les plus grossiers la différence maximum entre deux débits d'une même rue ne dépasse pas 3,5%.

Pour visualiser l'influence du raffinement du maillage sur la répartition des débits, on a tracé l'évolution de la différence par rapport au maillage le plus fin (ici 300k mailles).

On a réutilisé l'équation 17 avec les débits issus du maillage le plus fin, au lieu des débits expérimentaux (cette nouvelle formule a été inscrite en [Annexe 2](#)). La figure ci-dessous illustre les résultats obtenus.

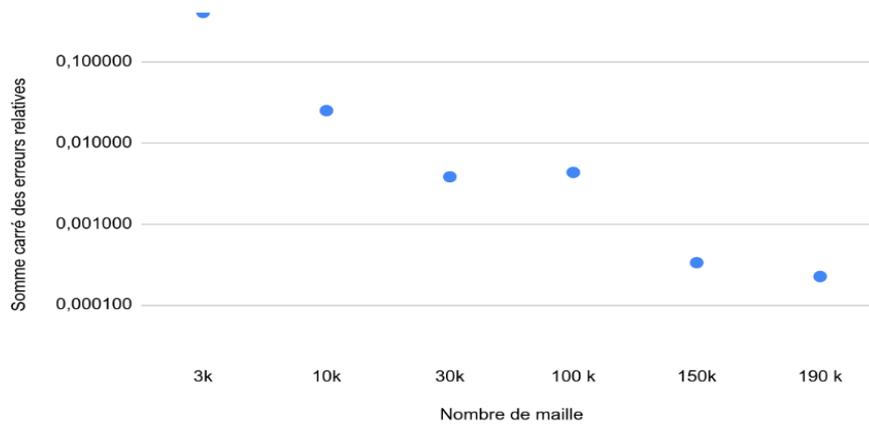


Figure 10 : Evolution de la différence des résultats par rapport au maillage le plus fin

Sur ce graphique, la décroissance de la courbe illustre la convergence de la répartition des débits de sortie. La variation des résultats entre les trois maillages les plus grossiers est importante : la valeur pour le maillage à 30k mailles est 10 fois inférieure à celle pour un maillage à 10k mailles qui est elle-même 10 fois inférieure au maillage à 3k mailles. Un palier de stabilisation des résultats semble être atteint au-delà du maillage à 150k mailles.

Hauteurs d'eau et vitesses

Passons maintenant à l'évolution des hauteurs d'eau et de la vitesse aux différents points présentés sur la figure 6. Les deux figures ci-dessous représentent l'évolution de ces deux grandeurs aux différents points en fonction du maillage associé à l'évolution de la différence par rapport au maillage le plus fin.

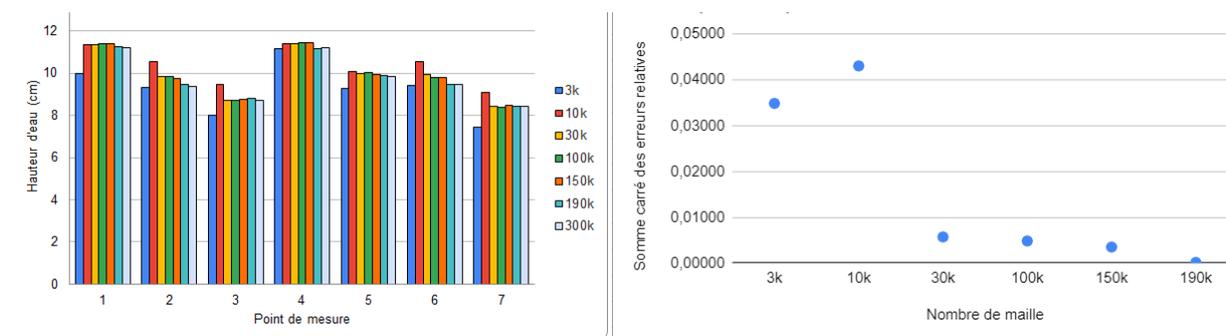


Figure 11 : Evolution de la hauteur en fonction du maillage (à gauche) et évolution de la différence par rapport au maillage le plus fin (à droite) sur Dassflow

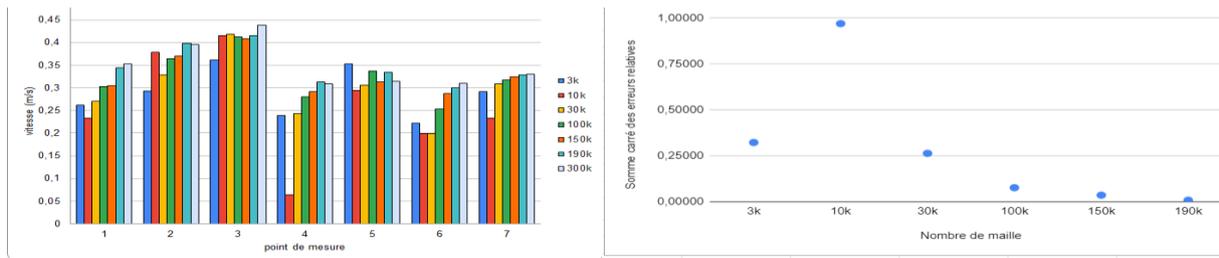


Figure 12: Evolution de la vitesse en fonction du maillage (à gauche) et évolution de la différence par rapport au maillage le plus fin (à droite) sur Dassflow

On constate que la hauteur converge rapidement : au-delà du maillage à 30 000 mailles il n’y a quasiment aucune évolution, et cela se voit particulièrement bien sur la figure présentant l’évolution de la différence par rapport au maillage le plus fin. Tandis que pour la vitesse aucune réelle stabilisation ne semble apparaître sur l’histogramme : la vitesse croît lentement, mais aucun palier de stabilisation ne semble atteint. Toutefois en regardant le graphique représentant la différence par rapport au maillage le plus fin, on constate une réelle convergence des résultats.

Profil de vitesse

Après avoir étudié l’évolution de la vitesse en un point, on va maintenant s’intéresser à l’évolution d’un profil de vitesse sur une section. Le profil de vitesse sur une section nous permet de visualiser plusieurs caractéristiques de l’écoulement, par exemple la symétrie de l’écoulement, mais surtout de voir l’influence du maillage comme on peut le constater sur la figure ci-dessous. Pour des raisons techniques, seuls 3 maillages ont été testés avec Dassflow, cela permet toutefois de constater l’influence du raffinement du maillage.

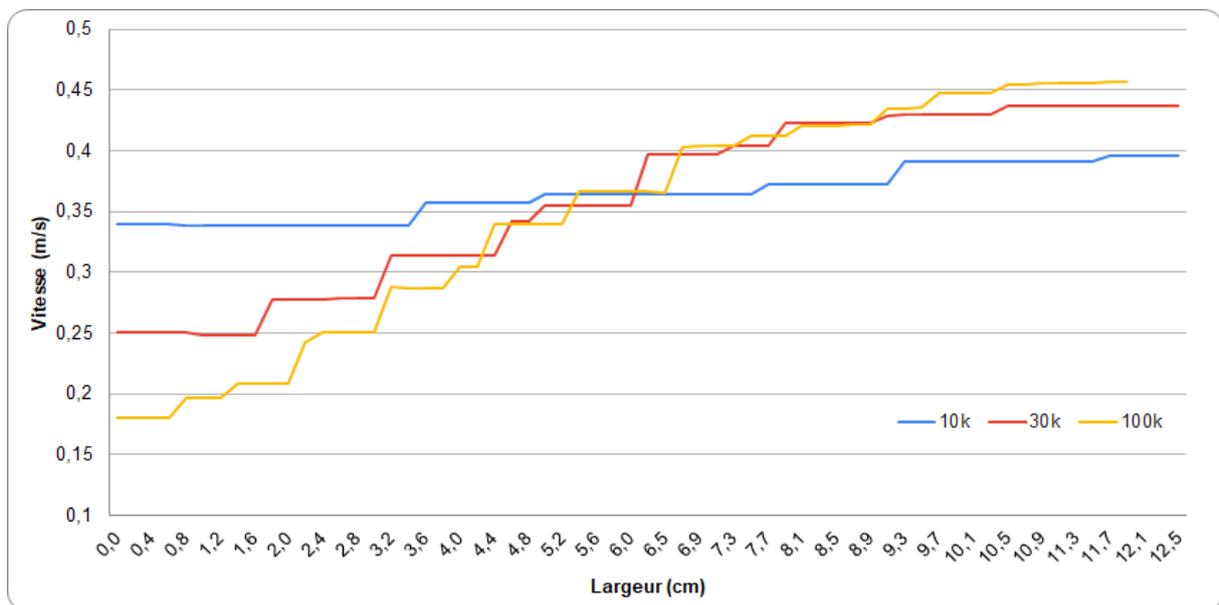


Figure 13: Evolution du profil de vitesse en fonction du maillage, réalisé sur Dassflow dans la rue 4 en aval du carrefour avec la rue F

On constate que la qualité du maillage joue un rôle important dans la représentation du profil en travers :

- Pour un maillage grossier (10k mailles), le profil en travers apparaît comme quasi symétrique avec une très légère variation entre les deux extrémités. Les variations de vitesse entre deux mailles sont importantes.

- Avec un maillage plus raffiné (30k mailles), une asymétrie commence à apparaître (elle a été créée par le croisement en amont : la rencontre des deux écoulements va créer pour chaque branche en aval une zone de recirculation et une zone de forte vitesse).
- Avec un maillage très raffiné (100k mailles) : l'asymétrie de l'écoulement est clairement observable puisque les deux vitesses extrêmes ont encore évolué. Le profil apparaît plus lisse que les autres.

Concernant la vitesse moyenne sur la section, le raffinement du maillage a un impact important comme on peut le constater avec le tableau ci-dessous qui présente l'évolution de la vitesse moyenne sur une section en fonction du maillage.

Tableau 3 : Vitesse moyenne sur une section en fonction du maillage dont le profil de vitesse est issu (Dassflow)

Maillage	10 k	30k	100 k
Vitesse moyenne (m/s)	0,365	0,361	0,346

Bien que l'on observe une nette différence entre les profils de vitesses pour les deux premiers maillages, leur vitesse moyenne est similaire. Tandis que pour le maillage le plus raffiné, l'asymétrie mieux modélisée de l'écoulement permet d'observer une vitesse moyenne plus faible.

Temps de calcul

Passons maintenant au dernier point de comparaison : le temps de calcul. Les résultats présentés dans la figure ci-dessous sont les temps de calculs obtenus suite à la simulation de 5 minutes d'écoulement dans le pilote, avec des calculs lancés en parallèle en local sur 4 cœurs.

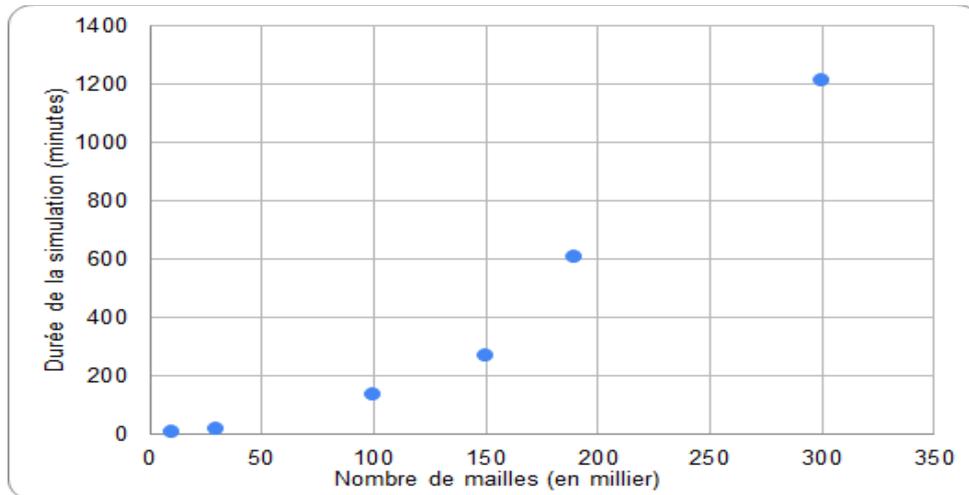


Figure 14 : Evolution du temps de calcul en fonction du nombre de mailles pour Dassflow

L'évolution des temps de calcul semble exponentielle : la durée de calcul est très faible (<1h) pour les petits maillages (<30k), et un temps de calcul bien plus important ($\approx 1j$) est observé pour les plus gros maillages (300k). Le temps de calcul reste globalement raisonnable même pour les plus gros maillages, surtout au vu des faibles moyens informatiques mobilisés.

Conclusion

Cette analyse de sensibilité sur Dassflow nous a permis de visualiser l'influence d'un maillage sur différents résultats d'une simulation. Un maillage trop grossier ne mènera pas à des résultats justes tandis qu'un maillage trop raffiné ne sera pas forcément utile au vu de la faible amélioration qu'il

apporte en prenant en compte la ressource utilisée. Au vu de ces éléments, le maillage aux alentours de **100-150k mailles** représente un bon compromis entre résultats et ressources et sera utilisé pour la suite de l'étude.

Telemac2D

Après avoir réalisé l'étude de sensibilité au maillage sur Dassflow, on va réaliser cette approche sur Telemac2D.

Les paramètres numériques utilisés pour l'analyse de sensibilité au maillage sont les suivants : une durée simulée de 5 minutes, le schéma numérique des éléments finis associé au modèle de turbulence k-epsilon, l'utilisation d'un pas de temps fixe qui a été calculé à partir des caractéristiques du maillage et de telle sorte que le nombre de courant soit toujours inférieur à 1.

Au total six maillages ont été créés sous Blue Kenue avec un nombre de mailles similaire à l'étude avec Dassflow : 10, 30, 85, 150, 210, 325 k mailles. Le logiciel Blue Kenue génère lui aussi des maillages non structurés, c'est donc assez logiquement que l'on retrouve le même ordre de grandeur pour les différentes caractéristiques des maillages générés par GMSH (présentées dans le tableau 2).

Remarque : bien que les maillages soient assez similaires avec ceux générés par GMSH (type de maillages non structurés et au niveau du nombre de mailles), la qualité des résultats entre les deux modèles 2D n'est pas comparable, et cela car ils n'utilisent pas le même schéma numérique (éléments finis pour Telemac2D et volumes finis pour Dassflow).

Répartition des débits de sortie

Maintenant que les paramètres numériques et que les maillages ont été présentés, on peut passer à la présentation des résultats, avec dans un premier temps l'évolution de la répartition des débits de sortie. L'histogramme ci-dessous représente les résultats des différentes simulations.

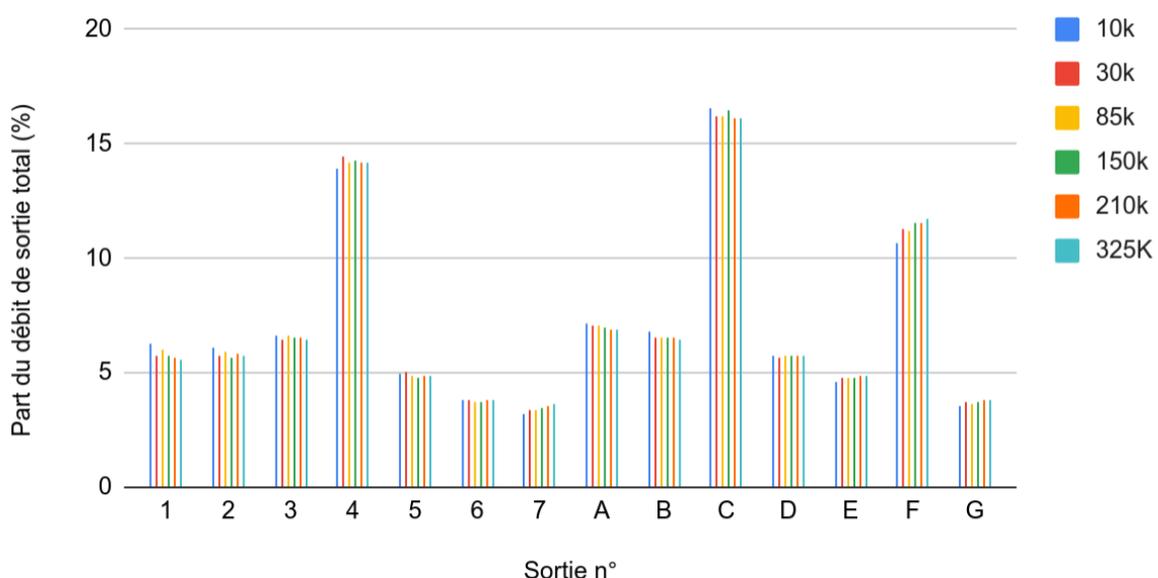


Figure 15 : Evolution de la répartition des débits en fonction du raffinement au maillage sur Telemac2D

La répartition des débits de sortie semble à première vue assez stable même si une légère tendance se dégage toutefois pour certaines rues (augmentation de la part du débit pour les rues 7 et F, baisse

pour la rue A). En excluant le maillage le plus grossier (10 k mailles), on constate en moyenne une évolution de 3,5% entre les valeurs maximales et minimales d'une même rue, et au maximum cette valeur atteint 7%. Comme dans l'analyse de sensibilité au maillage sur Dassflow, on a tracé ci-dessous l'évolution de la différence par rapport au maillage le plus fin afin de visualiser la stabilisation des résultats.

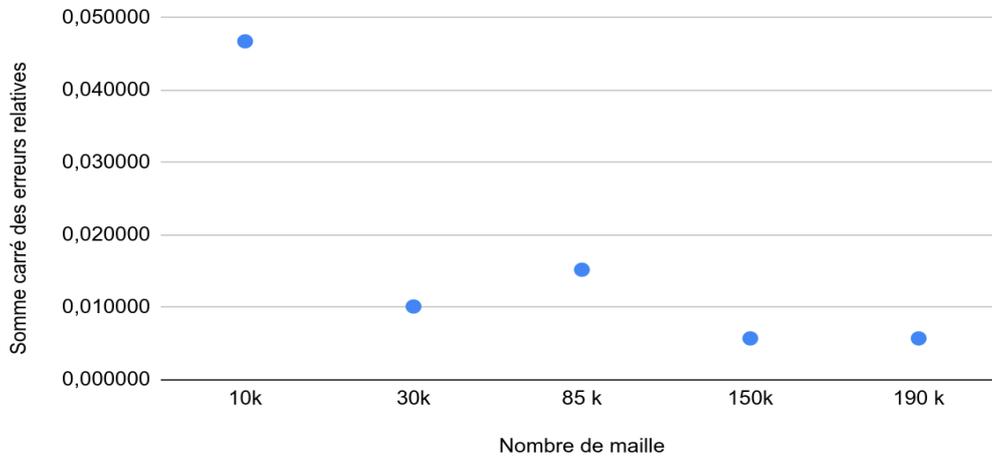


Figure 16 : Evolution de la différence de la répartition des débits par rapport au maillage le plus fin sur Telemac2D

Cette figure est dans la continuité des résultats obtenus sur Dassflow : le maillage le plus grossier est loin des résultats obtenus avec les autres maillages, et plus le nombre de mailles augmente et plus les résultats sont proches du maillage le plus fin. Dès le maillage à 30k mailles, on semble observer une bonne convergence, même si la différence relative du maillage à 85 k mailles ne semble pas suivre la tendance. Cette erreur peut être issue d'un problème de maillage ou autre. La modélisation n'étant toutefois pas aberrante, on conserve les résultats.

Hauteurs d'eau et vitesses

Nous allons maintenant nous intéresser aux résultats concernant la hauteur et la vitesse à différents points. Comme on peut le constater sur les figures ci-dessous, les résultats sont assez similaires à ceux obtenus avec Dassflow : les hauteurs ont tendance à diminuer tandis que les vitesses augmentent.

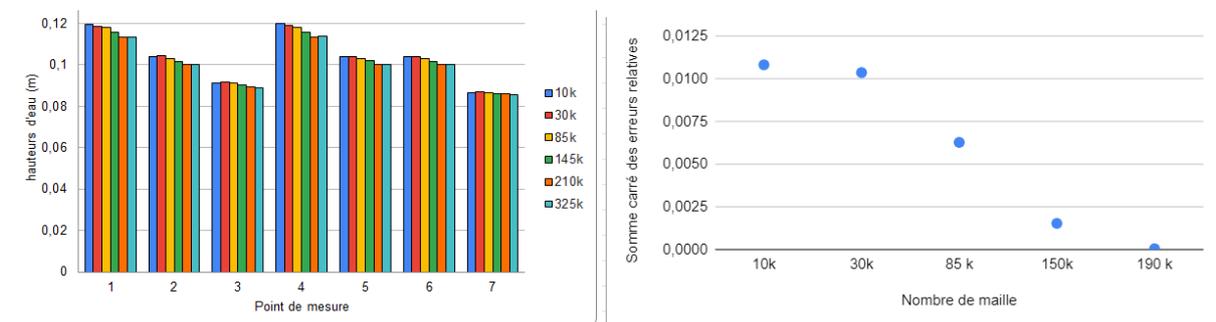


Figure 17 : Evolution de la hauteur en fonction du maillage (à gauche) et évolution de la différence par rapport au maillage le plus fin (à droite) sur Telemac2D

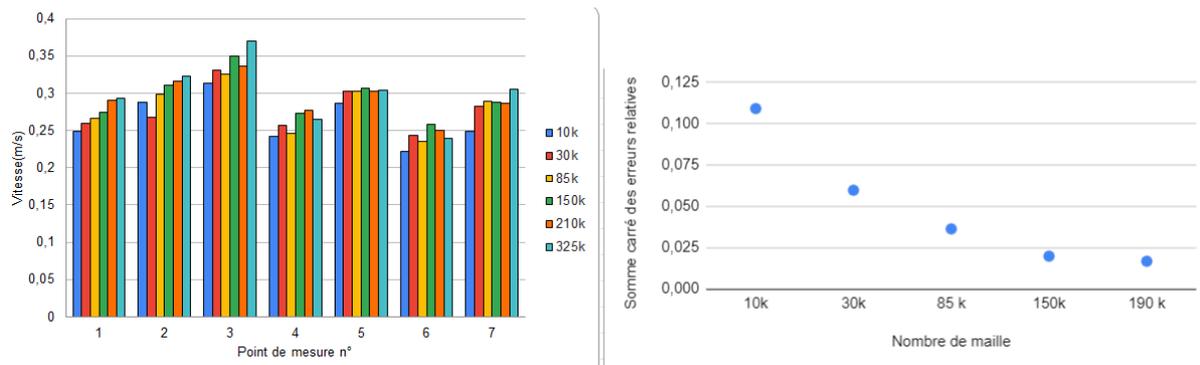


Figure 18 : Evolution de la vitesse en fonction du maillage (à gauche) et évolution de la différence par rapport au maillage le plus fin (à droite) sur Telemac2D

Même si sur les histogrammes on ne discerne pas vraiment de convergence (surtout pour la vitesse), on s'aperçoit en regardant l'évolution de la différence par rapport au maillage le plus fin que les écarts diminuent et que les résultats tendent à converger, bien que la stabilisation soit plus tardive que la convergence des débits (ici elle débute à partir du maillage à 150 k mailles).

Profil de vitesse

Intéressons-nous maintenant à l'évolution du profil de vitesse en fonction du maillage. Le profil de vitesse ci-dessous a été obtenu au même endroit que dans l'étude de sensibilité au maillage sur Dassflow (rue 4 en sortie du carrefour 4-F).

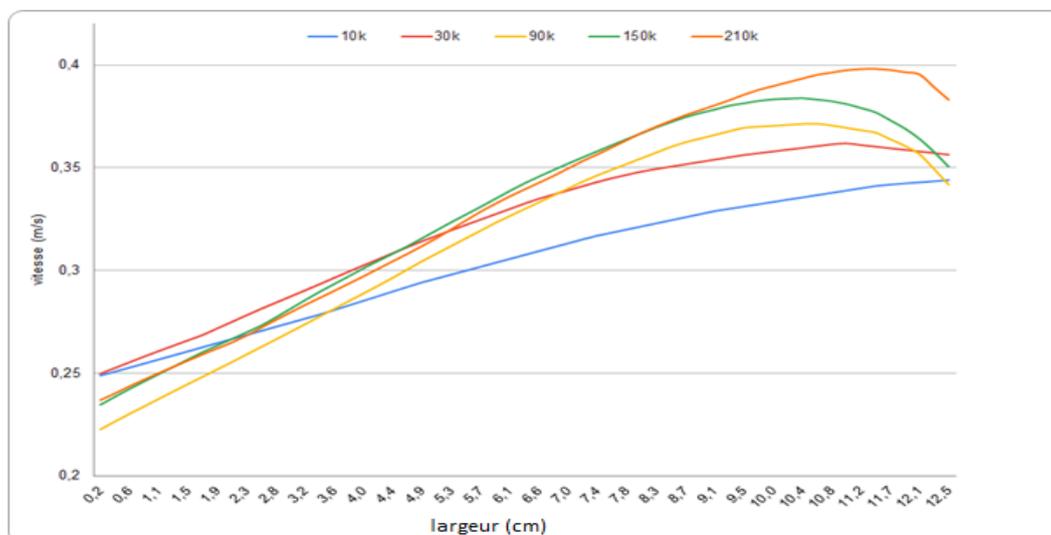


Figure 19 : Evolution d'un profil de vitesse en fonction du raffinement du maillage sur Telemac2D

On remarque que plus le maillage est fin et plus le profil de vitesse est asymétrique. En effet, comme la section se situe en aval d'un carrefour, une recirculation se forme. On comparera dans un prochain chapitre la forme des profils de vitesse en aval de carrefour afin de vérifier s'ils sont réellement aussi asymétriques.

L'impact sur la vitesse moyenne est du même ordre de grandeur que sur Dassflow : environ 0,01-0,03 m/s entre le maillage le plus grossier et le maillage le plus fin, sauf que dans notre cas la vitesse moyenne augmente comme on peut le constater dans le tableau ci-dessous.

Tableau 4 : Vitesse moyenne sur une section en fonction du maillage dont le profil de vitesse est issu (Telemac2D)

Maillage	10 k	30k	90k	150k	210k
Vitesse moyenne (m/s)	0,303	0,320	0,315	0,327	0,330

Si l'on compare ce profil de vitesse à celui obtenu sous Dassflow, on constate que celui-ci est beaucoup plus lisse même pour un maillage similaire. Comme on l'a précisé précédemment, cette différence vient du schéma numérique utilisé : le schéma numérique des éléments finis va calculer les caractéristiques de l'écoulement à divers points d'une maille en plus des sommets, alors que le schéma numérique des volumes finis calcule seulement sur les sommets d'une maille. Cela nécessite une ressource en calcul plus importante mais apporte de meilleurs résultats pour un même maillage. La comparaison des résultats entre Dassflow et Telemac2D pour un maillage similaire est donc biaisée.

Temps de calcul

Le dernier critère qui nous intéresse concerne le temps de calcul. Les temps affichés dans le graphique ci-dessous correspondent à une durée simulée de 5 minutes avec des calculs lancés en parallèle sur 4 cœurs en local.

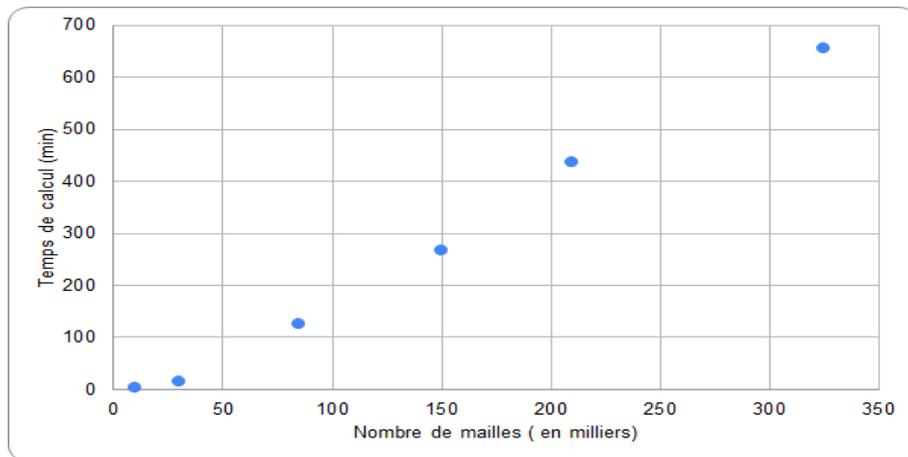


Figure 20 : Evolution de la durée de simulation en fonction du nombre de mailles sur Telemac2D

L'évolution des temps de calcul semble linéaire. Les durées de calcul pour le maillage le plus fin est de l'ordre de la demi-journée, ce qui reste raisonnable. Une réelle différence entre les deux modèles 2D sur le temps de calcul est observée à partir des maillages au-delà de 150 k mailles : la durée de calcul pour Dassflow est de l'ordre du double par rapport à Telemac2D, ce qui représente une différence non négligeable. Cette différence pourrait venir de la différence d'itération effectuée : au total environ 1 250k itérations pour Dassflow avec un pas de temps adaptatif et 120k pour Telemac2D avec un pas de temps fixé, soit 10 fois plus d'itérations effectuées avec Dassflow.

Conclusion

On a pu voir à travers cette analyse de sensibilité au maillage l'influence du raffinement du maillage : comme avec Dassflow, les simulations avec un maillage grossier conduisent généralement à des résultats grossiers (même si l'on n'a pas testé un maillage aussi grossier que sur Dassflow (3k mailles)). La stabilisation des résultats a lieu plus ou moins vite en fonction des paramètres : pour la répartition des débits de sortie, c'est à partir de 30 k mailles tandis que pour des paramètres locaux comme la hauteur ou la vitesse, la stabilisation a lieu à partir de 150 k mailles. Les temps de calculs restent très raisonnables et cela même pour les maillages les plus fins (½ journée de calcul pour une

simulation de 5 minutes en parallèle sur 4 cœurs). Au vu de ces conclusions, on considère que le maillage à **150 k mailles** représente un bon compromis entre résultats et temps de calcul, on choisira donc d'utiliser ce maillage pour la suite de l'étude.

1.1.3. Analyse de sensibilité au coefficient de friction

Dans cette partie on va s'intéresser à l'influence d'une variation du coefficient de friction sur les résultats. Ce coefficient est un paramètre essentiel dans les modélisations d'inondations pour les modèles 2D : il caractérise la rugosité des parois. En hydraulique à surface libre, ce paramètre est employé pour l'évaluation de la hauteur normale, grandeur qui est utilisée, entre autres, pour l'établissement des courbes de remous. L'étude bibliographique a mis en avant que ce paramètre a une influence sur les caractéristiques de l'écoulement et qu'un bon calage était nécessaire. Dans le logiciel Telemac2D, c'est le coefficient de Strickler (K_s) qui est utilisé. L'ordre de grandeur de ce paramètre est de $100-110 \text{ m}^{1/3} \cdot \text{s}^{-1}$ pour une paroi très lisse (verre), tandis que pour une paroi rugueuse (lit de gravier grossier) sa valeur est de l'ordre de $35-40 \text{ m}^{1/3} \cdot \text{s}^{-1}$. Dans Dassflow, c'est le coefficient de Manning (n) qui est utilisé, avec comme relation entre les deux $n = 1/K_s$. Pour plus de clarté, dans cette partie on utilisera seulement le coefficient de Strickler. Les parois du pilote étant constituées de plexiglass, on a considéré comme valeur de base un coefficient de friction correspondant à des surfaces lisses ($K_s = 90$).

Les simulations ont été réalisées avec les mêmes paramètres utilisés durant l'étude de sensibilité au maillage, c'est à dire : la pente fixée à 0 m/m , une hauteur d'eau initiale dans le pilote fixée à 5 cm , et enfin une durée de simulation 5 minutes afin d'atteindre le régime permanent. Une gamme de 7 valeurs de coefficient de Strickler entre 60 et $120 \text{ m}^{1/3} \cdot \text{s}^{-1}$ a été testée sur Dassflow et Telemac2D. Pour déterminer l'influence de la variation de ce coefficient, on va étudier la répartition des débits de sortie, l'évolution des hauteurs d'eau et de la vitesse à différents points.

Dassflow

Comme pour les études de sensibilité précédentes, on s'intéresse dans un premier temps à l'évolution de la répartition des débits de sortie. La figure ci-dessous représente les résultats des différentes simulations. Le constat est immédiat : la variation du coefficient de rugosité n'a quasiment aucune influence sur la répartition des débits de sortie. En effet, entre le maximum et le minimum de chaque branche il y a une variation maximum inférieure à $0,8\%$.

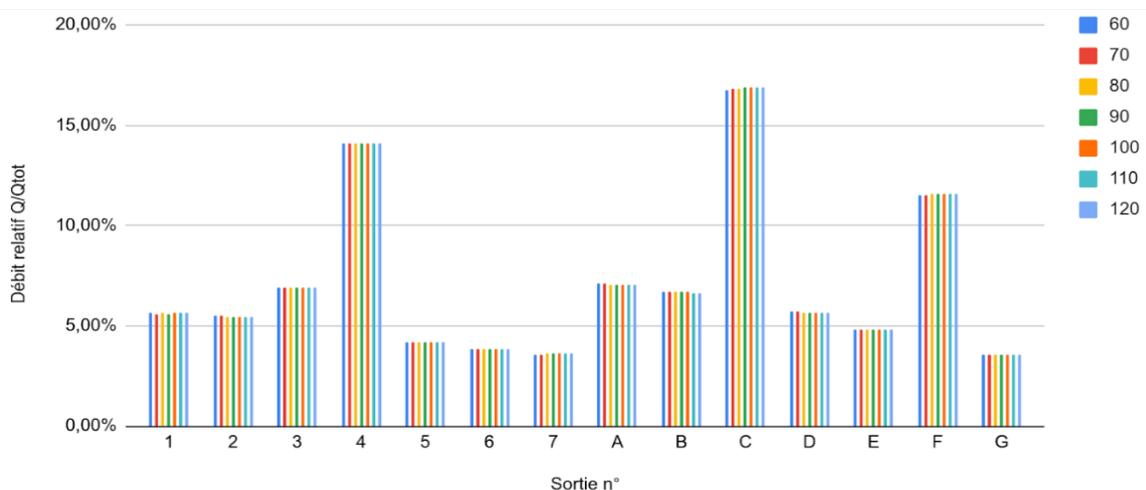


Figure 21 : Evolution des débits relatifs en sortie en fonction de l'évolution du coefficient de Strickler sur Dassflow

Cette quasi-invariabilité se retrouve aussi sur les mesures de vitesses et de hauteur d'eau comme en témoignent les deux histogrammes ci-dessous.

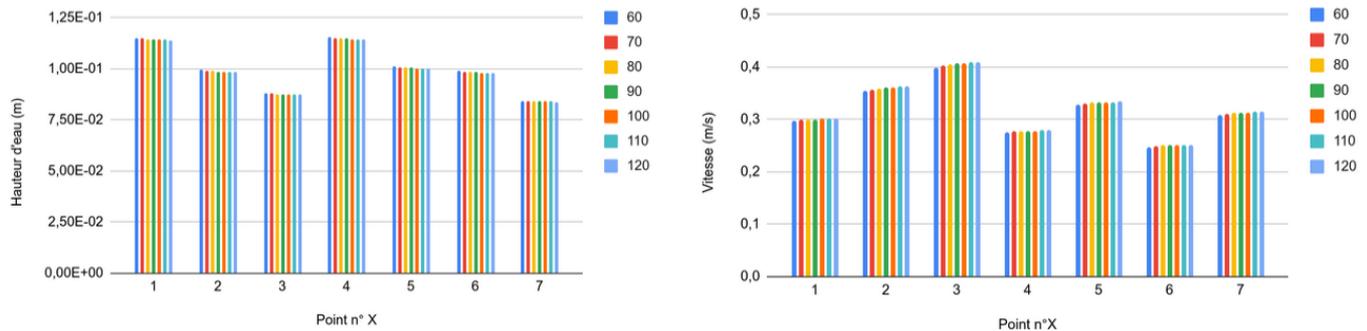


Figure 22: Evolution des hauteurs d'eau (à gauche) et des vitesses (à droite) en fonction du coefficient de Strickler sur Dassflow.

Même si on discerne une très légère tendance à la baisse pour les hauteurs d'eau et une augmentation pour les vitesses, cela reste très modéré. En effet, il y a moins de 1% de variation au maximum sur la hauteur et moins de 3% sur la vitesse pour un même point.

On peut donc conclure sur une insensibilité des résultats à la variation du coefficient de rugosité pour le pilote sur Dassflow et se demander ce qu'il en est de l'influence de ce paramètre pour le logiciel Telemac2D.

Telemac2D

Les résultats sont similaires à ceux obtenus sur Dassflow : on constate une quasi-invariabilité de la répartition des débits de sortie, des hauteurs d'eau et des vitesses à différents points (avec une légère tendance à la hausse des vitesses). Les différentes figures ont été placées en [Annexe 3](#).

Bien que le coefficient de Strickler varie de $\pm 33\%$, les paramètres observés ne semblent pas varier, ou très peu : par exemple pour une même sortie, la différence maximale entre deux valeurs de hauteur d'eau est de 0,3%. Pour la répartition des débits cette valeur augmente à 4% (en ne prenant pas en compte une valeur anormale qui monte à 8%), et pour les vitesses la différence maximale est de 6%.

Les écarts sont plus importants que ceux obtenus avec Dassflow, notamment à cause de quelques valeurs ponctuelles incohérentes qui viennent perturber les résultats. Toutefois les écarts restent relativement faibles et au vu des histogrammes, on peut conclure sur une quasi-invariabilité des résultats au coefficient de rugosité sur Telemac2D.

Remarque : Une des causes principales qui expliquerait ce phénomène concerne la hauteur normale. Le fait est que la distance entre deux carrefours est trop courte pour que la hauteur normale ait le temps de s'établir. Par conséquent, les variations du coefficient de Strickler n'ont aucune influence. Il serait intéressant de voir si pour un pilote auquel on applique un changement d'échelle les résultats seraient similaires ou non.

Jusqu'à là on a considéré une modification uniforme du coefficient de Strickler sur l'ensemble du pilote, toutefois si on modifie ce paramètre localement (dans la réalité, cela pourrait correspondre au passage d'un sol de type béton à un sol à gravier comme dans un parc) cette modification a une influence sur l'écoulement. Toutefois ce n'est pas le but de notre étude de sensibilité, et cette piste ne sera donc pas développée ici.

Conclusion

Pour conclure, on peut affirmer que les différents modèles 2D du pilote ne sont que très **peu sensibles au coefficient de friction**. Nos résultats concordent avec ceux de précédents travaux de modélisation

du pilote inondation (Arrault et al. 2016) (Payet 2018). Par défaut, on considérera un coefficient de Strickler moyen de $90 \text{ m}^{1/3} \cdot \text{s}^{-1}$ pour la suite de l'étude pour les modèles 2D.

1.1.4. Analyse de sensibilité au modèle de turbulence

Dans cette partie on s'intéresse à l'influence des modèles de turbulence sur les résultats des simulations. La prise en compte de la turbulence est importante dans le cas d'un réseau de carrefours car elle est au cœur de nombreux phénomènes. Pour les analyses de sensibilité précédentes, on a utilisé par défaut un modèle de turbulence sur Telemac2D (car Dassflow ne dispose pas pour le moment de modèle de turbulence).

Dans un premier temps on va estimer le nombre de Reynolds des écoulements à surface libre dans le pilote. Pour cela on utilise la formule suivante :

$$Re = \frac{Rh \cdot U}{\nu} \quad (\text{équation 18})$$

Avec : Rh le rayon hydraulique.

U la vitesse moyenne de l'écoulement.

ν la viscosité cinématique du fluide.

Pour un écoulement dans une artère, on a au minimum $Rh = 0,03 \text{ m}$, $U = 0,4 \text{ m/s}$ et $\nu = 1\text{e-}6 \text{ m}^2/\text{s}$ ce qui donne un nombre de Reynolds $Re = 12\ 000$.

Le nombre de Reynolds est bien supérieur à 1000, donc l'écoulement est bel et bien turbulent.

Notre analyse de sensibilité va comporter deux configurations : une avec un modèle de turbulence k-epsilon, et l'autre sans modèle de turbulence. On utilisera les points de comparaison utilisés précédemment pour voir l'influence sur les résultats. Intéressons-nous donc dans un premier temps à l'influence sur la répartition des débits de sortie dont l'histogramme de répartition a été tracé ci-dessous.

Répartition des débits de sortie

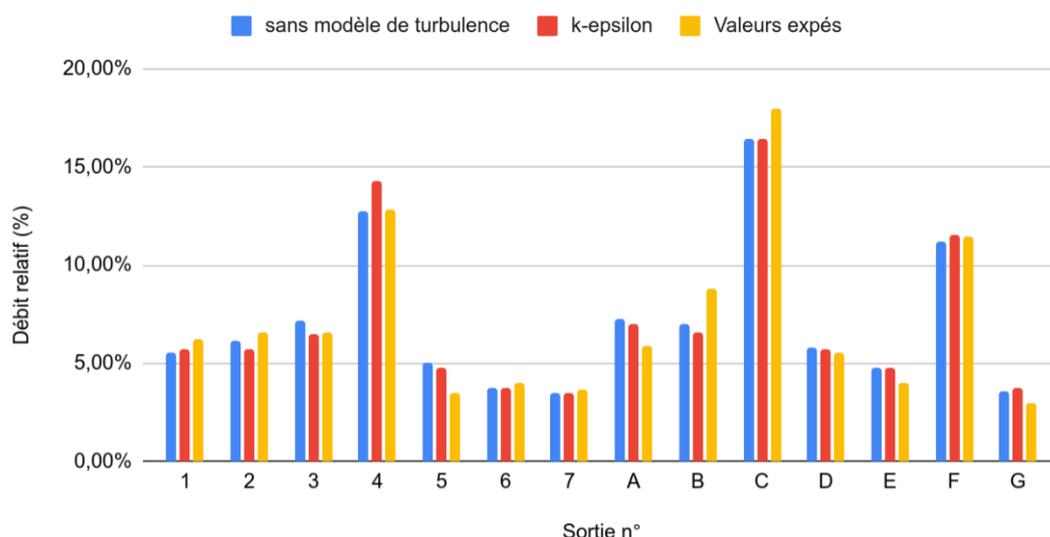


Figure 23 : Répartition des débits de sortie en fonction du modèle de turbulence utilisé sur Telemac2D

Comme on le constate sur la figure, l'absence d'un modèle de turbulence influe peu sur la répartition des débits, en effet à part les sorties 3 et 4 il y a moins de 5% de différence entre deux valeurs d'une

même rue. En comparaison avec les données expérimentales, les résultats obtenus sont meilleurs lorsque le modèle de turbulence est actif, même si la différence reste faible : une erreur de 0,41 avec modèle de turbulence contre 0,43 sans (calculée avec la formule issue de l'équation 17).

Hauteur d'eau et vitesses

En ce qui concerne les hauteurs d'eau, on observe quelques différences entre les deux : les hauteurs d'eau issues de la simulation sans modèle de turbulence sont légèrement plus élevées, la différence de hauteur croît au fur et à mesure que l'on s'éloigne de la condition aux limites aval, et au final une différence de hauteur de 1,5 cm est observée à l'amont des rues A et 1. Pour la simulation sans modèle de turbulence, on observe des oscillations de la surface libre, elles se trouvent principalement dans les grands axes et à la suite d'un croisement avec un autre grand axe, une capture d'écran de ce phénomène a été placée en [Annexe 4](#).

Intéressons-nous maintenant aux vitesses. Bien que l'influence du modèle de turbulence soit légère pour les paramètres précédents, des différences concrètes sont observées en ce qui concerne les vitesses. La figure ci-dessous représente les vitesses dans le pilote aux alentours de la rue 4 (les figures à tailles réelles ont été placées en [Annexe 5](#)).

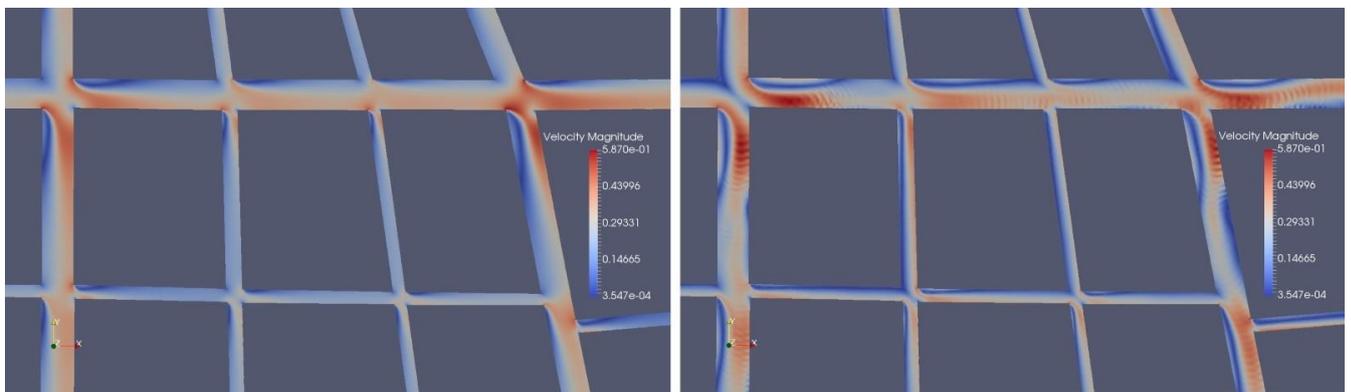


Figure 24 : Influence du modèle de turbulence utilisé sur les vitesses sur Telemac2D, à gauche : situation avec le modèle de turbulence k-epsilon utilisé, à droite : sans modèle de turbulence

On remarque que le choix du modèle de turbulence a une influence sur la forme des recirculations, l'évolution des vitesses au cours d'une rue et l'intensité de la vitesse. Les recirculations sont bien plus longues dans les simulations sans modèle de turbulence : par exemple dans les petites et moyennes rues, la recirculation s'étale sur toute la longueur de la rue jusqu'au prochain croisement. Dans les grands axes, même si la recirculation ne s'étend pas jusqu'au bout de la rue, elle y est quand même plus longue. Cette recirculation a comme conséquence de limiter la section de l'écoulement où le flux circule facilement. Pour assurer la conservation du débit, il est nécessaire que dans les zones où la section est réduite, les vitesses soient plus élevées (comme on peut le voir sur la figure 24 où les couleurs sont plus intenses dans la capture d'écran prise sans modèle de turbulence). Comme on peut le constater sur la figure 24, l'ajout d'un modèle de turbulence va permettre d'homogénéiser les paramètres de l'écoulement, y compris la vitesse. Par exemple à l'aval du croisement entre les axes 4 et F (carrefour en haut à droite), dans le cas sans modèle de turbulence la zone d'écoulement intense prend une forme de méandre sur la longueur. On peut voir une deuxième zone de recirculation (ou plutôt une zone où la vitesse est quasi nulle) se développer à l'aval et sur le côté opposé de la première, tandis que dans le cas où le modèle de turbulence est actif, l'écoulement s'homogénéise après la zone de recirculation.

Que ce soit avec ou sans modèle de turbulence, la largeur des zones de recirculation est similaire. Ce détail pourrait jouer un rôle important dans la bonne modélisation de la répartition des débits de sortie.

Temps de calcul

Concernant le temps de calcul, l'influence de l'ajout ou non d'un modèle de turbulence est très faible. Une différence de seulement 9 minutes est observée entre les deux simulations pour un calcul lancé en local en parallèle sur 4 cœurs.

Conclusion

Pour conclure, l'ajout d'un modèle de turbulence a dans notre cas eu une faible influence sur la répartition des débits et sur les hauteurs d'eau observées dans le pilote inondation, tandis que l'influence du modèle de turbulence sur les vitesses est non négligeable. En effet la répartition et l'intensité des vitesses sont bien différentes. Dans le cas où aucun modèle de turbulence n'a été utilisé, de nombreuses zones de vitesses hétérogènes sont observées notamment dû aux zones de recirculation très longues, tandis qu'avec l'utilisation du modèle de turbulence k-epsilon, on observe des vitesses beaucoup plus homogènes mais globalement moins intenses, accompagnées de zones de recirculation plus courtes. Les écoulements dans le pilote étant turbulents, on choisira d'utiliser le modèle de turbulence k-epsilon pour la suite de l'étude afin de modéliser les écoulements avec cohérence.

L'analyse de sensibilité pour les modèles 2D est maintenant terminée. Dans cette sous partie on a pu tester de nombreuses configurations et constater la sensibilité ou non des modèles à certains paramètres (condition aux limites aval, maillage, coefficient de friction, modèle de turbulence), et tout cela dans le but d'obtenir une bonne base pour l'étude en régime permanent. L'étude de sensibilité va maintenant se consacrer au modèle 3D.

1.2. Analyse de sensibilité du modèle 3D

Pour le modèle 3D, bien moins de paramètres sont à définir et donc à étudier dans l'analyse de sensibilité. En effet les codes de calculs 3D prennent directement en compte les phénomènes tandis que pour les codes de calcul 2D, la modélisation de ces phénomènes est simplifiée, notamment grâce aux paramètres que l'on a analysé dans la partie précédente.

Dans cette partie nous allons donc étudier dans un premier temps l'influence du raffinement au maillage sur les résultats, et ensuite l'influence du choix du modèle de turbulence.

1.1.1. Analyse de sensibilité au maillage

Le principe de l'analyse de sensibilité au maillage dans cette partie est le même que pour les modèles 2D : en faisant varier le raffinement du maillage on va étudier l'évolution des résultats jusqu'à observer une stabilisation des résultats.

Dans le cas d'un modèle 3D les ressources nécessaires pour réaliser une simulation sont bien plus importantes que pour un modèle 2D. La notion d'efficacité (obtenir les meilleurs résultats possibles avec le moins de ressource) aura donc un rôle de premier plan dans cette partie.

On présentera dans un premier temps les paramètres numériques du modèle avant de passer à l'analyse des résultats. Voici donc les paramètres numériques utilisés :

- Solveur : interFoam, adapté pour les modélisations diphasiques, ce solveur résout les équations de Navier Stokes en régime transitoire pour deux fluides incompressibles, isothermes et non miscibles. Les deux phases considérées sont l'air et l'eau.
- Pas de temps adaptatif avec un nombre de courant maximum fixé entre 1 et 2 en fonction de la convergence du calcul.
- Modèle de turbulence : RAS (Reynolds-averaged stress modelling) qui appelle le modèle de turbulence k-omega SST (shear stress transport)
- Durée de simulation : 120 secondes (au lieu de 300s pour les modèles 2D, pour des raisons d'économie de ressource), on s'est assuré de la convergence et de la stabilité des résultats.
- Calculs lancés en parallèle sur le cluster de l'Unistra avec 40 cœurs pour les cas à 500k, 1 et 2 millions de mailles et 80 cœurs pour les autres.

Maintenant que les paramètres numériques ont été présentés, on peut s'intéresser aux différents maillages utilisés. Au total cinq maillages ont été considérés dans notre étude de sensibilité. Le tableau ci-dessous présente leurs caractéristiques :

Tableau 5 : Caractéristique des différentes mailles du maillage créé pour le modèle 3D

Nombre de mailles (en millions)	Nombre de mailles dans une rue			Nombre de mailles dans une artère			Taille caractéristique d'une maille (cm)
	Longueur	Largeur	Profondeur	Longueur	Largeur	Profondeur	
0,5	30	3	35	30	6	35	2
1,2	40	4	40	40	12	40	1,5
2,7	60	6	40	60	18	40	1
4,9	80	8	45	80	20	45	0,7
8,0	100	10	50	100	22	50	0,5

Les dimensions du maillage à 2,7 millions de mailles ont été établies à partir d'un maillage existant du pilote. Ensuite pour les autres maillages, on a cherché à conserver des mailles cubiques tout en augmentant/réduisant le nombre de mailles. Les figures ci-dessous sont des représentations des différents maillages.

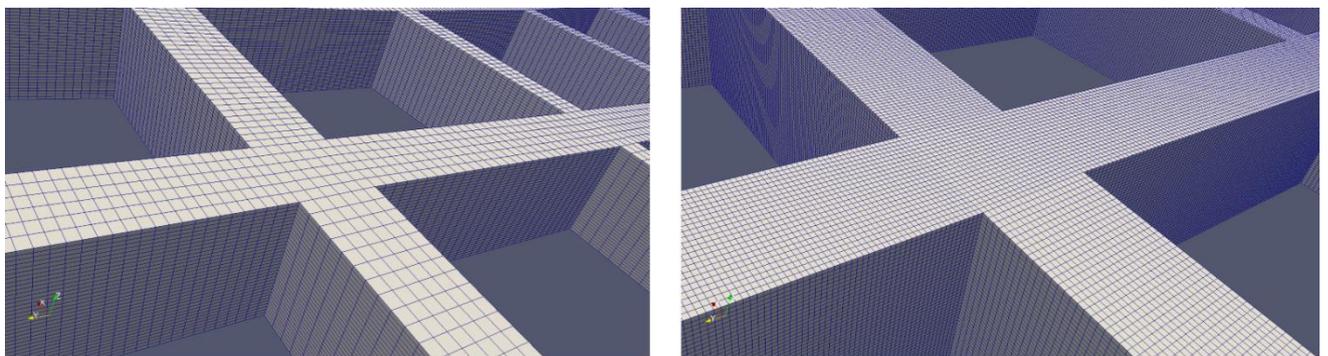


Figure 25 : Exemple de maillage généré avec la fonction blockMesh de OpenFoam (à gauche : 500 k mailles, à droite : 8 millions de mailles)

Après avoir présenté les paramètres géométriques et numériques, on va maintenant s'intéresser aux résultats. L'analyse va se concentrer sur les mêmes critères que pour les deux autres modèles à savoir une analyse de l'évolution de la répartition des débits de sortie, de l'évolution de la hauteur d'eau et de la vitesse à différents points, une analyse de profils de vitesse et au final du temps de calcul.

Répartition des débits de sortie

Commençons par étudier l'évolution de la répartition des débits de sortie. La figure ci-dessous présente les résultats obtenus :

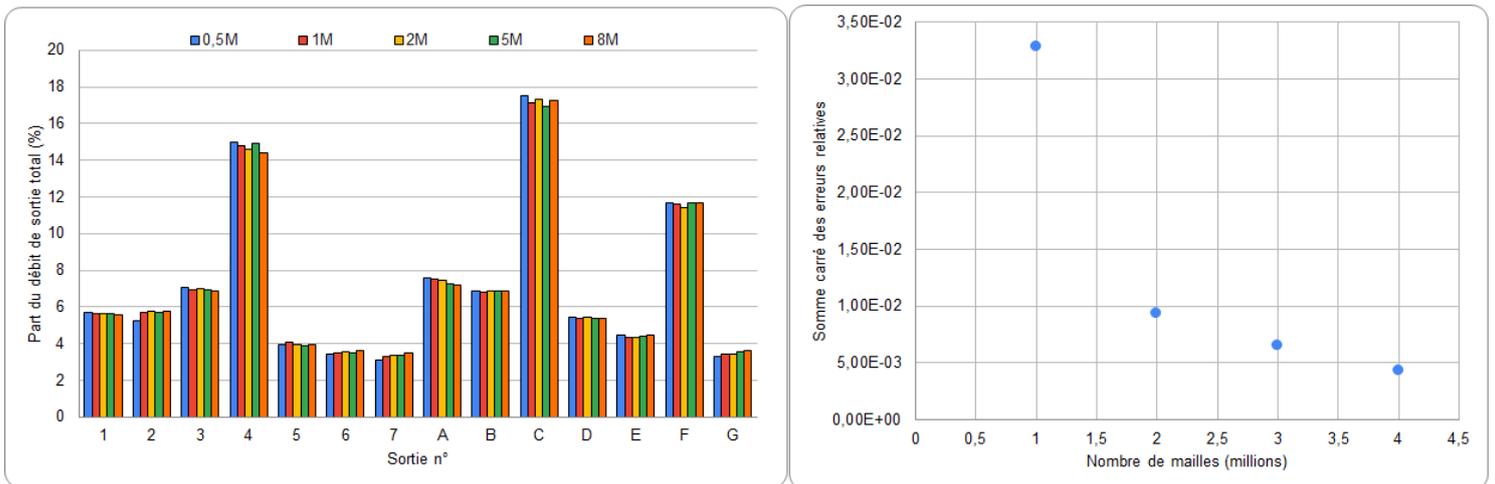


Figure 26 : Evolution de la répartition des débits en sortie (à gauche) et de l'erreur par rapport au maillage le plus fin (à droite) en fonction du raffinement du maillage sur OpenFoam

L'influence du raffinement au maillage n'est pas flagrante sur cette figure puisque même pour le maillage le plus grossier on constate relativement peu de différences avec les autres. Pour mieux visualiser l'évolution des résultats, on a aussi tracé l'erreur relative en fonction du maillage le plus fin (calculée avec la formule issue de l'équation 17 utilisée précédemment). Le graphique est similaire à ceux obtenus pour l'étude de sensibilité au maillage avec les modèles 2D : les résultats du maillage grossier sont assez éloignés du maillage le plus fin, en augmentant la taille des mailles la convergence s'obtient rapidement. Ici au-delà du maillage à 1M de maille la répartition des débits évolue peu. Utiliser un maillage de l'ordre de 1 ou 2 millions de mailles paraît cohérent si l'on souhaite obtenir une bonne répartition des débits.

Hauteurs d'eau et vitesses

On va s'intéresser maintenant à l'influence du maillage sur la hauteur d'eau et la vitesse à différents points. Les points considérés sont les mêmes que ceux utilisés dans l'étude sur les modèles 2D (voir figure 6). Le modèle fait preuve d'une grande stabilité sur l'estimation des hauteurs d'eau face au raffinement au maillage : l'évolution des hauteurs d'eau est très faible, aucune tendance à la hausse ou à la baisse ne se dégage réellement de l'histogramme ci-dessous. En traçant l'évolution de l'erreur par rapport au maillage le plus fin (voir figure placée à la suite), on observe tout de même une forme de convergence, avec des erreurs dont la valeur maximale est inférieure à 2e-3 (valeur obtenue avec les maillages les plus fins sur Dassflow et Telemac2D).

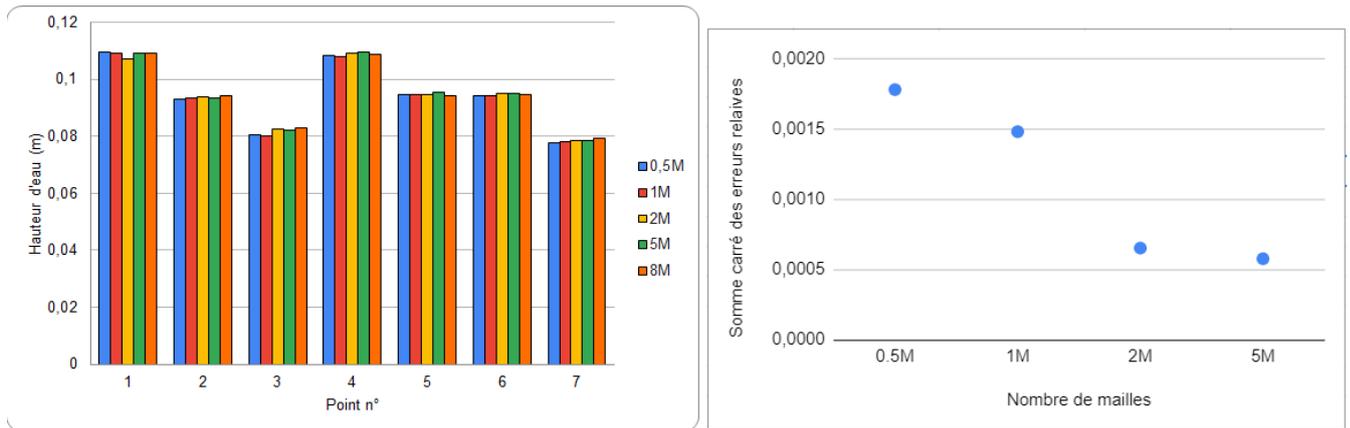


Figure 27 : Histogramme de l'évolution des hauteurs en fonction du raffinement au maillage (à gauche) et évolution de la différence par rapport au maillage le plus fin (à droite) sur OpenFoam

Un maillage, même grossier, sera donc capable de fournir une bonne estimation des hauteurs d'eau pour le pilote inondation.

Cette conclusion est assez différente pour les vitesses, car comme on peut le voir sur les graphiques ci-dessous la vitesse varie amplement entre les maillages (excepté pour les deux derniers maillages où on observe une stabilisation). Cette variation ne semble pas suivre de tendance.

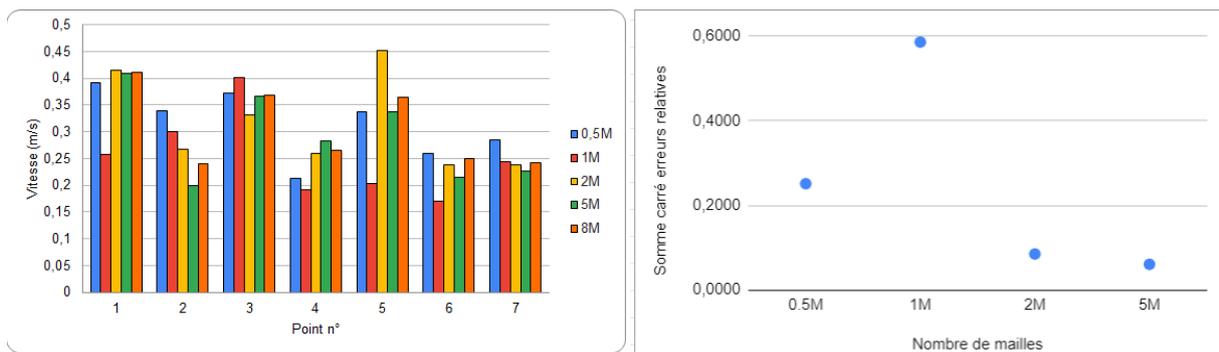


Figure 28: Histogramme de l'évolution des vitesses en fonction du raffinement au maillage (à gauche) et évolution de la différence par rapport au maillage le plus fin (à droite) sur OpenFoam

L'évolution de l'erreur par rapport au maillage le plus fin met en avant la différence du jeu de données pour le maillage à 1 million de mailles avec le reste. Mis à part ce point, le graphique a une tendance de convergence classique. La fluctuation des résultats peut provenir de la mesure de vitesse : les données ont été obtenues à partir d'une fonction "sonde" placée à un point précis. Ces points étant situés au centre des grands axes, près de la zone de recirculation, il se peut qu'entre deux simulations la vitesse à ce point précis de l'écoulement ait été légèrement modifiée et donc que la vitesse ait variée. Si l'on souhaite comparer les vitesses ponctuelles, une amélioration possible serait de moyenner les résultats sur plusieurs pas de temps.

Profil de vitesse

Afin d'être moins sensible aux variations de l'écoulement pour un point précis du pilote, on a tracé ci-dessous l'évolution d'un profil de vitesses sur une section (la même que pour l'étude de sensibilité au maillage sur les modèles 2D). Tracer les profils de vitesses nécessite plus de manipulations pour le modèle 3D que pour les modèles 2D. En effet, pour les obtenir il a fallu moyenner la vitesse sur une droite verticale (représentant un point sur une courbe du graphique ci-dessous), et répéter

l'opération autant de fois que nécessaire. Ici 24 points ont été réalisés afin d'avoir un profil en travers assez précis pour observer les variations de vitesse.

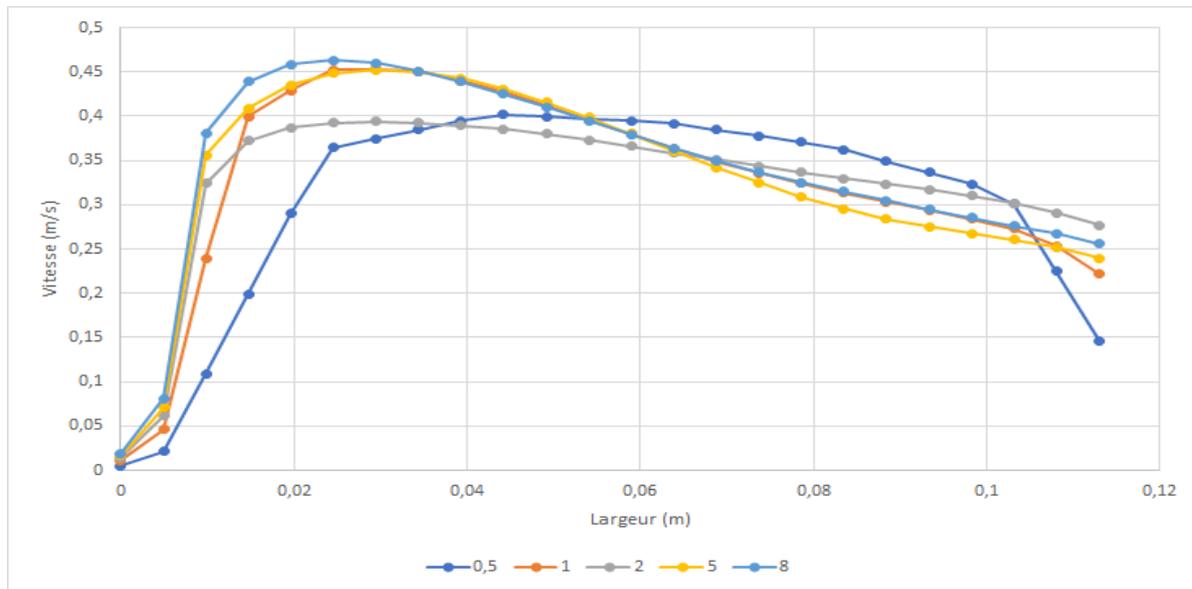


Figure 29 : Evolution du profil de vitesse en fonction du maillage sur OpenFoam

On constate que mis à part le maillage le plus grossier (à 500 k mailles), les profils de vitesses sont très similaires entre eux. Comme pour les simulations 2D, le défaut de modélisation pour le maillage le plus grossier porte sur les zones de recirculations, l'asymétrie du profil de vitesses n'est pas correcte : ce dernier est plat comparé aux autres. Étonnamment le profil de vitesse du maillage à 2 millions de mailles apparaît lui aussi légèrement plus plat que les autres, ce qui n'est toutefois pas un problème car en termes de vitesse moyenne le résultat est cohérent avec les autres comme on peut le voir dans le tableau ci-dessous.

Tableau 6 : Evolution des vitesses moyennes du profil de vitesse sur la rue 4 en aval du carrefour avec la rue C sur OpenFoam

Maillage (millions de mailles)	0,5	1	2	5	8
Vitesse moyenne (m/s)	0,304	0,327	0,324	0,330	0,341

Une tendance à la hausse est observée sur les vitesses moyennes. Au final, un maillage contenant au moins 1 million de mailles semble suffisant pour modéliser correctement les caractéristiques de vitesse des écoulements.

Temps de calcul

Le dernier point de comparaison porte sur les temps de calculs. Les simulations ont été lancées sur le cluster de calcul de l'Unistra sur plusieurs cœurs. Le même nombre de cœurs n'a pas été utilisé pour les différentes simulations, donc afin d'obtenir une comparaison cohérente du temps de calcul, on va utiliser le temps de calcul total. Pour obtenir le temps de calcul total, on multiplie le temps de calcul par le nombre de cœurs. La figure placée à la suite illustre l'évolution du temps de calcul total.

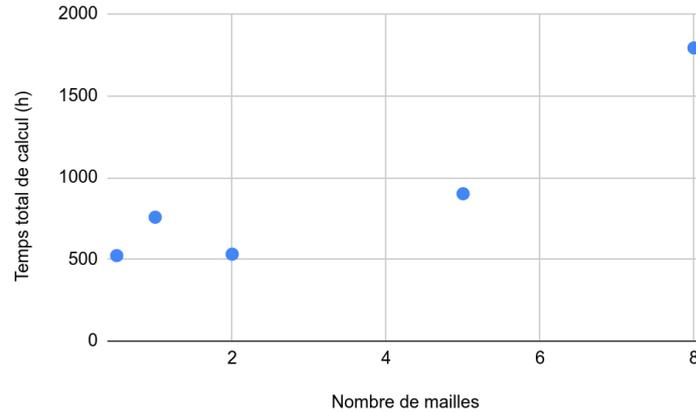


Figure 30 : Evolution du temps de calcul total en fonction du nombre de mailles sur OpenFoam

On constate que pour les trois maillages les plus grossiers, les temps de calcul totaux sont globalement similaires (entre 500 et 750 heures de calculs), au-delà les temps de calculs totaux augmentent fortement et semblent adopter la tendance exponentielle que l'on a obtenu avec le modèle 2D Dassflow. Pour le maillage à 8 millions de mailles, on obtient un temps de calcul total de quasiment 1800 heures. Cela représente une ressource considérable à mobiliser, qui est le gros point faible du modèle 3D.

Conclusion

Pour conclure, cette analyse de sensibilité au maillage a permis de mettre en avant l'influence du maillage utilisé sur la modélisation des écoulements. La répartition des débits ainsi que les hauteurs d'eau évoluent assez peu en excluant les maillages grossiers, tandis que la vitesse elle semble évoluer sans cesse, ce qui est notamment dû au caractère tridimensionnel des écoulements qui n'atteignent jamais un état d'équilibre parfait au contraire de ce que l'on a pu observer pour les modèles 2D. Toutefois pour avoir ces résultats complets, il est nécessaire de créer un modèle complexe à construire mais aussi d'avoir une ressource de calcul beaucoup plus importante. Au vu des différentes conclusions établies dans les parties précédentes, un maillage comportant au moins 2 millions de mailles sera utilisé si l'on souhaite modéliser convenablement les différentes caractéristiques des écoulements dans le pilote inondation.

1.1.2. Analyse de sensibilité au modèle de turbulence

Après avoir étudié l'influence d'un modèle de turbulence sur les résultats avec le code de calcul Telemac2D, on va cette fois s'intéresser à l'influence d'un modèle de turbulence sur OpenFoam. Dans OpenFoam, trois types de modèle de turbulence sont disponibles : laminaire (qui n'utilise pas de modèle de turbulence), RAS (utilise 'Reynolds-averaged simulation (RAS) modelling') et enfin LES (utilise 'large-eddy simulation (LES) modelling'). Chacun de ces modèles comprend des sous modèles qui possèdent leurs conditions d'utilisations (en fonction des caractéristiques de l'écoulements) et leurs particularités. Dans notre cas on a comparé le modèle de turbulence RAS – k- ω SST à une simulation en laminaire (donc sans modèle de turbulence). On a établi dans l'étude de turbulence pour un modèle 2D que les écoulements dans le pilote étaient turbulents. On va se demander si une simulation utilisant un modèle de turbulence laminaire peut-elle tout de même modéliser les phénomènes hydrauliques de type inondation urbaine.

Hormis le maillage utilisé, les mêmes paramètres numériques que pour l'étude de sensibilité au maillage ont été utilisés dans cette partie, c'est-à-dire :

- Solvateur : interFoam avec deux phases (air et eau).
- Pas de temps adaptatif avec un nombre de courant maximum fixé à 2.
- Durée de simulation : 120 secondes.
- Calcul lancé en parallèle sur le cluster de l'Unistra avec 80 cœurs.
- Maillage utilisé : 5 millions de mailles.

Maintenant que les paramètres de la simulation ont été présentés, intéressons-nous aux résultats. Pour ce faire on se basera sur les mêmes critères que les parties précédentes : analyse de la répartition des débits, des hauteurs d'eau dans le pilote et des profils de vitesses.

Répartition des débits de sortie

Intéressons-nous maintenant aux résultats, et avec dans un premier temps la répartition des débits de sortie comme le représente l'histogramme ci-dessous.

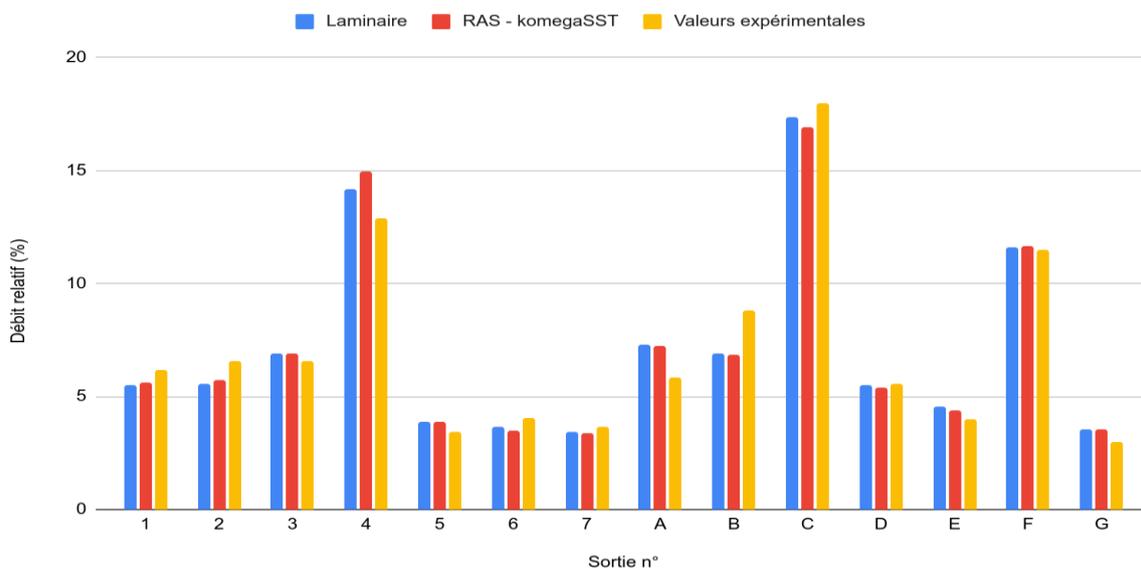


Figure 31 : Répartition des débits de sortie en fonction du modèle de turbulence utilisé sur OpenFoam

L'influence d'un modèle de turbulence sur la répartition des débits n'est pas flagrante, en effet pour une même branche on constate au maximum 5% de différence entre les deux valeurs de débits. Par rapport aux valeurs expérimentales, des résultats légèrement plus justes sont étonnamment obtenus pour la simulation sans modèle de turbulence : l'erreur (calculée avec la formule de l'équation 17) s'élève à **0,240** sans modèle de turbulence tandis que l'on obtient une erreur de **0,248** avec. L'écart est toutefois relativement faible.

Hauteurs d'eau et vitesses

Concernant les hauteurs d'eau, l'influence de l'ajout d'un modèle de turbulence est très faible : en comparant ponctuellement la hauteur d'eau à différents points (les points utilisés dans l'étude précédemment, voir figure 6) on observe en moyenne une différence de seulement 2 mm entre deux valeurs de hauteurs. Lorsque l'on regarde plus globalement l'évolution des hauteurs d'eau sur une rue, on retrouve des profils très similaires, à l'exception de quelques singularités, comme on peut le constater sur la figure ci-dessous. Sur la figure, les carrefours sont représentés par des traits pleins verticaux.

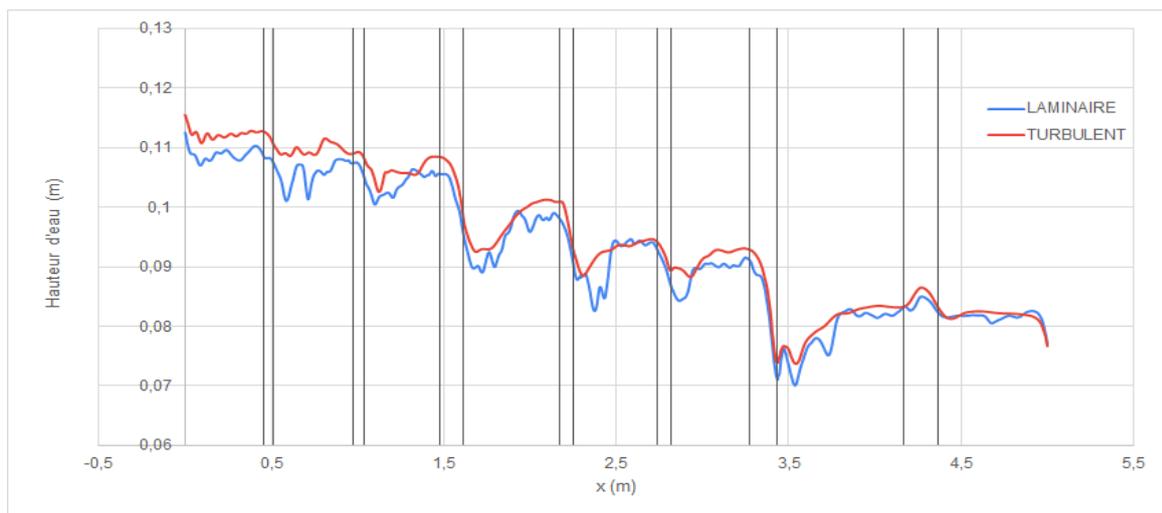


Figure 32 : Evolution des hauteurs d'eau le long de la rue 4 en fonction du modèle de turbulence sur OpenFoam

On observe une surface libre beaucoup plus oscillante pour la simulation en laminaire tandis que pour la simulation turbulente, les hauteurs d'eau apparaissent comme nettement plus lisses. Lors de l'analyse de sensibilité au modèle de turbulence sur Telemac2D, ce phénomène d'oscillation avait aussi été observé dans le cas sans modèle de turbulence.

Au-delà de ces oscillations de la surface libre, l'évolution des hauteurs d'eau reste très similaire, mais cela n'est pas le cas des vitesses. Pour observer ce phénomène, on a représenté sur la figure ci-dessous les vitesses des écoulements pour une coupe horizontale du pilote à 5cm au-dessus du fond dans les deux cas : avec et sans modèle de turbulence. Des images plus grandes ont été placées en annexe pour une meilleure visualisation des différences ([Annexe 6](#)).

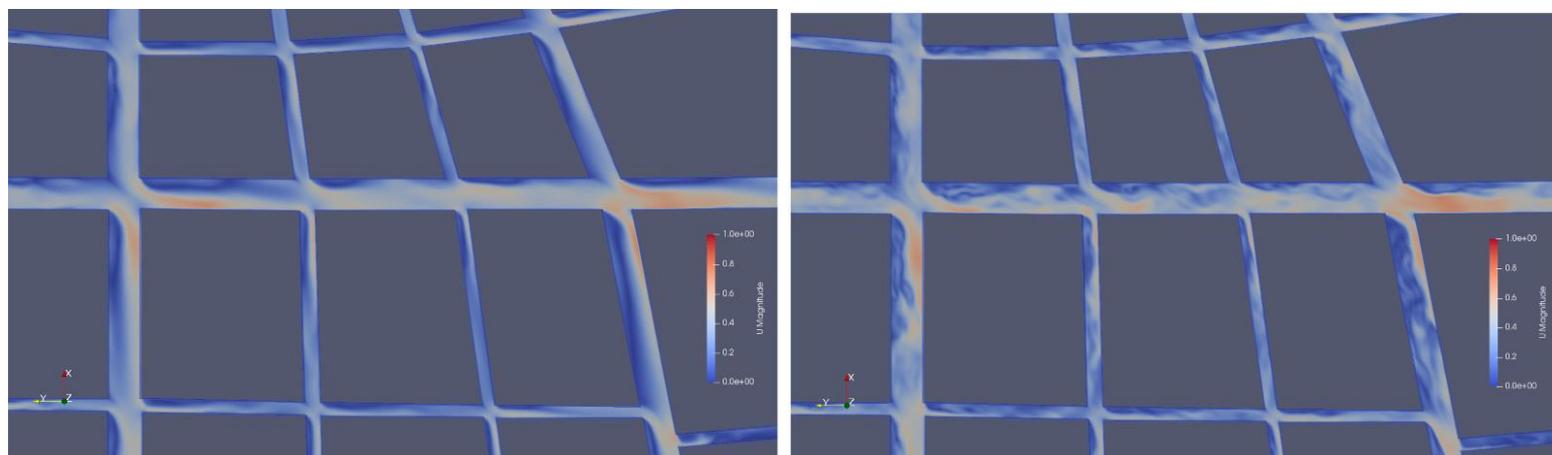


Figure 33 : Influence du modèle de turbulence utilisé sur les vitesses sur OpenFoam, à gauche : situation avec le modèle de turbulence RAS - komegaSST utilisé, à droite : sans modèle de turbulence

Sur la capture d'écran correspondant au modèle de turbulence, on peut aisément apercevoir les zones de recirculation et les zones d'écoulements intenses du fluide. On discerne aussi plutôt bien les zones de recirculation sur la capture d'écran correspondant au modèle laminaire même si elles semblent moins bien définies. La réelle différence intervient en aval de ces zones où les vitesses paraissent très hétérogènes. On en arrive donc au même constat que pour l'étude de sensibilité au modèle de turbulence sur Telemac2D : la turbulence permet d'homogénéiser les paramètres de l'écoulement, et particulièrement la vitesse. On émet à nouveau l'hypothèse que la bonne modélisation de la largeur des zones de recirculation joue un rôle clé dans la répartition des débits de sortie.

Profils de vitesses

Lorsque l'on s'intéresse aux profils de vitesses, on observe les mêmes résultats : les profils de vitesses entre la simulation avec modèle de turbulence et celle sans modèle de turbulence sont très similaires, et cela surtout dans la partie où la zone de recirculation est encore présente. Lorsque l'on s'éloigne de la zone de recirculation, les différences se creusent entre les deux courbes. On a tracé ci-dessous sept profils de vitesses dans la rue 4 en aval du carrefour avec la rue C, ces derniers ont été obtenus grâce à la même méthode que dans la partie analyse de sensibilité au maillage sur OpenFoam (moyenne de la vitesse sur une droite verticale, 24 moyennes réalisées sur une section en travers, regroupement des points pour former le profil de vitesse).

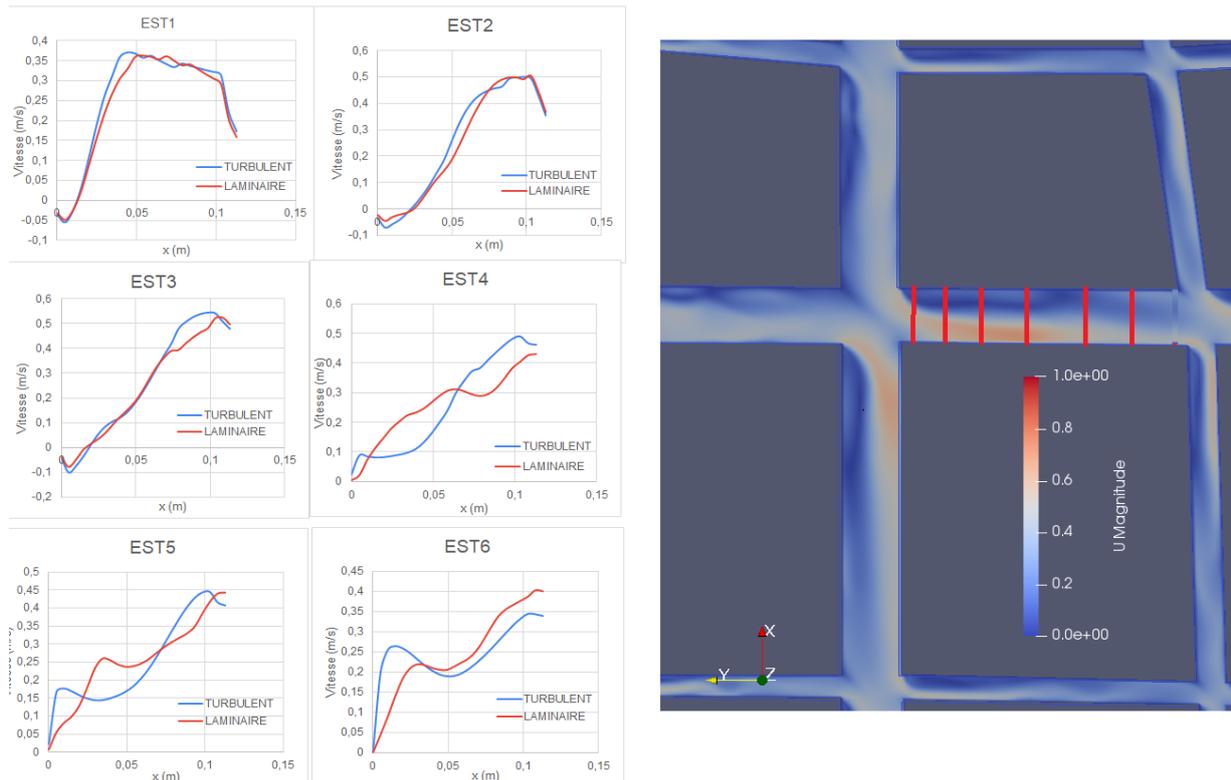


Figure 34 : Comparaison des profils de vitesse avec et sans modèle de turbulence sur OpenFoam dans la rue 4 en aval du carrefour C-4

C'est sans doute grâce à la bonne modélisation de ces zones de recirculations que la simulation en laminaire permet d'obtenir de bons résultats sur la répartition des débits de sortie, en effet comme on l'a vu dans la bibliographie sur les carrefours à 4 branches, les zones de recirculations jouent un rôle important pour la bonne modélisation de ce paramètre.

Temps de calcul

Vis-à-vis du temps de calcul, la simulation en laminaire a demandé nettement plus de ressources que la simulation avec un modèle de turbulence. En effet, pour la simulation en laminaire des problèmes de convergence ont été rencontrés, afin de résoudre ces problèmes il a fallu augmenter le nombre de boucle pour la résolution des équations, ce qui a considérablement augmenté le temps de calcul. On est passé de 900 h de calcul au total pour la simulation avec modèle de turbulence à 3040h pour la simulation en laminaire.

Conclusion

Pour conclure, cette étude de sensibilité a permis de mettre en avant l'influence du modèle de turbulence sur les écoulements sur OpenFoam. Au niveau de la répartition des débits, la simulation en laminaire possède de très bons résultats lorsque l'on compare aux valeurs expérimentales, et ils sont même légèrement meilleurs que la simulation avec un modèle de turbulence. Au niveau des hauteurs d'eau les résultats sont similaires même si on observe des oscillations à la surface libre dans la simulation en laminaire. Pour finir concernant les vitesses, au niveau de l'aval immédiat du carrefour (zones de recirculation), les vitesses sont bien modélisées, et les différences surviennent en aval de ces zones où l'on observe des différences conséquentes. Le régime des écoulements dans le pilote inondation étant turbulent, pour la suite de l'étude on choisira d'utiliser le modèle de turbulence RAS-komegaSST.

Cette partie conclut l'étude de sensibilité du modèle 3D. Dans cette partie on a retrouvé des phénomènes similaires à ceux observés lors de l'étude de sensibilité pour les modèles 2D (influence du modèle de turbulence sur la répartition des débits et création d'oscillation de la surface libre). Même si moins de paramètres ont été testés dans la partie pour le modèle 3D, on possède toutefois une base solide pour la suite de l'étude : la comparaison des trois modèles en régime permanent.

Etude en régime permanent

Suite à l'analyse de sensibilité, différents paramètres permettant de former des configurations jugées optimales pour chaque modèle ont été obtenus. Grâce à cela on va pouvoir comparer les résultats des différents modèles entre eux, mais aussi les comparer aux résultats expérimentaux obtenus grâce au pilote.

Dans cette partie on se placera comme précédemment dans la configuration où l'on injecte en entrée 80m³/h répartis à 50% entre les faces nord et ouest, ensuite pour chaque rue le débit est attribué au prorata de la largeur.

Plusieurs points de comparaisons seront étudiés dans cette partie : dans un premier temps on va s'intéresser à la modélisation des débits, à travers la répartition des débits de sortie mais aussi grâce à l'évolution des débits dans chaque rue. On s'intéressera ensuite aux hauteurs d'eau, d'un point de vue global dans un premier temps, puis à l'échelle de la rue. Pour finir, on étudiera les vitesses et les zones de recirculation au niveau d'un carrefour.

1.1. Etude de la modélisation des débits

Intéressons-nous dans un premier temps aux débits, et plus particulièrement à la répartition des débits de sortie. Pour l'estimation de la distribution des débits entre les faces Sud et Est, les trois modèles obtiennent de très bons résultats : tous les modèles estiment que la face Sud collecte 56% des débits sortant et la face Est 44%, avec moins de 1% d'écart observé entre les valeurs expérimentales et les valeurs numériques. Quant à la répartition des débits rue par rue, la conclusion est moins évidente car les résultats varient d'un modèle à l'autre, comme on peut le constater sur la figure ci-dessous.

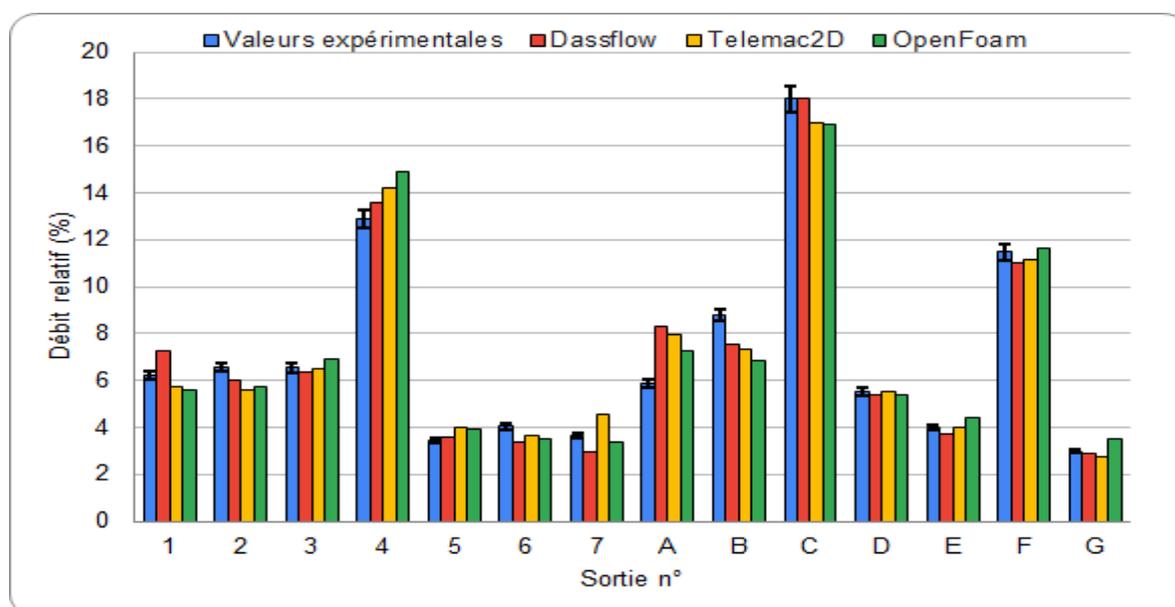


Figure 35 : Comparaison de la répartition des débits de sortie entre les différents modèles et les valeurs expérimentales

Sur ce graphique, on a placé les incertitudes liées à la mesure des valeurs expérimentales qui s'élèvent environ à 3% du débit mesuré.

De ce graphique, aucune tendance nette ne se dégage : aucun modèle ne surestime/sous-estime spécifiquement les débits dans les grandes ou petites rues. Bien qu'ils soient spécifiques pour chaque

sortie, les écarts par rapport aux valeurs expérimentales sont globalement similaires, comme on peut le constater dans le tableau ci-dessous, où l'on a calculé l'écart moyen entre les débits relatifs modélisés et les débits relatifs expérimentaux, ainsi que l'écart maximal observé pour une sortie entre le débit relatif modélisé et le débit relatif expérimental.

Tableau 7 : Comparaison des écarts moyens et maximums pour la répartition des débits de sortie entre les différents modèles et les valeurs expérimentales

	Dassflow	Telemac2D	OpenFoam
Ecart maximal observé (%)	2,45	2,11	2,05
Ecart moyen observé (%)	0,63	0,70	0,77

Les résultats semblent alors très similaires. Pour quantifier la bonne modélisation des débits de sortie par rapport aux valeurs expérimentales, on a réutilisé la somme carrée des erreurs relatives (issue de l'équation 17). On obtient les résultats suivants :

Tableau 8 : Différence des débits de sortie modélisés par rapport aux valeurs expérimentales

	Dassflow	Telemac2D	OpenFoam
Somme carrée erreurs relatives	0,307	0,299	0,248

Comme attendu, le modèle 3D obtient de meilleurs résultats avec une erreur de l'ordre de 0,25, tandis que les performances des deux modèles 2D sont très similaires avec une erreur un peu plus élevée aux alentours de 0,3.

Intéressons-nous maintenant à l'évolution des débits dans l'ensemble du pilote. On a estimé les débits dans chaque rue sur les différents logiciels à partir du même principe : on définit une section (ou une face), et le logiciel va calculer le flux passant à travers. Les différentes sections (ou faces) pour la mesure du débit ont été placées en aval de chaque rue de façon à mesurer le débit à un endroit où l'écoulement est le moins perturbé possible, comme le montre la figure ci-contre.

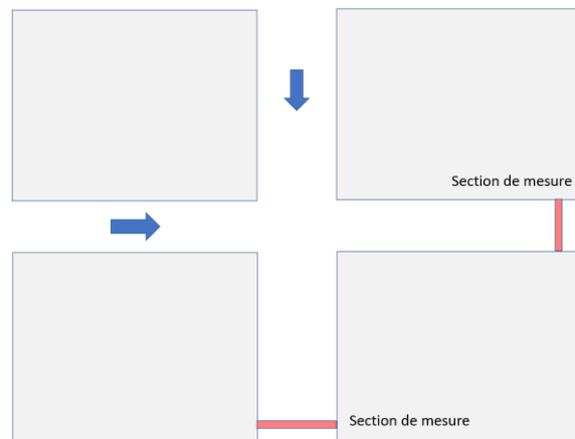


Figure 36 : Placement des sections de mesure de débits

On a pu réaliser une cartographie des débits dans le pilote ainsi qu'une cartographie des erreurs relatives par rapport aux valeurs expérimentales. Les différentes cartes ont été placées ci-dessous.

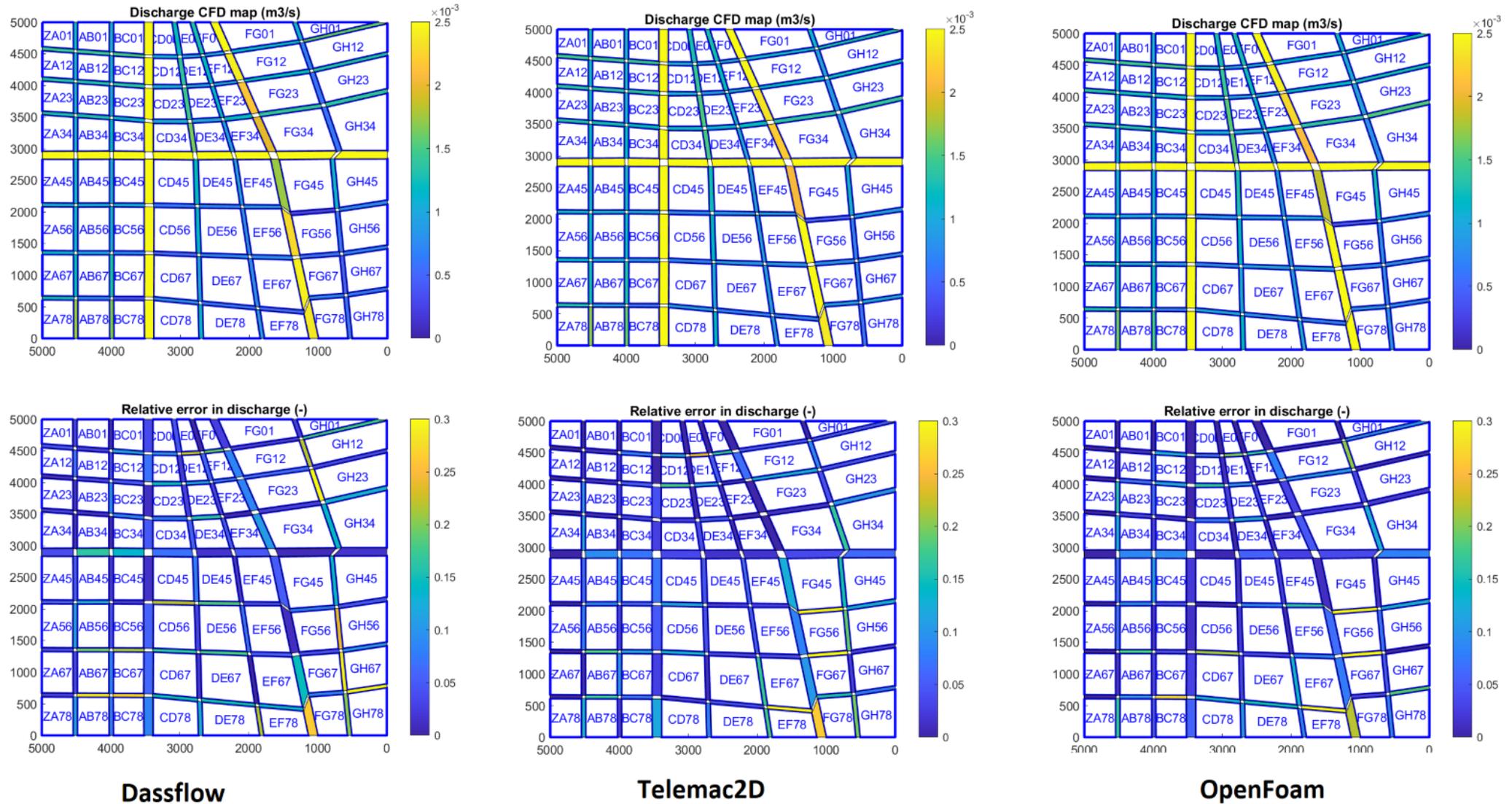


Figure 37 : Cartographie de la répartition des débits et des erreurs relatives par rapport aux valeurs expérimentales en fonction du logiciel utilisé

Les cartes se situant dans la ligne supérieure de cette image représentent la cartographie des débits dans le pilote inondation. Pour les trois modèles, les cartes sont très similaires : on retrouve les débits les plus importants dans les grands axes tandis que pour les rues étroites, les débits dépassent rarement 1,5 L/s. La seule variation nette se situe dans la rue F en aval du carrefour avec la rue 4, qui est un carrefour entre deux grands axes et dont les écoulements sont complexes à modéliser. Dans la ligne inférieure de cette image, on retrouve une carte des erreurs relatives par rapport aux débits expérimentaux. Même si les cartes restent très similaires, on discerne toutefois quelques singularités. Les erreurs les plus importantes ont généralement lieu à l'aval (Sud ou Est) dans les rues les plus étroites. Si autant de petites rues comportent des erreurs relatives importantes, cela vient du fait que pour des débits faibles une différence de quelques décilitres par seconde représente une part importante du débit. Une piste d'amélioration pour une plus juste comparaison des erreurs entre les grands axes et les rues étroites serait de comparer les débits rapportés à la largeur de la rue. Parmi les rues où se situent les erreurs les plus importantes, on retrouve les rues G, 7 (des rues étroites donc), mais aussi étonnamment la rue F. En effet en aval du carrefour avec la rue 4, pour les trois cartes d'erreurs on observe des erreurs au moins supérieures à 0,2.

Pour avoir une idée globale du logiciel reproduisant le mieux les débits au sein du pilote, on calcule la somme des erreurs relatives sur l'ensemble des débits des 112 sections. Le tableau ci-dessous présente les résultats.

Tableau 9 : Somme des erreurs relatives entre les débits modélisés et les débits expérimentaux sur l'intégralité des rues modélisées

	Dassflow	Telemac2D	OpenFoam
Somme des erreurs relatives (sans unité)	9,91	8,25	7,74

C'est la simulation de Dassflow qui obtient les plus mauvais résultats même si le résultat est relativement proche de Telemac2D. Sans surprise, c'est le modèle 3D qui obtient les meilleurs résultats.

Les fortes incertitudes liées à la mesure du débit pourraient être la cause principale des mauvais résultats de Dassflow. En effet lorsqu'on réalise un bilan de masse sur un carrefour avec les quatre valeurs de débit, on observe avec Dassflow des pertes importantes. Le tableau ci-dessous présente les pertes moyennes et maximales observées :

Tableau 10 : Valeurs moyenne et maximale de perte pour les bilans de masse sur un carrefour en fonction du modèle utilisé

	Dassflow	Telemac2D	OpenFoam
Perte bilan de masse moyenne (%)	1,55	0,1	0,13
Perte bilan de masse maximum (%)	4,11	0,23	0,97

Les valeurs obtenues avec Dassflow sont bien moins bonnes que celles des autres modèles, un facteur 10 les sépare. Plusieurs méthodes ont été testées pour résoudre ce problème : modifier l'emplacement des sections de mesures (qui étaient initialement situées plus à l'amont que sur la figure 36), cela a permis d'améliorer légèrement les performances. L'implémentation de lignes d'appui pour la mesure de débit a aussi été testée, mais cela s'est avéré compliqué à mettre en place sur les logiciels de maillage utilisés. La dernière piste explorée est la modification du code de calcul de mesure

du flux de masse pour une section sur le modèle qui n'est potentiellement pas complète. Cette dernière piste a été abandonnée face à la complexité de la tâche.

Cette partie nous a permis de comparer les performances des différents modèles concernant la modélisation des débits dans le pilote. Dans l'ensemble, les résultats sont assez similaires entre les différents modèles et cohérents vis-à-vis des valeurs expérimentales. Le modèle 3D est celui qui est le plus fidèle par rapport aux valeurs expérimentales tandis que les modèles 2D sont légèrement moins performants, et notamment Dassflow avec lequel un problème de mesure de débit a été rencontré, et bien que des pistes d'améliorations aient été proposées, ces dernières n'ont pas abouties dû à des contraintes temporelles.

1.2. Etude de la modélisation des hauteurs d'eau

On va maintenant s'intéresser à la modélisation des hauteurs d'eau par les différents modèles. Pour rappel les hauteurs d'eau sont un des facteurs principaux pour l'établissement de la carte des aléas d'un PPRI, une bonne modélisation des hauteurs d'eau est donc essentielle.

Pour les trois codes de calculs, on observe que les hauteurs d'eau les plus élevées sont observées dans le coin nord-ouest et les plus faibles dans le coin sud-est. En termes de valeurs extrêmes les trois modèles ont des résultats semblables : en amont une différence de 1 mm est observée pour la hauteur maximale entre les trois modèles, tandis qu'en aval on retrouve cette différence de 1 mm pour les valeurs de hauteurs d'eau minimale pour OpenFoam et Telemac2D, un écart plus net de 6 mm est observé pour Dassflow. La valeur aval est toutefois fortement liée à la modélisation de la répartition des débits et donc si la modélisation des débits est différente il est logique de retrouver des hauteurs différentes. On peut d'ailleurs constater sur la figure 35 que les débits pour la sortie 7 entre Telemac2D et Dassflow ne sont pas similaires.

Afin de mieux constater les différences, on a tracé l'évolution des hauteurs d'eau et de la charge spécifique au sein des rues 4 et C. Pour rappel la charge spécifique se calcule avec la formule ci-dessous.

$$H_s = h + \frac{v^2}{2g} = h + \frac{Q^2}{S^2 2g} \quad (\text{équation 19})$$

Avec : h la hauteur d'eau (m)

V la vitesse du fluide (m/s)

Q le débits (m³/s)

S la surface occupée par l'écoulement (m²)

Les points de mesures pour les débits étant placés à l'aval des rues, juste en amont des carrefours (voir figure 36), on ne connaît pas précisément les débits dans les carrefours. Pour le calcul de la charge spécifique dans un carrefour, on a utilisé la valeur de débit en aval de ce carrefour. Pour les trois modèles numériques, l'évolution de la hauteur d'eau et de la charge spécifique suit globalement la même tendance que les courbes de la figure ci-dessous : en amont la charge spécifique et la hauteur d'eau sont plutôt proches (seulement 0,002m de différence) tandis que plus on se rapproche de l'aval et plus les deux courbes s'éloignent. A la fin on constate un écart de 0,006m entre les deux. Physiquement cela traduit le fait qu'en amont, la quasi-totalité de l'énergie est contenue dans la hauteur d'eau, tandis qu'en aval la vitesse augmente et représente une part plus importante dans l'énergie de l'écoulement.

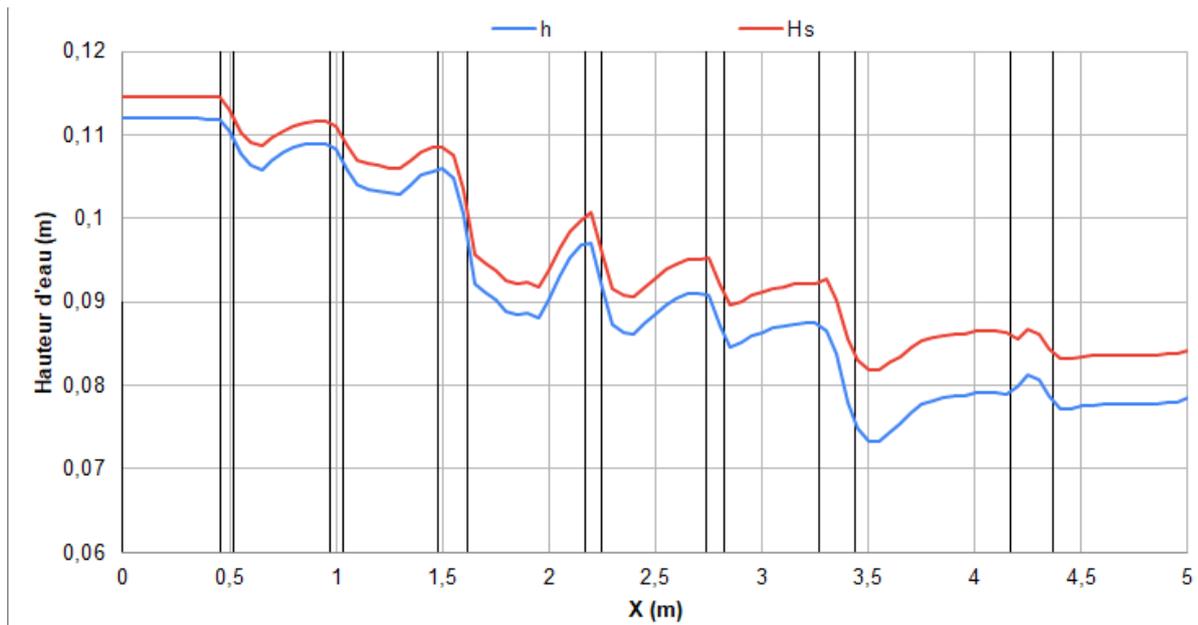


Figure 38: Evolution de la charge spécifique et de la hauteur d'eau modélisée sur Dassflow le long de la rue 4

Maintenant intéressons-nous aux différences sur la hauteur d'eau et la charge spécifique en fonction du modèle numérique utilisé. On a tracé ci-dessous l'évolution des hauteurs d'eau pour la rue 4 en fonction du modèle numérique. L'évolution de la charge spécifique a été placée en [Annexe 7](#).

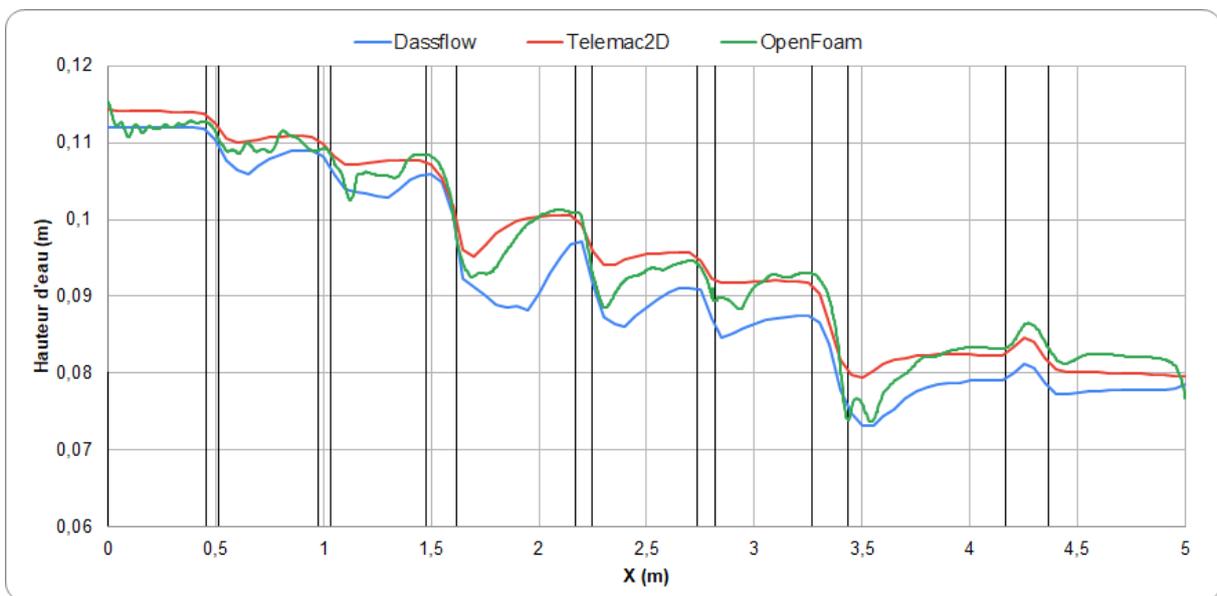


Figure 39 : Evolution de la hauteur d'eau le long de la rue 4 en fonction du modèle numérique

Sur ces différentes figures, plusieurs éléments retiennent notre attention : quasiment tout le long de la ligne d'eau on observe que les paramètres obtenus avec Dassflow ont les valeurs les plus faibles et à l'inverse ceux obtenus avec Telemac2D ont les plus élevées, et entre ces deux extrêmes on retrouve les valeurs obtenues avec OpenFoam. C'est au niveau des carrefours que la modélisation des paramètres est la plus similaire entre les trois modèles et notamment pour les gros carrefours, tandis qu'au niveau des rues des différences nettes sur l'évolution des hauteurs d'eau apparaissent entre les modèles.

Les carrefours ont une forte influence sur les hauteurs d'eau : le niveau d'eau chute en aval immédiat du carrefour (d'environ 1 cm pour les plus gros carrefours et de quelques millimètres pour les plus petits), ensuite entre deux carrefours le niveau d'eau remonte progressivement.

Les carrefours représentent la perte de charge la plus importante pour les écoulements du pilote, les pertes de charges linéaires sont négligeables face aux carrefours. Cette observation est valable car le cas d'étude est un modèle réduit, il serait intéressant de voir quelle est l'influence des pertes de charges linéaires dans un cas à échelle réelle.

Il a été possible d'obtenir les hauteurs d'eau expérimentales dans différentes rues du pilote inondation. La mesure s'effectue à l'aide d'une caméra qui va se placer devant les bords en plexiglas, sur lesquels il est possible de capturer l'évolution de la surface libre. Durant le post-traitement de la vidéo, les hauteurs d'eau seront obtenues par analyse d'images en détectant l'endroit où un gradient de couleur élevé est présent. Un des défauts de cette méthode de mesure de hauteur est qu'il est impossible d'avoir accès aux hauteurs d'eau dans les carrefours, car ils ne sont pas à proximité d'un bord en plexiglas.

On a tracé ci-dessous l'évolution de la surface libre dans la rue C, avec les données expérimentales ainsi qu'avec les données provenant des modèles numériques.

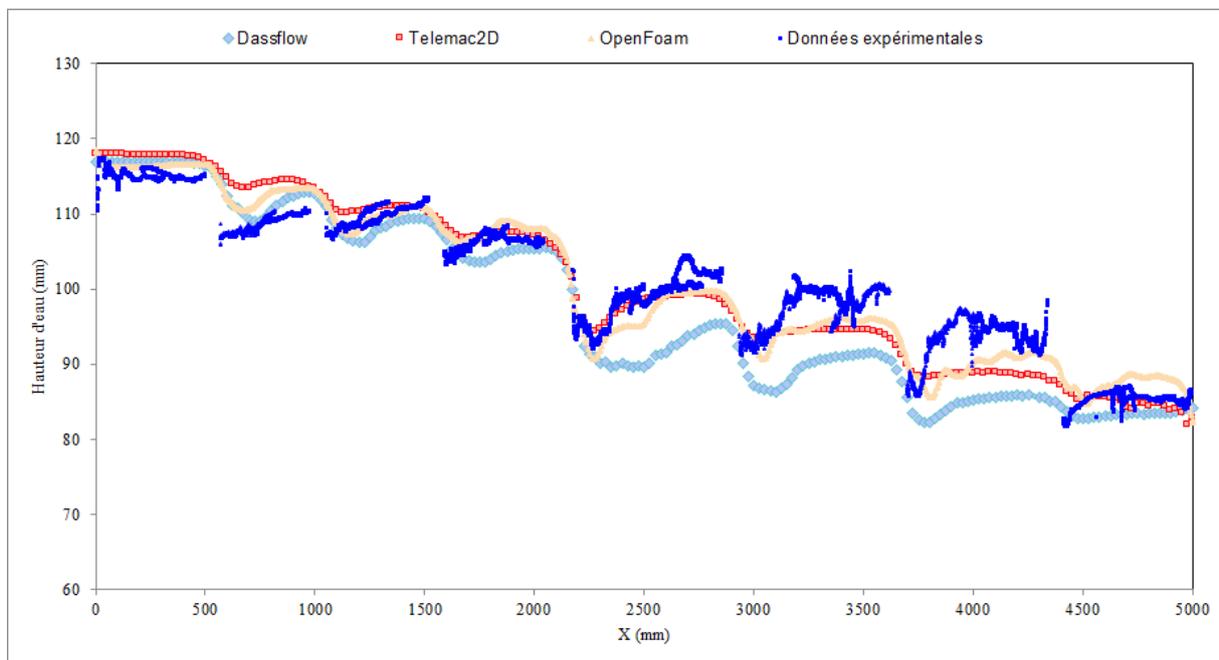


Figure 40 : Comparaison de l'évolution de la surface libre dans la rue C entre les données expérimentales et numériques

Dans la partie amont du pilote (avant la rencontre avec la rue 4), les valeurs expérimentales sont très similaires aux valeurs numériques que ce soit pour la hauteur d'eau en entrée de rue ou bien l'évolution de la surface libre en aval d'un carrefour. En aval du croisement avec la rue 4, on observe un plus grand écart entre les résultats, les modèles ne parviennent plus à représenter correctement l'évolution des hauteurs d'eau en aval des carrefours, et notamment pour Dassflow dont les valeurs sont sous-estimées avec presque 1 cm d'écart par endroit. Cet écart est moindre pour Telemac2D et OpenFoam, même si on observe des différences d'environ 0,5 cm par endroit. Les valeurs expérimentales sont plutôt instables à certains endroits, notamment en aval de la rue 4. Pourtant lors du traitement des données la caméra filme durant une période de 4 secondes et les valeurs de hauteurs sont ensuite moyennées sur la période. Cela montre la grande variabilité des hauteurs d'eau dans cette zone.

Dans cette partie on s'est intéressé à la modélisation des hauteurs d'eau par les différents logiciels, ainsi que à la charge spécifique. D'un point de vue global, les résultats entre les trois modèles sont plutôt similaires : les hauteurs d'eau en entrée et en sortie sont cohérentes avec les valeurs expérimentales, un gradient de hauteur d'eau est observé entre le coin Nord-Ouest et le coin Sud-Est, en amont la majorité de l'énergie de la charge spécifique est contenue dans la hauteur d'eau tandis qu'en aval, dû à l'accélération des écoulements, une part non négligeable est contenue dans la vitesse. Lorsque l'on regarde au niveau d'une rue, de nettes différences apparaissent entre les modèles. C'est notamment le cas pour la modélisation de la surface libre en aval des carrefours dans la zone aval du pilote inondation pour laquelle des valeurs bien inférieures aux valeurs expérimentales sont obtenues avec Dassflow, alors que des valeurs cohérentes sont obtenues avec les deux autres modèles.

1.3. Etude de la modélisation des vitesses

Le dernier point de comparaison pour cette étude en régime permanent est l'étude des vitesses et des zones de recirculation. Pour la comparaison de ces grandeurs, on s'est focalisé sur le carrefour C-4. En effet, c'est le carrefour entre deux grands axes où la zone de recirculation est importante et donc facilement étudiable expérimentalement.

Les profils de vitesses expérimentaux ont été obtenus grâce à des capteurs à ultrasons. Les profils de vitesses présentés ci-dessous sont constitués de six points de mesure sur la section. Les profils de vitesses numériques pour les modèles 2D ont été obtenus simplement en traçant la vitesse sur une section. Pour le modèle 3D, les profils de vitesses ont été réalisés avec la même méthode que dans l'étude de sensibilité, c'est à dire en moyennant la vitesse sur la hauteur pour vingt-quatre points d'une même section pour ensuite tracer le profil de vitesse.

Sur les quatre branches du carrefour C-4, une demi-douzaine de profils de vitesses espacés de façon régulière a été tracé. Il est ainsi possible de visualiser l'évolution des profils de vitesse en amont et en aval sur ce carrefour. La figure tracée ci-dessous représente les profils de vitesses de la rue C en aval de ce carrefour.

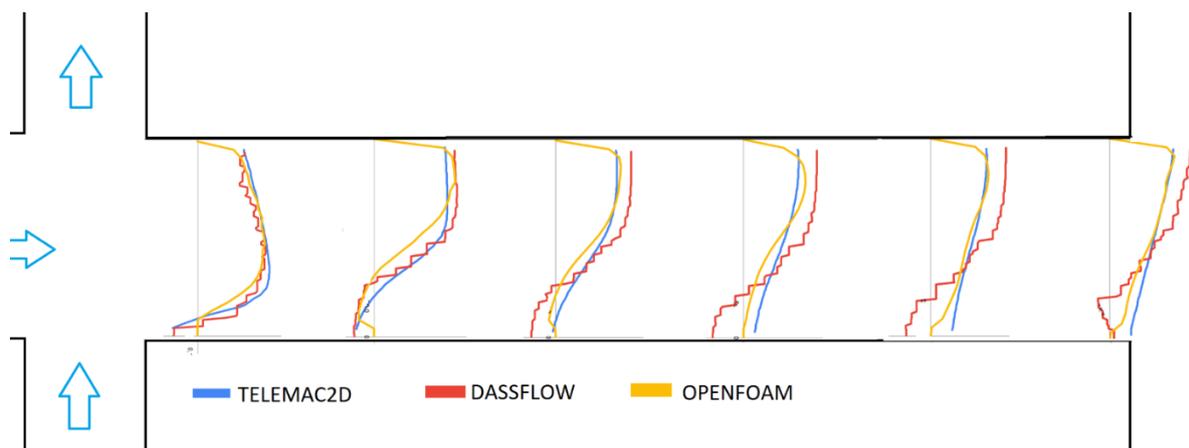


Figure 41 : Cartographie de profils de vitesse modélisés par différents logiciels dans la rue C en aval du carrefour C-4

Cette figure permet de visualiser les différents phénomènes s'établissant à l'aval d'un carrefour à quatre branches : une zone de recirculation et une zone de contraction. La zone de recirculation (vitesse négative ou quasi nulle) est présente jusqu'au quatrième profil de vitesse environ pour les résultats obtenus avec Telemac2D et OpenFoam, tandis qu'elle se développe tout le

long de la rue sur Dassflow. Sur les différents profils de vitesse, on observe une forte asymétrie de l'écoulement qui s'atténue toutefois lorsque la zone de recirculation se termine.

C'est lorsque la zone de recirculation est présente (pour Telemac2D et OpenFoam) que les trois modèles fournissent les résultats les plus similaires entre eux. Une fois qu'elle est clôturée, l'évolution des profils de vitesse est différente et notamment entre les logiciels possédants ou non, un modèle de turbulence. Ainsi OpenFoam et Telemac2D fournissent des résultats plutôt similaires : la vitesse tend à s'homogénéiser sur la section tout en conservant un profil légèrement asymétrique. A contrario, la zone de recirculation est bien présente tout le long de la rue et aucune homogénéisation n'est observée pour les résultats issus de Dassflow. Ce phénomène a été expliqué dans les parties précédentes par le fait que la turbulence tend à homogénéiser les paramètres des écoulements. Sur ces profils de vitesse il est aussi possible d'observer une particularité du modèle 3D : la prise en compte des effets de bords. En effet, on constate que la vitesse est belle et bien nulle au niveau des parois.

On a tracé ci-dessous la même figure que précédemment, cette fois avec les profils de vitesse de la rue 4 en aval du carrefour accompagnés des profils de vitesse issus des valeurs expérimentales.

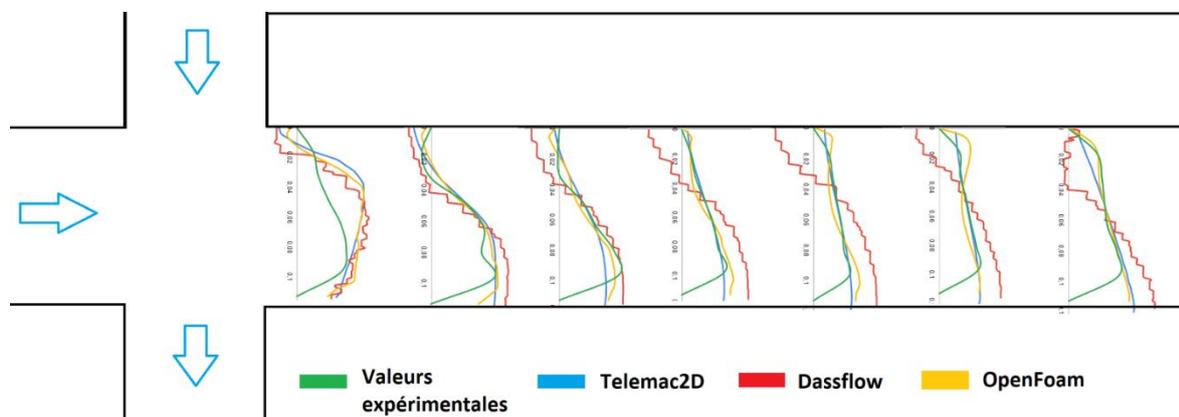


Figure 42 : Cartographie de profils de vitesse modélisés par différents logiciels dans la rue 4 en aval du carrefour C-4

Excepté le premier, tous les autres profils de vitesse expérimentaux sont similaires aux profils de vitesses issus de Telemac2D et OpenFoam tant sur la forme que sur les valeurs.

Les trois premiers profils de vitesses issus de Dassflow sont eux aussi plutôt similaires, mais ensuite la non prise en compte de la turbulence va rendre les profils asymétriques très différents des profils de vitesses expérimentaux.

Intéressons-nous maintenant aux zones de recirculations. La zone d'étude considérée est toujours le carrefour C-4 et la rue d'intérêt est la rue C. Les données expérimentales font apparaître les vitesses dans le plan horizontal et dans le plan vertical. Elles ont été obtenues grâce à un capteur de vitesse à ultrason et réalisées sur un plan horizontal à 5 cm au-dessus du fond. Pour réaliser les figures ci-dessous, 200 points de mesures ont été réalisés avec au total deux angles de mesures différents.

Les données numériques pour les modèles 2D sont les vitesses moyennes (et non pas les vitesses sur un plan horizontal à 5 cm au-dessus du fond du pilote inondation), tandis que pour le modèle 3D ce sont les vitesses horizontales et verticales dans un plan horizontal à 5 cm au-dessus du fond du pilote inondation. Les vitesses dans le plan vertical n'ont pas pu être obtenues pour les modèles 2D, car par définition les paramètres de l'écoulement sont moyennés sur la hauteur. La figure placée à la suite présente les vitesses horizontales dans la rue C en aval du carrefour C-4. La mise en forme des images

en carrée a été réalisée pour s'adapter aux valeurs expérimentales, les images non déformées sont placées en annexes (Annexe 8).

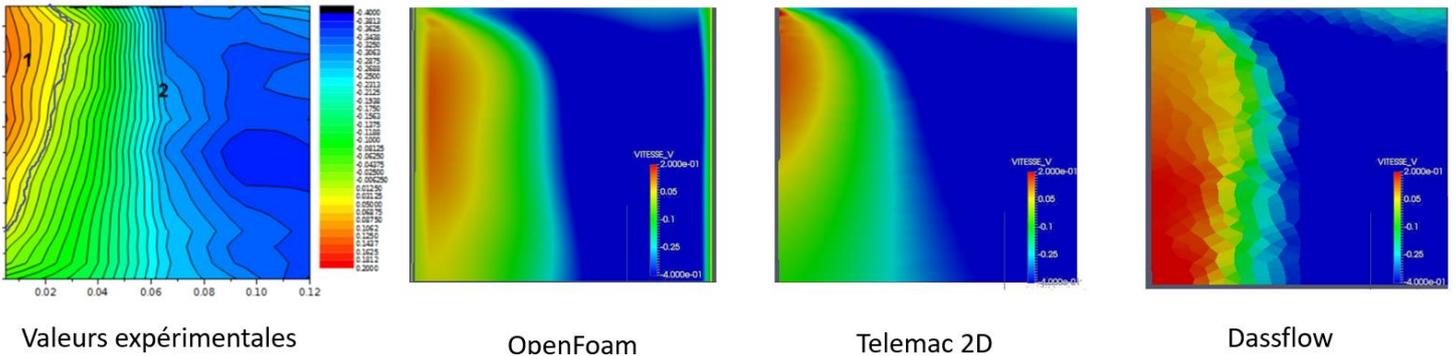


Figure 43 : comparaison des vitesses horizontales expérimentales et numériques en aval du carrefour C-4 dans la rue C

D'un modèle à l'autre les champs de vitesses sont bien différents. La longueur, la largeur et l'intensité de la zone de recirculation sont des paramètres qui varient grandement. Sur ces critères, le modèle 3D est celui qui est le plus ressemblant aux valeurs expérimentales. Les champs de vitesses modélisés avec les modèles 2D sont moins similaires au champ de vitesses expérimental, ils ont chacun leurs particularités : pour le champ de vitesses obtenu avec Telemac2D, la zone de recirculation est plutôt courte par rapport aux valeurs expérimentales, toutefois l'intensité et la largeur sont bien modélisées. Pour le champ de vitesses obtenu avec Dassflow, la zone de recirculation est bien trop longue, elle ne se referme pas (comme on a pu le constater sur les profils de vitesse) et l'intensité ne correspond pas aux valeurs expérimentales, seule la largeur est correctement modélisée.

Dans cette partie, on a mis en évidence l'importance d'un modèle de turbulence pour la bonne modélisation des phénomènes hydrauliques se déroulant en aval d'un carrefour. Le modèle 3D modélise nettement mieux les zones de recirculation, bien qu'avec un modèle 2D prenant en compte la turbulence, on obtient des résultats corrects.

1.4. Conclusion

Au cours de ce chapitre, la modélisation en régime permanent des écoulements urbains a été étudiée. Cette étude a notamment porté sur trois paramètres : les débits, les hauteurs d'eau et les vitesses. Entre les trois modèles, la modélisation des débits en régime permanent fournit de bons résultats, puisque des valeurs similaires sont obtenues, avec tout de même un léger avantage pour le modèle 3D. Le seul point négatif de cette partie porte sur les erreurs de mesure de débit pour le logiciel Dassflow. Concernant les hauteurs d'eau, d'un point de vue global les valeurs des hauteurs d'eau modélisées sont très similaires entre les trois modèles. Lorsque l'on s'intéresse aux hauteurs d'eau au niveau d'une rue, des différences apparaissent et notamment pour l'évolution de la surface libre en aval d'un carrefour pour une rue se situant dans la partie inférieure du pilote inondation. Cette conclusion serait sans doute différente pour un modèle à taille réelle où l'influence du carrefour serait moindre. Enfin, lors de la modélisation des vitesses, les logiciels possédant un modèle de turbulence fournissent des résultats plus proches des valeurs expérimentales. En comparaison aux modèles 2D, le modèle 3D fournit de bien meilleurs résultats pour les phénomènes liés à la vitesse pour des écoulements de type inondation urbaine. Si une étude nécessite une modélisation fine des vitesses (ou des paramètres hydrauliques en découlant), l'utilisation d'un modèle 3D est judicieuse.

A travers ces différentes parties, on a vu que le logiciel Dassflow semble afficher quelques faiblesses dans la modélisation d'écoulements de type urbain. L'absence de modèle de turbulence joue un rôle important dans ces résultats.

Etude en régime transitoire

Dans la réalité, quasiment toutes les inondations sont assimilables à des phénomènes transitoires plutôt que des phénomènes stationnaires. Une étude de la capacité des modèles numériques à reproduire les écoulements de type d'inondation urbaines est donc plus cohérente en régime transitoire. Pour ce faire, des consignes de débits variables dans le temps vont être imposées aux pompes du pilote, et on observera ensuite les différences entre les valeurs expérimentales et les valeurs numériques des différents codes de calcul.

Dans cette étude en régime transitoire, en termes de valeurs expérimentales, seuls les débits ont pu être instrumentés à cause de contraintes techniques, il n'y aura donc pas d'étude sur l'évolution des hauteurs d'eau ou des vitesses dans cette partie.

Les maillages et les configurations numériques utilisés pour cette étude sont les mêmes que ceux utilisés dans l'étude en régime permanent. L'unique changement concerne la condition aux limites amont qui va servir à générer les hydrogrammes.

Cette étude se divise en deux parties : une première où les hydrogrammes d'entrées possèdent une forme de signaux sinusoïdaux, et une deuxième partie où l'on s'est intéressé à la modélisation d'un évènement similaire à ce que l'on pourrait observer dans la réalité.

1.1. Etude en régime transitoire pour une consigne de type sinusoïdale

Pour cette première étude en régime transitoire, l'objectif est d'étudier si les modèles numériques arrivent à reproduire fidèlement l'évolution des débits au sein d'un régime de carrefours. Pour cette expérience, une configuration classique de $80\text{m}^3/\text{h}$ est appliquée au pilote (répartition à 50% entre les faces nord et ouest, puis répartition du débit par rue au prorata de la largeur de la rue), avec comme spécificité que pour les pompes des trois grands axes (rue 4, C et F), un hydrogramme sinusoïdal d'amplitude de $\pm 50\%$ autour du débit en régime permanent associé à une période de 20 secondes est appliquée.

Au total la durée de l'expérience est de 800 secondes dont initialement 300 secondes de régime permanent avec une configuration à $80\text{ m}^3/\text{h}$. Pour illustrer ce qui a été dit précédemment, la figure ci-dessous présente l'hydrogramme de la rue C et de la rue 1. La vidange du pilote ne sera pas étudiée.

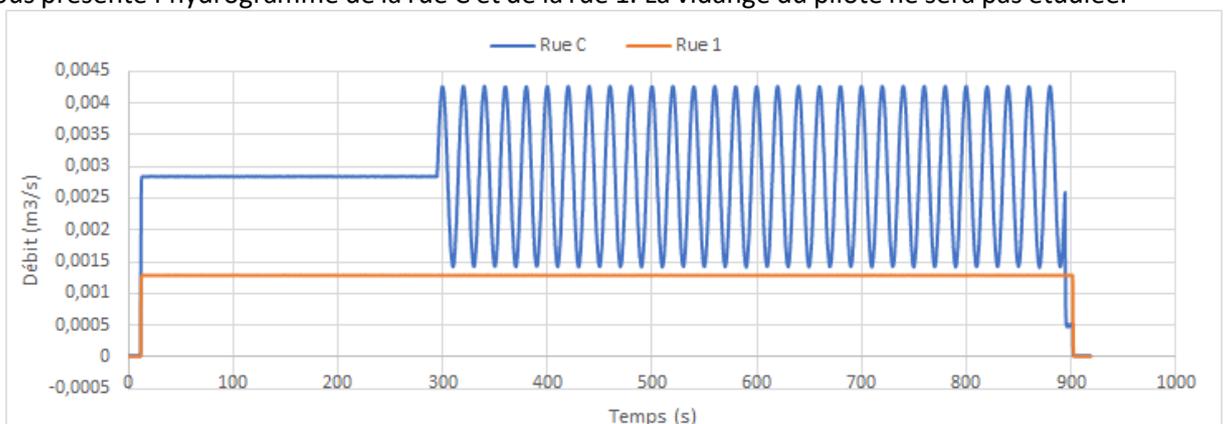


Figure 44 : Hydrogramme utilisé pour l'étude en régime transitoire pour les rues C et 1

Pour les modèles 2D, on a reproduit avec exactitude les hydrogrammes d'entrées, tandis que pour le modèle 3D, cet hydrogramme a été adapté afin de réduire les ressources numériques utilisées : le temps de régime permanent au début est de 100 secondes au lieu de 300, et seulement 600 secondes de régime transitoire ont été modélisées. La figure ci-dessous représente l'hydrogramme de débit de sortie de la rue C pour un temps compris entre 280 et 400 secondes, soit la transition entre le régime permanent et le régime transitoire.

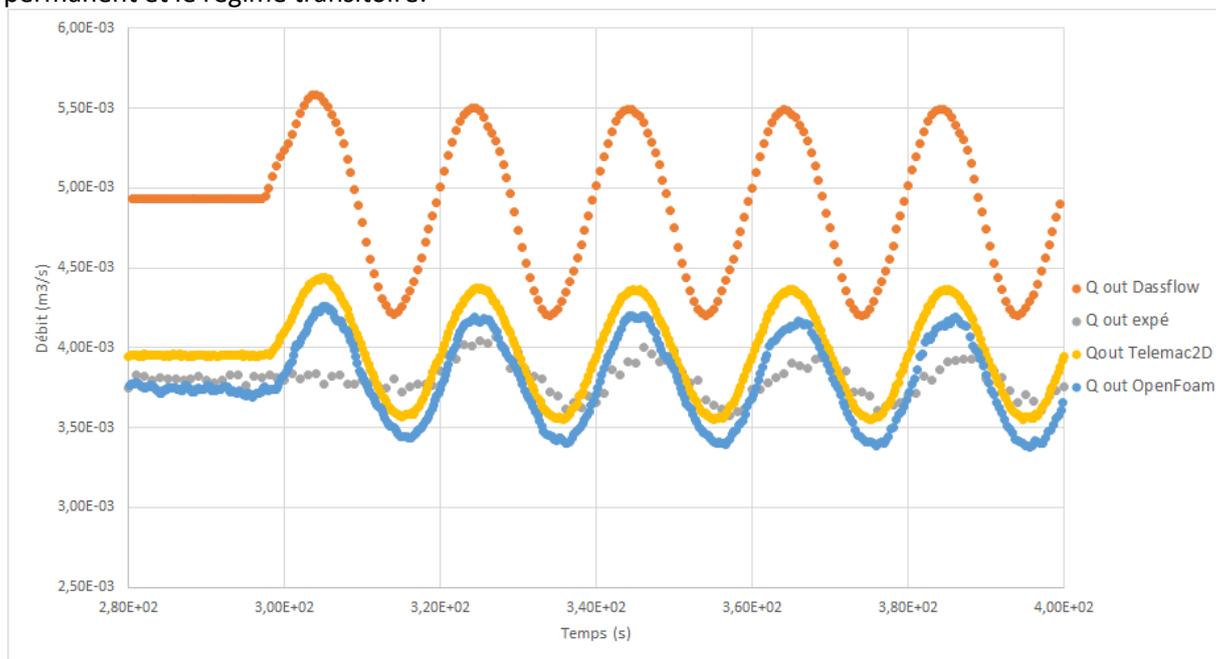


Figure 45 : Hydrogramme en sortie de rue C entre 280 et 400 secondes

Cette figure est représentative des phénomènes observés dans le pilote inondation pour l'imposition d'un régime sinusoïdal sur différentes rues.

L'écart que l'on constate entre les différents débits moyens des signaux sinusoïdaux vient du fait que les différences obtenues pour la répartition des débits en régime permanent restent présentes même lorsque l'on impose le régime transitoire.

Concernant la forme des hydrogrammes en régime transitoire, les trois modèles numériques reproduisent avec exactitude les périodes du signal sinusoïdal. Cette conclusion n'est pas vérifiée pour les amplitudes : au-delà du décalage initial sur les débits, la plage de variation n'est pas la même selon le modèle numérique. Sur la figure ci-dessus, Dassflow possède une amplitude de 1,3 L/s tandis que pour ceux issus de Telemac2D ou OpenFoam les valeurs sont de l'ordre de 0,85 L/s. Une différence assez conséquente qui est toutefois exceptionnelle puisque l'écart moyen entre les valeurs issues de Dassflow et celles issues de Telemac2D ou OpenFoam se situent généralement aux alentours de 0,1 L/s. Dans la comparaison précédente, Telemac2D et OpenFoam ont été regroupés car globalement les amplitudes des hydrogrammes issus de ces deux codes de calculs possèdent des valeurs très similaires : l'écart moyen est d'environ 0,02 L/s entre les deux modèles.

Etonnamment on constate que les amplitudes des hydrogrammes issus de Dassflow sont plus importantes que ceux des deux autres modèles numériques pour l'ensemble des hydrogrammes de la face Sud, et inférieurs sur l'ensemble de la face Est.

L'hydrogramme issu des valeurs expérimentales possède une allure différente de ceux issus des modèles numériques : il est plus plat et possède un léger déphasage. Ces différences s'expliquent par le fait que la mesure de débit ait lieu dans un bac à l'aval du pilote inondation. Le temps que l'écoulement traverse la conduite puis le bac cause le déphasage (de l'ordre de 2-3 secondes), et le transit entre la rue, le bac et la conduite va dissiper légèrement l'écoulement à travers des phénomènes de convergence/divergence et cela va atténuer l'amplitude de l'hydrogramme.

La collecte de données expérimentales pour des phénomènes transitoires plus fins nécessitera la mise en place d'un autre type d'instrumentation.

En plus de la forme des amplitudes, l'autre critère étudié dans cette partie est le volume d'eau transitant par une sortie au cours d'une période de sinusoïde. Pour obtenir cette valeur on a utilisé la formule ci-dessous.

$$V = \sum_i Q(i) * (t(i + 1) - t(i)) \quad (\text{équation 20})$$

Avec :

V le volume d'eau sur la période considérée

Q(i) le débit à l'instant i

t(i) le temps à l'instant i (le temps n'est pas constant car pour rappel Dassflow et OpenFoam utilisent des pas de temps adaptatifs)

Dans notre cas le volume a été calculé sur pour $t \in [500,600]$ soit sur 5 périodes, et on a ensuite divisé par le nombre de périodes pour avoir seulement le volume moyen sur une période. Le tableau ci-dessous présente les résultats obtenus :

Tableau 11 : Volume sortant pour une période de sinusoïde

Rue	Volume (m3) pour une période			
	Valeur expérimentale	Dassflow	Telemac2D	OpenFoam
1	0,027	0,029	0,026	0,025
2	0,026	0,024	0,025	0,025
3	0,027	0,026	0,029	0,031
4	0,053	0,058	0,063	0,064
5	0,016	0,016	0,018	0,018
6	0,015	0,015	0,016	0,016
7	0,014	0,013	0,020	0,015
A	0,037	0,040	0,035	0,033
B	0,035	0,040	0,032	0,031
C	0,077	0,098	0,079	0,076
D	0,024	0,026	0,024	0,024
E	0,017	0,016	0,018	0,020
F	0,051	0,047	0,049	0,052
G	0,013	0,012	0,012	0,016

Les valeurs ayant plus de 10% d'écart par rapport aux valeurs expérimentales ont été colorées en rouge, en orange on retrouve les valeurs ayant entre 5 et 10% d'écart et enfin en vert, celle ayant un écart inférieur à 5%.

On constate à partir des résultats de ce tableau que le modèle 3D est celui qui possède le plus de valeurs ayant un écart supérieur à 10% par rapport aux valeurs expérimentales. A contrario, c'est Telemac2D qui semble modéliser les volumes sortant avec le moins d'erreurs importantes. C'est la première fois que les codes de calculs 2D fournissent des résultats plus justes que OpenFoam, toutefois cette étude pour des signaux sinusoïdaux n'est pas représentative des phénomènes qui se déroulent lors des inondations, c'est pourquoi nous allons étudier dans la prochaine sous-partie la modélisation des débits pour un hydrogramme de type triangulaire en entrée.

1.2. Etude en régime transitoire pour une consigne de type triangulaire

La différence par rapport à la partie précédente concerne le type de consigne que l'on impose aux pompes. L'objectif est de simuler un phénomène d'inondation qui pourrait se dérouler dans la réalité. Pour cela on a utilisé un hydrogramme de type triangulaire qui est fréquemment utilisé pour modéliser l'évolution du débit lors d'une inondation.

Dans un premier temps, on impose un régime permanent avec un débit total injecté de 20 m³/h. Au bout de 100 secondes se met en place le début de l'inondation réelle : une montée progressive du débit sur 50 secondes vers un débit d'injection total qui correspond à un débit total injecté de 100 m³/h, ensuite on impose une phase de décroissance des débits pour un retour à l'état initial. Après 100 secondes de régime permanent, un nouvel hydrogramme de type triangulaire possédant les mêmes caractéristiques que le premier est imposé aux pompes. La figure ci-dessous représente les hydrogrammes utilisés.

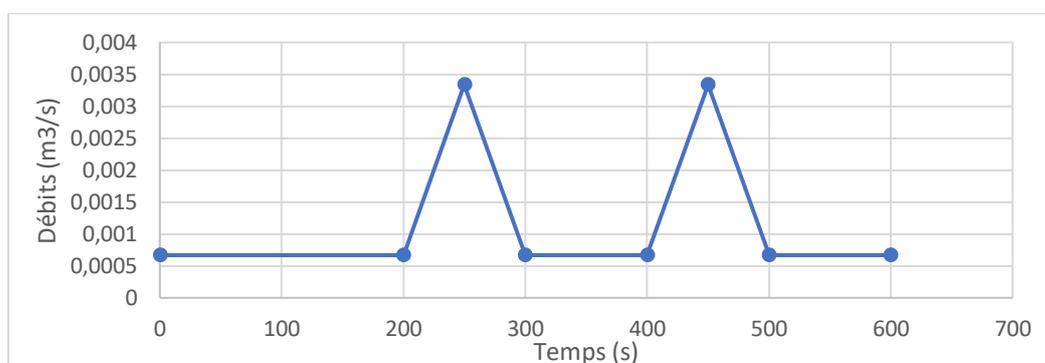


Figure 46 : Hydrogramme d'entrée appliqué à la rue C

La figure ci-dessous représente l'évolution temporelle des débits de sortie dans la rue 4 en fonction de l'origine des données. Les résultats obtenus possèdent logiquement la même forme que les hydrogrammes d'entrées. Des figures représentant l'évolution de débits dans d'autres rues ont été placées en [Annexe 9](#).

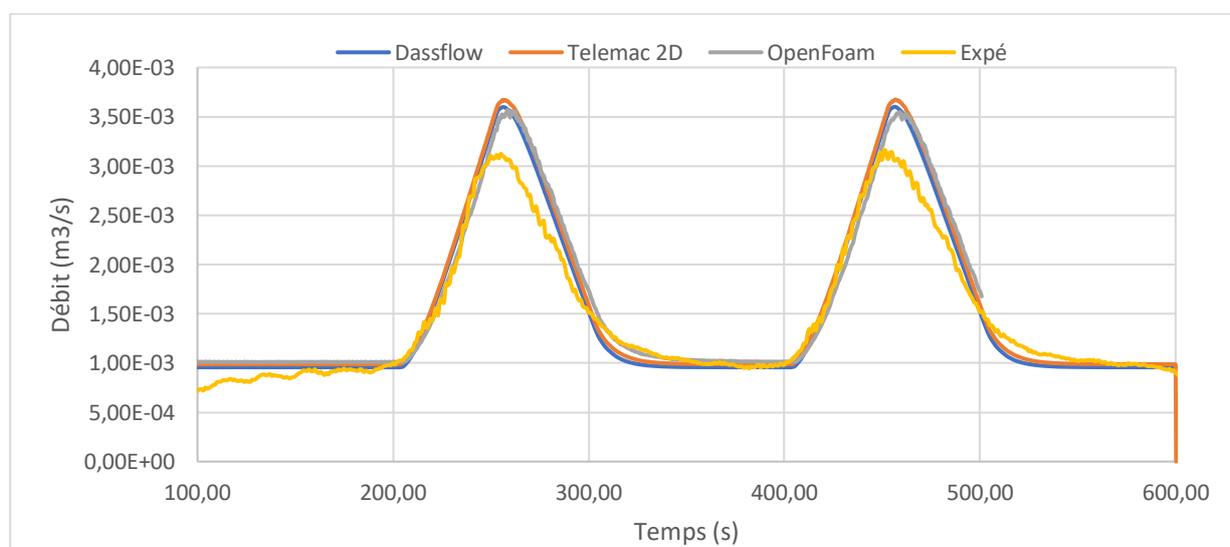


Figure 47 : Comparaison de l'évolution du débit de sortie dans la rue 4 en fonction du code de calcul utilisé

La modélisation du régime transitoire semble correcte : les trois modèles fournissent un hydrogramme très similaire, que ce soit pour la valeur du pic de crue ou bien le temps de montée/descente. On retrouve sensiblement les mêmes valeurs maximales au niveau des pics de crue pour les différentes sorties : une différence moyenne de 10% environ est observée entre les trois codes de calculs (allant de 0,05 à 0,5L/s). Globalement, les valeurs de pics de débits les plus similaires aux valeurs expérimentales sont issus de OpenFoam et de Dassflow.

En ce qui concerne le volume transitant pour une période, les résultats obtenus sont bien différents que ceux observés dans la première sous partie : dans ce nouveau cas, Telemac2D fournit les résultats les plus éloignés des valeurs expérimentales. En effet, on observe en moyenne 20% d'erreur relative entre le volume transitant issu de Telemac2D et les valeurs expérimentales, tandis que pour Dassflow et OpenFoam on obtient respectivement 14% et 13% d'erreur relative. On a placé en annexe le tableau qui regroupe toutes les valeurs ([Annexe 10](#)).

Même si l'échelle de la figure ne permet pas de le constater, les différences de modélisation des débits en régime permanent entre les différents codes de calculs sont encore bien présentes et suivent les mêmes tendances que pour la configuration à 80 m³/h. On retrouve aussi le défaut de mesure des débits expérimentaux mis en avant dans la sous partie précédente qui fait que les hydrogrammes expérimentaux soient plus plat et légèrement déphasé, et cela dû au fait que les valeurs soient mesurées dans un bac à l'aval.

Cette partie sur l'étude de la modélisation des débits de sortie en régime transitoire apporte les mêmes conclusions que la partie précédente à savoir, une bonne modélisation des phénomènes transitoires (pics de débits et volumes transités) avec toutefois une conservation des défauts de modélisation des débits en régime permanents pour les différents codes de calculs. Contrairement à la sous partie précédente qui portait sur la modélisation de signaux sinusoïdaux, cette fois c'est Telemac2D qui fournit les valeurs les plus éloignées des valeurs expérimentales.

1.3. Conclusion

Pour l'étude en régime transitoire, seule la modélisation des débits de sortie a été étudiée pour des raisons d'instrumentations du pilote inondation de ICUBE. Deux types de signaux ont été imposés aux pompes : un signal sinusoïdal et un hydrogramme similaire à un phénomène d'inondation. Des résultats assez similaires aux valeurs expérimentales ont été obtenues pour les deux signaux, que ce soit en termes de valeur maximale ou d'amplitude de l'hydrogramme mais aussi en termes de volumes transités. En fonction du signal d'entrée, les codes de calcul ont été plus ou moins performant : Telemac2D a mieux modélisé les signaux sinusoïdaux, tandis que OpenFoam et Dassflow ont mieux reproduit le signal représentant un hydrogramme de crue.

Un des points négatifs de cette étude concerne les valeurs expérimentales, la mesure des débits se faisant dans des bacs à l'aval des rues, les signaux obtenus sont légèrement déformés et déphasés. Ces perturbations gênaient la comparaison avec les valeurs issues des modèles numériques. Pour une étude plus approfondie en régime transitoire, il serait idéal d'obtenir des valeurs expérimentales de hauteurs d'eau ou de vitesses. Dans cette optique, des capteurs de hauteur d'eau ont été acquis durant le stage, toutefois aucunes données expérimentales n'a pu être obtenue avant la fin de mon contrat.

Conclusion

Cette étude avait pour but d'établir une comparaison des performances de différents codes de calcul pour la modélisation des écoulements d'inondations urbaines grâce aux valeurs expérimentales obtenues avec le pilote inondation du laboratoire ICUBE. Cette étude a été séparée en différentes parties afin de de construire un raisonnement cohérent. Dans un premier, temps une étude de sensibilité des modèles a été menée. En se basant sur les résultats obtenus, une deuxième partie portant sur la modélisation des écoulements en régime permanent a été réalisée, et la dernière partie se concentrait sur la modélisation des écoulements en régime transitoire.

L'analyse de sensibilité a permis de mettre en évidence l'influence des différents paramètres intervenant dans les codes de calcul. Les principales conclusions de cette étude sont listées ci-dessous :

- Pour les modèles 2D, dans le cas du pilote inondation, la définition des conditions aux limites aval a une grande influence sur les résultats.
- En fonction du paramètre d'intérêt de l'étude (débits, hauteur d'eau ou vitesse), il est possible d'adapter le raffinement du maillage afin d'obtenir de bons résultats tout en limitant les ressources numériques utilisées. Que ce soit pour les codes de calcul 2D ou 3D, obtenir une bonne modélisation des débits ne nécessitera pas impérativement un maillage très raffiné, puisque des mailles dont la taille caractéristique est de l'ordre de 1-2 cm (environ 5 mailles sur la largeur d'une rue) suffisent pour obtenir des résultats corrects pour le pilote inondation. Pour une modélisation fine des hauteurs d'eau et des vitesses, un maillage plus raffiné sera nécessaire, la taille caractéristique des mailles sera de 0,7 – 0,8 cm (soit 6 à 7 mailles environ sur la largeur d'une rue).
- Dans la partie consacrée au coefficient de rugosité, on a constaté que la modification uniforme de ce paramètre n'avait aucun impact sur les résultats de la modélisation du pilote inondation.
- Le dernier paramètre ayant fait l'objet d'une étude de sensibilité est l'utilisation d'un modèle de turbulence. Dassflow ne possédant actuellement pas de modèle de turbulence, cette étude a été menée seulement sur Telemac2D et OpenFoam. Pour ces deux codes de calcul, des résultats similaires ont été observés : l'utilisation d'un modèle de turbulence ou non a peu d'influence sur la modélisation des débits et des hauteurs d'eau, et a une influence très forte sur la modélisation des vitesses.

A partir des connaissances issues de la première partie, une configuration de différents paramètres jugée optimale pour les codes de calcul a pu être obtenue. A partir de cette base, la deuxième partie de cette étude a été consacrée à la comparaison des différents modèles numériques face à des valeurs expérimentales en régime permanent. La répartition des débits, les hauteurs d'eau et les vitesses ont été étudiées. Les trois logiciels fournissent des résultats très similaires entre eux et assez proches des valeurs expérimentales pour la répartition des débits. Concernant les vitesses et les hauteurs d'eau, les résultats numériques issus de Dassflow sont assez éloignés des valeurs numériques. Cela provient de l'absence de modèle de turbulence qui est crucial pour modéliser correctement les phénomènes hydrauliques en aval des carrefours. Les résultats issus de Telemac2D et OpenFoam sont assez similaires, même si c'est sans surprise que l'on constate que le modèle 3D fournit les meilleurs résultats pour chaque paramètre. Toutefois les ressources numériques nécessaires et la création de la

géométrie et du maillage constituent de solides points négatifs à son utilisation généralisée pour l'étude des inondations.

La dernière partie a portée sur la modélisation en régime transitoire. Cette étude a été limitée car seuls les débits expérimentaux étaient disponibles. Deux configurations ont alors été étudiées : la même configuration qu'en régime permanent, accompagnée de l'imposition d'un signal sinusoïdal pour les trois grandes rues seulement, et une deuxième configuration qui portait sur la reproduction d'un hydrogramme de crue. Cette partie a permis d'observer que les points forts et faiblesses des différents codes de calcul étaient conservés en régime transitoire (répartition des débits de sortie). Globalement, les trois modèles numériques gèrent correctement la modélisation en régime transitoire puisqu'aucun défaut majeur n'est apparu parmi les trois modèles. Les défauts de modélisations observés dans l'étude en régime permanent ont logiquement été observés à nouveaux lors de la modélisation en régime transitoire.

A travers ces trois parties, de nombreux thèmes ont été explorés, et les points forts et les limites des différents codes de calcul ont été mis en avant. Ces connaissances pourront être utiles pour réaliser une bonne modélisation des écoulements d'inondations urbaines.

Bibliographie

- Araud, José Vazquez, Nicolas Riviere, Sandra Soares-Fraza, et Vincent Guinot. 2012. « Simulations des écoulements en milieu urbain lors d'un évènement pluvieux extrême », 290.
- Arrault, Anaïs, Pascal Finaud-Guyot, Pierre Archambeau, Martin Bruwier, Sébastien Erpicum, Michel Piroton, et Benjamin Dewals. 2016. « Hydrodynamics of Long-Duration Urban Floods: Experiments and Numerical Modelling ». *Natural Hazards and Earth System Sciences* 16
- CETMEF. 2005. « Notice sur les déversoirs - Synthèse des lois d'écoulements au sein des seuils et déversoirs ».
- Chen, S., P.-A. Garambois, P. Finaud-Guyot, G. Dellinger, R. Mosé, A. Terfous, et A. Ghenaim. 2018. « Variance Based Sensitivity Analysis of 1D and 2D Hydraulic Models: An Experimental Urban Flood Case ». *Environmental Modelling & Software* 109 (novembre).
- Couderc, Frédéric, Ronan Madec, Jérôme Monnier, et Jean-Paul Vila. 2013. « DassFow-Shallow, Variational Data Assimilation for Shallow-Water Models: Numerical Schemes, User and Developer Guides ». Research Report. University of Toulouse, CNRS, IMT, INSA, ANR. <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01120285>.
- EDF - DRD. 2010. « Telemac2d manuel utilisateur v6p0 ». http://www.opentelemac.org/downloads/Archive/v6p0/telemac2d_manuel_utilisateur_v6p0.pdf.
- Finaud-Guyot, P., P.-A. Garambois, Q. Araud, F. Lawniczak, P. François, J. Vazquez, et R. Mosé. 2018. « Experimental Insight for Flood Flow Repartition in Urban Areas ». *Urban Water Journal* 15.
- Finaud-Guyot, P., P.-A. Garambois, G. Dellinger, F. Lawniczak, et P. François. 2019. « Experimental Characterization of Various Scale Hydraulic Signatures in a Flooded Branched Street Network ». *Urban Water Journal* 16.
- Hunter, NM, PD Bates, S. Neelz, G. Pender, Ignacio Villanueva, Nigel Wright, Dongfang Liang, et al. 2008. « Benchmarking 2D Hydraulic Models for Urban Flood Simulations ». *Water Management* 161 (janvier).
- Mignot, E. 2006. « Modeling Floods in a Dense Urban Area Using 2D Shallow Water Equations ». *Journal of Hydrology* 327.
- Mignot, Emmanuel, Xuefang Li, et Benjamin Dewals. 2019. « Experimental Modelling of Urban Flooding: A Review ». *Journal of Hydrology* 568 (janvier).
- Payet. 2018. « Etude numérique et expérimentale des inondations urbaines en régime permanent et transitoire ».
- Seong, Hoje, Dong Sop Rhee, et Inhwan Park. 2020. « Analysis of Urban Flood Inundation Patterns According to Rainfall Intensity Using a Rainfall Simulator in the Sadang Area of South Korea ». *Applied Sciences* 10.
- Tanguy. 2009. *Traité d'hydraulique environnementale*. Vol. Volume 8. Lavoisier.

Annexe

Table des annexes

Annexe 1 : Evolution des hauteurs d'eau en fonction des courbes de tarages utilisées sur Telemac2D.

Annexe 2 : Formule utilisée pour l'évaluation de la différence par rapport au maillage le plus fin.

Annexe 3 : Evolution de la répartition des débits de sortie, de la hauteur d'eau et des vitesses en fonction du coefficient de rugosité sur Telemac2D.

Annexe 4 : Oscillations de la surface libre observées sur Telemac2D sans modèle de turbulence.

Annexe 5 : Influence du modèle de turbulence sur Telemac2D sur les champs de vitesses dans la rue 4.

Annexe 6 : Influence du modèle de turbulence sur OpenFoam sur les champs de vitesses dans la rue 4.

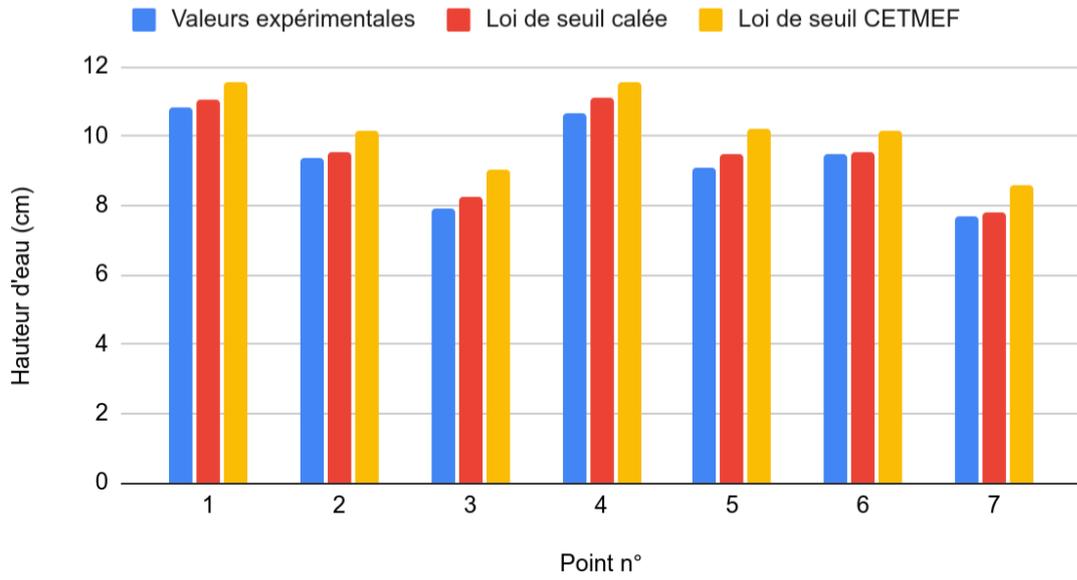
Annexe 7 : Evolution de la charge spécifique le long de la rue 4 en fonction du modèle numérique.

Annexe 8 : Champs de vitesses non déformés en aval du carrefour C-4 dans la rue C.

Annexe 9 : Hydrogrammes en régime transitoire pour différentes sorties.

Annexe 10 : Volume sortant pour une période de signal transitoire en fonction de l'origine des données.

Annexe 1 : Evolution des hauteurs d'eau en fonction des courbes de tarages utilisées sur Telemac2D



Annexe 2 : Formule utilisée pour l'évaluation de la différence par rapport au maillage le plus fin

$$E = \sum_i \left(\frac{(Q_{300,i} - Q_{X,i})}{Q_{300,i}} \right)^2$$

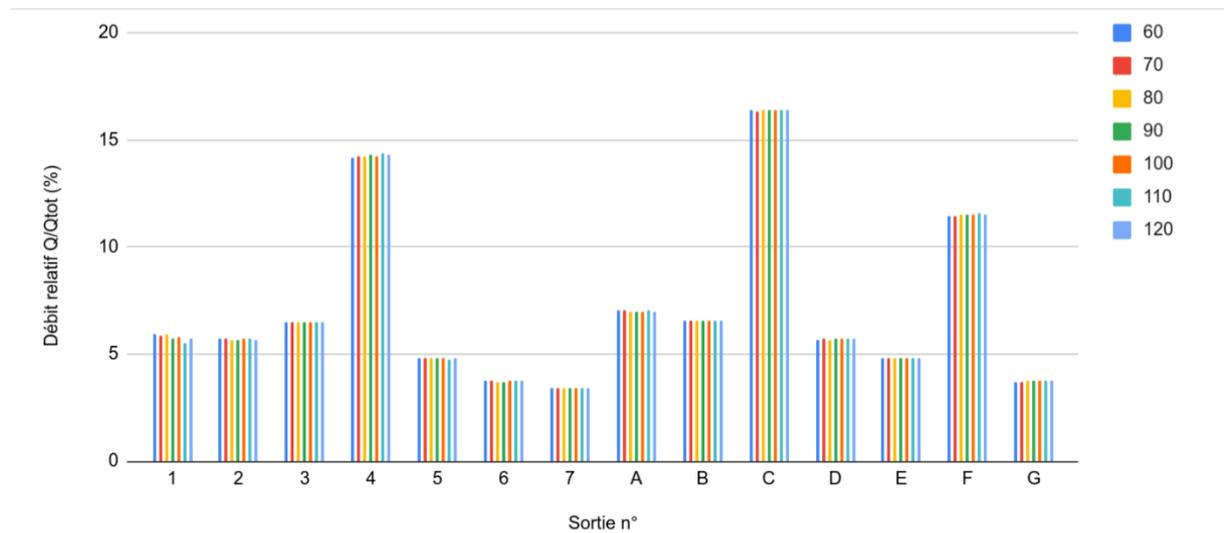
Avec :

$Q_{300,i}$ la $i^{\text{ème}}$ valeur issue du maillage à 300 k mailles

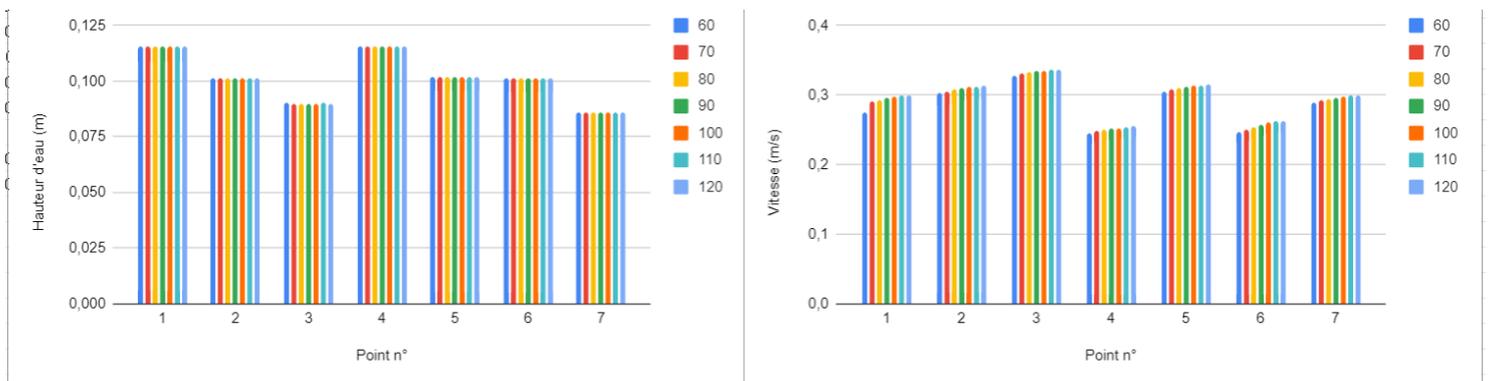
$Q_{X,i}$, la $i^{\text{ème}}$ valeur numérique issue du maillage à X k mailles

Annexe 3 : Evolution de la répartition des débits de sortie, de la hauteur d'eau et des vitesses en fonction du coefficient de rugosité sur Telemac2D

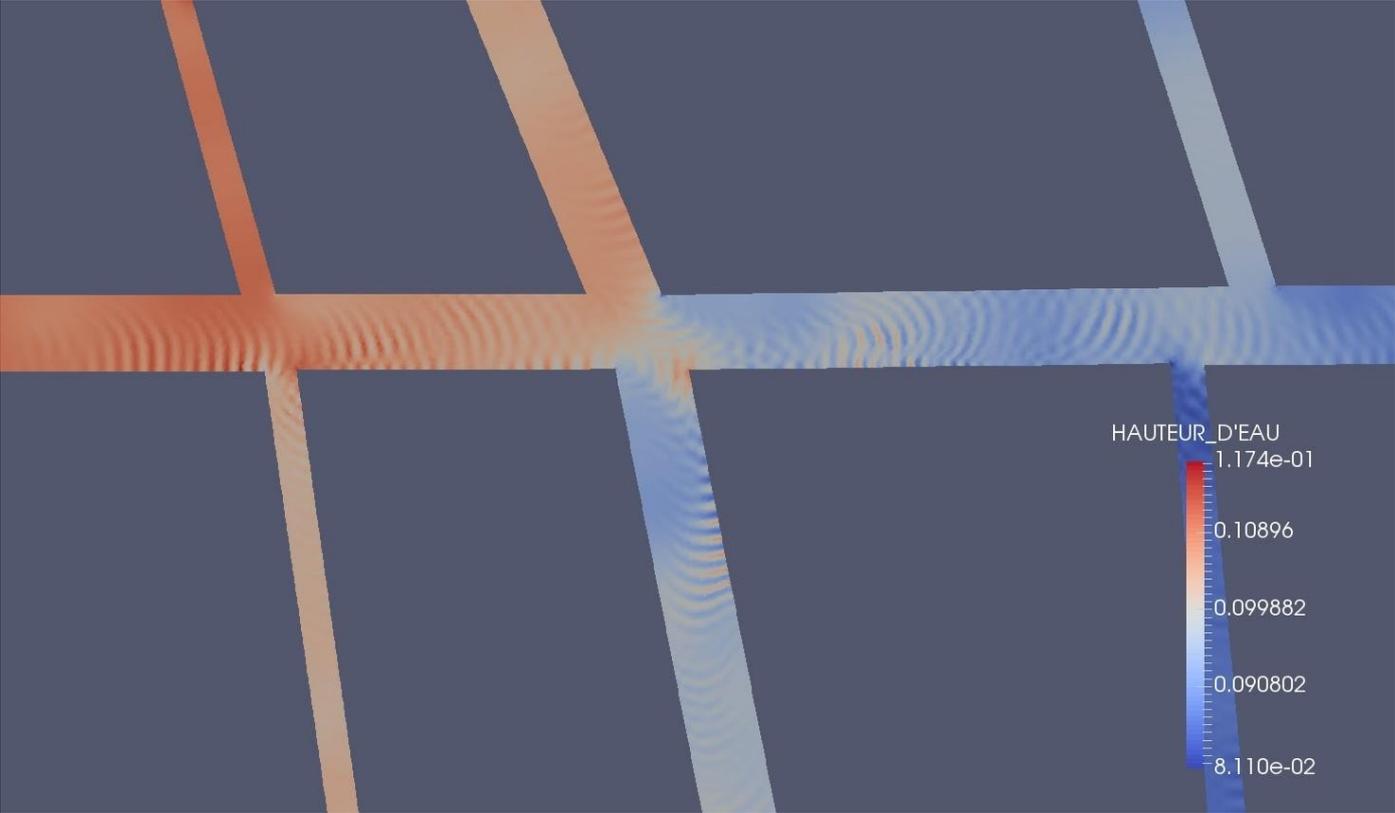
Evolution des débits relatifs en sortie en fonction de l'évolution du coefficient de Strickler sur Telemac2D



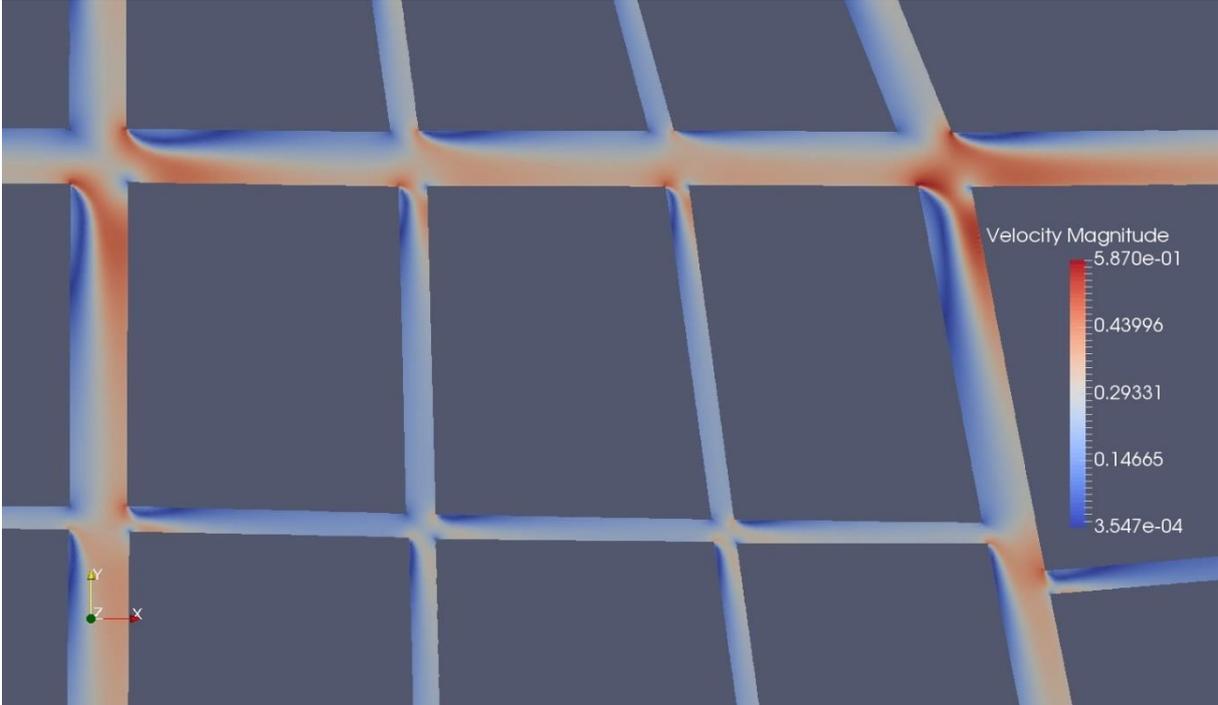
Evolution des hauteurs d'eau (à gauche) et des vitesses (à droite) en fonction du coefficient de Strickler sur Telemac2D



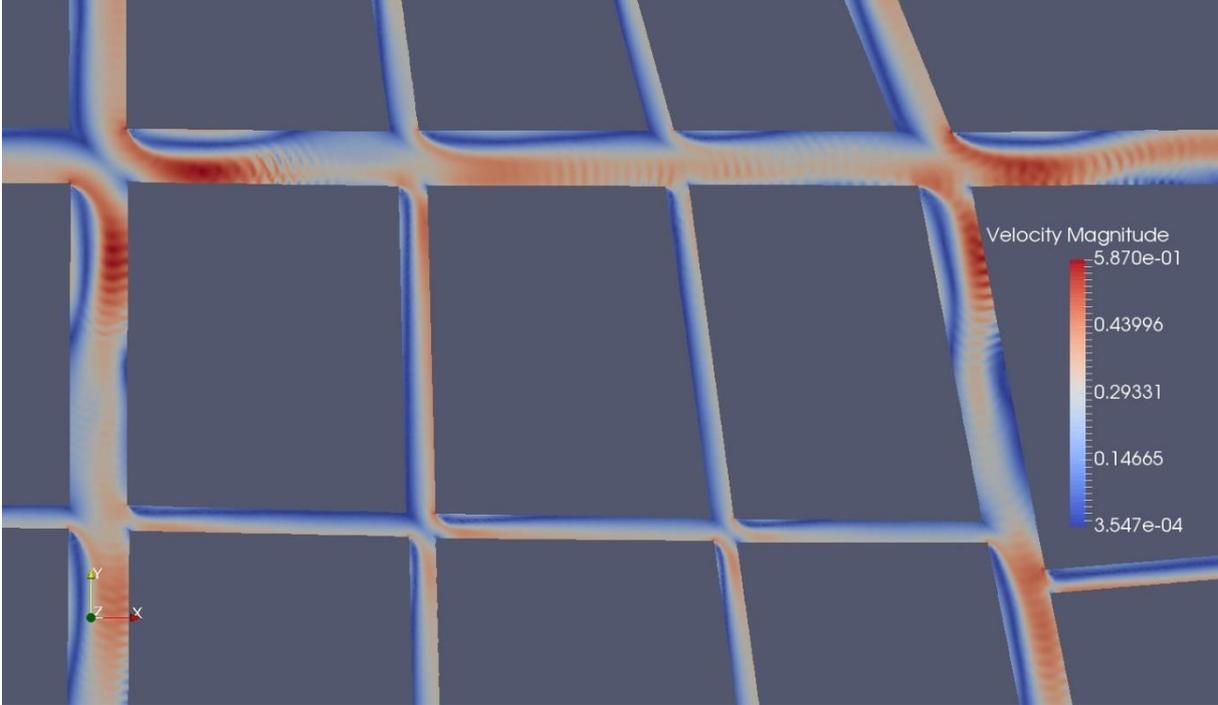
Annexe 4 : Oscillations de la surface libre observées sur Telemac2D sans modèle de turbulence



Annexe 5 : Influence du modèle de turbulence sur Telemac2D sur les champs de vitesses dans la rue 4.

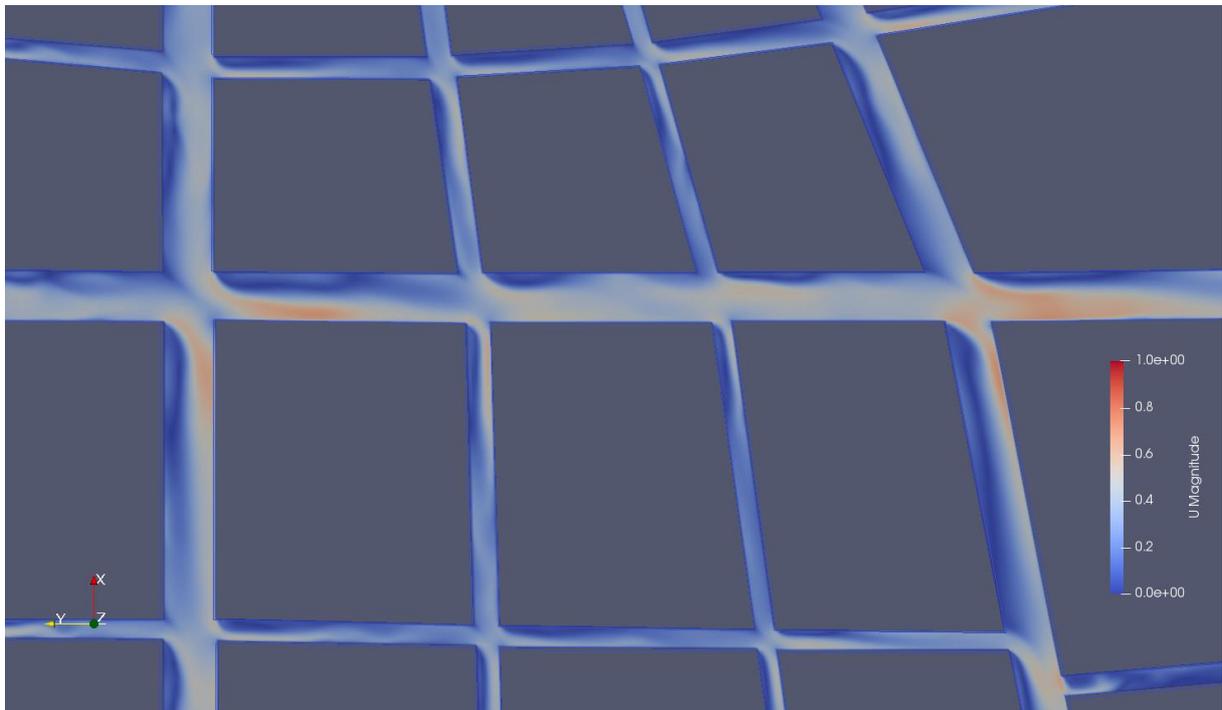


Champs de vitesse dans la rue 4 avec le modèle de turbulence k-epsilon.

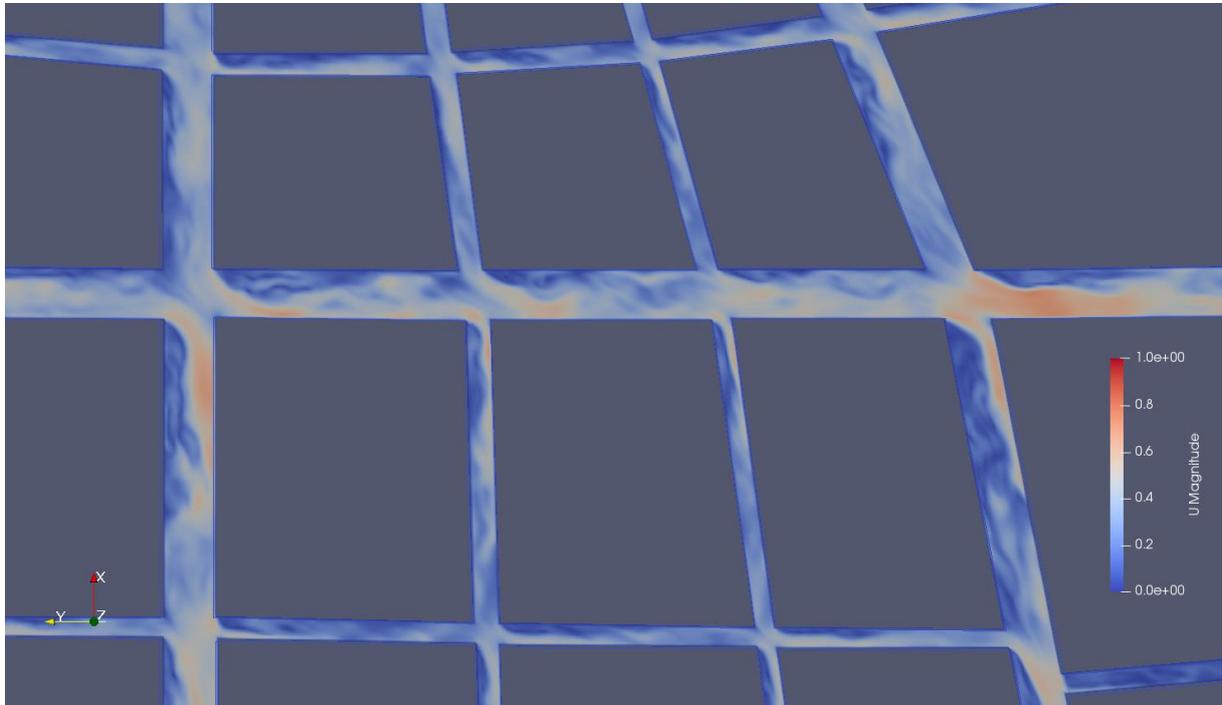


Champs de vitesse dans la rue 4 sans modèle de turbulence.

Annexe 6 : Influence du modèle de turbulence sur OpenFoam sur les champs de vitesses dans la rue 4.

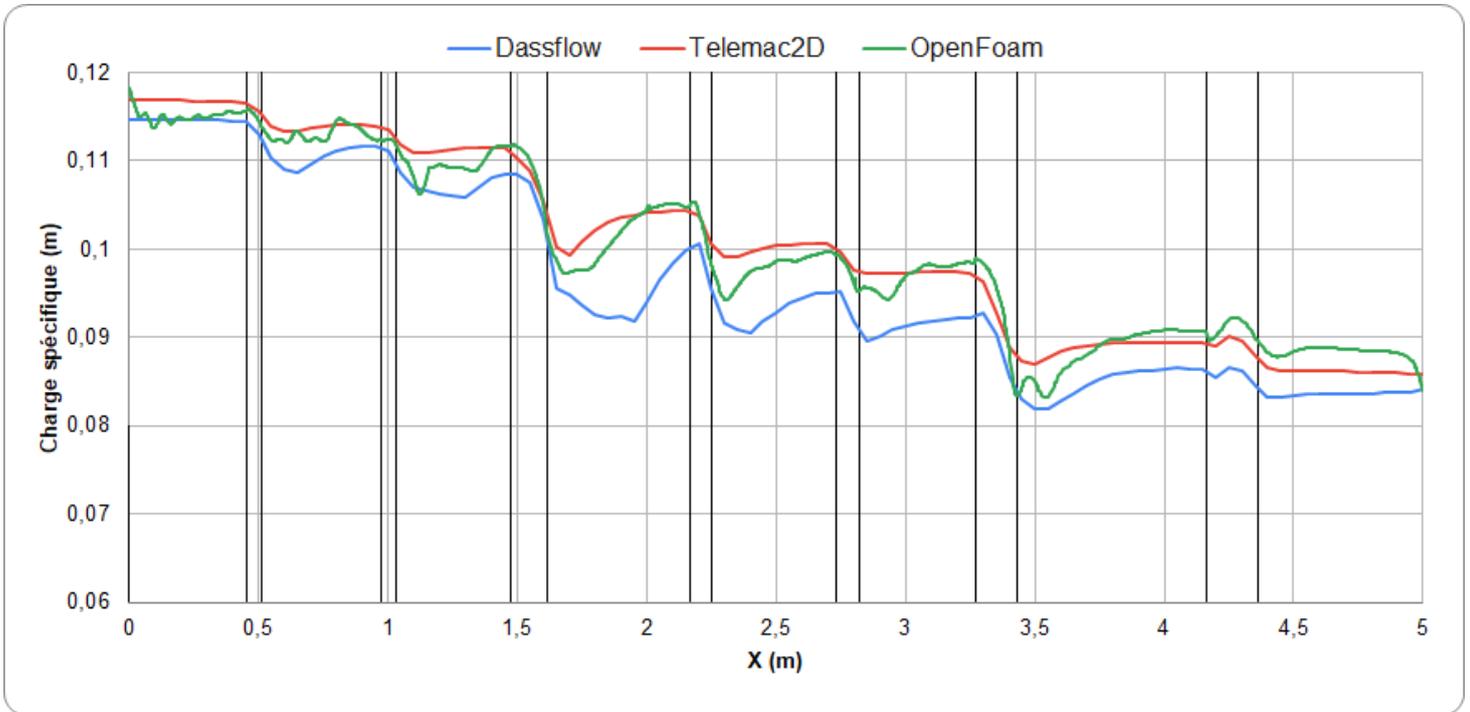


Champs de vitesse dans la rue 4 avec l'utilisation du modèle de turbulence.

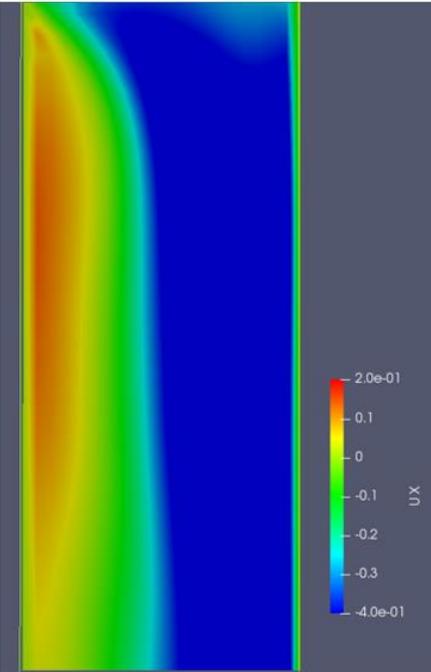


Champs de vitesse dans la rue 4 sans l'utilisation d'un modèle de turbulence.

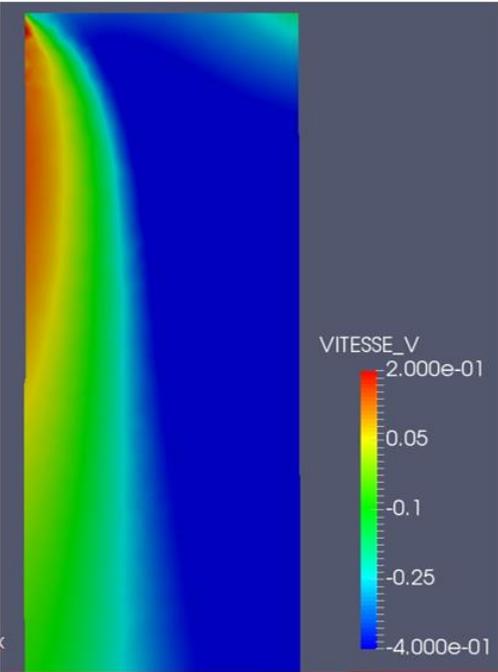
Annexe 7 : Evolution de la charge spécifique le long de la rue 4 en fonction du modèle numérique



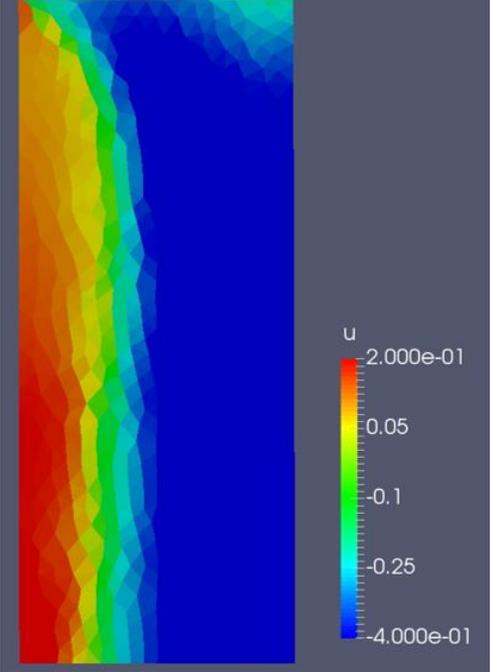
Annexe 8 : Champs de vitesses non déformés en aval du carrefour C-4 dans la rue C.



OpenFoam

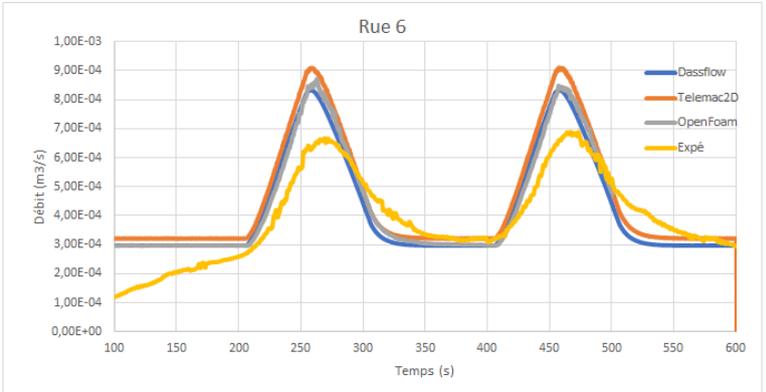
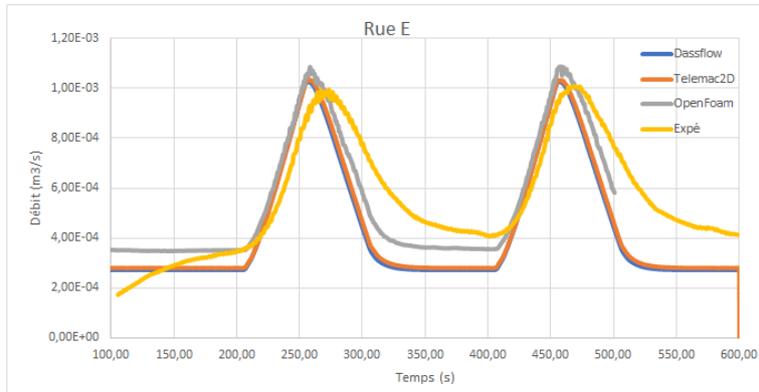
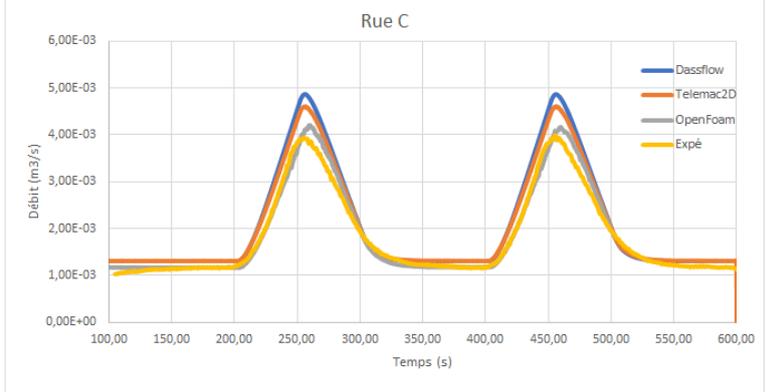
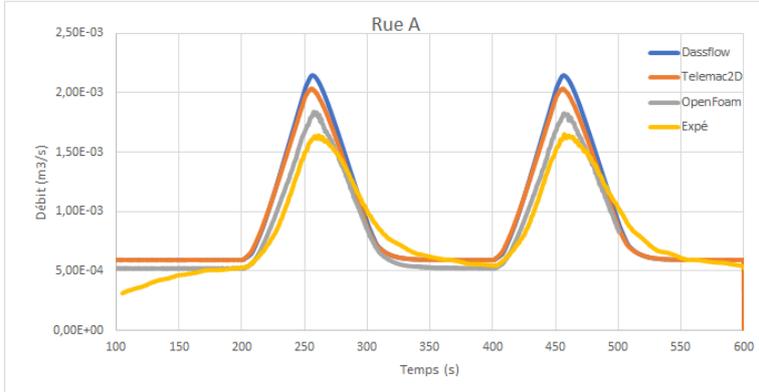
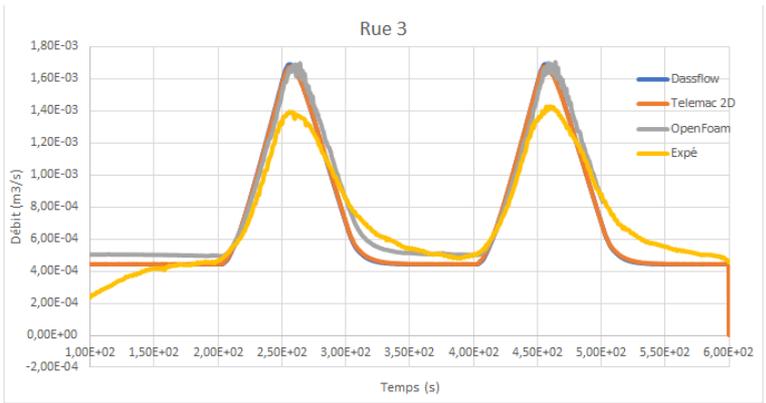
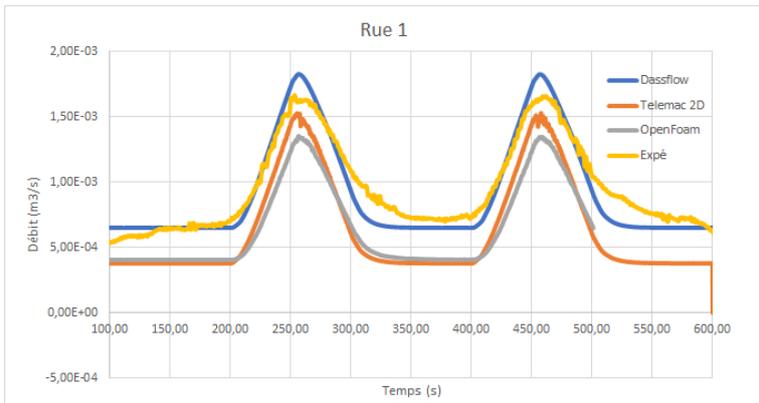


Telemac 2D



Dassflow

Annexe 9 : Hydrogrammes en régime transitoire pour différentes sorties



Annexe 10 : Volume sortant pour une période de signal transitoire en fonction de l'origine des données

Comparaison des volumes sortants entre 200 et 300s (m ³)				
	Expé	Dassflow	T2D	OpenFoam
Rue 1	0,128	0,130	0,099	0,091
Rue 2	0,080	0,104	0,095	0,092
Rue 3	0,101	0,110	0,110	0,112
Rue 4	0,215	0,236	0,241	0,234
Rue 5	0,043	0,064	0,070	0,067
Rue 6	0,051	0,059	0,064	0,059
Rue 7	0,053	0,052	0,082	0,058
Rue A	0,116	0,143	0,137	0,121
Rue B	0,114	0,132	0,125	0,111
Rue C	0,269	0,318	0,306	0,274
Rue D	0,090	0,094	0,094	0,088
Rue E	0,071	0,067	0,068	0,073
Rue F	0,201	0,195	0,190	0,195
Rue G	0,053	0,051	0,046	0,060

Code couleur utilisé :

	Erreur relative > 10%
	Erreur relative > 5%
	Erreur relative < 5%

MEMOIRE DE FIN D'ETUDES

Diplôme d'ingénieur de l'Ecole Nationale du Génie de l'Eau et de l'Environnement de Strasbourg (ENGEES)

Spécialité : Hydraulique Urbaine

Auteur : Cyril GUYOT

Année : 2021

Titre : Etude de la capacité des modèles numériques à reproduire les caractéristiques des écoulements d'inondations urbaines pour des régimes stationnaires et transitoires

Nombre de pages : 70 dont 11 pages d'annexes

Nombre de références bibliographiques : 14

Structure d'accueil : ICUBE, Strasbourg (France)

Maître de stage : M. Guilhem DELLINGER

Résumé

Cette étude s'intéresse aux performances de différents modèles numériques pour reproduire les caractéristiques des écoulements (débit, hauteur, vitesse) en milieu urbain.

Une modélisation numérique du pilote inondation du laboratoire ICUBE a été réalisée avec trois logiciels différents : Dassflow, Telemac2D et OpenFoam. L'étude va se dérouler en trois parties : une étude de sensibilité afin de déterminer les paramètres optimaux pour chaque modèle, une étude en régime permanent et une étude en régime transitoire pour identifier les points forts et les limites des différents logiciels.

Mots-clés : Modélisation numérique, inondation urbaine, réseau de carrefour, pilote inondation ICUBE, Dassflow, Telemac2D, OpenFoam.