



Ecole Nationale Polytechnique
Laboratoire de Recherches Sciences de l'Eau



Département Hydraulique
Mémoire de Master
Pour l'obtention du diplôme de

MASTER EN HYDRAULIQUE

Réalisé par :

Mr GUELMANE Mohamed Amine

Thème :

Couplage des modèles 1D et 2D pour la gestion des risques d'inondation en zones urbaines

Réalisé par : Mr GUELMANE Mohamed Amine

Proposé et dirigé par : Mr KOUIDER Khaled
Mr NEBBACHE Nacer-Eddine

Soutenu le : 05/10/2015

Devant le jury : - Dr M. NAKIB Président
- Mr S. BENZIADA Examineur



*A mes chers parents,
A mon frere et mes soeurs,
A ma grande famille,
A tous mes amis,
A ceux que j'aime et qui m'aiment.*

Guelmane Mohamed Amine



Remerciement

Je remercie avant tous Allah le tout puissant de m'avoir donnés le courage et m'avoir guidé pour pouvoir mener à bien ce modeste travail.

Je tiens à exprimer mes profonde gratitude et sincères remerciements à mon promoteur, Mr KOUIDER Khaled, de m'avoir proposé ce sujet et de l'aide précieux qu'il m'a apporté tout-au-long de la réalisation de ce travail.

Je tiens à remercier aussi Mr NEBBACHE Nacereddine.

Mes sincères remerciements s'adressent à la Direction Etudes et Projets de la SEAAL qui m'a ouvert un terrain de stage pour concrétiser ma formation d'ingénieur d'état en hydraulique, plus particulièrement Mr ADEL Sofiane et Mr GHERMOUL Madjid.

Mes remerciements également à Mr OLIVIER Narby et Mr BOUKHARI Abdelkarim qui ont accepté de m'encadrer, me guider et orienter, et de m'avoir enrichi avec leurs conseils et informations.

Je remercie également les membres du jury d'avoir accepté d'évaluer mon travail.

Enfin, j'adresse mes remerciements à tous ceux qui ont contribué par leurs conseils et leurs encouragements à l'aboutissement de ce travail.

ملخص:

الهدف من هذا العمل هو عرض اقتران النّماذج أحادية الأبعاد/ثنائية الأبعاد، التي تسمح بأخذ أفضل ما في النّماذج أحادية الأبعاد وثنائية الأبعاد على حدة، وذلك للتحكم في خطر الفيضانات في المناطق الحضرية، أين تكون عواقب الفيضانات وخيمة، بالإضافة إلى كونها الأهم للدراسة.

تعقيد الجريان في حالة الفيضانات تجبر على تطوير نماذج رقمية الأكثر فعالية، من هنا دخول النّموذج المقترن بعد/بعدين.

كلمات مفتاحية: محاكاة، باري سان فونان، اقتران بعد/بعدين، فيضان، جريان سطح حر.

Résumé :

L'objet de ce travail est de présenter le couplage des modèles 1D/2D, qui permet de reprendre les avantages des deux modèle 1D et 2D pour la gestion du risque d'inondation en milieu urbain, où les dommages dus aux inondations sont les plus graves, et aussi les plus importants à étudier.

La complexité des écoulements en cas d'inondation exige le développement de modèles numériques la plus performante, delà l'introduction du modèle couplé 1D/2D.

Mots clés : *Simulation, Barré Saint Venant, Couplage 1D/2D, Inondation, Ecoulement à surface libre.*

Abstract:

The purpose of this work is to present the coupling of 1D/2D models, which can take the advantages of both 1D and 2D models for the management of urban flood risk where flood damage are the most serious, and also the most important to study.

The complexity of the flows during flooding requires the development of the highest performance numerical models, beyond the introduction of the coupled model 1D/2D.

Keywords: *Simulation, Barre Saint Venant, Coupling 1D/2D, Flood, free-surface flow.*

Table des matières

INTRODUCTION GENERALE	2
CHAPITRE I : MODELES MATHEMATiques DES ECOULEMENTS A SURFACE LIBRE	4
I.1. INTRODUCTION.....	5
I.2. CLASSIFICATION DES MODELES MATHEMATiques DES ECOULEMENTS A SURFACE LIBRE	5
I.2.1. <i>Modèle de Navier-Stokes tridimensionnel</i>	5
I.2.2. <i>Modèles de Saint-Venant</i>	5
I.2.2.1. Modèle de Saint-Venant unidimensionnel.....	7
I.2.2.2. Modèle de Saint-Venant bidimensionnels	7
I.2.2.3. Equations de base	7
I.2.2.3.1. Equation de continuité.....	7
I.2.2.3.2. Equation de quantité de mouvement	7
I.3. MODELES DE SAINT-VENANT	8
I.3.1. <i>Modèles mathématiques 1D</i>	8
I.3.1.1. Equations de Saint-Venant 1D	8
I.3.1.1.1. Equation de continuité.....	9
I.3.1.1.2. Equation de quantité de mouvement	10
I.3.1.2. Avantages des modèles 1D.....	14
I.3.2. <i>Modèles mathématiques 2D en surface</i>	14
I.3.2.1. Equations de Saint-Venant 2D	14
I.3.2.2. Avantages des modèles 2D.....	16
I.4. CONCLUSION	16
CHAPITRE II : COMPARAISON DE DIFFERENTS MODELES HYDRAULIQUES 2D POUR LA SIMULATION DES INONDATIONS URBAINES.....	17
II.1. INTRODUCTION.....	18
II.2. MODELE HYDRAULIQUE.....	18
II.3. DIFFERENTS MODELES HYDRAULIQUES 2D.....	18
II.3.1. <i>TELEMAC-2D</i>	18
II.3.2. <i>FLO-2D</i>	19
II.3.3. <i>PCSWMM Europe 2D</i>	20
II.3.4. <i>MIKE 21 HD</i>	21
II.4. COMPARAISON DES MODELES HYDRAULIQUES 2D.....	22
II.5. CONCLUSION.....	22
CHAPITRE III : COUPLAGE 1D/2D.....	23
III.1. INTRODUCTION.....	24
III.2. COUPLAGE 1D/2D.....	24
III.3. LES AVANTAGES D'UN COUPLAGE 1D/2D	25
III.4. LES INCONVENIENTS D'UN COUPLAGE 1D/2D.....	26
III.5. CONCLUSION.....	26
CHAPITRE IV : UTILISATION DES DONNEES TOPOGRAPHIQUE A HAUTE RESOLUTION (MNT)	27
VI.1. INTRODUCTION.....	28
VI.2. DONNEES TOPOGRAPHIQUE A HAUTE RESOLUTION (MNT).....	28
VI.3. UTILISATION DU MNT	29
VI.4. CONCLUSION.....	30
CHAPITRE V : METHODOLOGIE DE SIMULATION	31
V.1. INTRODUCTION.....	32
V.2. HYPOTHESES DE LA MODELISATION	32

V.3.	ETAPES DE LA MODELISATION	32
V.4.	RESULTATS DE SIMULATION	32
V.5.	CONCLUSION.....	35
CHAPITRE VI : GESTION DU RISQUE D'INONDATION DANS LES ZONES URBAINES.....		36
VI.1.	INTRODUCTION.....	37
VI.2.	LA GESTION DU RISQUE D'INONDATION.....	37
VI.3.	PLAN DE PREVENTION DES RISQUES D'INONDATION	38
VI.4.	CONCLUSION.....	38
CONCLUSION GENERALE.....		39
BIBLIOGRAPHIE		41

Liste des figures

Figure I.1. : Elaboration du modèle mathématique de Saint-Venant.....	6
Figure I.2. : Schéma de définition pour les équations de Saint-Venant 1D.....	9
Figure I.3. : Forces exercées par le fluide sur la paroi et réaction de la paroi sur le fluide. ...	12
Figure I.4. : Conventions du modèle bidimensionnel	15
Figure II.1. : Exemple d'un maillage par TELEMAC-2D.....	19
Figure II.2. : Exemple d'un maillage par FLO-2D.....	20
Figure II.3. : Exemple d'un maillage par PCSWMM Europe 2D	21
Figure II.4. : Exemple d'un maillage par MIKE 21 HD.....	22
Figure IV.4. : Modèle Numérique du Terrain pour un bassin urbain	22
Figure V.1. : Réseaux (ou bien rivières) et zone inondables modélisés en 1D.....	33
Figure V.2. : Surface modélisée en 2D	33
Figure V.3. : Modèle de réseau 1D couplé à un modèle de surface 2D.....	34
Figure V.4. : Résultats de simulation couplée.....	34
Figure VI.1. : Cycle de réduction des inondations.....	37
Figure VI.2. : La directive inondation.....	38

Introduction générale

Les dommages dus aux inondations sont, en grande partie, concentrés dans des milieux urbanisés. La simulation des écoulements dans de tels milieux est nécessaire pour établir des mesures de prévention ou de prévision. La complexité de ces écoulements exige le développement de modèles numériques adaptés qui puissent, en particulier, traiter l'arrivée d'une vague et les passages entre régimes torrentiel et fluvial.

Ce risque pluvial résulte de l'association d'un aléa d'ordre climatique, les précipitations et les ruissellements qui en résultent, et de la vulnérabilité des zones exposées. La caractérisation du risque pluvial nécessite donc d'une part la caractérisation de l'aléa, et d'autre part, la caractérisation de la vulnérabilité du milieu.

La modélisation d'écoulements pour une zone d'étude entièrement urbanisée ou pour une plaine d'inondation reste toutefois problématique. En particulier, il reste nécessaire de raffiner le maillage notamment à proximité des principaux axes d'écoulement (grandes artères, rues principales, lits mineurs, canaux d'irrigation, etc.) pour représenter correctement l'anisotropie des écoulements induite par la voirie, les échanges lit majeur - lit mineur, etc.

Dans ce contexte, l'amélioration de la représentativité du modèle du réseau (1D) et le modèle de surface (2D) pour calculer l'évolution des plans d'eau et des débits est nécessaire.

L'objectif de ce mémoire est d'étudier la méthodologie d'utilisation d'un couplage des modèle 1D et 2D pour la gestion des risques d'inondation en zones urbaines.

D'abord, nous présentons les différents modèles mathématiques régissant les écoulements à surface libre : les modèles 1D et les modèles 2D en surface.

Ensuite, une comparaison de différents modèles hydrauliques 2D pour la simulation des inondations urbaines est faite.

Dans les chapitres qui suivent, nous allons traiter le couplage 1D/2D, l'utilisation des données topographiques à haute résolution (MNT), la méthodologie de simulation, et nous finissons par la gestion du risque d'inondation dans les zones urbaines en utilisant le couplage.

En fin, une conclusion sur tout le travail est faite.

Chapitre I :
Modèles mathématiques des
écoulements à surface libre

I.1. Introduction

L'étude des problèmes d'hydraulique fluviale consiste à établir un modèle mathématique des écoulements à surface libre peu profonds qui est représenté en général par des équations différentielles. Et même avec des hypothèses simplificatrices ces équations sont difficiles à résoudre par des méthodes analytiques, donc il est nécessaire d'avoir recours aux méthodes numériques.

Dans ce premier chapitre, on va présenter les différents modèles mathématiques des écoulements à surface libre et les avantages de chacun entre eux.

I.2. Classification des modèles mathématiques des écoulements à surface libre

Les écoulements à surface libre sont régis par des modèles mathématiques complexes :

I.2.1. Modèle de Navier-Stokes tridimensionnel

Ce modèle traite les écoulements à surface libre pour des géométries tridimensionnelles, ce modèle permet d'étudier le phénomène naturel tel qu'il est, sans tenir compte des hypothèses des simplifications.

Les modèles tridimensionnels sont rarement utilisés, parce que ce type de modèle demande des outils de calcul de stockage mémoire important et de temps de calcul important.

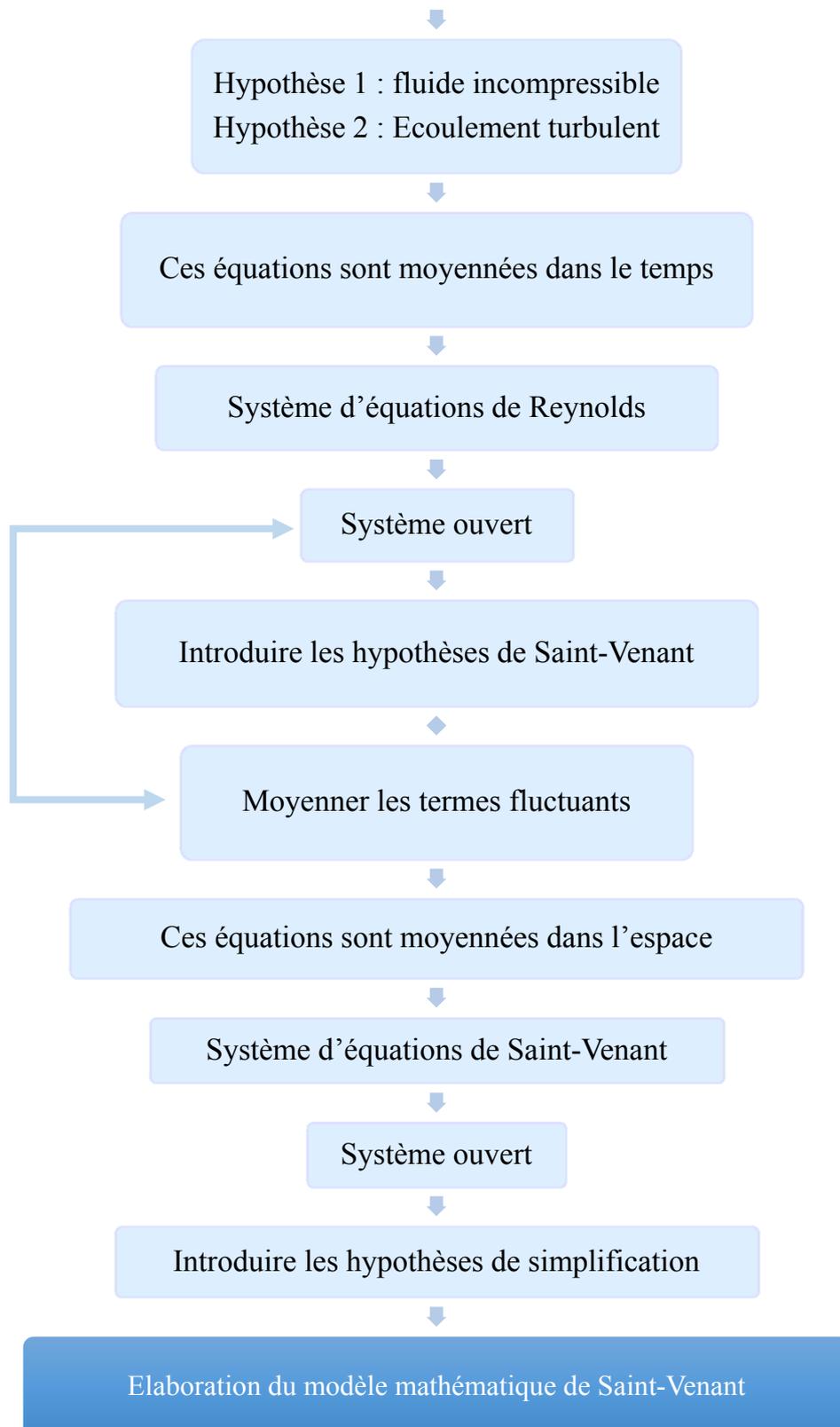
I.2.2. Modèles de Saint-Venant

Les équations de Saint-Venant régissent les écoulements à surface libre en eaux peu profondes, d'où leur appellation anglaise « shallow water equations » (modèle des eaux peu profondes).

Le modèle mathématique de Saint-Venant à deux dimensionnel (2D) dans le plan horizontal découle de l'intégration verticale des équations de Navier-Stokes à trois dimensions (3D) en posant différentes hypothèses fondamentales dont l'une est celle de la pression hydrostatique.

Le problème physique consiste à étudier les écoulements à surface libre dans le cas où la longueur d'onde est grande par rapport à la profondeur de l'écoulement. Le système d'équations de Saint-Venant et leurs différentes formulations sont résumés dans la figure (I.1.).

Système d'équations fondamental de Navier-Stokes 3D

**Figure I.1.** : Elaboration du modèle mathématique de Saint-Venant

On distingue deux types des modèles de Saint-Venant selon le nombre des dimensions :

I.2.2.1. Modèle de Saint-Venant unidimensionnel

Ce modèle est utilisé pour traiter les problèmes d'écoulement ayant une direction privilégiée.

Ces équations sont employées dans les domaines de la protection de l'environnement, calcul des marées et des ondes de tempête, la stabilité des ouvrages, l'étude des crues.

En général, la résolution analytique est limitée pour des géométries très simples, et avec un nombre du Reynolds moins élevée.

I.2.2.2. Modèle de Saint-Venant bidimensionnels

Ce type de modèle est utilisé pour étudier les écoulements à surface libre dans le cas où la profondeur de l'écoulement est négligeable devant la largeur du canal.

I.2.2.3. Equations de base

Les hypothèses pour l'étude de l'écoulement à surface libre sont les suivantes :

- Fluide incompressible ;
- Ecoulement turbulent.

Le fluide s'écoule entre le fond du canal et la surface libre de l'eau. L'écoulement du fluide est régi par les équations de Navier-Stokes et de continuité.

Les équations générales de la masse et du mouvement sont :

I.2.2.3.1. Equation de continuité

L'équation de continuité pour un fluide incompressible est donné par :

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (\text{I.1})$$

I.2.2.3.2. Equation de quantité de mouvement

L'équation dynamique s'exprime comme suit :

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + u_j \frac{\partial u_i}{\partial u_j} = \frac{\partial P}{\rho \partial x_i} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_i} + F_c + g \delta_{i3} \quad (\text{I.2})$$

avec: $(u, v, w) = (u_j); i = 1,2,3; j = 1,2,3$.

- F_c : Force de Coriolis
- g : Accélération de la pesanteur
- ρ : Masse spécifique de l'eau
- P : Pression
- τ_{ij} : Contraintes de Reynolds

L'équation dynamique suivant x, y et z respectivement :

$$\begin{cases} \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} = -\frac{\partial P}{\rho \partial x} + \frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial x} \right) + f_c \\ \frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} = -\frac{\partial P}{\rho \partial y} + \frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial \tau_{yx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yy}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial x} \right) + f_c \\ \frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} = -\frac{\partial P}{\rho \partial z} + \frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} + \frac{\partial \tau_{zy}}{\partial z} + \frac{\partial \tau_{zz}}{\partial z} \right) + f_c + g \end{cases} \quad (I.3)$$

I.3. Modèles de Saint-Venant

I.3.1. Modèles mathématiques 1D

En dynamique des fluides, l'équation unidimensionnelle (1D) de Saint-Venant a été dérivée par Adhémar Jean Claude Barré de Saint-Venant, et elle est souvent utilisée pour modéliser les écoulements à surface libre. Le modèle est une simplification des équations des eaux peu profondes (shallow water equations) à deux dimensions (2D), qui sont également connus comme les équations de Saint-Venant à deux dimensions.

La simplification 1D est utilisée dans plusieurs modèles : HEC-RAS, SWMM5, ISIS, Flood Modeller, MIKE 11, et MIKE SHE.

I.3.1.1. Equations de Saint-Venant 1D

Les hypothèses des équations de Saint-Venant 1D sont :

- l'eau est incompressible ($\rho = Cste$) ;
- les accélérations verticales et transversales des particules fluides sont négligeables par rapport aux accélérations longitudinales ;
- le régime d'écoulement est turbulent (les pertes d'énergie par frottement sur les berges sont proportionnelles au carré de la vitesse) ;
- la pente du bief est suffisamment faible pour que l'on puisse considérer que la cordonnée longitudinale est la cordonnée horizontale coïncident.

La figure (I.2.) présente le schéma de définition pour les équations de Saint-Venant 1D.

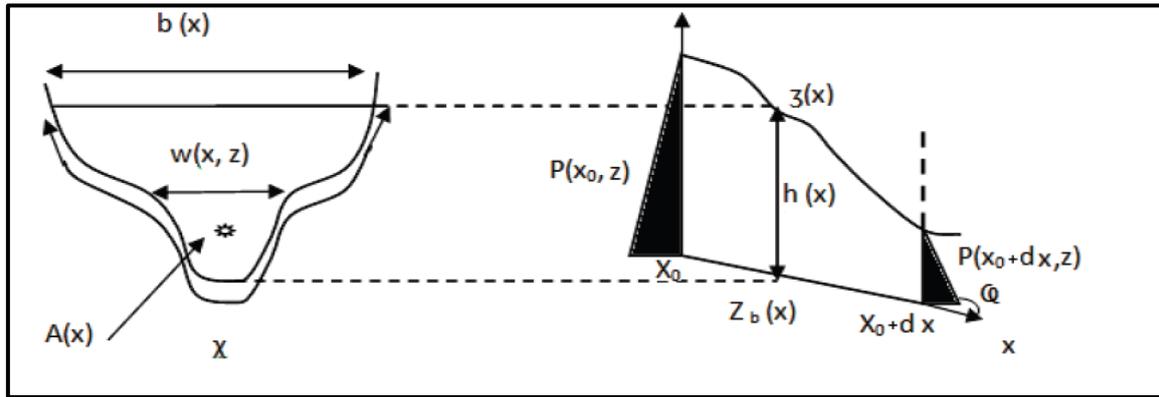


Figure I.2. : Schéma de définition pour les équations de Saint-Venant 1D

I.3.1.1.1. Equation de continuité

L'équation de continuités établit par une opération de bilan : on considère un élément de volume de section unitaire compris entre les abscisses x_0 et $x_0 + \delta x$ et on effectue un bilan sur l'évolution, entre deux dates t_0 et $t_0 + \delta t$ de la quantité totale de U dans cet élément de volume, le bilan de masse s'écrit : (Guinot, 2003)

$$\delta U(x, t_0 + \Delta t) - \delta U(x, t_0) - \delta F(x_0, t) + \delta F(x_0 + \Delta x, t) = \delta S \quad (I.5)$$

Où, $\delta U(t)$ est la masse de fluide contenue dans le volume de contrôle à la date t et δF est la masse de fluide passée entre les dates t_0 et $t_0 + \delta t$ par la section de contrôle située à l'abscisse x .

Entre les dates t_0 et $t_0 + \delta t$, le terme source est responsable de l'apparition de la quantité suivante dans le volume :

$$\delta S = \int_{t_0}^{t_0 + \delta t} \int_{x_0}^{x_0 + \delta x} S(U, x, t) dx dt \quad (I.6)$$

Les quantités $\delta U(t)$ et δF sont par définition, égales à :

$$\begin{cases} \delta U(t) = \int_{x_0}^{x_0 + \Delta x} (\rho A)(x, t) dx \\ \delta F(t) = \int_{x_0}^{x_0 + \Delta x} (\rho u A)(x, t) dx \end{cases} \quad (I.7)$$

Où A est la section mouillée, u est la vitesse moyenne du fluide et ρ sa masse volumique. En remplaçant les expressions (I.6) et (I.7) dans (I.5), on obtient :

$$\begin{aligned}
 & \int_{x_0}^{x_0+\Delta x} [(\rho A)(x, t_0 + \Delta t) - (\rho A)(x, t_0)] \\
 & \quad - \int_{t_0}^{t_0+\Delta t} [(\rho u A)(x_0, t) - (\rho u A)(x_0 + \Delta x, t)] \quad (I.8) \\
 & = \int_{t_0}^{t_0+\Delta t} \int_{x_0}^{x_0+\Delta x} S(U, x, t) dx dt
 \end{aligned}$$

En faisant tendre δt et δx vers 0, on aura :

$$\begin{cases}
 (\rho A)(x_0, t_0 + \Delta t) - (\rho A)(x_0, t_0) = \delta t \frac{\delta U}{\delta t} + O(\delta t^2) \\
 (\rho u A)(x_0, t_0) - (\rho u A)(x_0 + \Delta x, t_0) = -\delta x \frac{\delta F}{\delta t} + O(\delta x^2)
 \end{cases} \quad (I.9)$$

$O(\delta t^2)$ et $O(\delta x^2)$ sont des polynômes de degré supérieur ou égal à 2 par rapport à δt et δx respectivement. Lorsque δt et δx tendent vers 0, $O(\delta t^2)$ devient négligeable par rapport à $\delta t \frac{\delta U}{\delta t}$ car δx^2 décroît plus vite que δx , de la même façon, $O(\delta x^2)$ devient négligeable par rapport à $\delta x \frac{\delta F}{\delta t}$. Les égalités (I.9) deviennent donc :

$$\begin{cases}
 (\rho A)(x_0, t_0 + \Delta t) - (\rho A)(x_0, t_0) \simeq^{\delta t \rightarrow 0} \delta t \frac{\delta U}{\delta t} \\
 (\rho u A)(x_0, t_0) - (\rho u A)(x_0 + \Delta x, t_0) \simeq^{\delta x \rightarrow 0} -\delta x \frac{\delta F}{\delta t}
 \end{cases} \quad (I.10)$$

L'intégrale du terme source tend vers la quantité suivante :

$$\int_{t_0}^{t_0+\Delta t} \int_{x_0}^{x_0+\Delta x} S(x, t) dx dt \simeq^{\delta t \rightarrow 0, \delta x \rightarrow 0} \delta t \delta x S \quad (I.11)$$

En substituant les équivalences (I.10) et (I.11) dans (I.9), il vient :

$$\delta t \frac{\partial}{\partial t} (\rho A) \delta x + \delta t \frac{\partial}{\partial t} (\rho u A) \delta x = \delta t \delta x S \quad (I.12)$$

En utilisant l'hypothèse d'incompressibilité. On divise (I.12) par ρ (constante), ($Au = Q$), on obtient :

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = S \quad (I.13)$$

I.3.1.1.2. Equation de quantité de mouvement

D'après le théorème fondamental de la dynamique : (Guinot, 2003)

$$\delta U(t_0 + \Delta t) - \delta U(t_0) = \delta F(x_0) \delta F(x_0 + \Delta x) + \delta P(x_0) - \delta P(x_0, \Delta x) + \delta F_p \quad (I.14)$$

$\delta U(t)$ est la quantité de mouvement de fluide contenu dans le volume de contrôle à la date t et $\delta F(t)$ est la quantité de mouvement attachée au volume de fluide qui traversé, entre les dates t_0 et $t_0 + \Delta t$, de la section de contrôle située à l'abscisse x .

$\delta U(x)$ représente l'intégrale, entre les dates t_0 et $t_0 + \Delta t$, de la force de pression s'exerçant sur la face du volume de contrôle située à l'abscisse x et δF_p est l'intégrale entre t_0 et $t_0 + \Delta t$ de la résultante des forces de paroi (frottement et réaction de la paroi de la conduite aux forces de pression).

Les quantités δU et δF sont par définition, égales à :

$$\begin{cases} \delta U(t) = \int_{x_0}^{x_0+\Delta x} (\rho u A)(x, t) dx \\ \delta F(t) = \int_{x_0}^{x_0+\Delta x} (\rho u^2 A)(x, t) dx \end{cases} \quad (I.15)$$

La force de pression $P(x)$ est égale à l'intégrale de la pression $p(x)$ sur la section en travers $A(x)$. D'après l'hypothèse (2), la pression est hydrostatique, c'est-à-dire qu'elle est proportionnelle à la distance du point considéré à la surface libre. La pression à l'altitude z est donc donnée par :

$$p(x, z) = (\zeta - z)\rho g \quad (I.16)$$

Cette pression s'exerce sur toute la largeur $w(x, z)$. La force de pression $p(x)$ est donc :

$$p(x) = \int_{z_b(x)}^{\zeta(x)} p(x, z)W(x, z)dz = \int_{z_b(x)}^{\zeta(x)} [\zeta(x) - z]pgW(x, z)dz \quad (I.17)$$

La force de paroi est la résultante de trois forces :

$$\delta F_p(t) = \int_{x_0}^{x_0+\Delta x} (R_p + R_f + R_b)(x, t)dx \quad (I.18)$$

R_b , R_f et R_p sont respectivement, les forces de paroi dues à la réaction du fond sur le fluide dans le plan vertical, au frottement et à la réaction de paroi aux forces de pression dans le plan horizontal (Figure I.3.). On ramène habituellement R_f à la pente S_f de la ligne d'énergie par le biais de l'équation :

$$R_f = -\rho ghS_f \quad (I.19)$$

Il existe plusieurs formules pour caractériser S_f . Toutes les formules usuelles de l'hydraulique à surface libre font appel à l'hypothèse (3), liée à l'hypothèse de régime turbulent, d'une pente de frottement proportionnelle au carré de la vitesse. Les lois les plus souvent utilisées sont les suivantes :

$$\text{Chézy : } S_f = \frac{u^2}{C^2 R_h} \quad (C: \text{coefficients de Chézy}) \quad (I.20)$$

$$\text{Strickler : } S_f = \frac{u^2}{K_s^2 R_h^{\frac{4}{3}}} \quad (K_s: \text{coefficients Strickler}) \quad (I.21)$$

$$\text{Manning : } S_f = \eta^2 \frac{u^2}{R_h^{\frac{4}{3}}} \quad (\eta: \text{coefficients Manning}) \quad (I.22)$$

R_h est le rayon hydraulique :

$$R_h = \frac{A}{\chi} \quad (I.23)$$

Ces coefficients sont reliés par la formule :

$$K_s = \frac{1}{\eta} = \frac{C}{R_h^{1/6}} \quad (I.24)$$

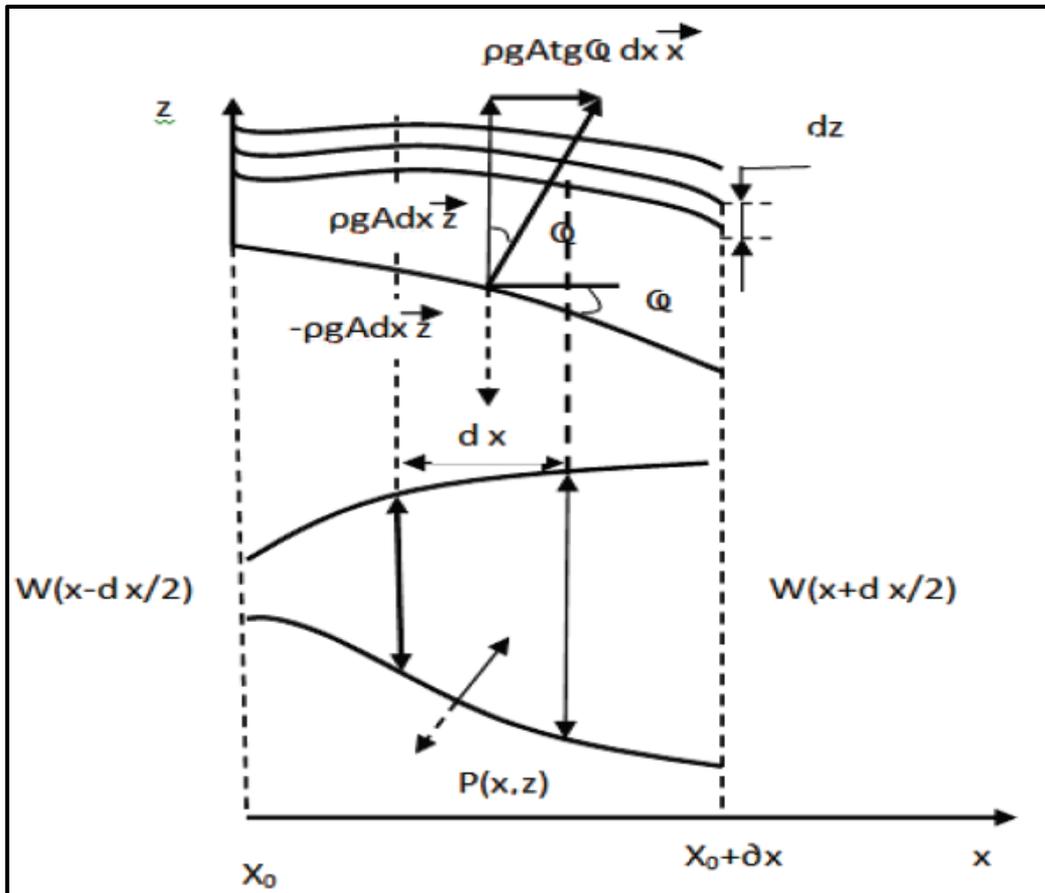


Figure I.3. : Forces exercées par le fluide sur la paroi et réaction de la paroi sur le fluide.

$$\begin{aligned} dR_p &= \left[W \left(x + \frac{dx}{2} \right) - W \left(x - \frac{dx}{2} \right) \right] p(x, z) dz \\ &= \left(\frac{\partial W}{\partial x} \right)_{\zeta-z=Cste} (\zeta - z) \rho g dx dz \end{aligned} \quad (I.25)$$

$\left(\frac{\partial W}{\partial x}\right)_{\zeta-z=Cste}$ indique que la dérivée de la largeur par rapport à x n'est pas prise à z constante, mais à distance constante par rapport à la surface libre.

La force R_p s'obtient en intégrant dR_p par rapport à z et z_b et ζ et par rapport à x entre x_0 et $x_0 + \Delta x$:

$$R_p = \rho g \int_{x_0}^{x_0+\Delta x} \int_{z_b(x)}^{\zeta(x)} (\zeta - z) \left(\frac{\partial W}{\partial x}\right)_{\zeta-z=Cste} dx dz \quad (I.26)$$

La composante R_p selon x est la réaction du fond du chenal sur le volume d'eau. On la calcule en effectuant un bilan des forces sur une tranche de fluide comprise entre $x - \frac{dx}{2}$ et $x + \frac{dx}{2}$. Cette force s'exerce dans le plan vertical, dans la direction normale au fond (figure). Sa projection selon l'axe des z compense exactement le poids $\rho g A dx$ de la tranche du fluide. Le fond étant incliné d'un angle φ par rapport à l'horizontale, la réaction du fond sur le fluide a une composante horizontale égale à :

$$R_b = \rho g A(x) \tan \varphi dx \quad (I.27)$$

La tangente de l'angle φ est la pente du fond du chenal. Elle est souvent notée S_0 et est reliée à la cote du fond par :

$$S_0 = \tan \varphi = -\frac{\partial z_b}{\partial x} \quad (I.28)$$

En remplaçant les relations (2.30), (2.32), (2.34), (2.39-2.40) dans (2.29), en faisant tendre x et t vers 0 et en divisant par la masse volumique ρ constante (hypothèse 1), on obtient la formulation suivante :

$$\frac{\partial}{\partial t}(uA) + \frac{\partial}{\partial x}\left(u^2A + \frac{P}{\rho}\right) = (S_0 - S_f)gA + I_p \quad (I.29)$$

Ou, l'intégrale I_p est donnée par :

$$I = \frac{1}{\rho} \frac{\partial R_p}{\partial x} = g \int_{z_b(x)}^{\zeta(x)} (\zeta - z) \left(\frac{\partial W}{\partial x}\right)_{\zeta-z=Cste} dz \quad (I.30)$$

Le système de BSV s'écrit sous la forme conservative suivante :

$$\begin{cases} \frac{\partial U}{\partial t} + \frac{\partial F}{\partial x} = S \\ U = Q \\ F = \frac{Q^2}{A} + \frac{P}{\rho} \\ S = (S_0 - S_f)gA + I_p \end{cases} \quad (I.31)$$

I.3.1.2. Avantages des modèles 1D

Bien que le modèle de Saint-Venant unidimensionnel n'est qu'une simplification du modèle bidimensionnel, cela n'empêche pas la présence de plusieurs avantages dans le cas de l'établissement de ce modèle : (Guinot, 2003)

- Les modèles 1D offre une meilleure solution :
 - Quand la résolution des modèles 2D est trop grossière ;
 - Pour les tuyaux, regards et les petites structures.
- Les modèles 1D nécessitent plus de jugement (donc une plus grande incertitude) ;
- Les solutions des modèles 1D sont très rapide (mais elles donnent un mauvais rapprochement des écoulements complexes (non-unidirectionnel)).

I.3.2. Modèles mathématiques 2D en surface

Les équations des eaux peu profondes (shallow water equations) à deux dimensions (2D) sont également connues comme les équations de Saint-Venant à deux dimensions.

Les équations 2D sont utilisées dans plusieurs modèles : TELEMAR 2D, FLO-2D, PCSWMM Europe 2D, MIKE 21 HD.

I.3.2.1. Equations de Saint-Venant 2D

Les hypothèses des équations de Saint-Venant 2D sont : (SOUIAIMANI, 1983)

- Profondeur faible devant l'échelle horizontale de variation de la surface libre et de la vitesse ;
- La pression est hydrostatique sur la profondeur car l'accélération verticale est négligeable devant l'accélération de la pesanteur ;
- La variation de la masse volumique de l'eau est négligeable ;
- La composante verticale de la vitesse W ainsi que ces variations (spatiales et temporelles) sont faibles, ceci implique :

$$\frac{\partial W}{\partial x} = \frac{\partial W}{\partial y} = \frac{\partial W}{\partial z} = \frac{\partial W}{\partial t} \quad (I.32)$$

- Les variations verticales des deux composantes horizontales U et V sont faibles ;
- les pertes de charges en régime transitoire sont supposées être calculables de la même manière que pour les écoulements permanents.
- Faible pente du fond du canal.

En considérant que la pression est hydrostatique et en intégrant les équations tridimensionnelles sur la verticale, les équations du modèle bidimensionnel sont :

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial hu}{\partial x} + \frac{\partial hv}{\partial y} = 0 \quad (I.33)$$

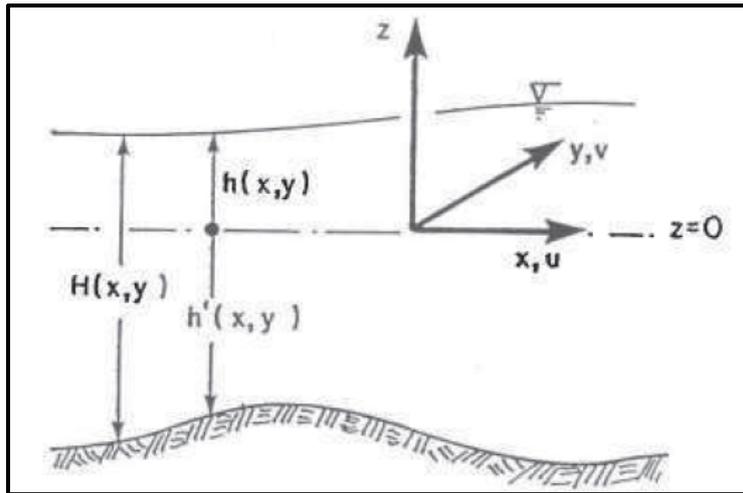


Figure I.4. : Conventions du modèle bidimensionnel

Pour les équations de la conservation de la quantité de mouvement :

$$\frac{\partial hv}{\partial t} + \frac{\partial huv}{\partial x} + \frac{\partial hv^2}{\partial y} + g \frac{\partial h}{\partial x} = F_x \quad (I.34)$$

$$\frac{\partial hu}{\partial t} + \frac{\partial hu^2}{\partial x} + \frac{\partial huv}{\partial y} + g \frac{\partial h}{\partial y} = F_y \quad (I.35)$$

$$F_x = -\frac{g\eta^2|V|u}{h^{\frac{4}{3}}} + f_c v + \frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} \right) + \frac{C_w \rho_a |W| W_x}{\rho H} \quad (I.36)$$

$$F_y = -\frac{g\eta^2|V|v}{h^{\frac{4}{3}}} + f_c u + \frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial \tau_{yx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yy}}{\partial y} \right) + \frac{C_w \rho_a |W| W_y}{\rho H} \quad (I.37)$$

Avec :

- C_w coefficient de traînée du vent ;
- F_x ou F_y résultantes des forces massiques exercées sur une particule d'eau selon x ou y
- f_c coefficient de Coriolis ;
- g gravité ;
- h hauteur d'eau ;
- H profondeur totale ;
- η coefficient de rugosité de Manning ;
- u, v composantes de la vitesse intégrées verticalement ;
- V vitesse du courant ;
- W_x, W_y composantes du vecteur vitesse du vent ;
- (x, y) coordonnées cartésiennes ; lorsque les forces de Coriolis sont prises en compte, x est orienté à l'est et y au nord ;
- ρ masse spécifique de l'eau ;

Par analogie avec les contraintes d'un fluide visqueux, les contraintes de Reynolds sont définies comme suit :

$$\tau_{ij} = \mu_i \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right)_{i=1,2; j=1,2} \quad (\text{I.38})$$

tels que τ_{ij} est la contrainte de Reynolds.

I.3.2.2. Avantages des modèles 2D

Le modèle 2D de Saint-Venant, malgré sa complexité en établissement, est le modèle qui offre un plus d'avantages dans la précision : (Guinot, 2003)

- Les modèles 2D offrent des gains importants dans :
 - La précision de : la modélisation des inondations, les risques et les impacts de la prévision des inondations ;
 - La compréhension et l'acceptation des parties prenantes ;
 Mais ils sont lents en comparaison aux modèles 1D seulement.
- Compréhension du logiciel :
 - Les différentes solutions 2D varient de manière significative dans la performance ;
 - Il faut assurer que le système 2D résout les processus physiques clés nécessaires.

I.4. Conclusion

Les modèles de Saint-Venant 1D et 2D permettent d'exprimer l'écoulement à surface libre, par deux voix de simplification du modèle de Navier-Stokes, une simplification sur l'axe Z, qui nous donne le modèle bidimensionnel 2D, et la simplification sur les deux axes Y et Z : le modèle unidimensionnel 1D.

Chapitre II :
Comparaison de différents
modèles hydrauliques 2D
pour la simulation des
inondations urbaines

II.1. Introduction

Les modèles hydrauliques 2D sont intégrés dans plusieurs logiciels qui offrent différentes options en simulation.

Le choix du modèle se base sur plusieurs critères : la précision requise, les ressources disponibles, et aussi les données d'entrées disponibles.

Le chapitre présent a pour objet la présentation des différents modèles existants (les plus populaires), et leurs caractéristiques d'emploi.

A la fin, une étude comparative des modèles présentés est explicitée.

II.2. Modèle hydraulique

Ce que l'on appelle en langage courant d'ingénieur « un modèle mathématique » est généralement un progiciel dont le cœur consiste en un programme permettant de résoudre numériquement une ou plusieurs équations, le plus souvent différentielles ou intégrales, mais aussi algébriques, souvent non linéaires. Ce cœur peut correspondre aussi bien à une conceptualisation déterministe de la réalité qu'au principe d'une « boîte noire » ou à une méthode statistique. (CUNGE)

II.3. Différents modèles hydrauliques 2D

Les modèles hydrauliques 2D utilisés pour la simulation des inondations urbaines sont différents, mais le tous se rejoint dans la résolution des équations de Saint-Venant à deux dimensions par différentes voies (éléments finis, volumes finis...) et avec différentes formes de discrétisations (carrés, triangulaires...), les uns sont commercialisés, d'autres sont libres (et/ou open-source), dont les plus populaires sont :

II.3.1. TELEMAC-2D

Le système TELEMAC a été développé par le Laboratoire National d'Hydraulique et Environnement (LNHE) d'EDF (Électricité de France).

TELEMAC-2D, résout les équations dites de l'eau peu profonde (les équations de Saint-Venant). TELEMAC-2D résout les équations de Saint-Venant en utilisant la méthode des éléments finis ou la méthode des volumes finis avec un maillage de calcul d'éléments triangulaires. Il peut effectuer des simulations dans des conditions transitoires et permanentes.

Le champ d'application de TELEMAC-2D couvre de nombreux cas d'études comme : (Web)

- les propagations de crues et modélisations des champs d'inondations ;
- les ondes de submersion résultant de rupture d'ouvrages hydrauliques ;
- les régulations de rivières et les propagations d'onde dans les canaux (intumescences, éclusées, mise en eau).

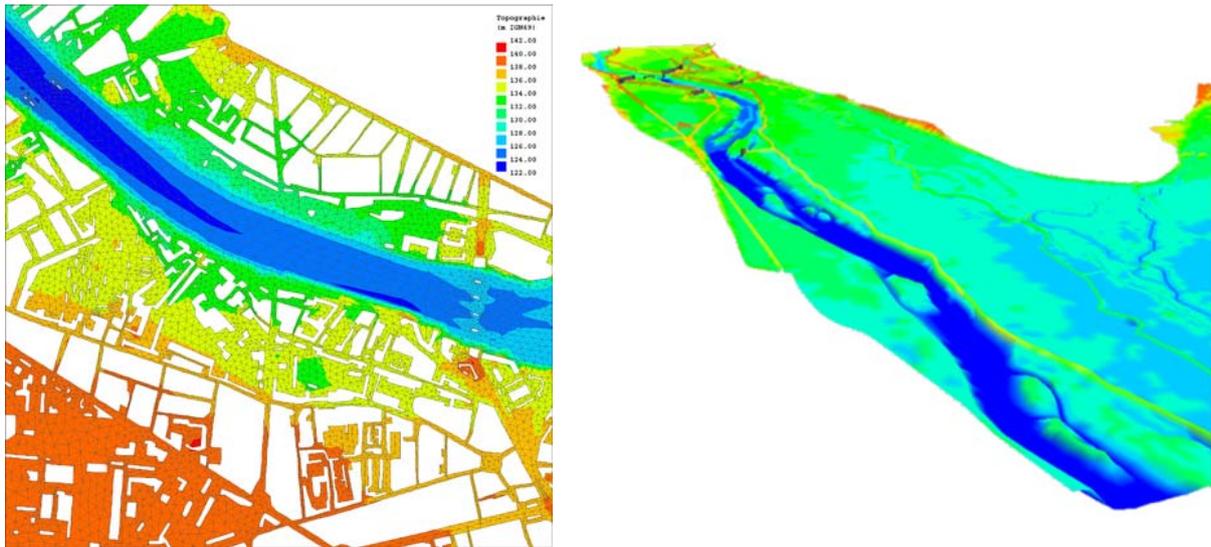


Figure II.1. : Exemple d'un maillage par TELEMAC-2D

II.3.2. FLO-2D

FLO-2D est un modèle bidimensionnel qui permet la simulation dynamique des écoulements dans les cours d'eau et sur les plaines d'inondation. Il simule la propagation d'un hydrogramme de crue sur un système schématisé par une grille constituée de carrés desquels un écoulement vers 8 directions est possible en maintenant la conservation du volume.

Le modèle possède de nombreuses composantes qui permettent une simulation détaillée comme par exemple les échanges entre la section du cours d'eau et la plaine d'inondation, les pertes de stockage dues aux bâtiments, les obstructions à l'écoulement, les ponts et diverses structures hydrauliques.

Le modèle est approuvé par la FEMA (Federal Emergency Management Agency) pour l'analyse des crues. (Web)

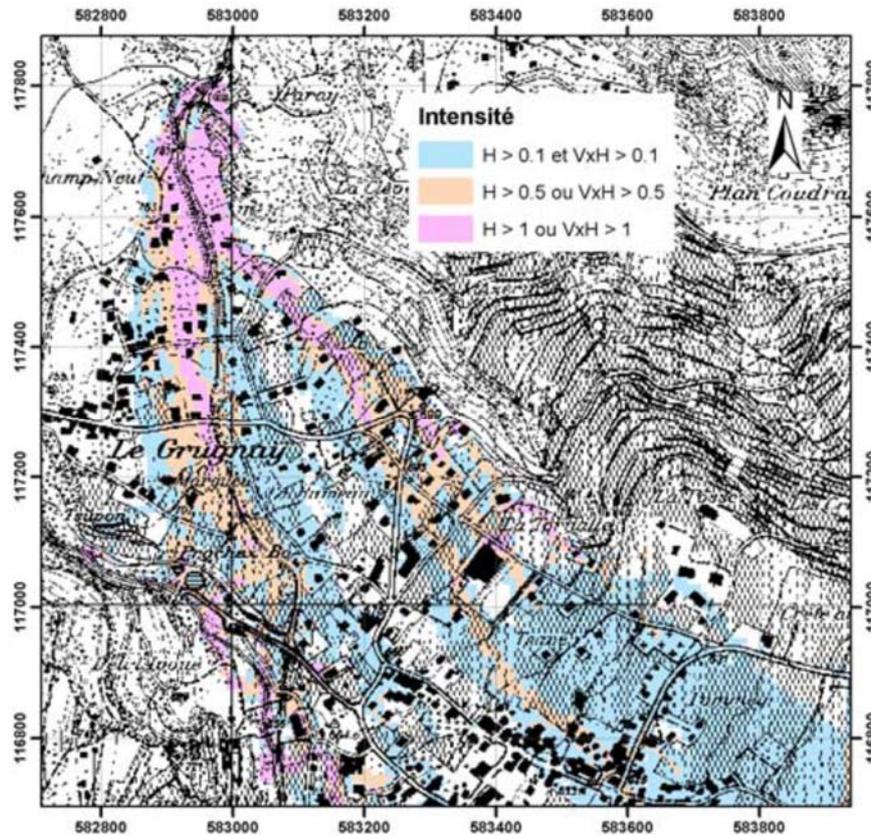


Figure II.2. : Exemple d'un maillage par FLO-2D

Les caractéristiques techniques disponibles en FLO-2D :

- Utilisation des équations complètes de l'onde ;
- Données entrantes : Modèle Numérique de Terrain (MNT) et un hydrogramme de crue ;
- Ecoulement 2D dans 8 directions ;
- Ecoulement 1D avec section naturel ou géométrique ;
- Transport solide.

II.3.3. PCSWMM Europe 2D

PCSWMM Europe 2D offre aux utilisateurs la possibilité de modéliser les écoulements de surface en milieu rural ou urbain.

En fournissant une solution 1D et 2D intégrée, PCSWMM Europe 2D permet de combiner à la fois les écoulements en réseaux avec les écoulements en surface à travers une interface unique et totalement transparente pour l'utilisateur.

PCSWMM Europe 2D intègre : (Web)

- Une solution 1D et 2D totalement intégrée ;
- Des transitions rapides entre 1D et 2D et parfaitement transparentes pour l'utilisateur ;
- Un outil puissant et simple de création et d'édition du maillage ;

- Une lecture 2D dynamique des résultats dans le logiciel ou via des vidéos ;
- Un support de présentation 3D réaliste sous Google Earth ;
- Des supports pour la modélisation : 1D en rivières et en conduites, double drainage (modélisation intégrée 1D des réseaux enterrés et superficiels), 2D des écoulements en surface, ou toute combinaison de ces types d'écoulement ;
- La modélisation de la qualité d'eau à la fois en 1D et 2D ;
- La résolution par la méthode dynamique des équations complètes de Saint-Venant ;
- La possibilité de pas de temps variables ;
- Aucune limite sur le nombre de nœuds et de conduites ni sur la taille des mailles ;
- Possibilité de mise en œuvre de PCSWMM Europe 2D en temps réel pour la prévision des crues.



Figure II.3. : Exemple d'un maillage par PCSWMM Europe 2D

II.3.4. MIKE 21 HD

Le modèle MIKE 21 HD résout les équations bidimensionnelles classiques de Saint-Venant, sur maillage structuré ou non structuré, en tenant compte du frottement sur le fond, de l'effet des événements météorologiques (vent et gradient de pression atmosphérique), de la force de Coriolis, de différentes modélisations de la turbulence de l'écoulement et de la variation de géométrie du domaine au cours du temps (zones couvrantes et non couvrantes au cours de la marée). Il permet également de calculer les courants littoraux en prenant en compte les contraintes de radiation dues à la houle dans la zone de déferlement. (Web)

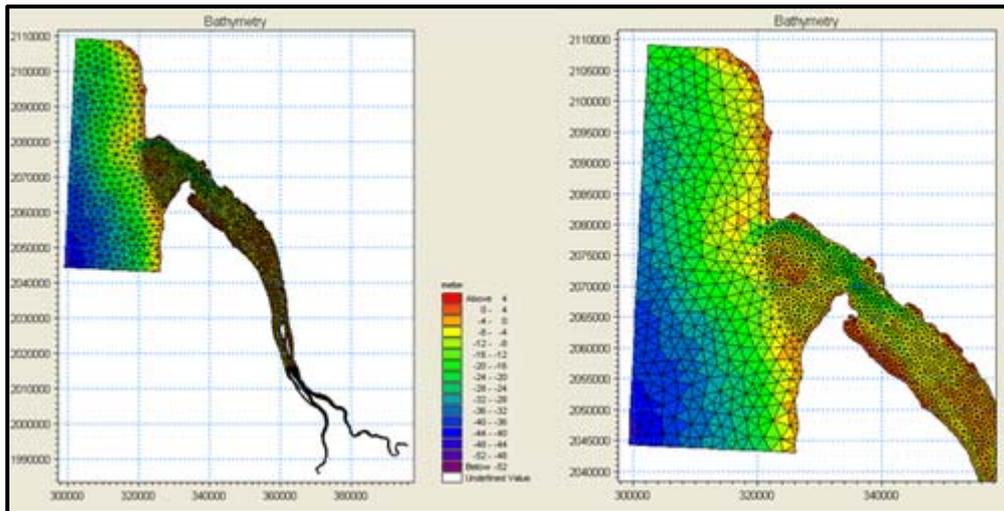


Figure II.4. : Exemple d'un maillage par MIKE 21 HD

II.4. Comparaison des modèles hydrauliques 2D

Le tableau suivant donne une comparaison entre les différents modèles 2D, en point de vue : les méthodes de résolution des équations de Saint-Venant, les formes de maillage de calcul, les conditions de simulation et bien d'autres caractéristiques.

Modèle	TELEMAC 2D	FLO-2D	PCSWMM Europe 2D	MIKE 21 HD
Méthode de résolution des équations de Saint-Venant	Eléments finis/ Volumes finis	Eléments finis/ Volumes finis	Eléments finis/ Volumes finis	Eléments finis/ Volumes finis
Forme de maillage de calcul	Triangulaire	Carrées	-	Triangulaire
Conditions de simulation	Permanentés/ Transitoires	Permanentés/ Transitoires	Permanentés/ Transitoires	Permanentés/ Transitoires
Autres caractéristiques	-	Transport solide	-	-
Payant	Non	Non	Oui	Oui

II.5. Conclusion

Les différents modèles 2D présentés par les divers logiciels permettent la résolution des équations différentielles de Saint-Venant par des méthodes numériques (éléments et volumes finis).

Chapitre III :

Couplage 1D/2D

III.1. Introduction

Pour l'amélioration des résultats de simulation, le couplage des modèles unidimensionnel et bidimensionnel, présente une bonne approche pour bénéficier des avantages du modèle 1D du réseau, et du modèle 2D de la plaine inondée.

Au chapitre présent, on va expliciter la théorie du couplage unidimensionnel/bidimensionnel, les avantages et les inconvénients d'un tels couplage.

III.2. Couplage 1D/2D

Après avoir présenté les modèles mathématiques utilisés dans l'écoulement à surface libre : les équations de Saint-Venant unidimensionnel et bidimensionnel, et après la présentation des différents modèles informatiques existants pour la résolution de système de Saint-Venant bidimensionnel. Une nouvelle méthode de résolution des équations de Saint-Venant appliquer en modélisation hydraulique, et qu'elle a comme but l'**optimisation du calcul** : Le couplage du modèle 1D utilisé pour le réseau d'assainissement (ou le lit mineur dans le cas d'une rivière), avec le modèle 2D pour la plaine d'inondation (lit majeur).

- Le modèle 1D est utilisé à la propagation d'une crue le long du réseau dont la direction est fixée par l'axe de la conduite (ou du lit mineur) ;
- Le modèle 2D est utilisé à la submersion de la plaine d'inondation s'effectue souvent dans une direction oblique.

Les méthodes numériques similaires utilisées dans la résolution des deux modèles permettent un **échange de flux de masse** (ou débit) et **de flux de quantité de mouvement** de manière très simple.

L'objectif principal est d'établir un modèle de surface 2D et le coupler à un modèle 1D afin de simuler les interactions entre les cours d'eau et les plaines inondables.

Les inondations sont généralement dues à un débordement au niveau des nœuds du réseau. Les risques d'inondation sont amplifiés par les effets prévisibles du changement climatique. (DHI: Danish Hydraulic Institute)

La modélisation 1D/2D est justifiée pour "**la conception au dépassement**" où il y a un besoin de comprendre les mécanismes de l'écoulement de surface lors des événements pluvieux qui dépassent la norme de conception du projet pour le régime proposé.

La **modélisation 2D** est considérablement **plus cher** que la **modélisation 1D** en raison des données supplémentaires qui sont nécessaires, l'amélioration de la précision qui est nécessaire, la nécessité d'utiliser du personnel plus expérimenté et en raison de la nécessité d'accorder une attention particulière aux détails qui implique plus de travail sur le terrain et plus travaux de modélisation intensive.

Pour cette raison, la modélisation détaillée 1D/2D est susceptible d'être utilisé avec parcimonie, et dans la plupart des cas la modélisation 1D/2D ne sera pas appliquée à travers

les bassins versants ou de drainages des domaines entiers, mais seront concentrés dans des domaines spécifiques.

III.3. Les avantages d'un couplage 1D/2D

Le couplage 1D/2D permet d'utiliser un modèle unidimensionnel pour représenter le réseau (en général : le lit mineur) et un modèle bidimensionnel pour représenter la plaine d'inondation (en général : le lit majeur), reprenant ainsi les avantages des deux méthodologies :

- La modélisation unidimensionnelle du lit mineur reste pour le moment la plus adaptée, pour deux raisons :
 - Les ouvrages influençant les écoulements dans la rivière restent pour le moment mieux gérés par les modèles unidimensionnels ;
 - Les données décrivant le lit mineur sont dans la plupart du temps des profils en travers situés à des intervalles réguliers le long de la rivière, la création d'un MNT sur lequel viendrait s'appuyer le maillage 2D reste difficile avec ce type de donnée, alors que la modélisation unidimensionnelle représente très bien les écoulements en se basant sur ces mêmes profils.
- La modélisation bidimensionnelle des écoulements en lit majeur est la plus fiable :
 - Plus besoin de faire des choix de représentation qui simplifient des situations souvent complexes :
 - Des casiers qui considèrent comme nuls les écoulements ;
 - Lit secondaire qui considère l'écoulement comme étant unidimensionnel.
 - Les hauteurs d'eau et vitesses sont connus en chaque point de la zone 2D modélisée, tous les obstacles à l'écoulement sont pris en compte, la complexité de la zone 2D est ainsi prise en compte dans les écoulements ; ce qui permet d'envisager l'étude précise des écoulements en milieu urbain après débordement.
- Très facile de transformer un modèle purement 1D en couplage 1D/2D (fonctions de traduction des stockages en zones 2D, utilisation des spills existants etc.) ;
- Générateur de maillage puissant et facile à utiliser, avec des fonctions avancées :
 - Gestion des zones de discrétisation différenciée (polygones de maillage) ;
 - Prise en compte de lignes de rupture, murs, vides etc.
- Modélisation 2D « à la demande » avec ajout d'un nombre illimité de zones 2D dans le modèle, évite d'avoir à tout modéliser la plaine d'inondation avec un seul maillage, limite ainsi la taille de la zone 2D et permet une adaptation à la topographie.

III.4. Les inconvénients d'un couplage 1D/2D

Parmi les inconvénients en cas d'utilisation du couplage 1D/2D :

- Nécessite un ordinateur puissant pour le traitement des données et la génération des maillages ;
- Les renversements peuvent être source d'instabilité et de perte/gain de débit durant la simulation, à surveiller.

III.5. Conclusion

Le couplage 1D/2D, est un outil très puissant d'optimisation de la modélisation en cas d'inondation, qui permet de prendre en considération les avantages des deux types de modélisation (uni et bidimensionnelle). Tout en augmentant la performance des calculateurs utilisés et en réduisant le temps de calcul.

Chapitre IV :
Utilisation des données
topographique à haute
résolution (MNT)

IV.1. Introduction

Le couplage 1D/2D utilise plusieurs données d'entrées dont la plus importante est le MNT (Modèle Numérique du Terrain).

L'utilisation de ces données topographiques à haute résolution permet d'obtenir une meilleure discrétisation de la plaine d'inondation. Cela permet de résoudre les équations de Saint-Venant avec une fine précision, donc des résultats plus exacts.

Le chapitre VI commence par une définition du MNT, puis son utilisation pour le couplage 1D/2D.

IV.2. Données topographique à haute résolution (MNT)

Un MNT est construit à partir de toutes les données topographiques et bathymétriques disponibles et celles collectées en début d'étude (éléments existants ou nouveaux relevés).

Il redessine le relief aussi bien des sols que des fonds de rivières, à l'aide de triangles de tailles et de formes différentes. Ce maillage à facettes triangulaires présente deux avantages essentiels :

- Le maillage s'adapte facilement aux géométries complexes que l'on peut rencontrer dans la traversée à certains points (digues, remblais, ouvrages hydrauliques, drains hydrauliques, etc.) de manière à les représenter fidèlement et avec précision.
- La densité du maillage est adaptée afin d'affiner les résultats fournis par le modèle dans les zones d'intérêt de l'étude et dans les zones d'écoulements complexes.

Chaque point du maillage est défini par :

- ses coordonnées au sol ;
- la cote du terrain ;
- un coefficient de rugosité, traduisant l'état de surface du terrain (occupation du sol en lit majeur ou nature des fonds en lit mineur).

Plusieurs difficultés rencontrées à la discrétisation du milieu urbain, le tissu urbain est fortement discontinu (routes, bâtiments) ce qui impose des conditions sévères sur les dimensions des éléments de discrétisation de l'espace. Ainsi, si l'on choisit une discrétisation à mailles carrées régulières, la taille des mailles ne devrait pas dépasser suivant certains auteurs le m^2 (Elgy J, 1993). Un autre inconvénient majeur des maillages plus ou moins arbitraires concerne la représentativité de l'information contenue par les différentes mailles. (Beven, 1989)

En milieu urbain, le réseau de drainage naturel est fortement modifié par les différents aménagements du milieu, en particulier par les obstacles à l'écoulement (les bâtiments) et par les éléments drainants artificiels (les voies ou les collecteurs). Certaines méthodes consistent à reconstituer artificiellement la topographie réelle du milieu en modifiant directement le MNT obtenu à l'aide des courbes de niveau du site par surélévation des mailles correspondant aux

bâtiments et par abaissement des mailles correspondant aux éléments drainants artificiels. (Elgy J, 1993) (Figure VI.1.)

Le réseau de voirie peut être aussi utilisé pour forcer directement le réseau de drainage naturel. La superposition du squelette du réseau de voiries au MNT permet de déterminer pour chaque tronçon de voirie compris entre deux nœuds (entre deux croisements) le sens de l'écoulement sur le tronçon.

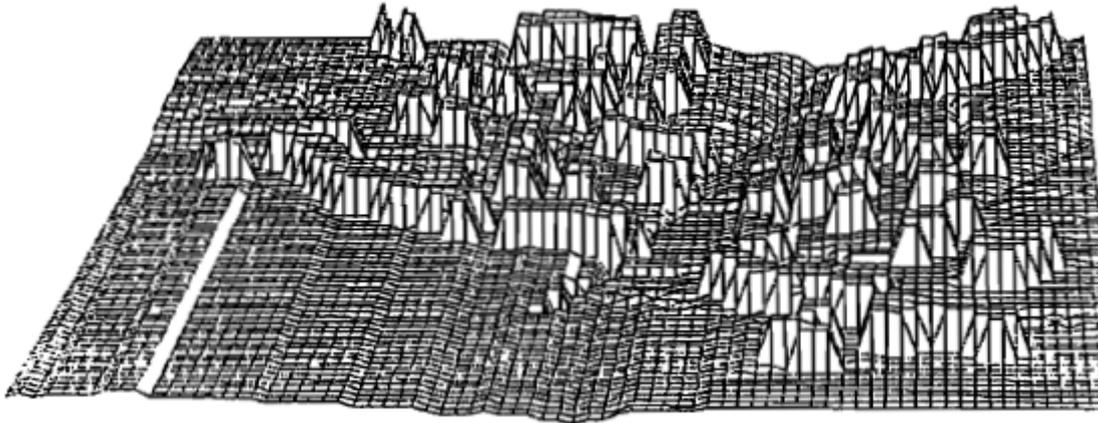


Figure IV.1. : Modèle Numérique du Terrain pour un bassin urbain

IV.3. Utilisation du MNT

Qu'il s'agisse de modélisation 1D, 2D, ou la modélisation couplé 1D/2D, le travail consiste tout d'abord en l'élaboration d'un modèle numérique de terrain (MNT) pour le lit mineur et pour le lit majeur des tronçons modélisés. Des données d'entrées pour cette modélisation sont nécessaires : modèle numérique de terrain pour le lit majeur ; relevés topographiques du lit mineur et des ouvrages d'art ; données statistiques.

Ce MNT est ensuite utilisé pour réaliser un modèle hydraulique qui sera calibré et validé en simulant une crue historique documentée grâce à toute mesure de hauteur d'eau, à tout relevé de laisses de crue, à toute photographie aérienne ou toute autre information disponible.

Enfin, le modèle hydraulique validé est utilisé pour simuler les débits stationnaires pour différentes périodes de retour ; ainsi que le débit extrême (débit dont la période de retour est 100 ans, augmenté de 30%).

Les résultats bruts d'une modélisation 2D, obtenus sur des mailles carrées sont une hauteur d'eau (submersion) et une vitesse d'écoulement pour chaque récurrence.

Un post-traitement des résultats bruts des modélisations 1D permet de définir une hauteur de submersion avec une densité similaire. (Wallonie, 2013)

Les cartes d'inondation doivent avoir été conçues rigoureusement en se reposant sur des bases scientifiques et en utilisant des données topographiques de grande précision. En outre, elles

doivent prendre en compte un nombre important d'événements statistiques de crues incluant de possibles influences du changement climatique et ne doivent pas se limiter à la reproduction des événements enregistrés dans le passé. Par ailleurs, ces cartes doivent pouvoir être mises à jour facilement au regard des modifications topographiques pouvant apparaître au sein même du lit mineur où dans les zones de débordements.

Dans ce contexte, la modélisation hydraulique peut certainement fournir les réponses attendues et des résultats fiables et précis surtout lorsque ces modèles peuvent exploiter les nombreuses informations fournies de nos jours par les Modèles Numériques de Terrain (MNT) qui sont généralement acquis par la technique du laser interférométrique embarqué en avion ou par la méthode du sonar multifaisceaux embarqué en bateau. (McMillan, 2007)

IV.4. Conclusion

L'utilisation du MNT a une importance primordiale dans le couplage des modèle 1D/2D. La précision des résultats de simulation est tributaire de la qualité du MNT, ce dernier doit avoir un maillage fin (de l'ordre de 1m²).

Chapitre V :
Méthodologie de simulation

V.1. Introduction

Le but d'un couplage des modèles 1D/2D est de pouvoir simuler le fonctionnement des réseaux de collecte et suivre l'évolution du plan d'eau en surface. L'exploitation des résultats de simulation va permettre au gestionnaire du réseau d'optimiser les efforts déployés en cas d'inondations.

La simulation comporte plusieurs étapes caractérisant les deux approches 1D et 2D.

Dans ce chapitre, nous allons présenter les hypothèses, les étapes et les résultats possibles de la simulation des modèles de couplage 1D/2D.

V.2. Hypothèses de la modélisation

Pour avoir les équations de Barré Saint-Venant, une zone d'étude doit vérifier les conditions suivantes :

- faible pente ;
- variations lentes de débit.

V.3. Etapes de la modélisation

Après les phases de préparation du MNT, les paramètres du modèle et principalement la valeur du coefficient de frottement doit être calibrée. Ce processus est réalisé en simulant une crue historique relativement bien documentée (photographies aériennes, mesures locales du niveau d'eau,...). Par après, les débits statistiques correspondants à des périodes de retour de 25, 50 et 100 ans sont simulés afin de fournir les données nécessaires à la création de la carte de l'aléa d'inondation. La construction du modèle couplé consiste en plusieurs étapes (Thibault, 2013) :

- la construction du modèle unidimensionnel. Tout d'abord, il faut définir le réseau hydraulique sur lequel s'appuyer ; ensuite, il faut tracer la géométrie des biefs définis par ce réseau. Puis, il faut définir le maillage 1D, formé par les profils, ainsi que les conditions initiales, bief par bief. On peut ensuite regrouper les différents biefs, pour obtenir un modèle unidimensionnel multi bief ;
- la construction du maillage bidimensionnel. Celui-ci doit avoir ses limites exactement au niveau des limites des biefs unidimensionnels ;
- Enfin, on couple le maillage bidimensionnel avec le modèle unidimensionnel, par un fichier mettant en relation les arêtes 1D et les arêtes 2D frontalières, par leurs coordonnées XY, On peut alors lancer la simulation couplée. On utilise un pas de temps constant, une valeur de courant maximale de 0,9 pour toutes les mailles. Ainsi, c'est le nombre de courant qui varie pour respecter la condition de stabilité de courant de Friedrich Levy, sauf s'il dépasse 0,9. Cela permet d'avoir un modèle plus stable.

V.4. Résultats de simulation

Les résultats de simulation peuvent se diviser en trois catégories :

- Réseaux (ou bien rivières) et zone inondables modélisés en 1D (Figure V.1.) ;

- Surface modélisée en 2D (Figure V.2.) ;
- Modèle de réseau 1D couplé à un modèle de surface 2D (Figure V.3.).

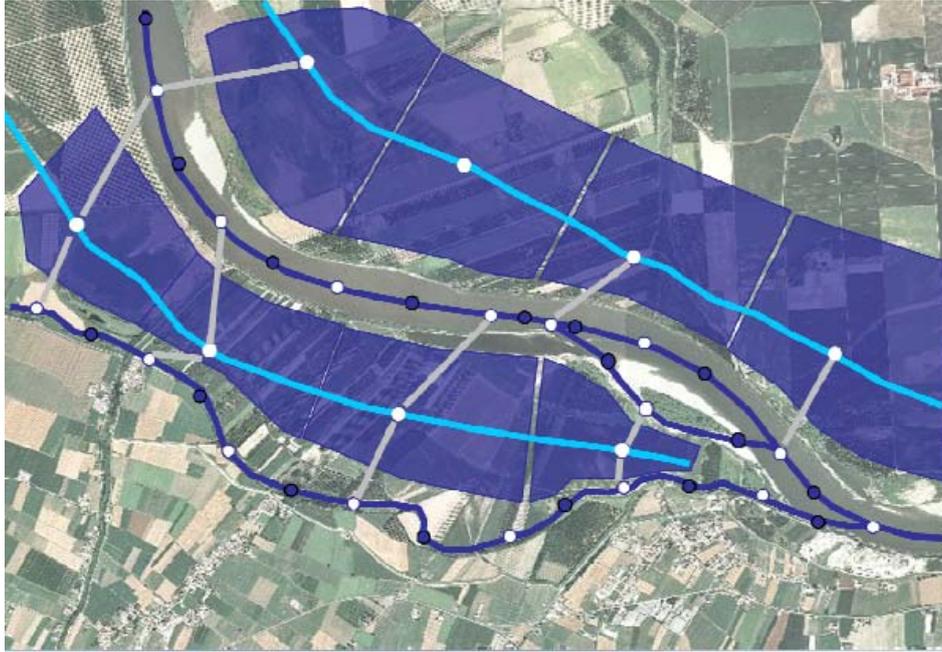


Figure V.1. : Réseaux (ou bien rivières) et zone inondables modélisés en 1D

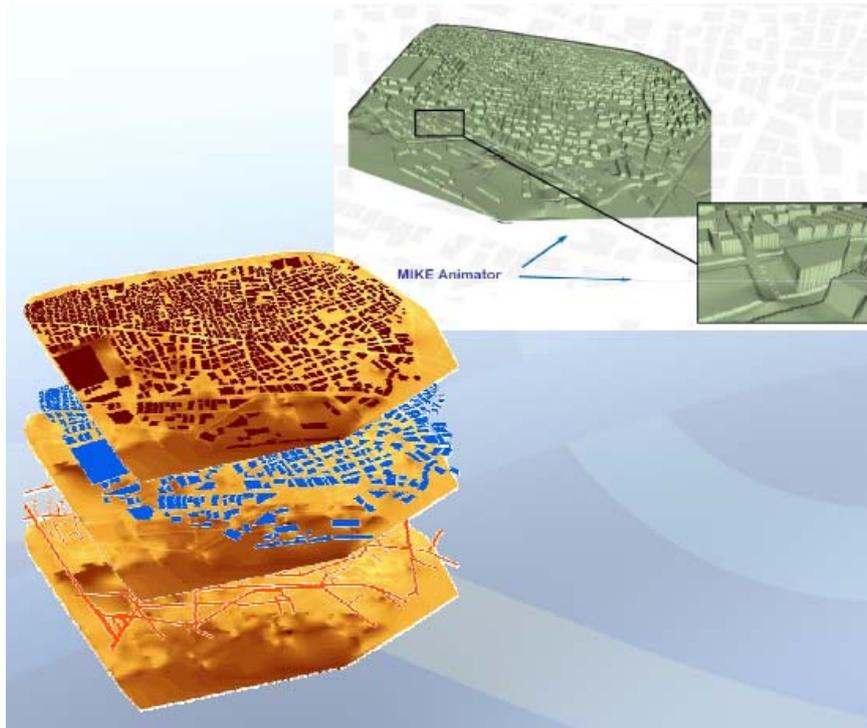


Figure V.2. : Surface modélisée en 2D

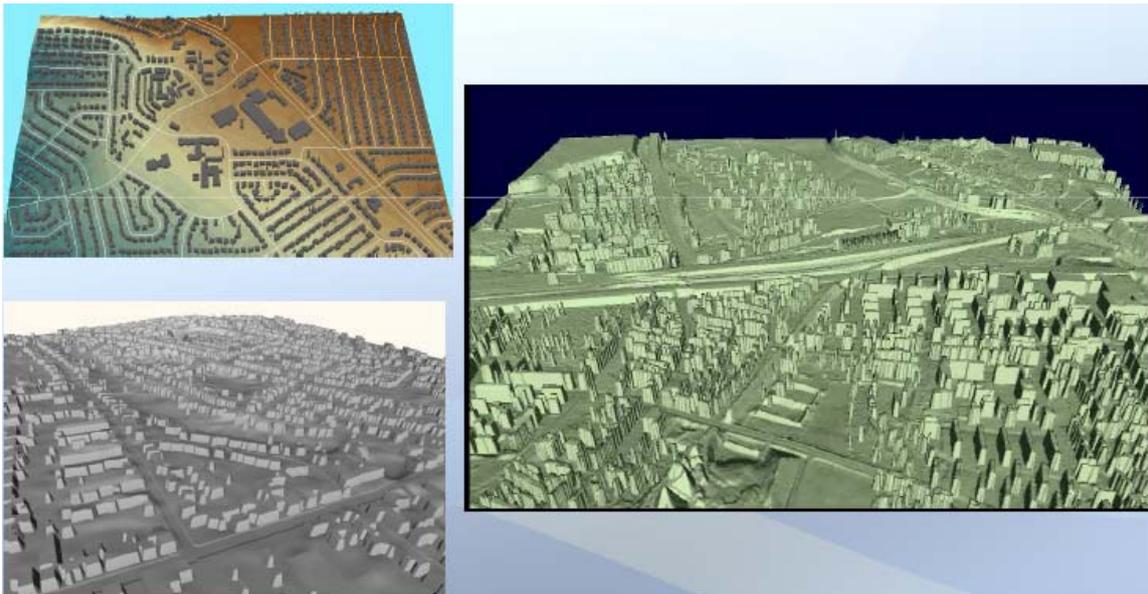


Figure V.3. : Modèle de réseau 1D couplé à un modèle de surface 2D

Les résultats de couplage sont (Figure V.4.) :

- Estimation des dommages et coûts
- Planification de la circulation
- Carte de risques

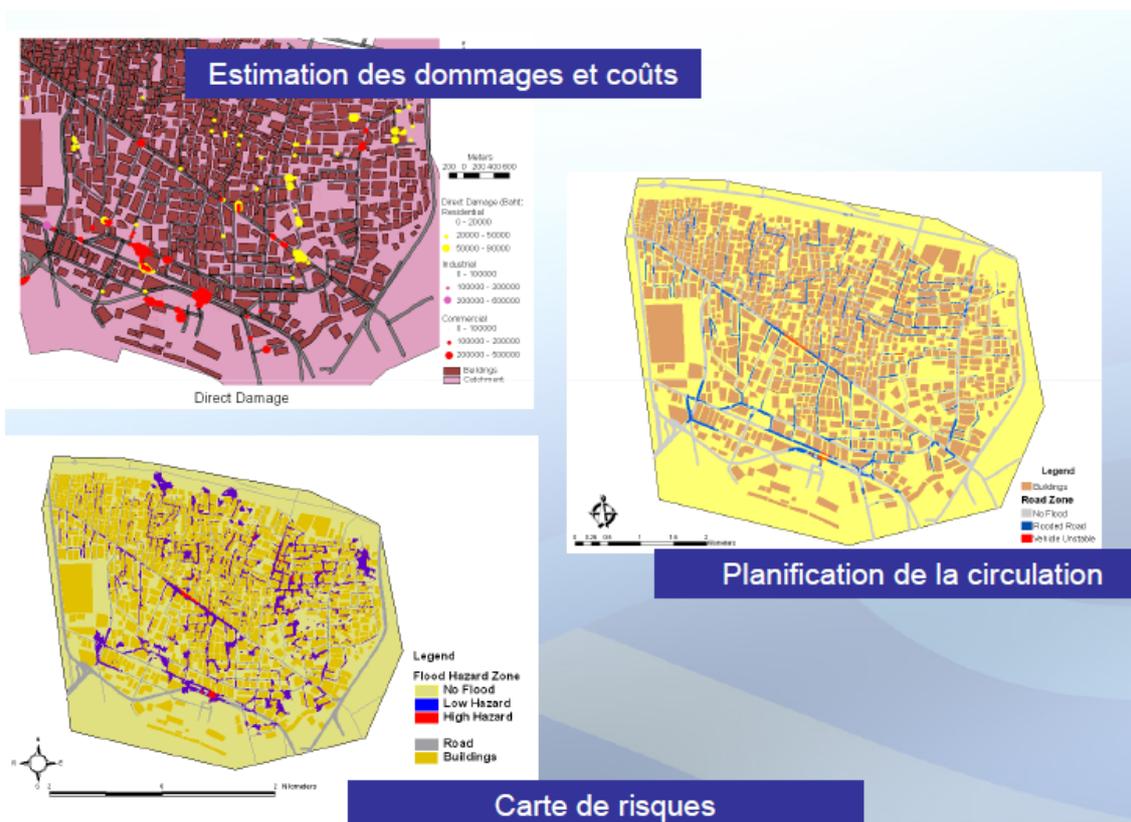


Figure V.4. : Résultats de simulation couplée

V.5. Conclusion

L'utilisation des modèles de couplage 1D/2D permet de visualiser et de quantifier l'impact des inondations sur les milieux urbains. Néanmoins, il est nécessaire de disposer de moyens de calcul plus puissants pour remédier à la lenteur du temps de calcul.

Chapitre VI :
Gestion du risque
d'inondation dans les zones
urbaines

VI.1. Introduction

L'objectif est d'établir un modèle 2D et de le coupler au modèle 1D afin de simuler les interactions entre les réseaux d'eaux pluviales et d'assainissement, et les zones inondables.

Ce dernier chapitre permet de mettre en évidence la relation entre le couplage des modèles unidimensionnel et bidimensionnel et la gestion du risque d'inondation dans une zone urbaine.

VI.2. La gestion du risque d'inondation

Le cycle de réduction des dommages causé par les inondations (Figure VI.1.) :

- Avant l'évènement : Prévention et mesures de réduction
- Pendant l'évènement : Alerte et Etat d'urgence et Secours (Impacts inondation) ;
- Après l'évènement : Reconstruction et réhabilitation.

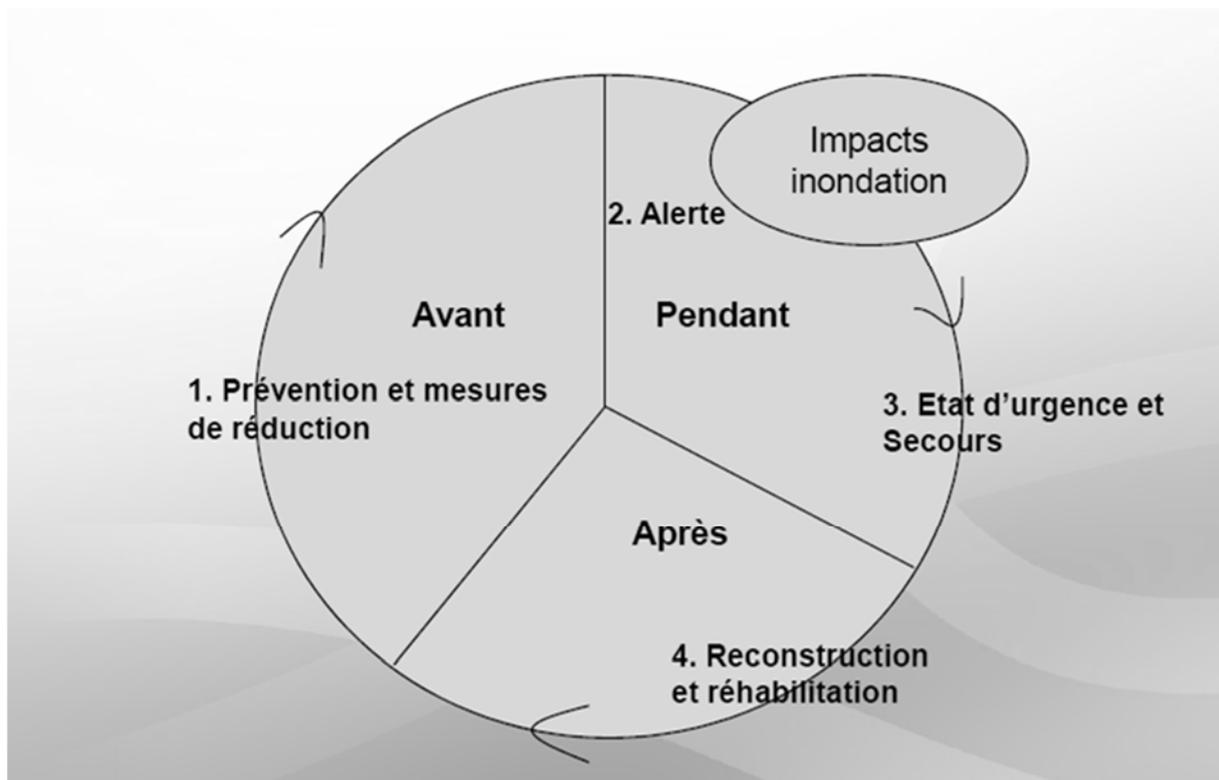


Figure VI.1. : Cycle de réduction des inondations (Parkinson & Mark, 2005)

L'étape de simulation des réseaux d'assainissement est placée en premier lieu : Prévention et mesures de réduction ; et en particulier, la simulation est utilisée par couplage des modèles 1D et 2D. Les résultats de cette simulation permettent de créer un plan de prévention des risques d'inondation.

VI.3. Plan de prévention des risques d'inondation

Un plan de prévention du risque inondation ou plan de prévention des risques d'inondation (sigle : « PPRI ») est un document émanant de l'autorité publique, destiné à évaluer les zones pouvant subir des inondations et proposant des remèdes techniques, juridiques et humains pour y faire face.

C'est un document stratégique, cartographique et réglementaire. Il définit les règles de constructibilité dans les secteurs susceptibles d'être inondés. La délimitation des zones est basée sur les crues de référence, et c'est en ce sens que ces documents sont souvent remis en question, notamment prospectivement en raison du contexte de dérèglement climatique.

L'établissement des cartes trouvées dans le PPRI, doit être construit à l'aide de la plus fiable méthode de simulation, et la plus optimale, qui est : Le couplage 1D/2D.

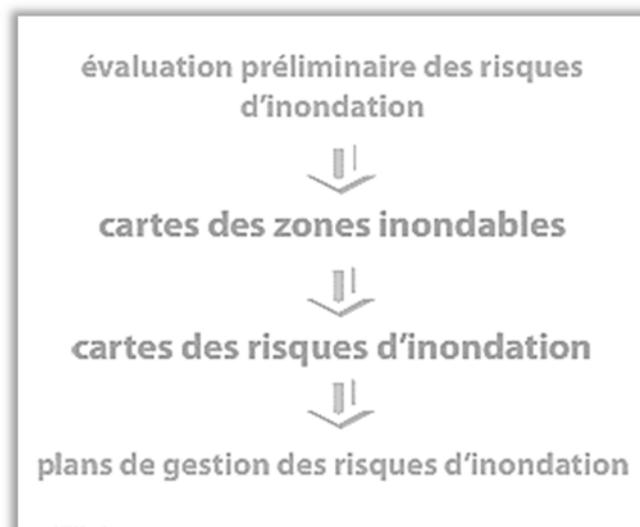


Figure VI.2. : La directive inondation

Les cartes des zones inondables et les cartes des risques d'inondations indiquent les zones qui sont inondées lors de crues d'une certaine probabilité (crue décennale, centennale ou extrême) et qui présentent un risque de dégât. Elles permettent aux experts et aux citoyens de mieux évaluer les risques d'inondation.

VI.4. Conclusion

Le couplage 1D/2D permet de simuler d'une façon optimale les risques d'inondation dans une zone urbaine, générés par des événements pluvieux intenses.

L'exploitation des résultats de simulation constitue un outil d'aide à la décision avec lequel, les décideurs vont se baser pour cadrer leurs interventions et orienter leurs investissements (renouvellement, réhabilitation...).

Conclusion générale

Le couplage 1D/2D permet de combiner à la fois les écoulements en réseaux avec les écoulements en surface à travers une interface unique, et cela pour l'amélioration des résultats de simulation.

C'est un outil d'optimisation de la modélisation en cas d'inondation, qui permet de prendre en considération les avantages des deux types de modélisation (uni et bidimensionnelle).

L'utilisation des modèles de couplage 1D/2D permet de visualiser et de quantifier l'impact des inondations sur les milieux urbains. Néanmoins, il est nécessaire de disposer de moyens de calcul plus puissants pour remédier à la lenteur du temps de calcul.

Le but final d'un couplage des modèles 1D/2D est de pouvoir simuler le fonctionnement des réseaux de collecte et suivre l'évolution du plan d'eau en surface. L'exploitation des résultats de simulation va permettre au gestionnaire du réseau d'optimiser les efforts déployés en cas d'inondations. L'exploitation de ces résultats est un outil d'aide à la décision.

Bibliographie

A. Paquier, B. Sigrist. *Simulation d'une inondation par couplage 1D-2D.*

Amélie Besnard, Nicole Goutal. 2011. *Modélisation hydraulique d'une plaine d'inondation : comparaison de modèles 1D à casiers et 2D.* 2011.

Beven, K. J. 1989. *Changing ideas in hydrology: the case of physically-based models.* s.l. : J. Hydrol., 1989.

CUNGE, Jean A. *Modèles mathématiques en hydraulique et en hydrologie.* s.l. : Techniques de l'Ingénieur.

Dutta, D., Herath, S., Musiaka, K. 2003. *A mathematical model for flood loss estimation.* 2003.

Elgy J, Maksimovic C, Prodanovic D. 1993. *Matching standard GIS packages with urban.* 1993.

Guinot, V. 2003. *Les modèles numériques en hydrologie et en hydraulique.* Montpellier : Université Montpellier 2, 2003.

KHERBACHE.K. 2004. *Contribution à l'élaboration d'un modèle hydrodynamique par la méthode des volumes finis.* Alger : Ecole Nationale Polytechnique, 2004.

KHOUALFIA Samir, NECIB Abdelbasset. 2013. *Modélisation 1D et 2D des écoulements en réseaux d'assainissement.* Alger : Ecole Nationale Polytechnique, 2013.

Kovacs, Y. 1988. *Modèles de simulation d'écoulement transitoire en réseau d'assainissement.* Paris : Thèse de doctorat ENPC, 1988.

Lai, C. 1980. *Numerical modeling of unsteady open-channel flow.* 1980.

McMillan. 2007. *Reduced complexity strategies for modelling urban floodplain inundation.* s.l. : Geomorphology, 2007.

Mignot, E., Paquier, A., Haider, S. 2006. *Modelling floods in a dense urban area using 2D.* 2006.

SOUIAIMANI, A. 1983. *Nouveaux aspects de l'application de la méthode des éléments.* 1983.

Test du couplage 1D-2D sur InfoWorks RS. **KOCH, Arnaud.** s.l. : PROLOG Ingénierie.

Thibault, Marie. 2013. *Modélisation hydrodynamique couplée 1D-2D du delta intérieur du fleuve Niger.* 2013.

Wallonie, Géoportail de la. 2013. *Aléa d'inondation, zones inondables, risques d'inondation: Notice technique.* 2013.

Web. *FLO-2D.* [En ligne] <http://www.flo-2d.com/>.

PCSWMM. [En ligne] <http://www.hydropraxis.com/>.

MIKE 21 HD. [En ligne] <http://www.mikepoweredbydhi.com/>.

OpenTelemac. [En ligne] <http://www.opentelemac.org/>.