



REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
Ministère de l'Enseignement Supérieur
et de la Recherche Scientifique



Université Hadj Lakhdar –Batna

Institut de Génie Civil, d'Hydraulique et d'Architecture

Département d'Hydraulique

Mémoire de Magister en Hydraulique

Option : Hydraulique numérique et Environnement

Présenté par
Kamel BENOUMESSAD

Pour obtenir le diplôme de Magister en Hydraulique

***Simulation des structures de vitesses dans
un écoulement non permanent dans
un canal non prismatique et
non linéaire***

Sous la direction de Dr Ali FOURAR

Mémoire soutenu le 31 Janvier 2012

Devant le jury composé de :

Jury	Grade	Affiliation	Qualité
D ^f LAHBARI N.	MC	Université de Batna	Président
D ^f FOURAR A.	MC	Université de Batna	Rapporteur
D ^f KADDID A.	MC	Université de Batna	Examineur
D ^f BOUZIANE T.	MC	Université de Biskra	Examineur
D ^f BRIOUA M.	MC	Université de Batna	Examineur

Résumé :

La présente étude consiste à simuler un écoulement non permanent à surface libre dans un canal non prismatique et non linéaire.

L'intérêt de l'étude est d'exploiter les résultats de la simulation numérique concernant les différentes caractéristiques influençant l'écoulement étudié en se concentrant sur les profils des vitesses d'écoulement dans le canal objet de notre étude.

Deux modèles sont choisis pour être objet d'étude, le premier est formé d'un canal de section rectangulaire qui diverge progressivement, le deuxième est constitué d'un canal à section rectangulaire avec un rétrécissement et un élargissement. Les deux modèles sont non linéaires avec une pente variable.

Le code numérique utilisé est «FLUENT», c'est un logiciel dédié aux simulations numériques des écoulements à surface libre avec un préprocesseur de géométrie et de maillage appelé GAMBIT.

Le processus de simulation impose une discrétisation des équations de Barré de Saint-Venant avec des conditions aux limites.

Les structures des vitesses de l'écoulement dans le canal étudié donnent une image très claire sur les phénomènes hydrauliques qui apparaissent dans le canal, notamment dans les singularités.

Mots clés : écoulement à surface libre, simulation numérique, profils de vitesse, canal

ملخص:

تتضمن الدراسة الحالية محاكاة لجريان غير دائم ذو سطح مفتوح في قناة غير متجانسة و غير خطية.

أهمية هذه الدراسة تتمثل في استغلال نتائج المحاكاة الرقمية المتمثلة في مختلف الخصوصيات المؤثرة في الجريان موضوع الدراسة مركزين في ذلك على الأشكال البيانية الممثلة لسرعات الجريان في القناة.

النموذجين المدروسين كل منهما عبارة عن قناة غير مستقيمة ذات مقطع مستطيل الشكل و تغير في الانحدار مع تغير في المقطع (اتساع و تضيق).

البرنامج الرقمي المستعمل يدعى "فلوونت" و هو برنامج متخصص في المحاكاة الرقمية للجريان ذو سطح مفتوح, مدعوم ببرنامج للمعالجة الأولية المسمى "قامبيت".

منهجية المحاكاة الرقمية تقتضي حل تجزيئي لمعادلات سان فونان مع شروط الحدود.

الأشكال البيانية لسرعات الجريان في القناة المدروسة أعطت صورة واضحة عن الظواهر الهيدروليكية التي تنتج في القناة خاصة في المناطق المتميزة.

كلمات مفتاحيه: جريان ذو سطح مفتوح ، محاكاة رقمية، شكل بياني للسرعة، قناة.

Dédicaces

Je dédie ce modeste travail à :

Mes parents

Ma petite famille

Tous mes amis et proches

Toute personne ayant contribué de près ou de loin à l'accomplissement de ce travail.

Remerciements

Je tiens à adresser mes plus vifs remerciements et gratitude au D^r Fourar Ali , directeur de mémoire, pour son aide et sa confiance.

Je tiens à remercier également le président de jury ainsi les membres de jury pour l'intérêt qu'ils ont porté à ce modeste travail.

Liste des symboles

A	Surface (m ²)
C	Constante
g	Accélération (m/s ²)
P	Pression (Pa)
t	Variable temps (s)
U_i	Composante de la vitesse moyenne suivant la direction i (m/s)
V	Volume d'une cellule (m ³)
x	Distance par rapport à la paroi (m)
h	Hauteur d'eau (m)
I	Pente du fond
J	Perte de charge
F	Flux
q	Débit latéral
P	Pression Pa
Patm	Pression atmosphérique
f	Force de frottement
Fr	Nombre de froude
C_f	Coefficient de frottement
n	indice de pas de temps pour les grandeurs hydrauliques (voir $U^n i$ par exemple)
R_c	rayon de courbure (m)
R_h	rayon hydraulique (m)
V	vitesse d'écoulement sur une ligne de courant (m/s)
U	vitesse moyenne de l'écoulement (m/s)
S	section mouillée (m ²)
x	abscisse (m)
z	Altitude (m)
Δx	pas d'espace (m)
Δt	pas de temps (s)
K_{str}	Coefficient de Strickler

Lettres grecques

δ	Kronecker Delta
ε	Taux de dissipation de l'énergie cinétique turbulente
μ	Viscosité dynamique (kg/ms)
ν	Viscosité cinématique (m ² /s)
τ	Coordonnée locale tangentielle à la paroi
ϕ	scalaire
ζ	coefficient numérique
γ	coefficient de Bazin (m ^{1/2})
ς	Vecteur d'accélération
α	Angle
ε	coefficient de transfert de la quantité de mouvement du débit latéral q
ρ	masse volumique du fluide (kg/m ³)

Liste des figures

Figure 1.1	Schémas écoulement permanent & non permanent	5
Figure 1.2	Schéma des différents régimes d'écoulement à surface libre	6
Figure 1.3	Schéma synthèse des différents régimes d'écoulement à surface libre	7
Figure 1.4	Les différents paramètres d'un écoulement dans une section.	7
Figure 1.5	Profile de vitesse 3D	8
Figure 1.6	Profile de vitesse 2D	9
Figure 1.7	Profile de vitesse 1D	9
Figure 1.8	Profil logarithmique de la vitesse	9
Figure 1.9	Profil longitudinal et transversal des vitesses	10
Figure 1.10	Surface libre et la variation du tirant d'eau	11
Figure 1.11	Le comportement des ondes selon les régimes d'écoulement	12
Figure 1.12	Seuil à crête mince (a)droit (b) profilé	13
Figure 1.13	Vanne orifice	13
Figure 1.14	Transition de section dans un canal	14
Figure 2.1	Types de modélisations d'écoulement à surface libre	17
Figure 2.2	Conservation de la masse	19
Figure 2.3	Trajectoire d'une "particule" de fluide	21
Figure 2.4	Écoulement monodimensionnel selon un axe O_x	22
Figure 3.1	Processus de simulation numérique	34
Figure 3.2	Méthodes de Discrétisation des équations différentielles	34
Figure 3.3.a.	Arrangement des volumes de contrôle	37
Figure 3.3.b	Le volume de contrôle principal dans un maillage bidimensionnel.	37
Figure 3.4	Discrétisation du canal en sous tronçons.	39
Figure 3.5	Méthodologie de d'un problème numérique	40
Figure 3.6	Interface de GAMBIT	41
Figure 3.7	domaine physique	42
Figure 3.8	Distorsion du maillage	43
Figure 3.9	Lissage du maillage	43
Figure 3.10	Différents types de du maillage	44
Figure 3.11	Fenêtres de la résolution.	46
Figure 3.12	Organigramme de calcul	47
Figure 3.13	Fenêtres de Post-Processeur	48

Figure 4.1-a	Géométrie en 2D du modèle	53
Figure 4.1-b	Profil longitudinal du modèle	53
Figure 4.2	Géométrie en 3D du modèle	53
Figure 4.3	Maillage du modèle	54
Figure 4.4	Graphique des calculs des résidus (convergence)	56
Figure 4.5	Pression statique en Pa	56
Figure 4.6	Pression dynamique en Pa	57
Figure 4.7-a	Profil des vitesses 3D	58
Figure 4.7-b	Profil des vitesses 2D	58
Figure 4.7-c	Profil des vitesses dans les différentes sections du canal	59
Figure 4.8-a	profil des vecteurs- vitesses dans les différentes sections du canal	59
Figure 4.8-b	profil des vecteurs - vitesses dans les singularités	60
Figure 4.9-a	profil des vitesses par rapport à X en m/s	61
Figure 4.9-b	profil des vitesses par rapport à Y en m/s	61
Figure 4.9-c	profil des vitesses par rapport à Z en m/s	62
Figure 4.10	profil des la contrainte de cisaillement sur le fond les parois en Pa	62
Figure 4.11-a	Géométrie du modèle en 2D	63
Figure 4.11-b	Profil longitudinal du modèle en 2D	63
Figure 4.12	Géométrie du modèle en 3D par Gambit	64
Figure 4.13	maillage du modèle par Gambit	64
Figure 4.14	graphique des calculs des résidus (convergence de la solution)	65
Figure 4.15	pression statique en Pa	66
Figure 4.16	pression dynamique en Pa	66
Figure 4.17	profil des vitesses le long du canal	67
Figure 4.18	profil des vecteurs-vitesses dans les différentes sections du canal	67
Figure 4.19	profil des vecteurs-vitesses dans les singularités	68
Figure 4.20-a	profil des vitesses par rapport à l'axe X	69
Figure 4.20-b	profil des vitesses par rapport à l'axe Y	69
Figure 4.20-c	profil des vitesses par rapport à l'axe Z	70
Figure 4.21	profil de la contrainte de cisaillement sur le fond et sur les parois	70

Liste des tableaux

Tableau 3.1	Conditions aux limites appliquées aux modèles étudiés	45
Tableau 4.1	Caractéristiques du canal	55
Tableau 4.2	Caractéristiques du canal	65

Sommaire

Introduction générale et objectifs	1
---	---

Chapitre 1

Généralités et définitions

Introduction	5
1.1. Variabilité dans le temps	5
1.2. Variabilité dans l'espace.....	6
1.3. La géométrie des canaux et grandeurs hydrauliques.....	7
1.4. Répartition des vitesses.....	8
a. Représentation 1D, 2D et 3D.....	8
b. vitesse moyenne & profile des vitesses.....	9
1.5. Les phénomènes hydrauliques.....	11
a) La surface libre.....	11
b) Le régime fluvial-torrentiel.....	11
c) Le ressaut hydraulique.....	12
1.6. Singularités dans les canaux.....	12
a) Seuils.....	13
b) Vannes.....	13
c) Transitions.....	13
1.7. L'évolution du fond du canal.....	14
Conclusion	14

Chapitre 2

Formulation mathématique

Introduction	16
2.1. Modélisation des écoulements à surface libre	16
2.2. Approche déterministe ou théorique (mécaniste).....	17
a) Approche mécaniste	17
b) Approche empirique.....	17
2.3. Modèles conceptuels.....	18
2.4. Modèles mécanistes de barré de saint-venant.....	18
2.5. Modèles mécanistes	18

2.6.	Le système de barre de saint-venant	19
2.6.1.	Etablissement de l'équation de continuité.....	19
2.6.2.	Etablissement de l'équation de la dynamique.....	21
2.7.	Etablissement du système de Barré de Saint-Venant S1 & S2.....	23
2.8.	Modèles simplifiés.....	27
2.8.1.	Modèles à inertie prépondérante et frottements négligeables.....	28
2.8.2.	Modèles à frottements prépondérants et inertie négligeable.....	28
2.8.3.	L'onde diffusante.....	29
2.8.4.	L'onde cinématique.....	30
	Conclusion	31

Chapitre 3

Simulation numérique

	Introduction	33
3.1.	Résolution numérique des équations de Saint –Venant	33
3.2.	Méthodes de résolution numériques	35
a)	Méthodes aux différences finies (MDF)	35
b)	Méthodes aux éléments finis (MEF).....	36
c)	Méthodes des volumes finis (MVF).....	36
3.3.	Schéma numérique de la méthode des volumes finis.....	37
3.4.	Principe de discrétisation et schéma numérique aux volumes finis.....	38
3.5.	Processus de simulation numérique	40
3.6.	Résolution par le code FLUENT.....	40
3.6.1.	Le préprocesseur (GAMBIT).....	40
3.6.2.	Domaine physique.....	41
3.6.3.	Le maillage.....	42
a)	Distorsion.....	43
b)	Lissage.....	43
c)	Choix du type de maillage.....	43
d)	Techniques générales de génération du maillage.....	45
3.6.4.	Les conditions aux limites.....	45
3.6.5.	Le solveur	46
3.6.6.	Le post-processeur.....	48
3.6.7.	Convergence.....	48

Conclusion	50
Chapitre 4	
Résultats et discussions	
Introduction	52
4.1. Géométrie du premier modèle	52
4.2. Maillage	54
4.3. Résultats de Simulation par FLUENT 3D	55
4.4. Géométrie du deuxième modèle	63
4.5. Maillage	64
4.6. Résultats de Simulation par FLUENT 3D	65
Conclusion	72
Conclusion générale & Perspectives.....	74
Bibliographie	77

Introduction générale & objectifs

INTRODUCTION GENERALE

L'étude des écoulements à surface libre en régime transitoire n'est pas une discipline scientifique récente. Elle a débuté il y a déjà 300 ans lors de l'essor de l'ensemble des théories mécaniques, avec les travaux de Laplace en 1776 et de Lagrange vers 1781 sur la propagation des ondes à la surface des canaux. Dès 1871, Barré de Saint-Venant a formulé mathématiquement, par un système d'équations différentielles, le mouvement des eaux à surface libre pouvant faire l'objet d'une description filaire. Depuis lors, ces équations servent de base aux modèles mathématiques d'écoulement à surface libre en rivière, en canaux et en réseau d'assainissement [1,2]

On peut citer de nombreuses applications de la modélisation numérique des écoulements à surface libre à l'aménagement des ressources en eau, à la protection de l'environnement et de l'écosystème : simulation des écoulements dus à la rupture d'un barrage, des déversements de crues d'un fleuve vers une zone de rétention d'eau, simulation du processus de changement du lit d'une rivière, simulation des écoulements et du transport sédimentaire ou des polluants en milieux estuariers et côtiers, etc. [3,4,5].

A l'heure actuelle, les équations de la mécanique des fluides (Navier –Stokes, Reynolds, Barré de Saint-Venant, Euler, etc....) ont donné naissance à de nombreux logiciels qui visent à les résoudre. Ces logiciels et bien sûr les équations qui sont à leur base peuvent être à caractère 1D, 2D ou 3D. L'hydraulique à surface libre traite les écoulements dans les canaux artificiels et naturels ayant une interface eau/air soumise à la pression atmosphérique. Les équations de Barré de Saint-Venant (1871) sont les équations les plus utilisées pour modéliser les écoulements non stationnaires et graduellement variés à surface libre.

Les applications qu'on trouve dans le domaine de l'hydraulique fluviale avec des logiciels tels que RUBAR ou TELEMAC qui pour le premier permettent de modéliser le comportement d'une rivière et pour le second de modéliser le comportement de grandes étendues d'eau soumise par exemple aux effets du vent et des marées. Ces logiciels résolvent les équations de Barré de Saint-Venant 1D ou 2D. Pour l'étude plus précise de phénomènes localisés, on trouve des logiciels tels que FLUENT ou CFX qui résolvent les équations de Reynolds. Ce

sont des logiciels 3D qui tiennent compte des phénomènes de turbulence et qui sont capables de prendre en charge des écoulements multiphasiques [6,7].

Pour l'assainissement, on trouve plusieurs logiciels dont, les plus employés sont SWMM HYDROWORKS, MOUSE et CANOE. Au niveau de l'hydraulique, ils sont tous bâtis sur la résolution des équations de Barré de Saint-Venant 1D par des méthodes numériques classiques du type différences finies. Ces logiciels contiennent des modules supplémentaires qui permettent de représenter certains phénomènes spécifiques (mises en charges, singularités, ouvrages mobiles, déversoirs, etc..). Ces logiciels montrent des limites dans leurs aptitudes à gérer les changements de régimes d'écoulements. Dans ce cas, on peut voir apparaître de fortes discontinuités sur la ligne d'eau (ressaut hydraulique), mais également dans leurs capacités à reproduire de manière correcte le comportement de certains ouvrages tels que les déversoirs d'orage et les jonctions [8, 9,10].

Pour un écoulement réel non permanent et non uniforme, le système d'équations de Barré de Saint Venant est constitué de l'équation de continuité et de l'équation de la dynamique. Le système de Barré de Saint-Venant est un système d'équations différentielles aux dérivées partielles non linéaires et hyperboliques. Il est donc impossible de résoudre ce système d'une façon analytique dans le cas général. Par conséquent, une résolution numérique de ce système s'impose. Simuler l'écoulement à surface libre revient à résoudre le système de Barré de Saint Venant à l'aide d'un schéma numérique robuste c'est-à-dire capable de donner une solution numérique proche de la réalité quelles que soient les particularités de l'écoulement. Dans ce but, les objectifs sont de donner des critères sur le choix :

1. des schémas numériques capables de résoudre le système de Barré de Saint Venant d'une façon robuste,
2. de la discrétisation temporelle : explicite ou implicite,
3. des solveurs numériques du terme flux,
4. des méthodes de discrétisation numérique du terme source,
5. des conditions aux limites externes et internes.

Malgré les efforts au cours des vingt-cinq dernières années, de nombreuses questions demeurent cependant encore mal élucidées. Donc, l'application des modélisations aux écoulements à surface libre exige de nouvelles expériences dans des configurations de référence reproduisant des interactions caractéristiques [11].

L'intérêt de développer des modèles numériques dans ce cas est triple. Les modèles permettent d'abord une meilleure compréhension des facteurs contrôlant les processus physiques en s'affranchissant de certaines limites des mesures expérimentales notamment pour faire varier les différents paramètres comme la géométrie, le débit et les conditions initiales et aux limites. Par ailleurs, ces modèles constituent dans certains cas des outils utilisables pour prévoir le comportement de systèmes soumis à des sollicitations extrêmes. Enfin, ils peuvent également permettre d'étudier les effets des hétérogénéités de surface sur les écoulements.

Différents travaux expérimentaux et numériques ont été menés pour caractériser ces écoulements complexes [12]. Les travaux numériques sont réalisés, dans leur majorité, en utilisant différents codes de calcul pour la simulation et l'optimisation du processus d'écoulement, parmi lesquels le logiciel FLUENT représente un outil permettant des études numériques, de grande qualité, de la plupart des phénomènes physiques possibles en mécanique des fluides, dans différents domaines industriels et de recherche.

Ce mémoire essaye de présenter un développement de nouveaux modèles et un perfectionnement des modèles numériques 3D, qui est la suite des travaux effectués durant ces dernières années en tenant compte des difficultés rencontrées lors du développement d'un modèle d'écoulement à surface libre.

Cette étude consiste en une modélisation 3D pour cerner les structures des vitesses dans un écoulement à surface libre dans un canal non prismatique et non rectiligne en régime non permanent, en utilisant le code numérique FLUENT. Notre simulation a considéré deux modèles dont chacun d'eux est constitué d'un canal à ciel ouvert à section rectangulaire variable avec et une pente variable.

Notre approche repose sur quatre chapitres, dont le premier est consacré à des rappels généraux sur l'hydraulique à surface libre et les caractéristiques des différents types de régimes d'écoulement. Il aborde aussi le cas de l'écoulement instationnaire à surface libre.

Le deuxième chapitre est dédié à la formulation mathématique de notre modèle, à savoir l'équation de continuité et l'équation de quantité de mouvement.

La modélisation et le traitement sous FLUENT feront l'objet du troisième chapitre. On y abordera les différentes étapes passées pour modéliser le problème, depuis la création de la géométrie sous GAMBIT (préprocesseur conçu pour le maillage des configurations géométriques tridimensionnelles complexes) en passant par le paramétrage de FLUENT jusqu'à la résolution.

Dans le dernier chapitre, nous évaluerons et discuterons les résultats des simulations.

Enfin, des conclusions sur les résultats seront présentées.

Chapitre 1

Chapitre 1

Généralités et définitions

Introduction

L'hydraulique à surface libre se distingue et se caractérise par l'existence d'une surface libre, c'est-à-dire d'une surface où l'écoulement est en contact direct avec l'atmosphère.

Le gradient de pression ne peut plus être le moteur de l'écoulement, c'est la gravité qui devient l'agent moteur.

Le domaine d'application est large :

- cours d'eau : rivières, fleuves, etc. ;
- canaux de navigation, d'irrigation, etc. ;
- systèmes d'évacuation : réseaux d'assainissement pluvial ;
- aménagements : retenues d'eau, usines de production d'électricité, ports, etc.

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

1.1. Variabilité dans le temps

Le mouvement est permanent (ou stationnaire) si la vitesse U et la profondeur h restent invariables dans le temps en grandeur et en direction. Le mouvement est non permanent dans le cas contraire. La figure 1.1 illustre les deux types d'écoulement considérés par rapport à une variabilité dans le temps [13].

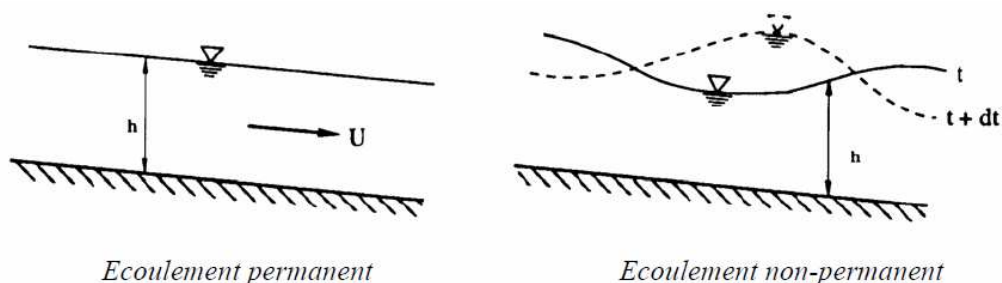


Figure 1.1 : schémas écoulement permanent & non permanent

L'écoulement dans les canaux est rarement permanent. Néanmoins les variations temporelles sont, dans certains cas, suffisamment lentes pour que l'écoulement puisse être considéré comme une succession de régime permanent. On peut alors ainsi définir le régime quasi-permanent.

1.2. Variabilité dans l'espace

La figure 1.2 ci après illustre une synthèse des différents types d'écoulement considérés par rapport à une variabilité dans l'espace, à savoir :

- Le mouvement est uniforme si les paramètres caractérisant l'écoulement restent invariables dans les diverses sections du canal. La ligne de la pente du fond est donc parallèle à la ligne de la surface libre [14,15].

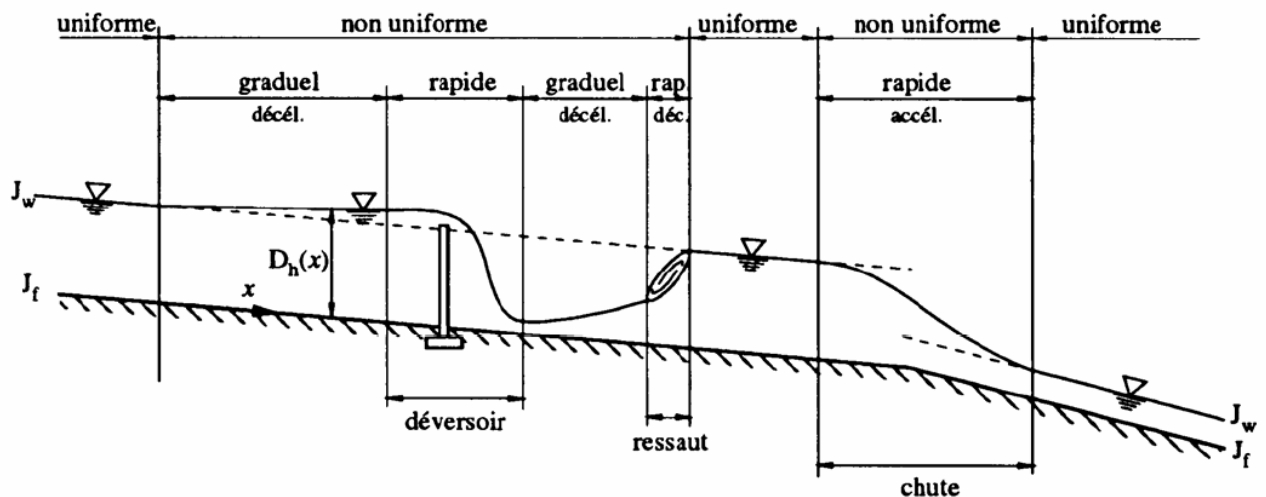


Figure 1.2 : Schéma des différents régimes d'écoulement à surface libre

- L'écoulement est non-uniforme ou varié si les paramètres caractérisant l'écoulement changent d'une section à l'autre. La pente de la surface libre diffère de celle du fond.
- Un écoulement non-uniforme peut être accéléré ou décéléré suivant que la vitesse croît ou décroît dans le sens du mouvement.
- Lorsque l'écoulement est graduellement varié, la profondeur ainsi que les autres paramètres varient lentement d'une section à l'autre.
- Lorsque l'écoulement est rapidement varié, les paramètres qui le caractérisent changent brusquement, parfois avec des discontinuités. Cela se manifeste en général au voisinage d'une singularité, telle qu'un seuil, un rétrécissement, un ressaut hydraulique ou une chute brusque [16].

Pour récapituler, La figure 1.3 synthétise les différents types d'écoulements à surface libre rencontrés :

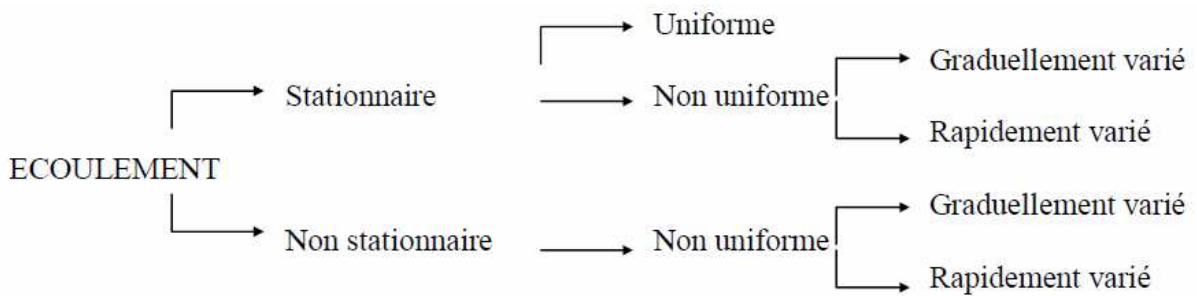


Figure 1.3 : Schéma synthèse des différents régimes d'écoulement à surface libre

1.3. La géométrie des canaux et grandeurs hydrauliques

Dans ce paragraphe, on définit les grandeurs hydrauliques permettant d'établir les équations caractérisant le comportement hydraulique des écoulements à surface libre. En considérant un canal non prismatique, dont la section transversale varie, et dont les différentes grandeurs sont représentées dans la figure suivante :

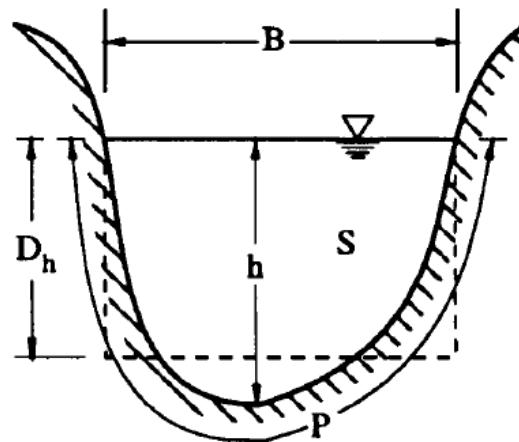


Figure 1.4 Les différents paramètres d'un écoulement dans une section.

- La surface mouillée A (m^2), dite aussi section, est la portion de la section transversale occupée par le fluide.
- La largeur au miroir est la longueur de la zone de contact entre l'eau et l'air au sein d'une section.
- Le périmètre mouillé P (m) d'une section est la longueur de la zone de contact entre l'eau et le canal au sein de la section mouillée.

- d. Le rayon hydraulique R_h (m) est défini comme étant le rapport de la surface mouillée par le périmètre mouillé.
- e. La profondeur hydraulique est donnée par le rapport de la surface mouillée par la largeur au miroir.
- f. Le débit Q (m^3/s) dans une section est défini comme étant le volume du liquide écoulé à travers cette section pendant une unité de temps.
- g. La vitesse moyenne de l'écoulement dans une section u (m/s) est le rapport du débit Q par la section normale de l'écoulement.
- h. La côte z est le niveau du lit du canal par rapport à un plan horizontal de référence fixe.
- i. La charge totale H dans une section est donnée par :

$$H = z + h + \frac{u^2}{2g}$$

- j. La charge spécifique dans une section est :

$$Hs = h + \frac{u^2}{2g}$$

1.4. Répartition des vitesses

a. Représentation 1D, 2D et 3D

Un écoulement non permanent dépend généralement de trois variables x , y et z . On l'appelle écoulement tridimensionnel [17, 18,19]. Pour un canal, l'écoulement est représenté par la figure suivante :

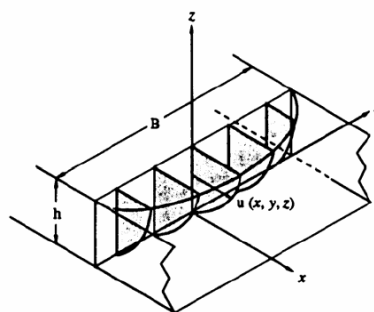


Figure 1.5 : profil de vitesse 3D

Si le canal a une largeur B , importante par rapport à la profondeur h , (cinq fois supérieure à sa profondeur), l'écoulement est considéré bidimensionnel, sauf sur une petite distance proche des parois verticales (figure 1.6) ;

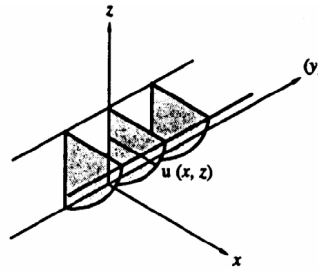


Figure 1.6 : profile de vitesse 2D

Les calculs en hydraulique sont considérablement facilités si on admet que l'écoulement est unidimensionnel. On utilise donc la vitesse moyenne (figure 1.7).

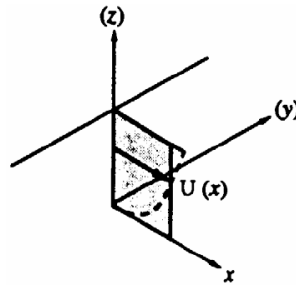


Figure 1.7 : profile de vitesse 1D

Dans un écoulement le long d'un canal, il y a une répartition de vitesse entre la paroi et la surface libre. La vitesse ponctuelle u , est nulle sur la paroi et croît rapidement lorsqu'on s'en éloigne.

La valeur maximale U_{\max} est atteinte un peu au-dessous de la surface libre et le profile de la vitesse est approximativement logarithmique (figure 1.8).

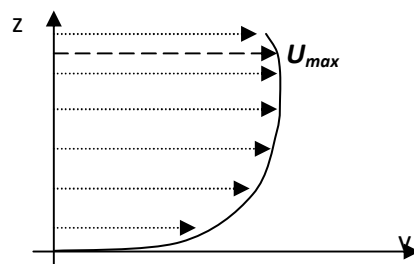


Figure 1.8 Profile logarithmique de la vitesse

b. vitesse moyenne et profile des vitesses

La notion de vitesse moyenne, que l'on a simplement définie comme un rapport du débit par la section mouillée, cache mal l'hétérogénéité de la distribution des vitesses dans la section [20]. Sur une ligne verticale, on rencontre trois types de vitesses caractéristiques qu'il suffira de relier selon une conique (paraboloïde) pour avoir une idée du profile des vitesses sur cette ligne :

- au fond, au contact de l'interface eau - lit, on peut considérer (hypothèse très classique) qu'il y a adhérence (non glissement) entre le filet liquide et le matériau constitutif du lit, d'où :

$$\lim_{M \rightarrow \text{interface (eau-lit)}} (V(M)) = 0$$

- sur une couche d'eau voisine de l'interface eau - lit, d'épaisseur ξ , l'écoulement est turbulent rugueux, c'est-à-dire qu'il est fortement perturbé par la rugosité des parois et dissipe localement de l'énergie, provoquant le gros de la perte de charge linéaire et diminuant fortement la vitesse, d'où :

$$\lim_{z \rightarrow \xi^-} (V(M)) \approx V_\xi < V$$

- Il résulte des précédentes considérations qu'il existe une tranche de liquide dans laquelle les molécules d'eau ont une vitesse sensiblement supérieure à la vitesse moyenne, atteignant un maximum noté V_M . Cette tranche est appelée le *filon*.
- au niveau de l'interface eau - air, les frottements et les tensions superficielles réduisent la vitesse des molécules d'eau du filet liquide de la surface libre à quelques pourcents de moins que la vitesse maximale, d'où :

$$\lim_{z \rightarrow Z} (V(M)) \approx V_\eta < V_M$$

La figure 1.9 ci après illustre le profile des vitesses sur une verticale dans un canal à surface libre à section quelconque :

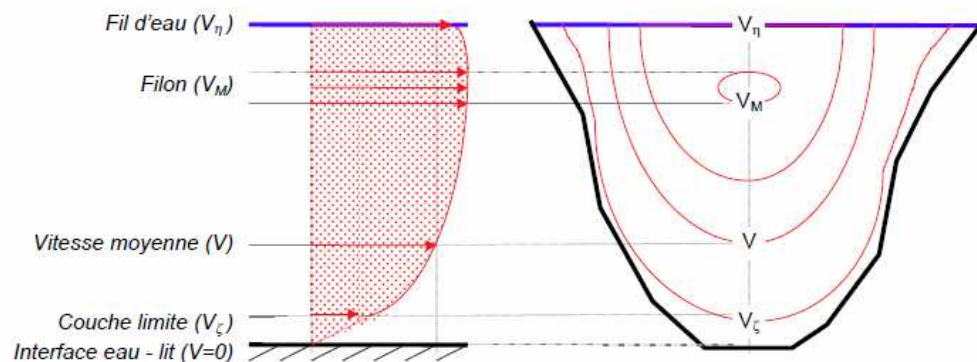


Figure 1.9 : Profile longitudinal et transversal des vitesses

1.5. Les phénomènes hydrauliques

a) La surface libre

La surface libre est l'interface entre l'air et l'eau. La pression y est égale le plus souvent à la pression atmosphérique.

Les écoulements dans les canaux naturels (rivière) et artificiels (irrigation, assainissement) sont, dans la plupart des cas, des écoulements à surface libre.

Les écoulements à surface libre sont caractérisés par une interface eau-air. Le paramètre hydraulique permettant d'évaluer cette interface est le tirant d'eau c'est-à-dire la variation de la hauteur entre le fond du canal et l'interface. La figure suivante représente l'évolution du tirant d'eau le long d'un seuil [21,22].

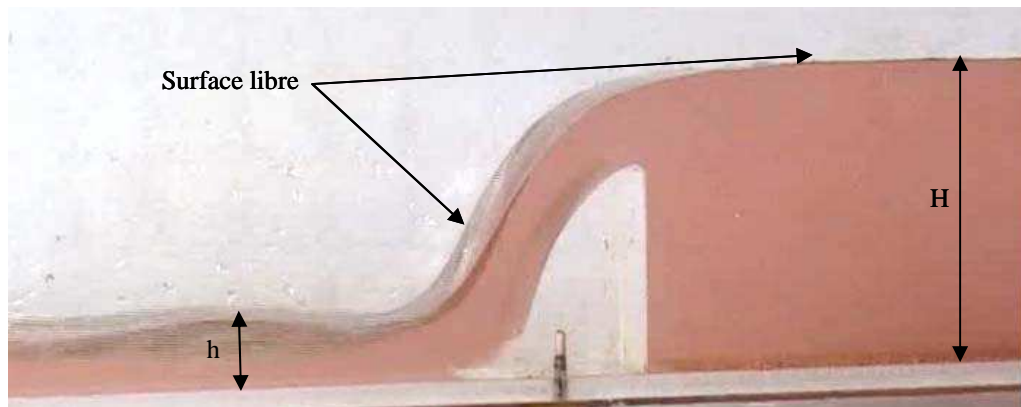


Figure 1.10 surface libre et la variation du tirant d'eau

b) Le régime fluvial-torrentiel

L'écoulement à surface libre est de type transitionnel, c'est à dire que l'on peut observer dans un même tronçon d'un canal des régimes d'écoulement fluvial et torrentiel. Ces transitions peuvent être dues à des changements de pente du fond de canal, à la présence d'un obstacle, etc. le passage du régime fluvial au régime torrentiel, ou inversement, peut être détecté par évaluation du nombre de Froude.

La connaissance des régimes d'écoulement influence également la gestion des conditions aux limites à imposer pour pouvoir simuler les écoulements dans les canaux.

Soit u la vitesse moyenne de l'écoulement dans une section et c la célérité de propagation d'une onde. Lors d'une perturbation, deux ondes se propagent, l'une à la vitesse $u + c$ et l'autre à $u - c$. Soit le nombre de Froude défini par : $F_r = u/c$

Si $F_r = 1$, le régime est dit critique. La hauteur correspondant à ce régime s'appelle hauteur critique, notée h_c , exprimée en mètres (m).

Si $F_r < 1$, la hauteur d'eau est supérieure à la hauteur critique ($h > h_c$) ; dans ce cas, le régime est dit fluvial, et l'on observe une onde qui se propage vers l'aval et une autre vers l'amont (Figure 2 a).

Si $F_r > 1$, la hauteur d'eau est inférieure à la hauteur critique ($h < h_c$) ; dans ce cas, le régime est dit torrentiel et l'on observe les deux ondes qui se propagent vers l'aval (Figure 2 b).



Figure 1.11: Le comportement des ondes selon les régimes d'écoulement

c) Le ressaut hydraulique

Le ressaut hydraulique se caractérise par une variation importante et croissante de la hauteur d'eau de l'amont vers l'aval du phénomène sur une courte distance. Le ressaut se produit lors du passage du régime torrentiel au régime fluvial. Dans la plupart des cas, une agitation importante de la surface libre permet rapidement de localiser le phénomène, comme par exemple dans le cas d'un ressaut fort.

Le ressaut hydraulique est l'un des phénomènes les plus complexes en hydraulique à surface libre. Les connaissances actuelles sur ce phénomène ne sont pas encore suffisamment étendues pour que l'écoulement interne soit parfaitement compris.

1.6. Singularités dans les canaux

Les singularités dans les canaux sont des obstacles qui provoquent des variations locales de la hauteur d'écoulement.

a) Seuils

Les seuils sont utilisés soit pour mesurer le débit dans un canal, soit pour réguler le débit et contrôler les niveaux d'eau. Il s'agit de structures par-dessus lesquelles l'écoulement doit passer.

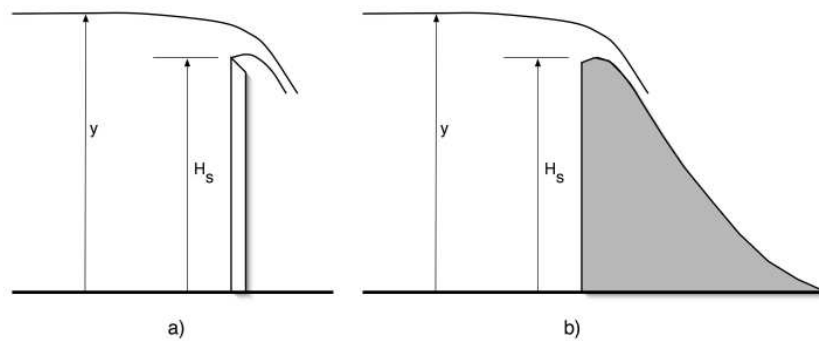


Figure 1.12 seuil à crête mince (a)droit (b) profilé

b) Vannes

Les vannes sont placées dans les canaux pour régler la hauteur et la vitesse d'écoulement (fig. 1.13). Hydrauliquement, elles se comportent comme des orifices c'est-à-dire que l'on observe à la sortie une contraction de la veine liquide.

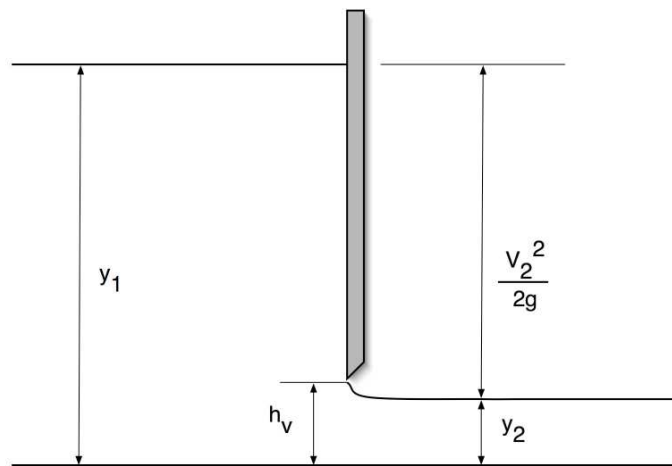


Figure 1.13 vanne orifice

c) Transitions

Les transitions sont des changements de section qui s'effectuent sur une distance relativement courte. En général, les contractions se font avec des pentes 1:1 et les élargissements se font avec un Rapport transversal/longitudinal de 1:4.

Ces singularités provoquent une perte de charge locale et l'écoulement en amont et en aval est considéré comme uniforme.

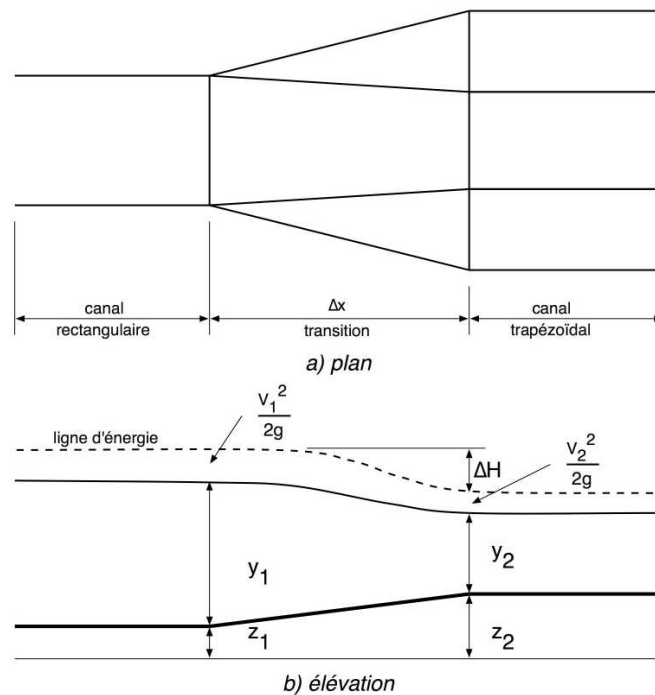


Figure 1.14 Transition de section dans un canal

1.7. L'évolution du fond du canal

En canaux artificiels comme en rivière, l'eau peut véhiculer un transport solide. La différence fondamentale entre le transport solide en rivière et en canaux c'est que le fond d'un canal est fixe et il n'y a pas d'érosion possible une fois qu'on l'a atteint. En fonction des conditions hydrauliques, les particules en suspension peuvent décanter voire se remettre en suspension. Dans ces cas, bien que le fond du canal évolue lentement, celui-ci va engendrer une modification des caractéristiques géométriques essentiellement de la pente et donc influencer l'écoulement.

Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté les différents types d'écoulements à surface libre, ainsi que les paramètres hydrauliques qui caractérisent chaque régime d'écoulement. Nous avons donné une idée générale sur la distribution des vitesses et leur profils dans un canal découvert pour les

différentes dimensions (1D, 2D et 3D), nous avons présenté également quelques phénomènes hydrauliques pouvant être rencontrés dans la nature.

Chapitre 2

Chapitre 2

Formulation mathématique

Introduction

L'étude mathématique des écoulements à surface libre en régime transitoire n'est pas une discipline scientifique récente. Elle a débuté depuis 200 ans lors de l'essor de l'ensemble des théories mécaniques, avec les travaux de Laplace en 1776 et de Lagrange vers 1781 sur la propagation des ondes à la surface des canaux. Dès 1871, Barré de Saint-Venant a formulé mathématiquement, par un système d'équations différentielles, le mouvement des eaux à surface libre pouvant faire l'objet d'une description filaire. Depuis lors, ces équations servent de base aux modèles mathématiques d'écoulement à surface libre en rivière, en canaux et en réseau d'assainissement (d'après Kovacs, 1988).

2.1. Modélisation des écoulements à surface libre

De nombreux modèles existent pour représenter le fonctionnement hydraulique d'un canal où l'écoulement se fait à surface libre. Pour modéliser ce type d'écoulement, on distingue classiquement deux grandes familles de modèles :

- les modèles issus de la mécanique des fluides et de l'hydraulique, appelés modèles hydrodynamiques, dérivés du modèle complet de Barré de Saint-Venant (1871) [23].
- les modèles issus de la dynamique des systèmes, appelés souvent modèles globaux ou conceptuels, du type Muskingum ou réservoir linéaire par exemple.

Le schéma ci après illustre les deux grandes familles des modèles utilisés pour la modélisation des écoulements à surface libre.

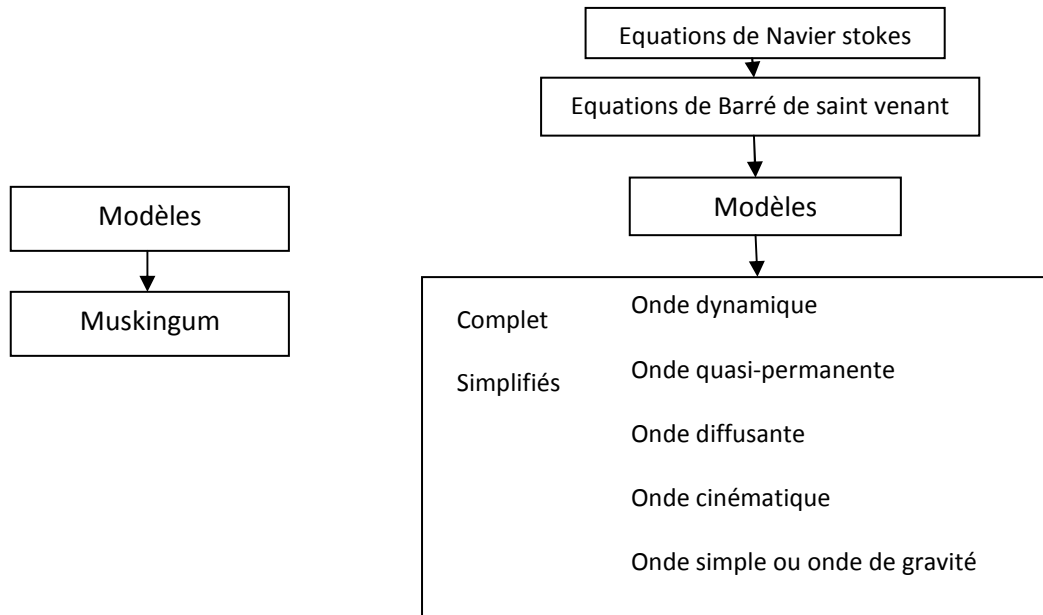


Figure 2.1 types de modélisations d'écoulement à surface libre

2.2. Approche déterministe ou théorique (mécaniste)

a) Approche mécaniste

Modèle => Expérience

Ce modèle représente les phénomènes reposant sur les principes et les équations de la mécanique. En hydraulique, les modèles mécanistes s'appliquent à la simulation des écoulements à surface libre, des écoulements en réseau, et au transport dissout [24, 25,26].

Cette approche consiste à décomposer un système et son fonctionnement en sous systèmes et en microphénomènes, de les modéliser et ensuite construire un modèle de recombinaison.

b) Approche empirique

Expérience => Modèle

- Approche conceptuelle

L'approche conceptuelle ou macroscopique considère le système dans son ensemble et s'intéresse uniquement à son comportement global.

- Approche statistique

2.3. Modèles conceptuels

Ils sont caractérisés par le fait que l'on ne cherche pas à comprendre en détail les phénomènes physiques qui se produisent au sein de l'écoulement, mais on considère le modèle dans sa globalité « boîte noire » c'est à dire comme un simple transformateur entrée-sortie.

On dispose en général des valeurs d'entrée et des grandeurs de sortie qui permettent de fixer les paramètres du modèle. Ces modèles ne traduisent que les conséquences des phénomènes se produisant dans le système et par conséquent permettent de contourner les difficultés dues à la complexité des écoulements. Ils donnent une explication comportementale et non mécaniste des phénomènes.

2.4. Modèles mécanistes de barré de saint-venant

Contrairement aux modèles conceptuels, les modèles mécanistes étudient le mouvement réel du fluide. Ils sont tous basés sur des principes physiques et en particulier sur les équations de Barré de Saint-Venant. Ils décrivent les écoulements non permanents à surface libre, unidimensionnels. Leur résolution permet de définir, selon l'abscisse x de l'écoulement, les variations temporelles de la ligne d'eau et des débits. Les modèles mathématiques issus des équations de Barré de Saint Venant constituent la famille des modèles mécanistes. Les équations de Barré de Saint-Venant, établies en 1871, sont les équations les plus utilisées pour modéliser les écoulements non stationnaires graduellement variés à surface libre, ces équations sont de type hyperbolique. Elles constituent en fait une simplification des équations de Navier-Stokes.

En raison de la grande quantité de calculs qu'elle nécessite, la résolution numérique des équations complètes de Saint-Venant n'est possible que depuis l'invention des ordinateurs, c'est à dire la deuxième moitié du XXème siècle.

2.5. Modèles mécanistes

On considère un écoulement réel non permanent et non uniforme. Le système d'équations de Barré de Saint Venant est constitué de deux équations dont la première traduit la conservation de la masse (équation de continuité) et la seconde la conservation de la quantité de mouvement (équation dynamique) [27,28].

La plupart des équations développées par la suite dérivent de trois relations fondamentales de la mécanique des milieux continus, à savoir :

- a) l'équation de continuité ou conservation de la masse ;
- b) l'équation de quantité de mouvement ou relation fondamentale de la dynamique ;
- c) l'équation de l'énergie ou premier principe de la thermodynamique.

2.6. Le système de barre de saint-venant

Les équations de Saint-Venant sont une forme intégrée (intégration selon la hauteur) des équations de Navier-Stokes. Elles permettent de calculer les hauteurs d'eau et les vitesses moyennes le long de la direction d'écoulement en fonction du temps. Elles ne sont applicables qu'en régime graduellement varié.

Pour simplifier les calculs, on se réduit au système d'équations de barré de saint venant unidimensionnel.

2.6.1. Etablissement de l'équation de continuité

L'équation de continuité exprime la conservation de la masse, donc des volumes si on considère que le fluide est incompressible, ce qui est le cas pour l'eau dans les conditions applicables en rivière ou dans les canaux. On considère le canal de longueur dx représenté par la figure 2.2,

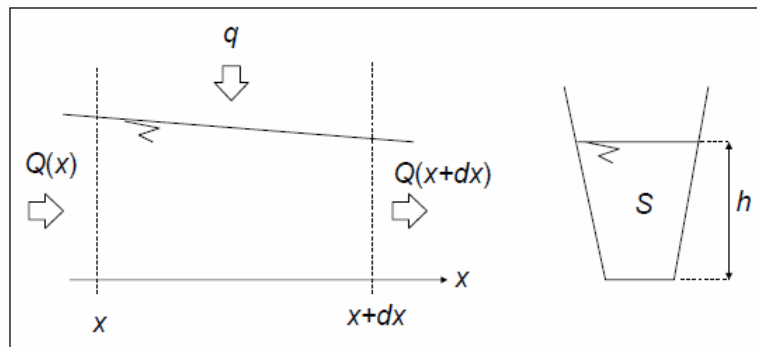


Figure 2.2 conservation de la masse

On recherche le volume stocké au temps $(t+dt)$ dans l'espace compris entre x et $(x+dx)$.

Ce volume $V_s(t+dt)$ est **égal** au volume entrant à l'abscisse x durant dt , **plus** le volume stocké entre $(x$ et $x+dx)$ à l'instant t , **moins** le volume sortant à l'abscisse $(x+dx)$ durant dt , **plus** éventuellement le volume extérieur entrant dans le bief entre les abscisses x et $(x+dx)$ durant dt . Ce volume s'écrit, avec $Q(x,t)$ le débit, $S(x,t)$ la section mouillée, $q(t)$ le débit latéral extérieur par unité de longueur) et $h(x,t)$ la hauteur d'eau:

$$V_s(t+dt) = \int_t^{t+dt} Q(x,t) dt + \int_x^{x+dx} S(x,t) dx - \int_t^{t+dt} Q(x+dx,t) dt + \int_t^{t+dt} q(t) dx dt \quad \dots \text{Eq. 2.1}$$

D'autre part, le volume $V_s(t+dt)$ s'exprime aussi sous la forme :

$$V_s(t+dt) = \int_x^{x+dx} S(x,t+dt) dx \quad \text{Eq. 2.2}$$

En égalant les deux expressions, on obtient :

$$\int_x^{x+dx} (S(x,t+dt) - S(x,t)) dx = \int_t^{t+dt} (Q(x,t) dt - Q(x+dx,t) + q(t) dx) dt \quad \text{Eq. 2.3}$$

En considérant que les fonctions $S(x,t)$ et $Q(x,t)$ sont continues, on peut modifier les termes comme suit :

$$\int_x^{x+dx} (S(x,t+dt) - S(x,t))dx = dx \cdot (S(x+a,t+dt) - S(x+a,t)) \quad \text{Eq. 2.4}$$

Avec $(x+a) \in [x, x+dx]$

$$\int_t^{t+dt} (Q(x,t) - Q(x+dx,t) + q(t))dt = dt \cdot (Q(x,t+b) - Q(x+dx,t+b) + q(t+b))dx \quad \text{Eq. 2.4}$$

Avec $(t+b) \in [t, t+dt]$

En reprenant l'égalité précédente et en substituant, on obtient, en divisant par $dxdt$:

$$\frac{S(x+a,t+b) - S(x+a,t)}{dt} = \frac{Q(x,t+b) - Q(x+a,t+b)}{dx} + q(t+b) \quad \text{Eq. 2.6}$$

Comme dx et dt sont petits et tendent vers zéro, les termes précédents correspondent aux dérivées partielles des fonctions et on obtient l'équation de continuité :

$$\frac{\partial S(x,t)}{\partial t} + \frac{\partial Q(x,t)}{\partial x} = q(t) \quad \text{Eq. 2.7}$$

Notons que si l'écoulement est permanent, c.à.d :

$$\frac{\partial S}{\partial t} = 0 \quad \text{Eq. 2.8}$$

Et il reste uniquement

$$\frac{\partial Q}{\partial x} = q \quad \text{Eq. 2.9}$$

2.6.2. Etablissement de l'équation de la dynamique

On s'intéresse à un petit élément de volume liquide au sein de l'écoulement, suffisamment petit pour que les grandeurs physiques y soient homogènes. Cela revient à considérer une « particule » de fluide au sein de l'écoulement. A partir de l'équilibre des forces auxquelles est soumise cette particule, et en supposant le fluide incompressible, on obtient l'équation de Navier-Stokes avec les variables d'Euler [23,25] :

$$\vec{\gamma} = -\frac{1}{\rho} \overrightarrow{\text{grad}} P^* - \vec{f} \quad \text{Eq. 2.10}$$

Avec

P^*	Pression (kg/m/s ²)
ρ	Masse volumique du fluide (kg/m ³)
$\vec{\gamma} = \frac{d\vec{V}}{dt}$	Vecteur accélération (m/s ²)
\vec{f}	Force de frottement (m/s ²)

On considère un filet liquide représentant la trajectoire de la particule située au point M. Soit \vec{s} la tangente et \vec{n} la normale à la trajectoire au point M

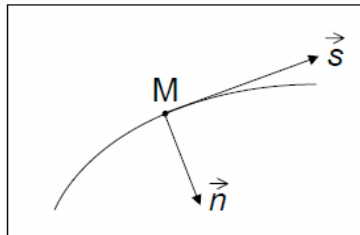


Figure 2.3 Trajectoire d'une "particule" de fluide

En projetant sur ces deux axes l'équation de Navier-Stokes, on obtient le système suivant :

Sur la tangente \vec{s} :

$$\frac{\partial V_s}{\partial t} + V_s \frac{\partial V_s}{\partial s} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P^*}{\partial s} - f_s \quad \text{Eq. 2.11}$$

Sur la normale \vec{n} :

$$\frac{\partial V_n}{\partial t} + \frac{V_s^2}{R_c} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P^*}{\partial n} - f_n \quad \text{Eq. 2.12}$$

Avec R_c rayon de courbure (m).

En toute généralité, la dérivée partielle de la vitesse sur la tangente par rapport au temps est non nulle et ne peut pas être simplifiée :

$$\frac{\partial V_s}{\partial t} \neq 0 \quad \text{Eq. 2.13}$$

Si on fait l'hypothèse que la pente du radier ou du fond est faible et que les filets liquides sont parallèles au fond, Alors

$$\left. \begin{aligned} R_c \rightarrow \infty, \quad f_n = 0 \\ \frac{\partial V_n}{\partial t} = 0, \end{aligned} \right\} \quad \text{Eq. 2.14}$$

$$\text{donc} \quad \frac{\partial P^*}{\partial n} = 0 \quad \text{Eq. 2.15}$$

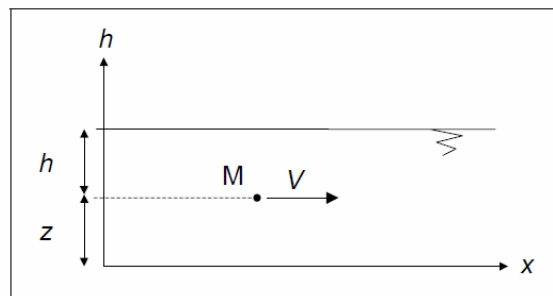


Figure 2.4 Écoulement monodimensionnel selon un axe O_x

La répartition des pressions est hydrostatique. Si on assimile S_r à l'axe x_r d'un écoulement monodimensionnel (Figure 2.4), le système d'équations précédent se simplifie comme suit :

(Notant V la vitesse de la particule de fluide le long de l'axe O_x)

$$\frac{\partial V}{\partial t} + V \frac{\partial V}{\partial x} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P^*}{\partial x} - f \quad \text{Eq. 2.16}$$

On développe l'expression de P^* pour poursuivre les calculs :

$$P^* = P_{atm} + \rho g(z + h) \quad \text{Eq. 2.17}$$

Avec :

P_{atm} la pression atmosphérique (Pa)

h la hauteur d'eau au-dessus du filet liquide passant au point M (m)

z l'altitude du filet liquide par rapport à une cote fixe (m)

g l'accélération de la pesanteur (m/s^2)

On a donc :

$$\frac{\partial P^*}{\partial x} = \frac{\partial P_{atm}}{\partial x} + \rho g \frac{\partial z}{\partial x} + \rho g \frac{\partial h}{\partial x} \quad \text{Eq. 2.18}$$

Si on admet l'hypothèse que la pression atmosphérique ne varie pas avec x ($\frac{\partial P_{atm}}{\partial x} = 0$),

Et en notant ($I = -\partial z / \partial x$) la pente du fond, il vient :

$$\frac{\partial V}{\partial t} + V \frac{\partial V}{\partial x} + g \frac{\partial h}{\partial x} = gI - f \quad \text{Eq. 2.19}$$

En notant :

$$J = \frac{f}{g} \quad \text{Eq. 2.20}$$

La perte de charge par frottement due à la rugosité des parois et à la viscosité du fluide, on écrit :

$$\frac{\partial V}{\partial t} + V \frac{\partial V}{\partial x} + g \frac{\partial h}{\partial x} = g(I - J) \quad \text{Eq. 2.21}$$

On a considéré jusqu'à présent une particule de fluide se déplaçant à la vitesse V . Soit U la vitesse moyenne d'écoulement à travers la section mouillée S (hypothèse de Bernoulli). On peut alors écrire $V = kU$, avec k un coefficient appelé coefficient de répartition.

L'équation précédente peut alors s'écrire directement avec la vitesse moyenne U et on obtient l'équation dynamique, en admettant que k est une constante :

$$k \frac{\partial U}{\partial t} + k^2 U \frac{\partial U}{\partial x} + g \frac{\partial h}{\partial x} = g(I - J) \quad \text{Eq. 2.22}$$

En pratique, on peut simplifier l'équation en adoptant $k \approx 1$, hypothèse vérifiée pour un écoulement turbulent [25].

2.7. Etablissement du système de Barré de Saint-Venant S1 & S2

On considère un fluide incompressible. En supposant que :

– l'écoulement est monodimensionnel selon un axe O_x ,

Eq. 2.23

– la pente du fond est faible

$$(\alpha = \sin \alpha = \operatorname{tg} \alpha)$$

On peut écrire le système d'équations S1 établi pour la première fois par Barré de Saint-Venant en 1871 :

Equation de continuité (ou de conservation de la masse) et équation dynamique (ou de conservation de l'énergie ou de la quantité de mouvement) :

$$S1 \quad \left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial s}{\partial t} + \frac{\partial q}{\partial x} = q \\ \frac{\partial U}{\partial t} + U \frac{\partial U}{\partial x} + g \frac{\partial h}{\partial x} = g(I - J) + (\varepsilon - 1)q \frac{U}{S} \end{array} \right. \quad \begin{array}{l} \text{Eq. 2.24} \\ \text{Eq. 2.25} \end{array}$$

Avec

h Hauteur d'eau (m)

I pente (m/m)

J perte de charge (m/m)

ε Coefficient de transfert de la quantité de mouvement du débit latéral q , variant de 0 à 1

Q débit (m³/s)

q débit latéral éventuel entrant ou sortant par unité de longueur (m²/s)

S section mouillée (m²)

t temps (s)

U vitesse moyenne de l'écoulement sur la section S (m/s)

x abscisse (m)

Si le débit latéral q est orthogonal à la direction O_x , on prend $\varepsilon = 0$: ce débit latéral n'apporte (s'il est entrant) ni n'emporte (s'il est sortant) aucune quantité de mouvement à l'écoulement principal.

Si le débit latéral est parallèle à O_x , on prend $\varepsilon = 1$. Dans les cas intermédiaires, la valeur de ε est comprise entre 0 et 1.

S , Q , U et h sont des fonctions continues des deux variables x et t .

Avec la perte de charge par frottement J , cela conduit à un système comportant 5 inconnues dès lors que les caractéristiques physiques du bief sont définies.

Pour résoudre le système **S1**, trois hypothèses complémentaires doivent être faites.

Hypothèse 1 : les pertes de charges en régime transitoire sont supposées être calculables de la même manière que pour les écoulements permanents [29]. On a ainsi une expression du type :

$$J = f(Q, U, h, \dots)$$

Différentes formules existent dans la littérature pour évaluer le terme de perte de charge par frottement J [23,25], par exemple :

– Formule de Chézy :

$$J = \frac{U^2}{C_h^2 R_h} \quad \text{Eq. 2.27}$$

Avec C_h coefficient de Chézy ($\text{m}^{1/2}/\text{s}$) et R_h rayon hydraulique (m).

– Formule de Manning-Strickler :

$$J = \frac{U^2}{K_{ms}^2 R_h^{4/3}} = \frac{Q^2}{K_{ms}^2 S^2 R_h^{4/3}} \quad \text{Eq. 2.28}$$

Avec K_{ms} coefficient de Manning-Strickler ($\text{m}^{1/3}/\text{s}$).

Il existe plusieurs possibilités pour définir le coefficient de Chézy, à partir des caractéristiques du matériau constituant la paroi des collecteurs :

- formule du coefficient de frottement à la paroi C_f :

$$C_h^2 = \frac{2g}{C_f} \quad \text{Eq. 2.29}$$

- formule de Bazin :

$$C_h = \frac{87}{1 + \frac{\gamma}{\sqrt{R_h}}} \quad \text{Eq. 2.30}$$

Avec γ coefficient de Bazin ($\text{m}^{1/2}$) qui dépend du matériau.

- formule de Manning-Strickler :

$$C_h = K_{ms} R_h^{1/6} \quad \text{Eq. 2.31}$$

Hypothèse 2 : la distribution des pressions est hydrostatique et l'accélération verticale est négligeable.

Hypothèse 3 : il faut deux autres relations pour avoir autant d'équations que d'inconnues. On utilise alors les relations reliant la section mouillée S à la hauteur d'eau h , et l'expression du débit Q en fonction de la section mouillée S et de la vitesse moyenne U :

$$S = f(h) \quad \text{Eq. 2.32}$$

Eq. 2.33

$$Q = SU$$

On obtient alors le système complet S2 de 5 équations à résoudre :

$$\left\{ \begin{array}{l} S = f(h) \\ Q = SU \\ J = f(Q, U, h, \dots) \\ \frac{\partial S}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = q \\ \frac{\partial U}{\partial t} + U \frac{\partial U}{\partial x} + g \frac{\partial h}{\partial x} = g(I - J) + (\varepsilon - 1)q \frac{U}{S} \end{array} \right. \quad \text{Eq. 2.34}$$

Il faut également définir des conditions aux limites amont et aval du bief et des conditions initiales pour $t = 0$.

Ce modèle est le plus complet et le plus général. Il est applicable sur un bief régulier, c'est à dire un tronçon de caractéristiques homogènes.

Le système S2 ne possède pas de solution analytique. Il faut donc le résoudre numériquement. Pour cela, plusieurs familles de méthodes numériques sont utilisables :

- résolution par la méthode des caractéristiques;
- résolution par éléments ou volumes finis ;
- résolution par des schémas de différences finies.

Pour un canal ou la largeur est cinq fois supérieure à la profondeur, l'écoulement peut être considéré comme bidimensionnel, par conséquent les équations de saint venant bidimensionnelles s'écrivent sous la forme conservative comme suit :

$$\mathbf{U}_t + \nabla F = \mathbf{S} \quad \text{Eq. 2.35}$$

Avec :

$$\mathbf{U} = \begin{bmatrix} h \\ hu \\ hv \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{F} = \begin{bmatrix} h(u, v) \cdot n \\ hu(u, v) \cdot n + \frac{1}{2}gh^2n_x \\ h(u, v) \cdot n + \frac{1}{2}gh^2n_y \end{bmatrix},$$

$$S = \begin{bmatrix} 0 \\ gh(S_{0x} - S_{fx}) \\ hgh(S_{0y} - S_{fy}) \end{bmatrix}$$

Avec :

h : la hauteur d'eau

(u, v) : le vecteur vitesse

n : le vecteur normal

g : l'accélération gravitationnelle

S_0 : la pente du canal

S_f : la pente énergétique.

Ces différentes méthodes de résolution du système de Barré de Saint-Venant feront l'objet du chapitre 3.

2.8. Modèles simplifiés

Avant d'aborder les méthodes de résolution, nous allons étudier les simplifications possibles des équations du système de Barré de Saint-Venant. Dans la suite, afin d'alléger les écritures, nous considérerons qu'il n'y a pas d'apport latéral, c'est à dire $q = 0$.

L'équation de continuité, n'est pas simplifiable et devient :

$$\frac{\partial S}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = 0 \quad \text{Eq. 2.36}$$

L'équation dynamique comprend plusieurs termes, numérotés ici de (1) à (5) :

$$\frac{\partial U}{\partial t} + u \frac{\partial U}{\partial x} + g \frac{\partial h}{\partial x} = g(I - J) \quad \text{Eq. 2.37}$$

(1) (2) (3) (4) (5)

Ils correspondent respectivement à :

- (1) Premier terme d'inertie (énergie due à l'accélération dans la direction Ox)
- (2) Deuxième terme d'inertie (accélération convective)
- (3) Terme de pression, lié à la pente de la surface libre
- (4) Terme de gravité
- (5) Terme de frottement, lié aux pertes de charge.

Selon les ordres de grandeur relatifs des différents termes, des simplifications de l'Eq. 2.37 sont possibles. En effet, il est rare que tous les termes aient le même ordre de grandeur, en fonction des caractéristiques géométriques et des conditions aux limites. Différentes études théoriques et expérimentales portant sur la propagation d'une crue ont permis de montrer (Preissmann 1971, Kovacs, 1988) que le terme d'inertie (1) est lié au temps, donc à la vitesse de montée de la crue et que le terme d'accélération convective (2) est lié à la géométrie des canaux. Par exemple, pour les crues en rivières, on a observé que (1) et (2) étaient négligeables devant les autres termes de l'équation. Les termes (4) et (5) de pente et de frottement sont en général du même ordre de grandeur. Il est possible de procéder alors à des simplifications, selon les ordres de grandeur respectifs des différents termes.

2.8.1. Modèles à inertie prépondérante et frottements négligeables

Les termes (4) et (5) sont négligés, d'où :

$$\frac{\partial U}{\partial t} + U \frac{\partial U}{\partial x} + \frac{\partial h}{\partial x} = 0 \quad \text{Eq. 2.38}$$

Le modèle donné par l'Eq. 2.38 est appelé *modèle de l'onde dynamique*. En pratique, il correspond à des ondes de haute fréquence (impulsions brèves et rapprochées) qui ne sont pas des situations fréquentes en hydraulique à surface libre où ce modèle est très peu employé.

2.8.2. Modèles à frottements prépondérants et inertie négligeable

Les termes (1) et (2) sont négligés. Dans ce cas, on obtient le *modèle de l'onde diffusante* :

$$g \frac{\partial h}{\partial x} = g(I - J) \quad \text{Eq. 2.39}$$

Si de plus le terme (3) est négligé, on obtient le *modèle de l'onde cinématique* :

$$g(I - J) = 0 \text{ et } I = J \quad \text{Eq. 2.40}$$

Le modèle de l'onde dynamique, généré par les termes d'inertie, et le modèle de l'onde diffusante ne correspondent pas nécessairement à un déplacement de matière, comme dans le cas de la houle par exemple. A l'inverse, le modèle de l'onde cinématique correspond à un

déplacement réel de matière. On distingue ainsi le déplacement réel du fluide à la vitesse U et le déplacement de l'onde de débit à la célérité C .

Ces deux grandeurs permettent de définir le nombre de Froude F_r par la relation :

$$F_r = \frac{U}{C} \quad \text{Eq. 2.41}$$

Si $F < 1$, l'écoulement est dit fluvial (ou infra-critique), les ondes se déplacent plus vite que le fluide. Elles peuvent se propager vers l'amont ou vers l'aval. Il faut donc, pour résoudre les équations, poser des conditions aux limites amont et aval.

Si $F > 1$, l'écoulement est dit torrentiel (ou supercritique), les ondes se déplacent moins vite que le fluide et se propagent toujours vers l'aval. Pour résoudre les équations, une condition à la limite amont est suffisante.

Si $F = 1$, l'écoulement est dit critique. Cet état est instable et n'apparaît normalement que de manière transitoire.

2.8.3. L'onde diffusante

Le système initial de Barré de Saint-Venant se ramène au cas suivant :

$$\frac{\partial S}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = 0 \quad \text{Eq. 2.42}$$

$$\frac{\partial h}{\partial x} = I - J \quad \text{Eq. 2.43}$$

Si on dérive l'Eq. 2.42 par rapport à x à t constant et l'Eq.2.43 par rapport à t à x constant, on peut éliminer l'une des deux variables h ou Q . Si on choisit d'éliminer h , ce qui permet souvent de simplifier l'expression des conditions aux limites, il reste une équation unique en Q qui s'écrit:

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + C \frac{\partial Q}{\partial x} = D \frac{\partial^2 Q}{\partial x^2} \quad \text{Eq. 2.44}$$

Avec :

C la célérité de l'onde, correspondant au déplacement de l'onde de crue (m/s)

D le coefficient de diffusion, correspondant à l'atténuation de l'onde de crue (m²/s).

Les variables C et D sont données par les relations suivantes :

$$C = \frac{dQ}{dS} + \frac{D}{B} \left(\frac{\partial B}{\partial x} - J \frac{\partial B}{\partial y} \right) \quad \text{Eq. 2.45}$$

$$D = \frac{Q}{2BJ} \approx \frac{Q}{2BI} \quad \text{Eq. 2.46}$$

Avec B la largeur au miroir (m), et en admettant pour D que J est voisin de I . B est une fonction de la hauteur d'eau h :

$$B = \frac{\partial S}{\partial h} \quad \text{Eq. 2.47}$$

Les conditions aux limites amont et aval sont du type $Q(t)$. La résolution de l'Eq.2.44, demande de calculer C et D . Pour cela, différentes méthodes de calcul existent, que nous verrons ultérieurement (chapitre 3).

Si on considère, comme cela est souvent fait, que C et D sont indépendants du temps, il existe alors une solution analytique à l'équation de l'onde diffusante : c'est le modèle d'Hayami.

Cunge (1969) a montré que l'onde de crue diffusante est analogue à une résolution particulière du modèle Muskingum. En effet, avec un schéma particulier de différences finies, le modèle Muskingum peut être considéré comme une approximation à l'ordre 2 du modèle de l'onde diffusante. Cette démonstration est très intéressante car elle permet de relier l'approche hydrodynamique mécaniste et l'approche conceptuelle.

2.8.4. L'onde cinématique

L'équation de l'onde cinématique correspond à un écoulement où :

- L'énergie due à la crue est négligeable devant les forces de pesanteur;
- l'aval n'a aucune influence sur l'amont;
- Il existe une relation directe $Q = f(h)$ appelée courbe de jaugeage (ou courbe de tarage ou courbe d'étalonnage).

Il existe plusieurs expressions possibles de ce type de relation, par exemple :

- Relation de Chézy

$$Q = C_n S \sqrt{R_n I} \quad \text{Eq. 2.48}$$

- Relation de Manning Strickler

$$Q = K_{ms} S I^{1/2} R_n^2 \quad \text{Eq. 2.49}$$

- Autres relations

$$Q = a \cdot h^b \quad \text{Eq. 2.50}$$

a et b coefficients numériques

Eq. 2.48

Le système d'équations à résoudre devient alors :

$$\frac{\partial S}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = 0 \quad \left\{ \begin{array}{l} \\ I=J \end{array} \right. \quad \text{Eq. 2.51}$$

Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté les propriétés mathématiques du système de Barré de Saint-Venant, ce dernier constitué de l'équation de continuité et de l'équation de la dynamique est le plus utilisé pour modéliser un écoulement réel non permanent et non uniforme dans les canaux artificiels ou naturels ayant une interface eau/air soumise à la pression atmosphérique.

Le système de Barré de Saint-Venant est un système d'équations différentielles aux dérivées partielles non linéaires et hyperboliques, écrites sous certaines hypothèses et conditions qui doivent être satisfaites.

Des cas particuliers du système de Barré de saint venant sont présentés, à savoir l'onde diffusante, l'onde cinématique.

Chapitre 3

Chapitre 3

Simulation numérique

Introduction

La simulation de l'écoulement à surface libre revient à résoudre le système d'équations de Barré de Saint Venant à l'aide d'un schéma numérique capable de donner une solution numérique proche de la réalité quelles que soient les particularités de l'écoulement. La simulation numérique de l'écoulement est usuellement réalisée grâce à de puissants codes de calcul qui sont des solveurs en utilisant des méthodes numériques à savoir méthode des éléments finis, méthode des différences finis, et méthode des volumes finis qui est utilisée par le code FLUENT.

3.1. Résolution numérique des équations de Saint –Venant

Les équations générales de la mécanique des fluides sont les équations tridimensionnelles de Navier Stokes dans lesquelles les inconnues sont les trois composantes de la vitesse ainsi que la pression. Les écoulements à surface libre sont souvent modélisés par une simplification des équations de Navier -Stokes [31].

Dans les écoulements à surface libre en eau peu profonde, comme dans les rivières et les canaux, il est parfois pertinent de négliger la vitesse verticale devant ses composantes horizontales.

Saint -Venant fut le premier à proposer les équations décrivant un écoulement unidimensionnel en eau peu profonde intégrées suivant la section. Ces équations dont les inconnues sont la hauteur d'eau h [m] et le débit Q [$\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$] traduisent la conservation de la masse et de la quantité de mouvement dans le cas d'un écoulement unidimensionnel sans apport latéral sous la forme :

$$\frac{\partial S}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = 0 \quad \text{Eq.3.1}$$

$$\frac{\partial U}{\partial t} + U \frac{\partial U}{\partial x} + g \frac{\partial h}{\partial x} = g(I - J) \quad \text{Eq.3.2}$$

Où :

g représente la gravité,

I est la pente du fond

J prend en compte les frottements sur le fond et les berges.

Suivant la formule de Manning-Strickler on a $J = \left(\frac{Q}{K_{str} A Rh^{2/3}} \right)^2$

Le principe pour obtenir les équations de Saint -Venant est d'effectuer une intégration suivant la verticale (pour la version bidimensionnelle) ou suivant la section (pour la version monodimensionnelle) des équations de Navier- Stokes en supposant que l'écoulement est horizontal (typiquement une pente inférieure à 10%), la pression est hydrostatique, les variations de la surface libre sont faibles et la turbulence est négligeable [32,33].

On suppose également qu'il n'y a pas de transfert de masse à travers le fond et la surface, que la vitesse verticale est nulle au fond et que la cote du fond est indépendante du temps.

Le schéma suivant illustre le processus d'un calcul scientifique pour la résolution numérique d'un problème :

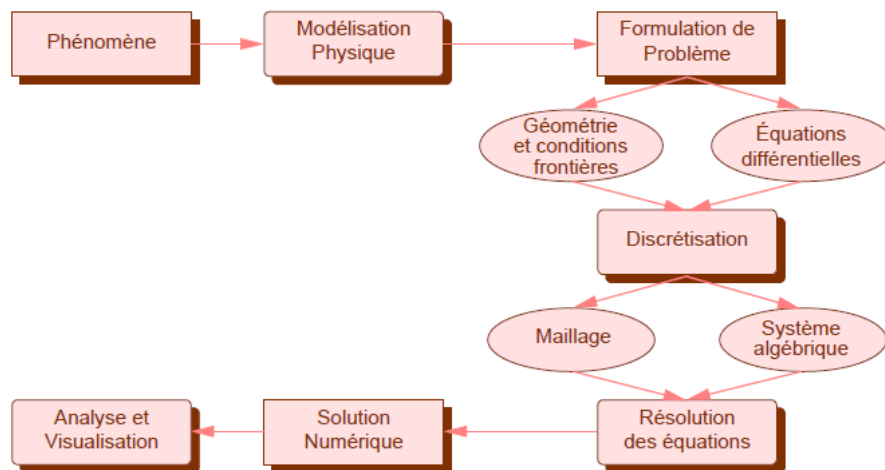


Figure 3.1 processus de simulation numérique

La simulation de l'écoulement à surface libre revient à résoudre le système d'équations de Barré de Saint Venant numériquement, la figure suivante présente les différentes méthodes de discrétisation utilisées :

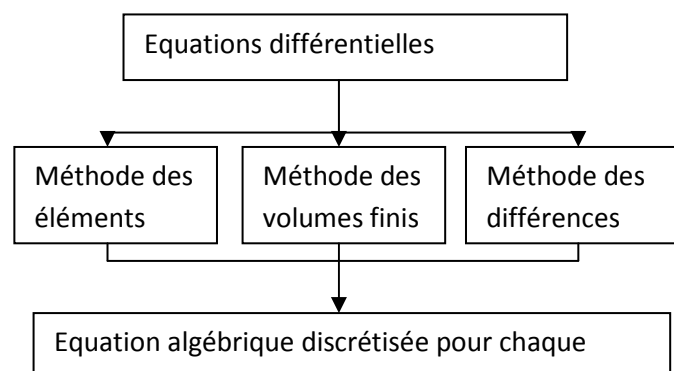


Figure 3.2 - Méthodes de Discrétisation des équations différentielles

La méthode des volumes finis considère la forme intégrale des lois de conservation. Supposons que Q soit la variable à conserver dans le volume V , que F désigne le flux de cette variable et P désigne le terme source. La loi de conservation sous la forme intégrale s'écrira de la manière suivante:

$$\frac{d}{dt} \iiint_V Q dV + \iint_{\partial V} \mathbf{n} \cdot F dS = \iiint_V P dV \quad \text{Eq.3.3}$$

L'idée fondamentale de la méthode des volumes finis est de satisfaire (eq.3.3) avec un certain degré d'approximation pour chacun des petits volumes c'est-à-dire les mailles qui forment le domaine de calcul à chaque pas de temps. On représente Q par sa valeur moyenne pendant un pas de temps, qui est:

$$\bar{Q} = \frac{1}{V} \iiint_V Q dV \quad \text{Eq.3.4}$$

Lors du développement d'un modèle numérique, le choix d'une méthode de discrétisation est primordial [34]. Il existe trois méthodes principales de discrétisation (les plus utilisées) des équations aux dérivées partielles (EDP) à savoir méthode des éléments finis, des différences finies et des volumes finis déjà évoquée.

3.2. Méthodes de résolution numériques

a) Méthodes aux différences finies (MDF)

Les méthodes aux différences finies consistent à discrétiser, moyennant un maillage de calcul prédéfini, chaque dérivée partielle d'une variable dans l'EDP à l'aide du développement en série de Taylor de la valeur de cette variable. Ainsi, la discrétisation de l'EDP permet d'obtenir des relations linéaires entre la valeur de la variable en un nœud et les valeurs de cette même variable aux nœuds voisins du maillage de calcul.

Les méthodes aux différences finies apportent, grâce à leur simplicité, la possibilité de construire des schémas numériques d'ordre élevé à faible coût. Cependant, elles semblent plus difficiles à mettre en œuvre pour les problèmes à géométrie complexe où la construction d'un seul maillage structuré est difficile. Elles sont donc mal adaptées aux écoulements en géométries complexes.

b) Méthodes aux éléments finis (MEF)

La technique des éléments finis discrétise l'espace à l'aide des éléments géométriques simples (triangles ou quadrilatères en général). Comme elle permet de modéliser des géométries très complexes, elle est parfois préférée à la méthode des volumes finis. Abondamment utilisées dans l'étude du système de Saint-Venant et validées, ces méthodes fournissent aujourd'hui encore des algorithmes rapides et des résultats souvent satisfaisants, (i.e. le logiciel TELEMAC (Hervouet 2000) par EDF, SMS (King I.P. et al., 1978), Brigham Young University), CCHE2D par NCCHE (Wang S.S.Y et al., 1989), et les autres (Katsaounis T. and Makridakis C., 2003) et (Dawson C.N. and Proft J., 2002). Cette méthode offre à la fois un cadre théorique rigoureux et une grande souplesse pour discrétiser les domaines de calcul (Hervouet J.M., 2001). Cependant, les méthodes classiques d'éléments finis ne sont pas naturellement très bien adaptées ni au caractère discontinu des solutions, ni au caractère conservatif du système (Audusse E., 2004).

c) Méthodes des volumes finis (MVF)

Dans la littérature, la méthode des volumes finis a été qualifiée comme la plus utilisée parmi les méthodes de discrétisation pour la simulation des écoulements des fluides.

La méthode consiste à subdiviser le domaine de calcul (volume géométrique de l'écoulement) en petits volumes de contrôle tel que chaque nœud est entouré par un seul volume de contrôle.

En d'autres termes, La méthode des volumes finis consiste à discrétiser le domaine de l'écoulement en une multitude de volumes (ou cellules) de contrôle, puis d'effectuer des bilans de masse et de quantité de mouvement sur ces petits volumes.

Les avantages déterminants des volumes finis par rapport aux autres méthodes [Zhao D.H. et al. 1994), et (Tan W., 1992)] sont :

- Découper l'espace en cellules, construites par exemple à partir d'un maillage d'éléments finis classique.
- Intégrer l'équation considérée sur chaque cellule à chaque pas de temps.

L'intérêt de la méthode des volumes finis réside dans le fait qu'elle représente une loi de conservation physique, elle assure donc non seulement la conservation de la masse, une propriété importante dans le calcul des écoulements de fluides, mais permet également une prise en compte parfaite de la géométrie complexe du domaine de calcul.

La méthode des volumes finis est aussi la méthode utilisée par le code « FLUENT » que nous avons utilisé pour nos simulations [35, 36,37].

3.3. Schéma numérique de la méthode des volumes finis

L'initiateur de ce type de schéma numérique est GODUNOV [GODUNOV, 1959] qui en 1959 mit au point le premier schéma numérique aux volumes finis. Depuis la précision et la capacité à converger de ces schémas ont été améliorées. Le paragraphe suivant détaille la discrétisation ainsi que le schéma numérique [38].

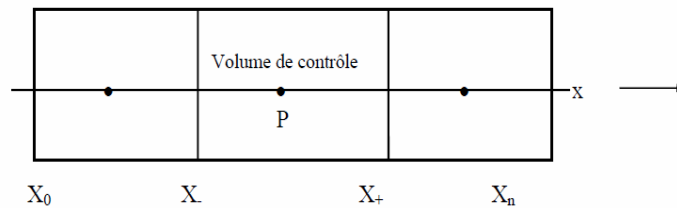


Figure 3.3.a. Arrangement des volumes de contrôle

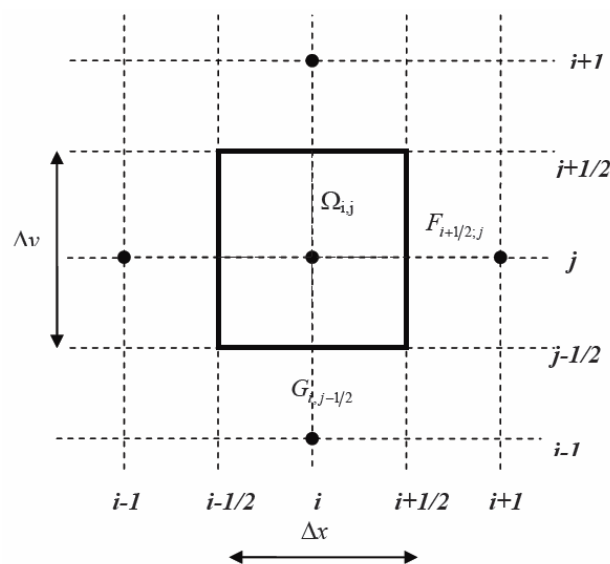


Figure 3.3.b. Le volume de contrôle principal dans un maillage bidimensionnel.

Le principe de la méthode des volumes finis, consiste à ce que chacun des points de l'objet est assimilé simplement à un petit volume élémentaire. Un plasma, par exemple, est ainsi vu comme un ensemble ou un réseau de volumes contigus qui, par analogie avec la trame d'un tissu, sera dénommé maillage. Les paramètres de l'état de l'objet sont maintenant définis dans chaque maille du maillage. Pour chacune d'elles, en reformulant les équations mathématiques du modèle par des moyennes volumiques, il sera alors possible de construire des relations algébriques entre les paramètres de la maille et ceux de ses voisines. Au total, il y aura autant de relations que de paramètres inconnus et ce sera à l'ordinateur de résoudre le système de relations obtenu.

3.4. Principe de discrétisation et schéma numérique aux volumes finis

Le principe de la résolution du système de Barré de Saint Venant par la méthode des volumes finis commence par une discrétisation volumique du domaine de calcul en sous domaines de contrôle dans lesquels les variables sont considérées comme constantes.

On s'intéresse dans un premier temps à l'équation sans second membre:

Eq.3.5

$$U_t + F(U)_x = 0$$

On applique alors le théorème de Green :

$$\iiint (U dx - F(U) dt) = 0 \quad \text{Eq.3.6}$$

Où on intègre l'équation aux dérivées partielles à résoudre sur le volume de contrôle

D'où:

$$\int_{x_L}^{x_R} U(x, t_2) dx = \int_{x_L}^{x_R} U(x, t_1) dx + \int_{t_1}^{t_2} F(U(x_L, t)) dt - \int_{t_1}^{t_2} F(U(x_R, t)) dt \quad \text{Eq.3.7}$$

En posant :

$$U_i^n = \frac{1}{\Delta x} \int_{x_{i-1/2}}^{x_{i+1/2}} U(x, t) dx \quad \text{Eq.3.8}$$

$$U_i^{n+1} = \frac{1}{\Delta x} \int_{x_{i-1/2}}^{x_{i+1/2}} U(x, t + \Delta t) dx \quad \text{Eq.3.9}$$

$$F_{i-1/2}^n = \frac{1}{\Delta x} \int_0^{\Delta t} F(U(x_L, t)) dt \quad \text{Eq.3.10}$$

$$F_{i+1/2}^n = \frac{1}{\Delta x} \int_0^{\Delta t} F(U(x_R, t)) dt \quad \text{Eq.3.11}$$

On met en indice la position de la cellule considérée et en exposant le pas de temps auquel la valeur a été calculée.

On note U^n la valeur du vecteur écoulement dans la cellule i au pas de temps t . On nomme $i + 1/2$ (respectivement $i - 1/2$) l'interface des cellules i et $i + 1$ (respectivement $i - 1$ et i).

Ainsi, $F_{i+1/2}$ représente donc le flux à l'interface entre les cellules i et $i + 1$.

Avec Δx le pas d'espace, Δt le pas de temps, $i = \frac{\Delta t}{\Delta x}$ et $n = \frac{t}{\Delta t}$ entiers.

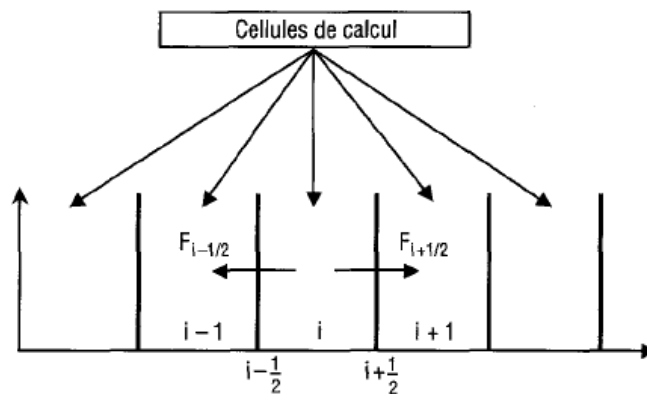


Figure3.4 Discrétisation du canal en sous tronçons.

On arrive ainsi à la forme du schéma numérique suivante:

$$U_i^{n+1} = U_i^n + \lambda [F_{i-\frac{1}{2}}^n - F_{i+\frac{1}{2}}^n] \quad \text{Eq.3.12}$$

Avec :

$$\lambda = \frac{\Delta t}{\Delta x} \quad \text{Eq.3.13}$$

Celle-ci est valable pour le système d'équation sans second membre.

Le terme source est ensuite pris en compte par sommation. On obtient au final le schéma numérique appliqué à l'équation avec second membre:

$$U_i^{n+1} = U_i^n + \lambda \left[F_{i-\frac{1}{2}}^n - F_{i+\frac{1}{2}}^n \right] + \Delta t G_i^n \quad \text{Eq.3.14}$$

3.5. Processus de simulation numérique

Les développements et les progrès réalisés au cours des deux dernières décennies ont conduit à l'apparition d'une méthodologie qui est devenue standard découpant le processus de simulation en quatre tâches distinctes [39], qui sont :

1. Modélisation géométrique
2. Maillage
3. Résolution
4. Analyse et visualisation

La figure suivante illustre le processus de résolution d'un problème numérique

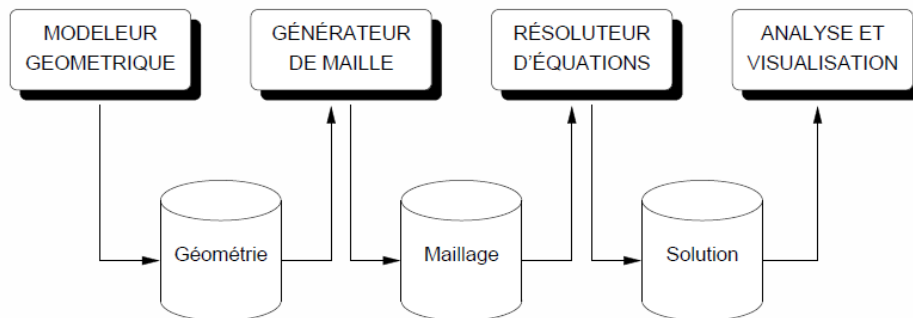


Figure 3.5 méthodologie de d'un problème numérique

3.6. Résolution par le code FLUENT

Trois modules interviennent lors de la simulation numérique par le code FLUENT à savoir :

Un préprocesseur (logiciel GAMBIT), un solveur et post-processeur (FLUENT)

Cette partie du chapitre expose la description de ces trois parties du code de calcul FLUENT, la construction des géométries avec génération de maillage et l'incorporation des conditions aux limites qui sont effectuées par le préprocesseur GAMBIT, ainsi que la résolution et la visualisation des résultats effectués par le post processeur FLUENT [40, 41,42].

3.6.1. Le préprocesseur (GAMBIT)

La définition du problème à résoudre s'effectue à l'aide du **préprocesseur** Gambit. Il permet de représenter la géométrie du système, de définir le type de conditions limites aux frontières du

domaine, de spécifier le type de matériau (fluide ou solide). Il fournit aussi la possibilité de discrétiser le domaine, en proposant plusieurs algorithmes de maillage suivant sa géométrie. C'est aussi un logiciel conçu pour aider les analystes et les concepteurs à construire et à mailler des modèles pour les problèmes d'écoulements des fluides et d'autres applications scientifiques.

GAMBIT reçoit les données de l'utilisateur au moyen de l'interface graphique (GUI). Cette dernière réalise les étapes de base de construction et du maillage. De plus, il est assez souple pour adapter plusieurs applications de modelage. GAMBIT, le générateur de maillage convivial et ergonomique comprend un ensemble très complet d'outils de génération de maillages surfaciques et volumiques qui permettent de réaliser rapidement des maillages de qualité et garantissent une précision des résultats optimale, notamment, la génération automatique du maillage volumique en tétraèdre. Il a, aussi, l'avantage d'importer des fichiers CAO grâce à l'interface (au format CAD,..) qui transforme la géométrie directement en une série de maillages surfaciques ou volumiques [43].

GAMBIT possède une interface facile à manipuler et qui est constituée de plusieurs fenêtres d'outils d'opération destinées à construire le modèle, générer le maillage et incorporer les conditions aux limites, figures (3.6).

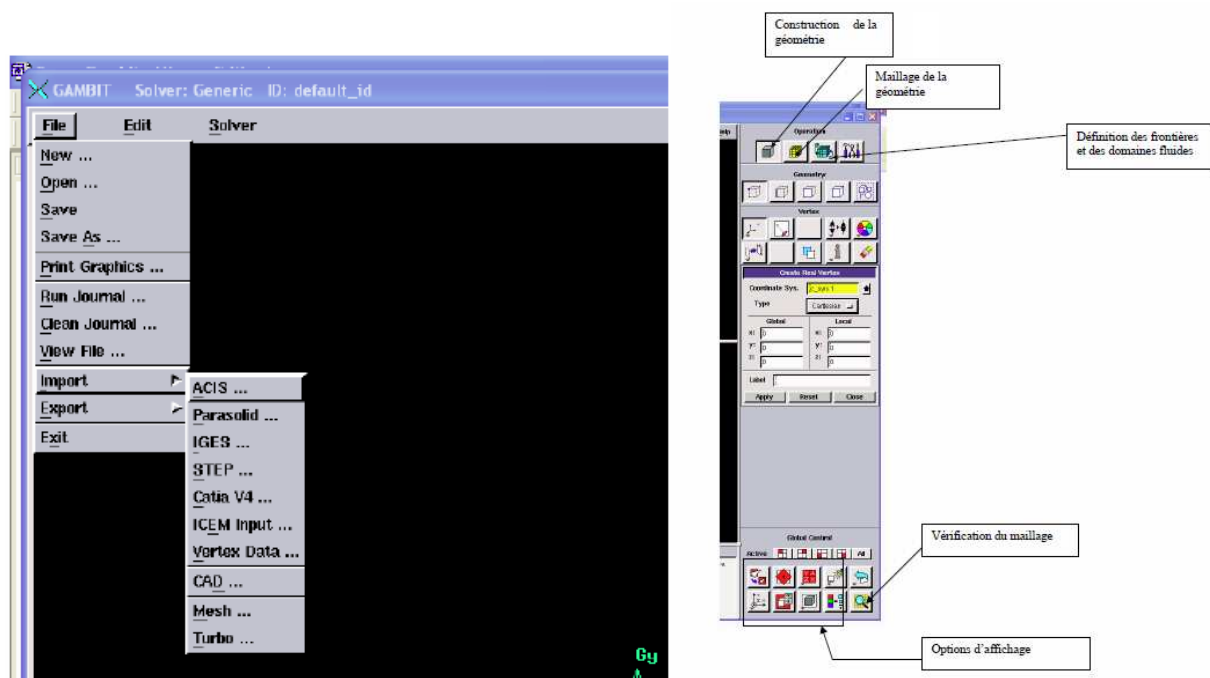


Figure 3.6 Interface de GAMBIT

3.6.2. Domaine physique

Le domaine d'étude se limite à un canal non rectiligne à section rectangulaire variable, (avec un convergent et n divergent), et une pente variable (entre 0.1-0.25%), les deux modèles choisis pour notre étude, sont illustrés par les figures 3.7 (a & b) ci- après.

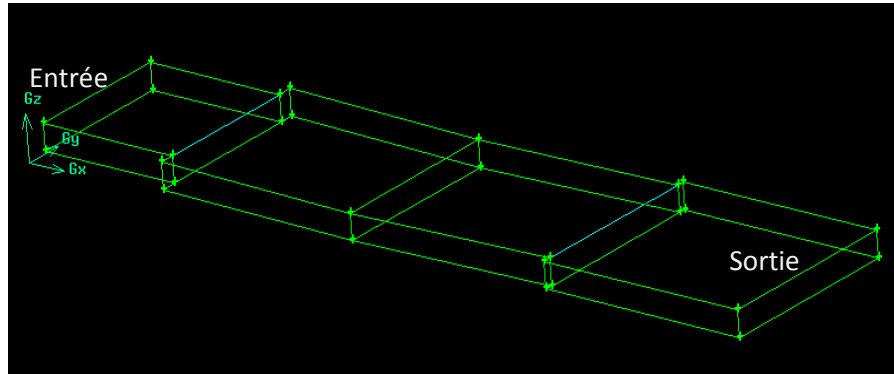


Figure 3.7-a domaine physique du modèle 1

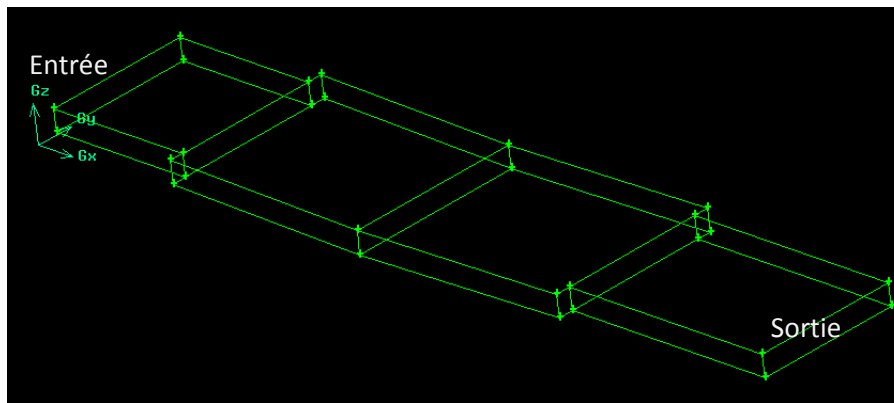


Figure 3.7-b domaine physique du modèle 2

3.6.3. Le maillage

La génération du maillage (2D ou 3D) est une phase très importante dans une analyse CFD, vu l'influence de ses paramètres sur la solution calculée. La génération d'une très bonne qualité de maillage est essentielle pour l'obtention d'un résultat de calcul précis, robuste et significatif.

La spécification du maillage dépend de la complexité de la géométrie et du code de simulation utilisé [44].

Le premier travail à accomplir dans la réalisation d'une simulation numérique est la définition d'un maillage adapté à l'écoulement, dont la qualité infecte directement la précision des calculs.

Un nombre de mailles insuffisant fera diverger les calculs ou sera responsable d'une diffusion numérique trop importante. Il faut trouver un compromis entre le nombre de mailles et le temps de calcul qui augmente considérablement avec le raffinement de la discrétisation du domaine.

Une bonne qualité de maillage repose sur les éléments suivants :

- Minimisation des éléments présentant des distorsions (skewness en anglais)

-Une bonne résolution dans les régions présentant un fort gradient (couches limites, ondes de choc ...etc.)

Enfin, la qualité de maillage à un sérieux impact sur la convergence, la précision de la solution et surtout sur le temps de calcul.

a) Distorsion

Une bonne qualité de maillage est synonyme d'absence de grandes distorsions d'éléments

Le facteur de distorsion F_d (skewness) se calcule de deux façons différentes :

- Calcul basé sur le volume équilatéral :

$$F_d = \frac{\text{Taille}_{\text{élément optimal}} - \text{Taille}_{\text{élément généré}}}{\text{Taille}_{\text{élément optimal}}} \quad \text{Eq.3.16}$$

Applicable uniquement pour les éléments triangulaires ou tétraédriques [45].

- La valeur maximale du skewness tolérée pour un maillage volumique doit être inférieure à 0.90
- La valeur maximale du skewness tolérée pour un maillage surfacique structuré ou non, hexaédrique ou tétraédrique doit être inférieure à 0.75

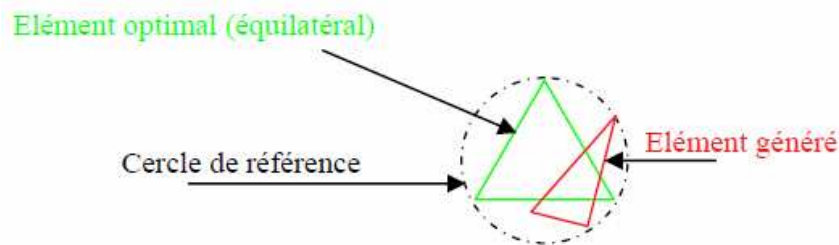


Figure 3.8 distorsion du maillage

b) Lissage

Le changement dans la taille des éléments de maillage d'une zone maillée à une autre doit être graduel, la variation de la taille des éléments de deux zones adjacentes ne doit pas dépasser 20%.

$$\frac{\Delta x_{i+1}}{\Delta x_i} \leq 1.2 \quad \text{Eq.3.17}$$

Figure 3.9 lissage du maillage

c) Choix du type de maillage

- **Maillage structuré (quadra/hexa)**

Il est beaucoup plus facile de le générer en utilisant une géométrie à multi bloc, il présente les avantages suivants :

- Economique en nombre d'éléments, présente un nombre inférieur de maille par rapport à un maillage non structuré équivalent.
- Réduit les risques d'erreurs numériques car l'écoulement est aligné avec le maillage.

Ses inconvénients :

- Difficile à générer dans le cas d'une géométrie complexe.
- Difficile d'obtenir une bonne qualité de maillage pour certaines géométries complexes.

- **Maillage non structuré (tri/tétra.)**

Les éléments de ce type de maillage sont générés arbitrairement sans aucune contrainte quant à leur disposition.

Ses avantages :

- Peut être généré sur une géométrie complexe tout en gardant une bonne qualité des éléments.
- Les algorithmes de génération de ce type de maillage (tri/tétra) sont très automatisés

Ses inconvénients :

- Très gourmand en nombre de mailles comparativement au maillage structuré.
- Engendre des erreurs numériques (fausse diffusion) qui peuvent être plus importante si l'on compare avec le maillage structuré.

- **Maillage hybride**

Maillage généré par un mélange d'éléments de différents types, triangulaires ou quadrilatéraux en 2D, tétraédriques, prismatiques, ou pyramidaux en 3D.

Ses avantages :

- Combine entre les avantages du maillage structuré et ceux du maillage non structuré

Le schéma suivant récapitule les différents types de maillage :

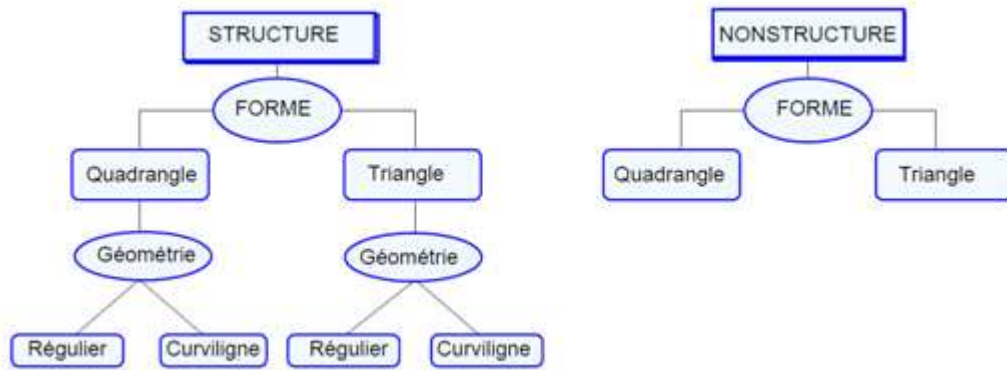


Figure 3.10 différents types de du maillage

d) Techniques générales de génération du maillage

Pratiquement, il n'existe pas de règle précise pour la création d'un maillage valable, cependant il existe différentes approches qui permettent d'obtenir une grille acceptable.

Nous pouvons résumer ces règles ainsi :

- Maintenir une bonne qualité des éléments.
- Assurer une bonne résolution dans les régions à fort gradient.
- Assurer un bon Lissage dans les zones de transition entre les parties à maillage fin et les parties à maillage grossier.
- Minimiser le nombre Total des éléments (temps de calcul raisonnable).

3.6.4. Les conditions aux limites

Afin de définir un problème pour une solution unique, on doit fournir des informations sur les variables aux frontières du domaine. Dans ce contexte, les conditions aux limites définissent la valeur des paramètres hydrauliques (vitesse, pression...) permettant de représenter l'effet en terme hydrodynamique de ce qui a été enlevé [46,47].

Plusieurs types de conditions aux limites sont proposés dans le code Fluent. Nous en utilisons essentiellement trois : vitesse d'entrée, pression de sortie imposée à la surface libre, et la condition de paroi.

La première condition aux limites «*velocity-inlet*» correspond à une vitesse imposée.

La deuxième condition «*pressure-outlet*» (pression de sortie) est appliquée au niveau de la sortie du canal et à la surface libre (pression atmosphérique).

La troisième condition «*wall*» est une condition de flux nul. Elle est appliquée au niveau des parois ou des seuils. La vitesse est tangente à la paroi pour les cellules du voisinage (condition de non glissement).

A noter que l'espace maillé est pris par défaut comme étant fluide.

Les conditions aux limites appliquées pour notre modèle sont récapitulées dans le tableau suivant :

Géométrie	Type de condition limite	Observation
Entrée	Velocity inlet	Vitesse initiale
Sortie	Pressure outlet	Pression atmosphérique
Parois	Wall	Mur (non-glissement)
Surface libre	Pressure outlet	Pression atmosphérique

Tableau3.1 Conditions aux limites appliquées pour notre modèle

3.6.5. Le solveur

Fluent est un logiciel de simulation de tous les écoulements de fluides, compressibles ou incompressibles, impliquant des phénomènes physiques complexes tels que la turbulence, le transfert thermique, les réactions chimiques, les écoulements multiphasiques, la cavitation, les écoulements en charge ou à surface libre et les machines tournantes...etc, et pour des géométries industrielles complexes.

Le solveur permet de définir numériquement les conditions opératoires (gravité, pression) dans lesquelles est effectuée la simulation, ainsi que la spécification des conditions aux limites. Enfin, il permet de choisir le processus itératif, en proposant notamment plusieurs schémas numériques pour la discrétisation spatiale et temporelle, et pour le couplage de la vitesse et de la pression. Il offre également une interface permettant de contrôler à tout moment l'état d'avancement des calculs.

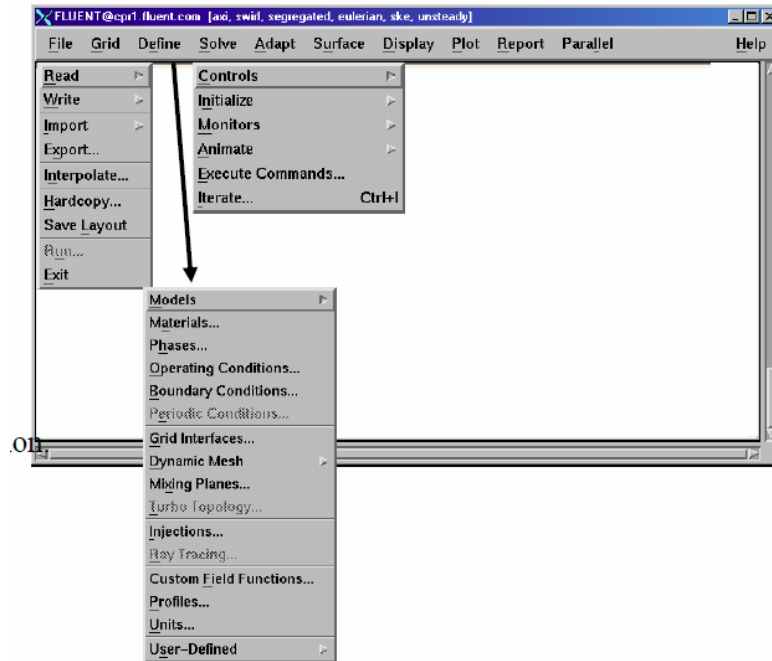


Figure 3.11 Fenêtres de la résolution.

Le menu est tel que les opérations se font de gauche vers la droite, figure 3.9

- Importer et dimensionner le maillage
- Sélectionner le modèle physique.
- Définir les propriétés des matériaux.
- Définir les conditions de calcul.
- Définir les conditions aux limites.

- Fournir une solution initiale.
- Régler les paramètres du Solveur.
- Régler le moniteur de convergence.
- Lancer le calcul et contrôler la solution.

Les équations discrétisées sont considérées comme convergées lorsque toutes les équations présentent un résidu inférieur à un seuil normalisé fixé. En plus, le suivi de résidu permet de rendre compte de la façon selon laquelle chaque équation de conservation est équilibrée et donne un aperçu de l'état du processus de résolution.

Le processus de simulation est synthétisé dans l'organigramme suivant :

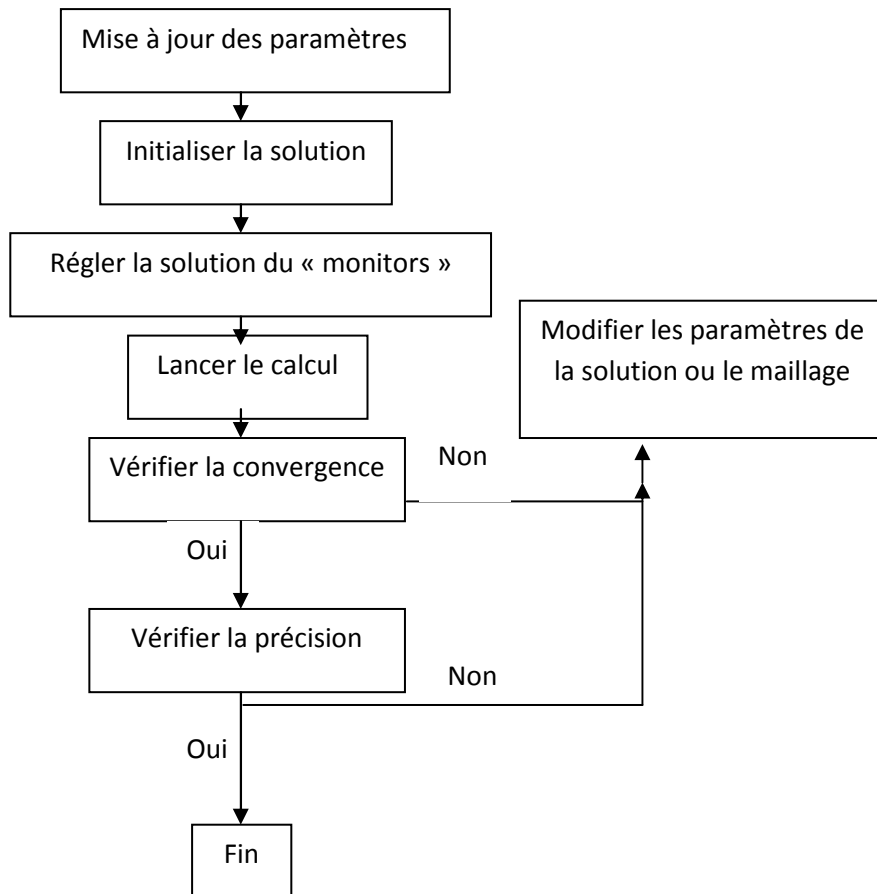


Figure 3.12 organigramme de calcul

3.6.6. Le post-processeur

Le post-processeur est l'élément qui permet de visualiser la géométrie et le maillage du domaine, mais surtout d'afficher les résultats obtenus. Il est ainsi possible de visualiser les champs du vecteur-vitesse, les champs de pression, de turbulence ainsi que toutes les autres grandeurs calculées sur un segment, d'une section du domaine ou sur tout le volume. Il offre aussi la possibilité de tracer des courbes et de visualiser les lignes de courant ou la trajectoire des particules. Il a pour rôle d'être en interaction avec le solveur et d'effectuer l'analyse du problème convergé [48].

Il y a de nombreux outils de post-processeur :

- Les fonctions de post-processeur s'appliquent souvent aux surfaces et aux lignes.
- Les surfaces sont créées automatiquement à partir de zones.

- Des surfaces et des lignes additionnelles peuvent être créées.

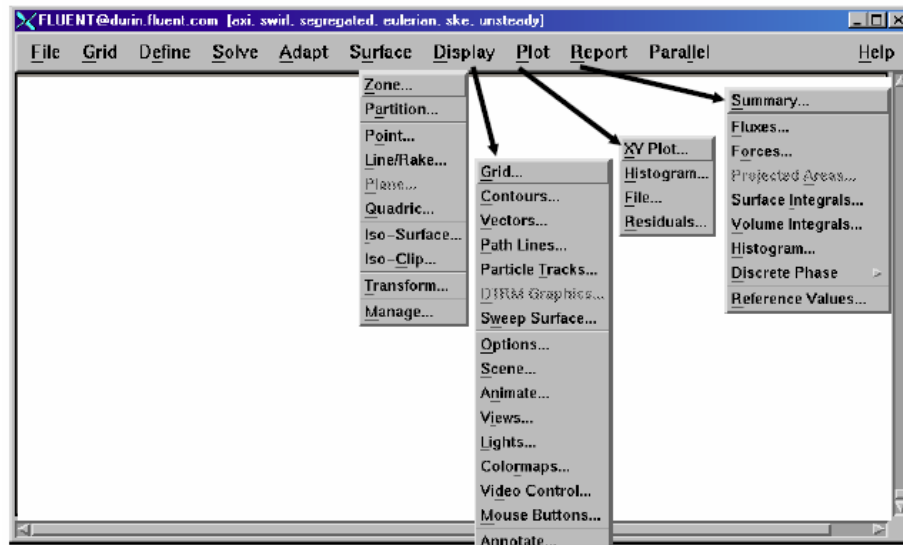


Figure 3.13 Fenêtres de Post-Processeur

3.6.7. Convergence

La résolution numérique des problèmes de type CFD nécessite un processus itératif. Pour apprécier la convergence du processus itératif, des critères de convergence doivent être pris en compte. Ainsi, la convergence du processus itératif est déterminée par le concept de résidu.

A chaque itération, Fluent permet de juger l'état de convergence par le biais du calcul des résidus sur toutes les cellules du domaine avec un degré de précision généralement égal à 10^{-3} .

Il s'écrit donc sous la forme :

$$R^\phi = \sum_{\text{cellules } P} \left| \sum_{nb} a_{nb} \phi_{nb} + b - a_P \phi_P \right| \quad \text{Eq.3.18}$$

a_P et a_{nb} sont des coefficients,

ϕ_P est la valeur d'une variable scalaire au centre de la cellule.

n_b Représente les indices des cellules voisines.

En général, il est difficile de juger de la convergence à partir de son résidu car il dépend de la taille du système. Fluent rend adimensionnel le résidu en utilisant un facteur d'échelle représentatif du débit de ϕ sur le domaine. Ce résidu relatif est défini par :

$$R^\phi = \frac{\sum_{\text{cellules } P} \left| \sum_{nb} a_{nb} \phi_{nb} + b - a_P \phi_P \right|}{\sum_{\text{cellules } P} |a_P \phi_P|} \quad \text{Eq.3.19}$$

Fluent propose par défaut l'utilisation de ces résidus relatifs, et c'est la méthode que nous utiliserons pour juger la convergence des calculs.

Conclusion

Un certain nombre de modèles numériques existent et conviennent pour la modélisation des écoulements dans les canaux à surface libre, ils s'étendent du modèle régi par les équations de Barré de Saint Venant 1D jusqu'au modèle régi par les équations de Navier Stokes 3D. Tous sont fondés sur les mêmes principes physiques fondamentaux (conservation de la masse, théorème des quantités de mouvement) et le choix le plus approprié dépendra du problème réel considéré et notamment de la nature des résultats attendus par l'étude. Dans notre travail, nous considérons le modèle de Barré de Saint Venant, bien qu'il soit relativement plus simple que celui de Navier Stokes, celui-ci permet d'obtenir suffisamment d'informations pour expliquer les différents phénomènes hydrauliques obtenus dans nos simulations.

Dans ce chapitre nous avons présenté les différentes méthodes numériques utilisées pour la discrétisation des écoulements à surface, nous avons opté pour la méthode des volumes finis puisque c'est la plus utilisée pour les écoulements à surface libre et aussi c'est la méthode utilisée par le code numérique FLUENT que nous avons choisi pour notre simulation.

La technique de résolution comprend deux étapes importantes :

- Le maillage qui consiste à diviser le domaine en plusieurs intervalles réguliers appelés volumes de contrôle.
- La discrétisation qui consiste à intégrer les équations dans les volumes de contrôle.

Nous avons choisi un modèle non rectiligne de géométrie variable, à section rectangulaire et qui présente plusieurs singularités à savoir : élargissement et rétrécissement brusques, une pente de fond variable.

Le dessin de la géométrie du modèle ainsi le maillage, s'effectuent avec le préprocesseur GAMBIT,

La qualité du maillage a une importante influence sur la convergence, sur la précision de la solution et surtout sur le temps de calcul.

Les calculs et la visualisation des résultats s'effectuent avec le solveur et le post processeur FLUENT.

Chapitre 4

Chapitre 4

Résultats et discussion

Introduction

La plus logique des démarches nous conduit à résoudre le problème en 3D vu la géométrie complexe du canal à étudier. Les simulations ont été effectuées pour deux types différents de géométries, pour un écoulement instationnaire. Le premier modèle est un canal rectangulaire divergeant, le deuxième modèle est un canal rectangulaire convergeant et divergeant, les deux modèles sont non linéaires. La géométrie des deux modèles a été réalisée sur le post-processeur GAMBIT ainsi que le maillage et les conditions aux limites imposées. En dernière étape on introduit les différents paramètres dans le solveur FLUENT à savoir :

- *Nature du fluide qui est l'eau.*
 - *Régime d'écoulement instationnaire.*
 - *Les conditions aux limites du domaine :*
 - *la vitesse d'entrée*
 - *la pression à la sortie (est pris égale à la pression atmosphérique P_{atm}).*
 - *les parois (la condition de non glissement, vitesse nulle).*
 - *la surface libre (est pris égale à la pression atmosphérique P_{atm}).*
 - *L'intervalle de temps pour chaque itération de calcul ainsi le nombre d'itérations à réaliser.*
 - *Initialiser le calcul et définir le degré de précision de la solution qui est fixé à 10^{-3} .*
-

4.1. Géométrie du premier modèle

- *Le modèle est constitué d'un volume d'entrée, un volume de sortie et un volume intermédiaire.*
 - *Les dimensions des volumes sont comme suit:*
 - Volume d'entrée : 2m de largeur, 0.3m de hauteur avec 2m de longueur.*
 - Volume de sortie : 2.6m de largeur, 0.3m de hauteur avec 2m de longueur.*
 - *Le volume intermédiaire constitué de deux tronçons identiques de dimensions :*
-

2.4m de largeur, 0.3 m de hauteur et 3m de longueur pour chacun, formant entre eux un angle faible de 4 degré.

- Les pentes des différents tronçons constituant le canal varient entre 0.1% et 0.25%
- Les figures suivantes illustrent le dessin de la géométrie, en 2D et 3D du modèle à étudier.

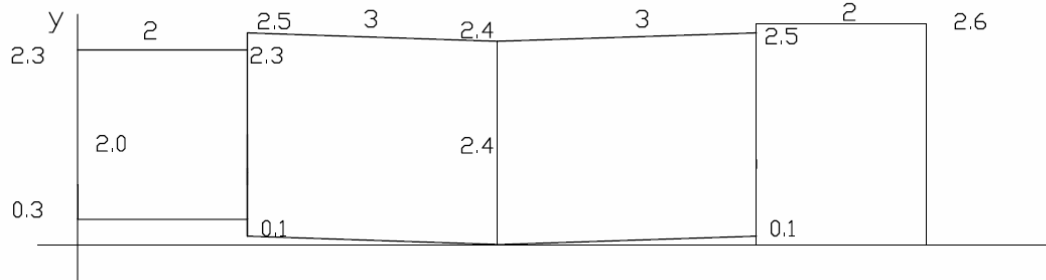


Figure 4.1.a Géométrie en 2D du modèle

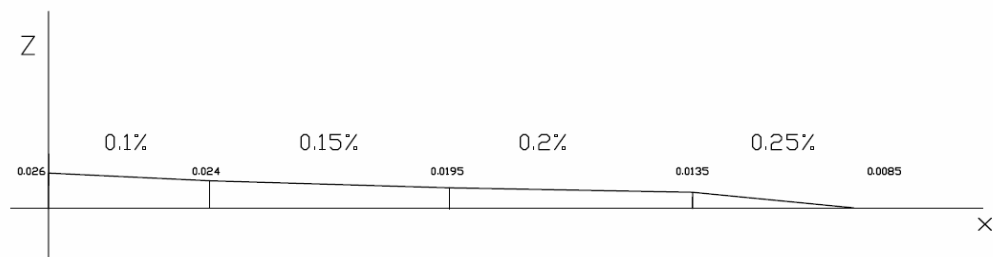


Figure 4.1.b Profile longitudinal du modèle

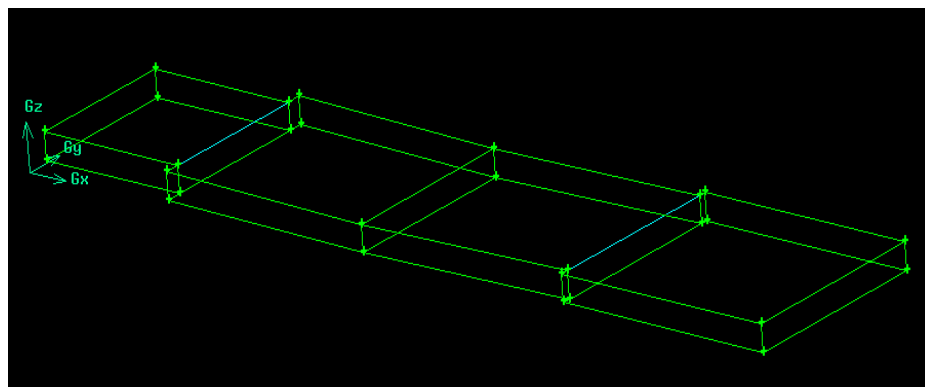


Figure 4.2 géométrie du modèle en 3D sur Gambit

4.2 Maillage et conditions aux limites

Le maillage effectué par le préprocesseur GAMBIT de type 3D HEX/MAP.

Le nombre de maille résultant est comme suit :

- Volume d'entrée 44890 mailles avec un map size : 0.03
- Volumes intermédiaires 92020 mailles chacun avec un map size : 0.028
- Volume de sortie 92000 mailles avec un map size : 0.03

Plusieurs types de conditions aux limites sont proposés dans le code Fluent. Nous en utilisons essentiellement trois : la vitesse d'entrée, la pression de sortie imposée à la surface libre, et la condition de paroi [10].

La première condition aux limites «*velocity-inlet*» correspond à une vitesse imposée.

La deuxième condition «*pressure-outlet*» (pression de sortie) est appliquée au niveau de la sortie du canal et à la surface libre (pression atmosphérique).

La troisième condition «*wall*» est une condition de flux nul. Elle est appliquée au niveau des parois ou des seuils. La vitesse est tangente à la paroi pour les cellules du voisinage (condition de non glissement).

A noter que l'espace maillé est pris par défaut comme étant fluide.

La figure suivante présente le maillage du modèle en 3D.

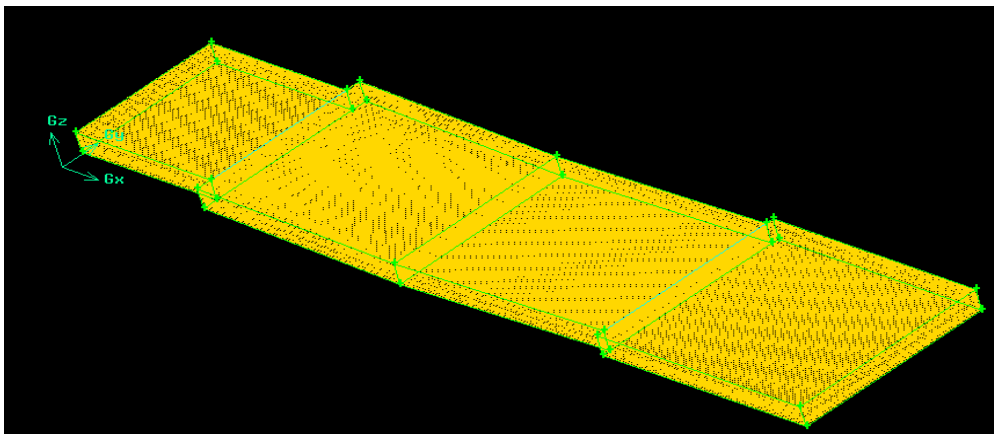


Figure 4.3 maillage du modèle

4.3. Résultats de Simulation sous FLUENT

Pour un canal construit en béton ordinaire ou béton lisse, le coefficient de Strickler est pris égal à 80.

$$K_{str} = \frac{V}{R_h^{2/3} \sqrt{i}}$$

Eq. 4.1

$$\tau = \gamma \cdot R_h \cdot i$$

Eq. 4.2

K_{str} : coefficient de Strickler

V : vitesse d'écoulement (m/s)

R_h : rayon hydraulique (m)

i : pente (m/m)

γ : poids volumique (N/m³)

τ : contrainte de cisaillement (N/m²)

X	Entrée 0 à 2m	volume 1 2 à 5m	volume 2 5 à 8m	Sortie 8 à 10m
hauteur	0,3	0,3	0,3	0,3
largeur	0,4	0,8	0,8	1
pente i	0,001	0,0015	0,002	0,0025

Tableau 4.1 caractéristiques du canal

Avec une pente variant entre 0.1% et 0.25%, la vitesse d'entrée est pris égale à 1m/s

Pour un pas de temps égal à 1sec, le calcul des résidus converge pour un nombre de 1750 itérations avec une précision de 10⁻³.

La figure 4.4 illustre Les résultats de convergence de la solution.

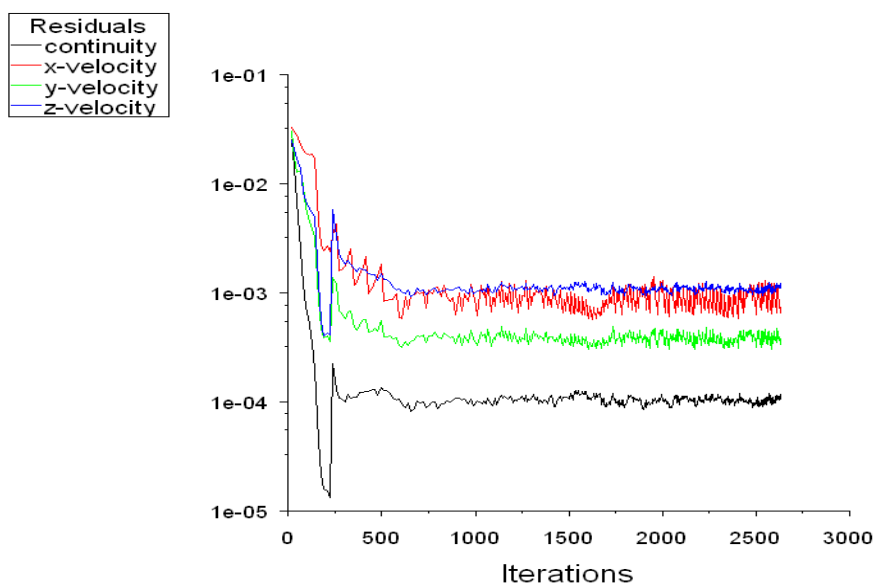


Figure 4.4 graphique des calculs des résidus (convergence de la solution)

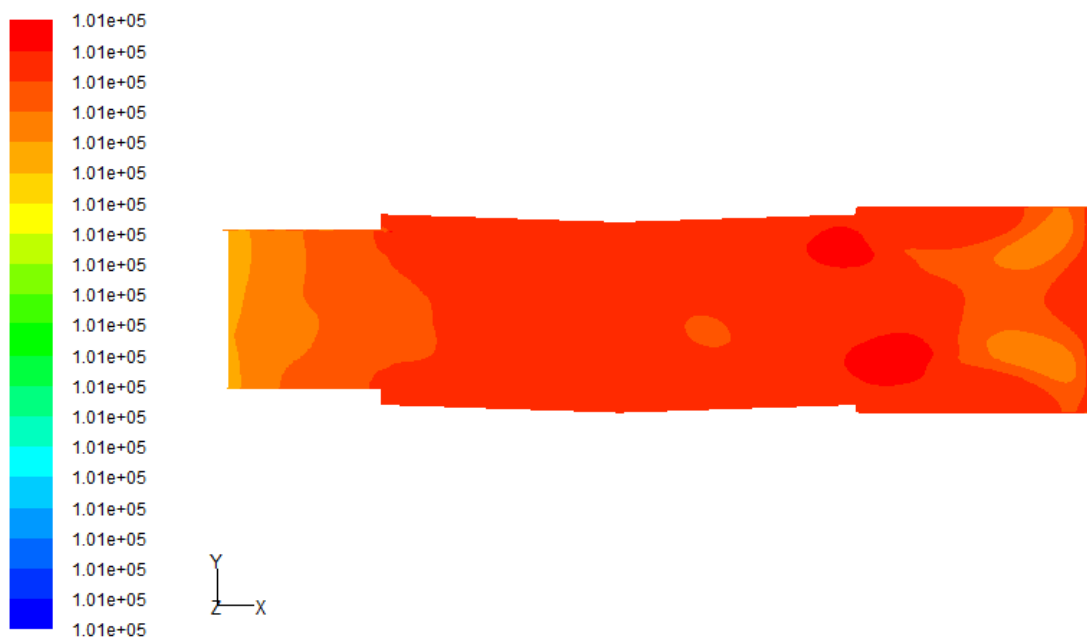


Figure 4.5 pression statique en Pa

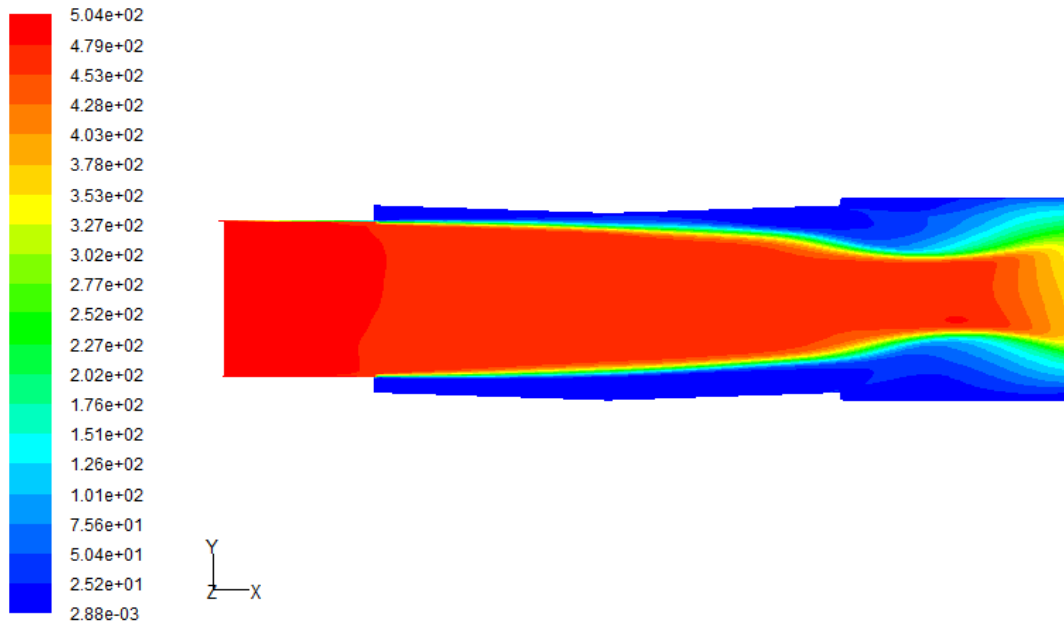


Figure 4.6 pression dynamique sur les parois et le fond en Pa

Les figures 4.5 & 4.6 représentent les profils des pressions statique et dynamique dans le canal ; la pression statique stable avec une valeur constante le long du canal. La pression dynamique illustrée par la figure 4.6 présente des valeurs maximales à l'entrée et reste stable le long de l'axe du canal, et elle commence à diminuer juste avant la sortie, les valeurs les plus faibles sont observées le long des parois (en couleur bleue), ce qui explique l'effet du changement de la section du canal.

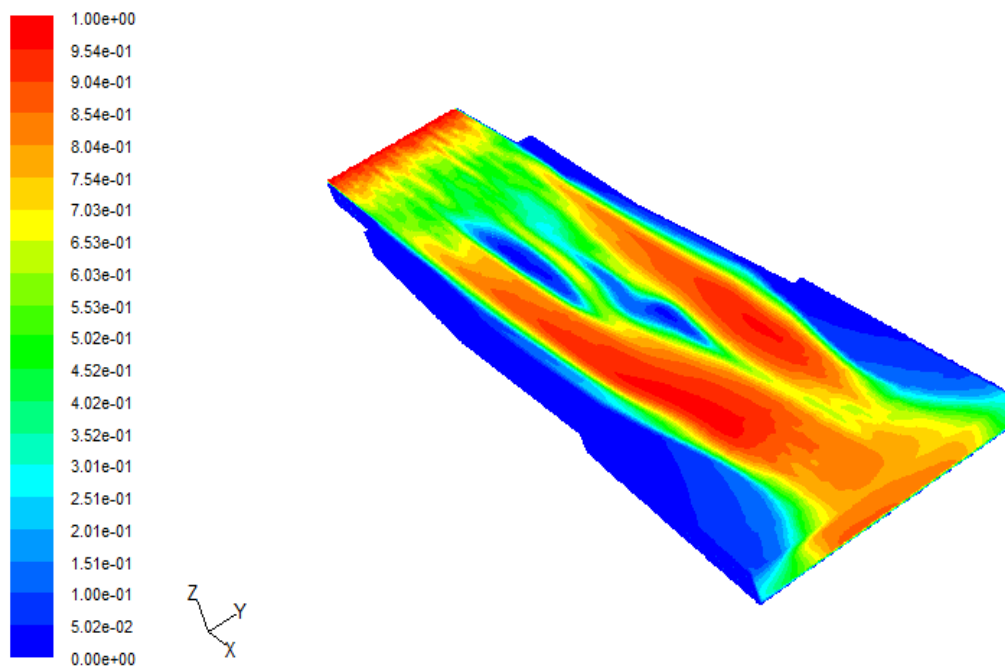


Figure 4.7-a profile des vitesses longitudinales en m/s

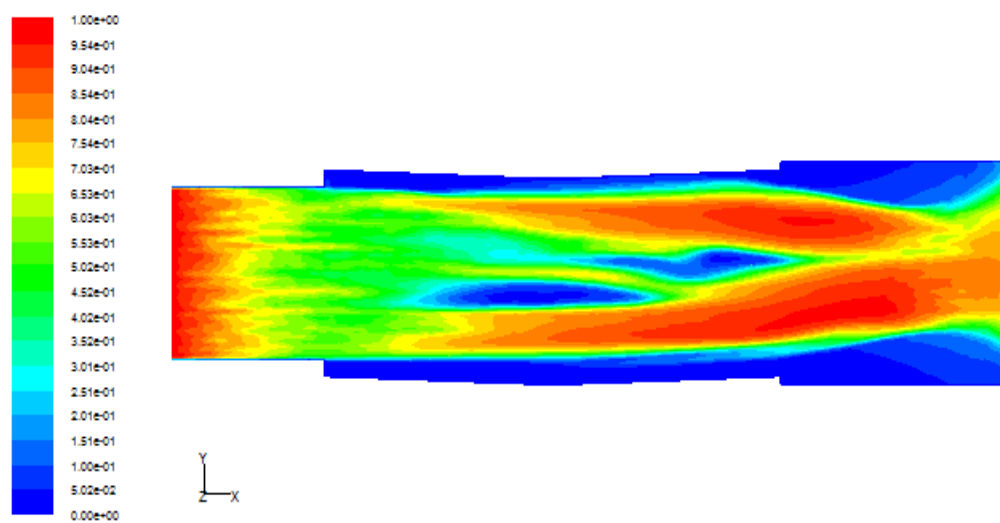


Figure 4.7-b profile des vitesses longitudinales en m/s

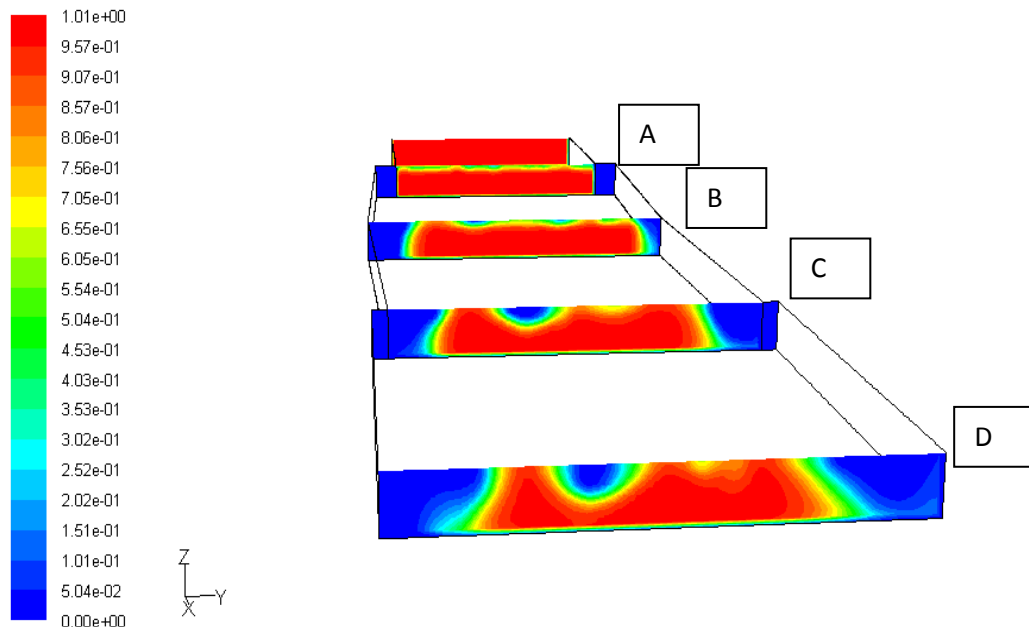


Figure 4.7-c. Profile des vitesses longitudinales en m/s

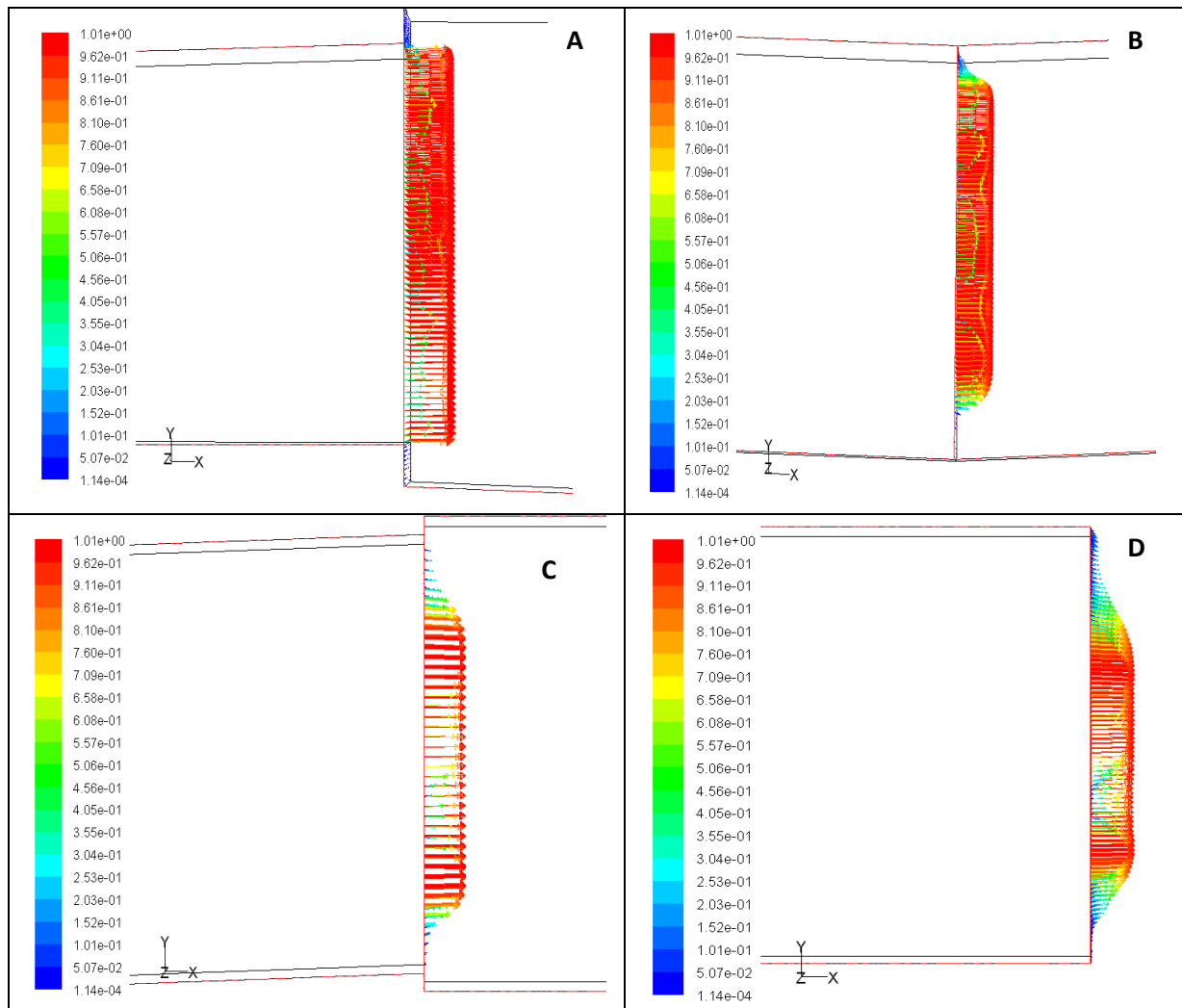


Figure 4.8.a Profile des vecteurs- vitesses dans les différentes sections du canal

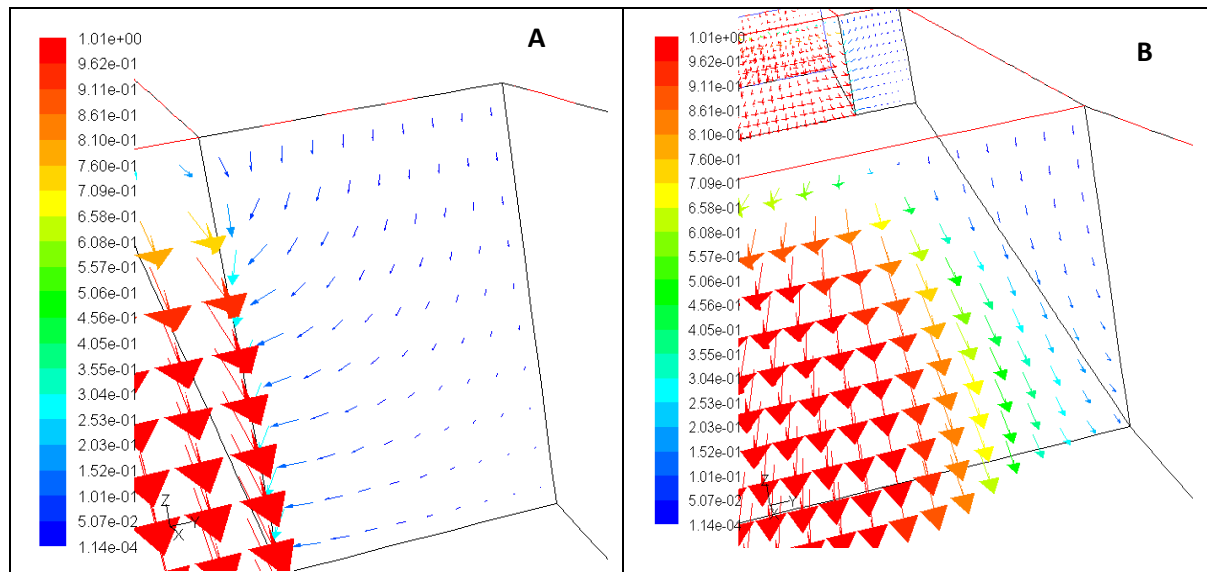


Figure 4.8.b. Profils des vecteurs vitesses aux singularités

Les figures 4.7 (a, b, c) & 4.8 (a, b) montrent les profils des vitesses ainsi que ceux des vecteurs vitesses dans les différentes sections du canal. Les valeurs maximales de la vitesse (en rouge) sont observées le long de l'axe du canal, un peu moins à la surface libre, et les zones de recirculation sont observées aux singularités du canal [11,12] (au changement de la section). Les valeurs les plus faibles de la vitesse (en bleu) sont remarquées le long des parois, les zones en bleues à la sortie indiquent une recirculation du fluide suite à la rugosité des parois, les changements brusques de la section et la pente du canal ainsi la largeur importante du canal qui fait cinq fois sa profondeur, ce qui est confirmé par la figure 11 qui illustre le profile de la contrainte de cisaillement, montrant le fond du canal (en rouge) où les frottements sont plus importants sur une largeur uniforme du fond et diminuent sur les cotés.

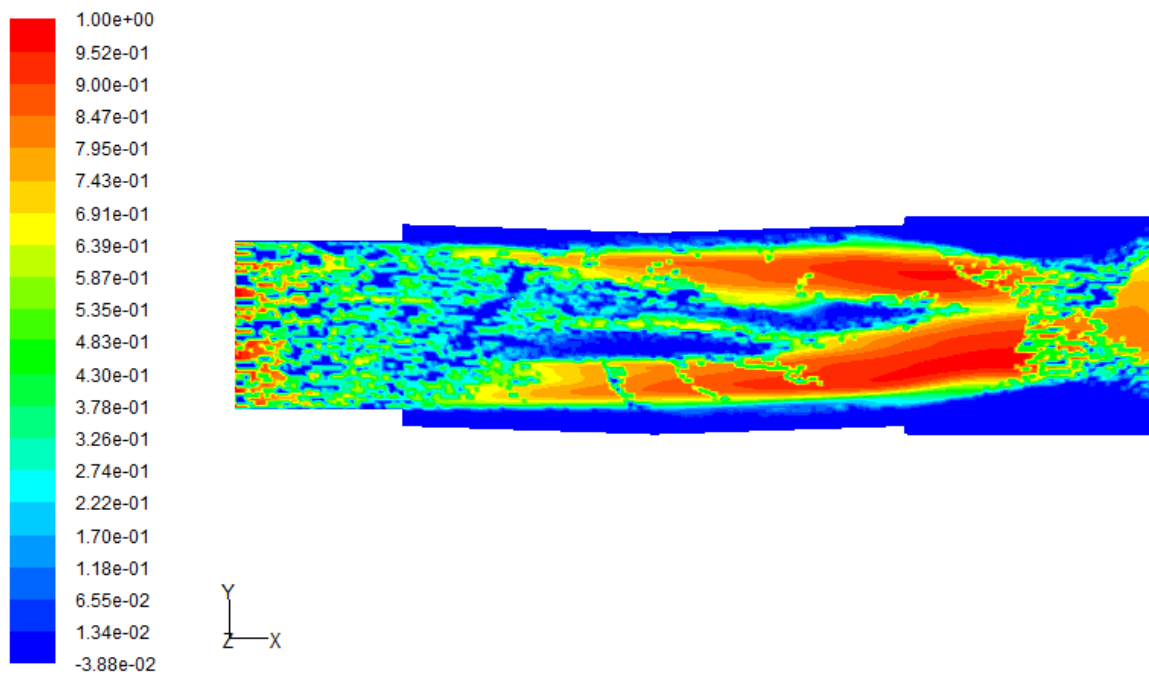


Figure 4.9.a. Profile des vitesses par rapport à l'axe X

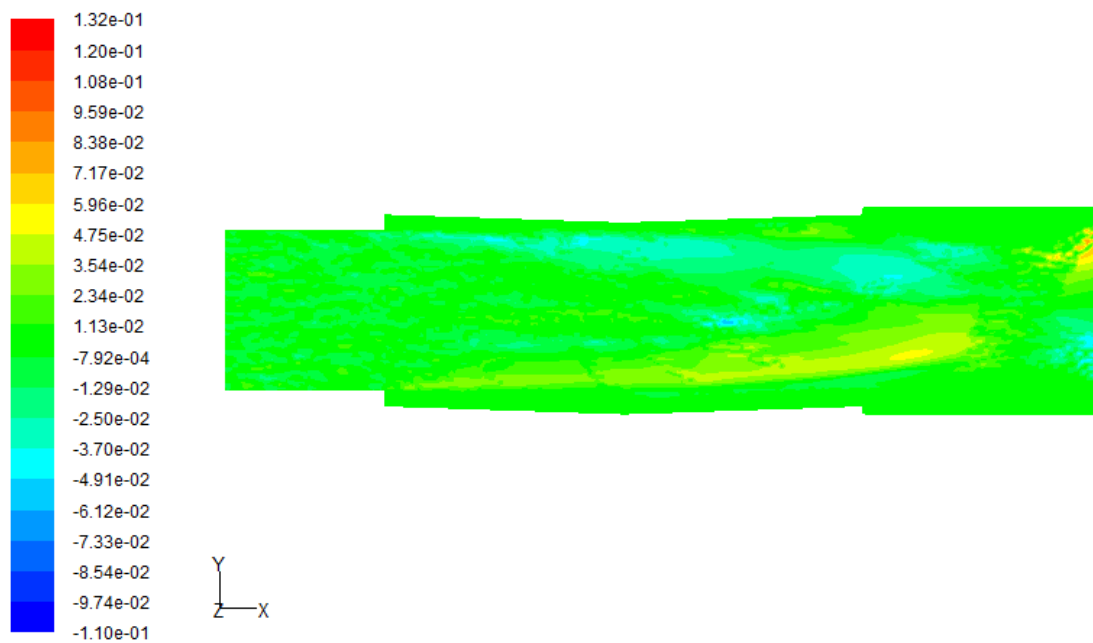


Figure 4.9-b. Profile des vitesses par rapport à l'axe Y

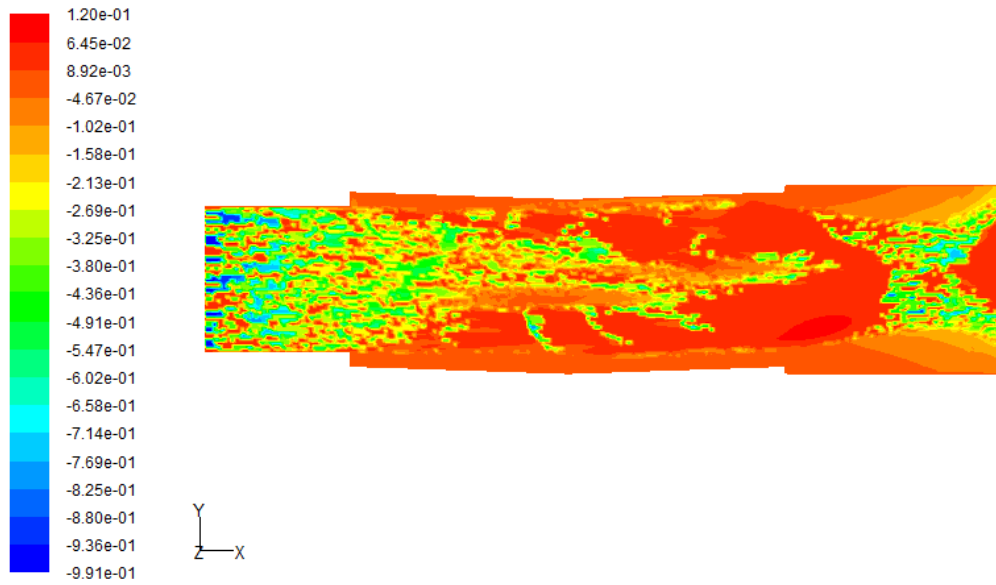


Figure 4.9-c. Profile des vitesses par rapport à l'axe Z

Les figures 4.9 (a,b,c) présentent les profils des vitesses par rapport aux différents axes du repère, on remarque que l'écoulement dominant est suivant l'axe des X, des valeurs avec signes négatifs montrent qu'une recirculation dans le sens inverse de l'écoulement suite à la géométrie variable du canal.

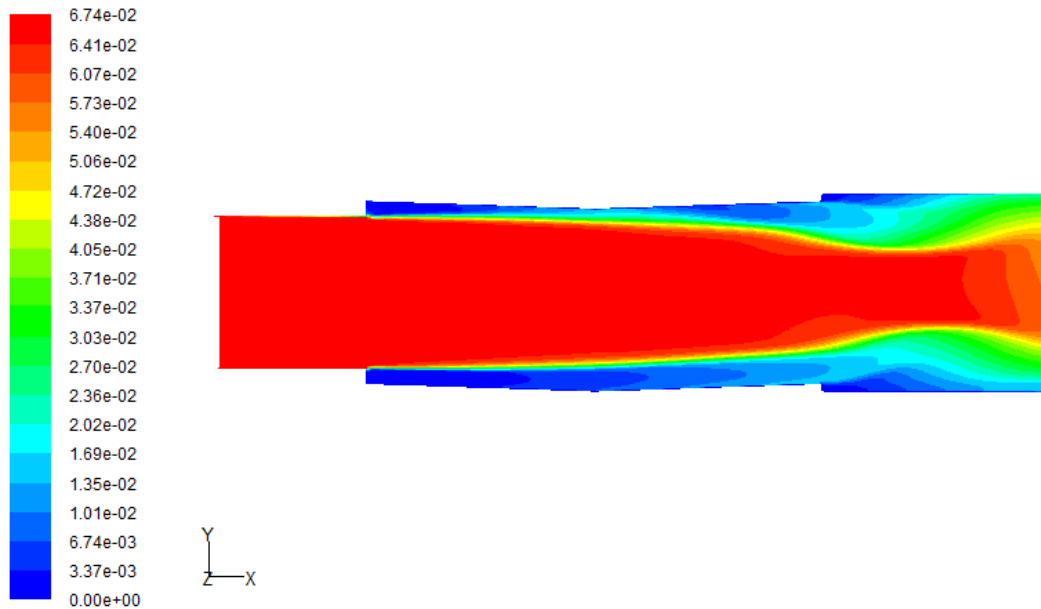


Figure 10. Profile de la contrainte de cisaillement au niveau du fond et des parois

la figure 4.10 présente le profil de la contrainte de cisaillement sur le fond et les parois du canal, avec une valeur maximale sur le fond depuis l'entrée du canal jusqu'à la sortie pour les valeurs faibles sont remarquées le long des parois depuis le premier changement de section.

4.4. Géométrie du deuxième modèle

- Le modèle est constitué d'un volume d'entrée, un volume de sortie et un volume intermédiaire.
- Les dimensions des volumes sont comme suit:
Volume d'entrée : 2m de largeur, 0.3m de hauteur avec 2m de longueur.
Volume de sortie : 2m de largeur, 0.3m de hauteur avec 2m de longueur.
- Le volume intermédiaire constitué de deux tronçons identiques de dimensions :
2.4m de largeur, 0.3 m de hauteur et 3m de longueur pour chacun, formant entre eux un angle faible de 4 degré.
- Les pentes des différents tronçons constituant le canal varient entre 0.1% et 0.25%.

Les figures suivantes illustrent le dessin de la géométrie, en 2D et 3D du modèle à étudier.

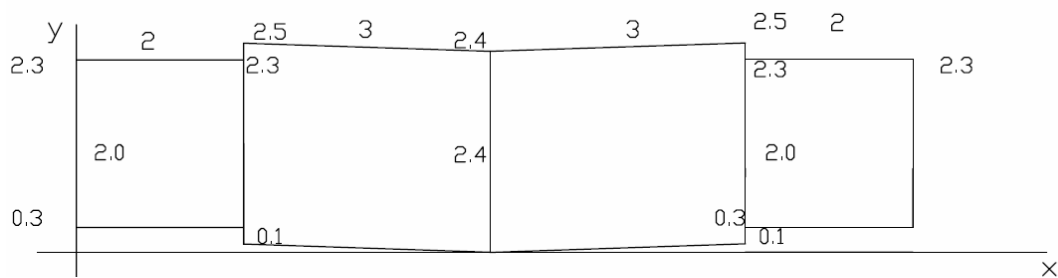


Figure 4.11-a Géométrie du modèle en 2D

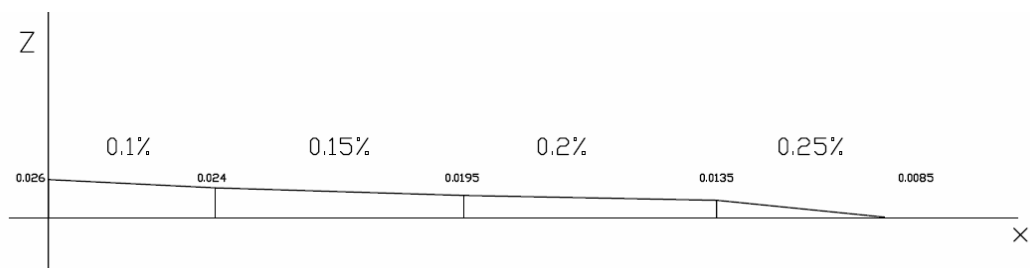


Figure 4.11-b profil longitudinal du modèle en 2D

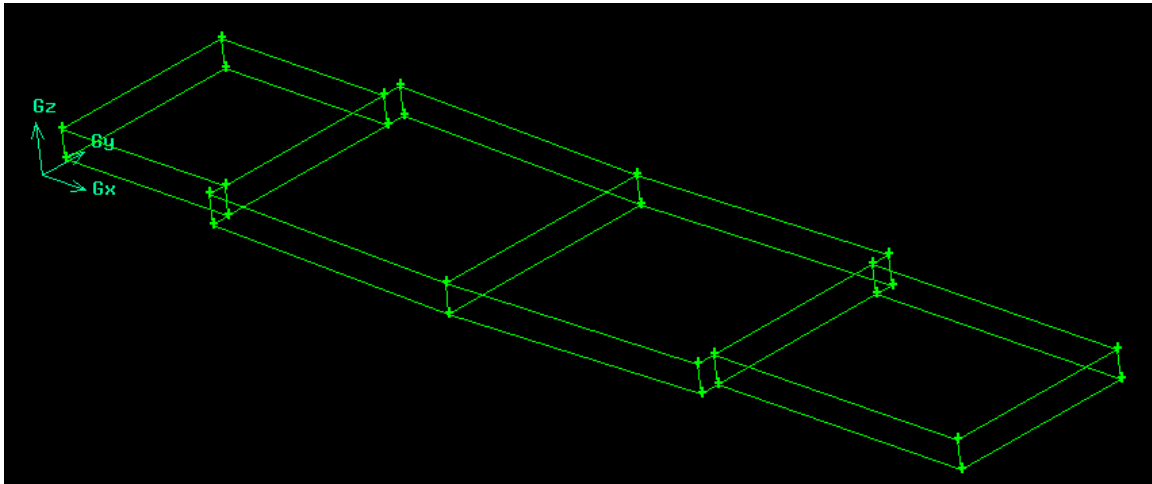


Figure 4.12 Géométrie du modèle en 3D

4.5. Maillage et conditions aux limites

- Le maillage effectué par le préprocesseur GAMBIT de type 3D HEX/MAP.
- Le nombre de maille résultants est de :
 - Volume d'entrée 20000 mailles avec un map size de 0.04
 - Volume de sortie 37184 mailles avec un map size de 0.036
 - Volumes intermédiaires 45152 mailles chacun avec un map size de 0.036

La figure suivante présente le maillage du modèle en 3D.

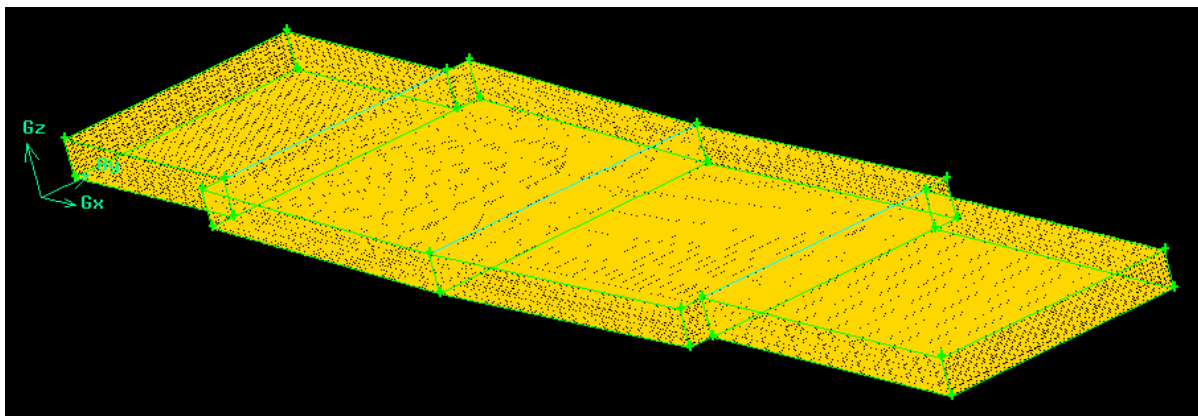


Figure 4.13 maillage du modèle sous Gambit

4.6. Résultats de Simulation sous FLUENT

Pour un canal construit en béton ordinaire ou béton lisse, le coefficient de Strickler est pris égal à 80.

X	Entrée 0 à 2m	volume 1 2 à 5m	volume 2 5 à 8m	Sortie 8 à 10m
hauteur	0,6	0,6	0,6	0,6
largeur	1	0,8	0,8	1
pente i	0,001	0,0015	0,002	0,0025

Tableau 4.2 caractéristiques du canal

Avec une pente variant entre 0.1% et 0.25%, la vitesse d'entrée est pris égale à 1m/s

Pour un pas de temps égal à 1sec, le calcul des résidus converge pour un nombre de 800 itérations avec une précision de 10^{-3} .

La figure 4.14 illustre Les résultats de convergence de la solution.

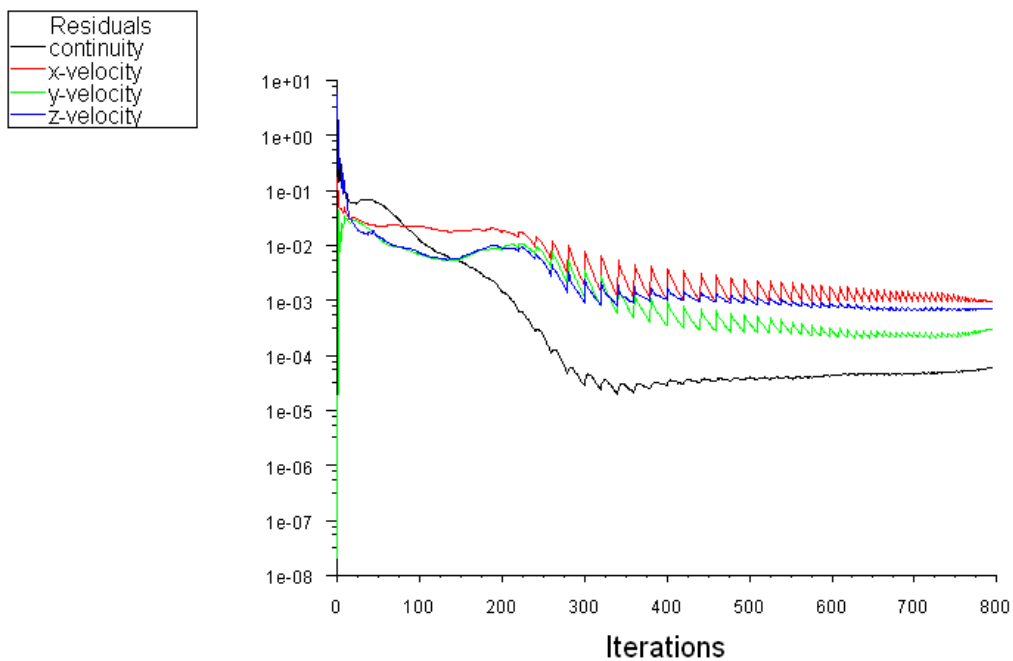


Figure 4.14 graphique des calculs des résidus (convergence de la solution)



Figure 4.15. Pression statique en Pa

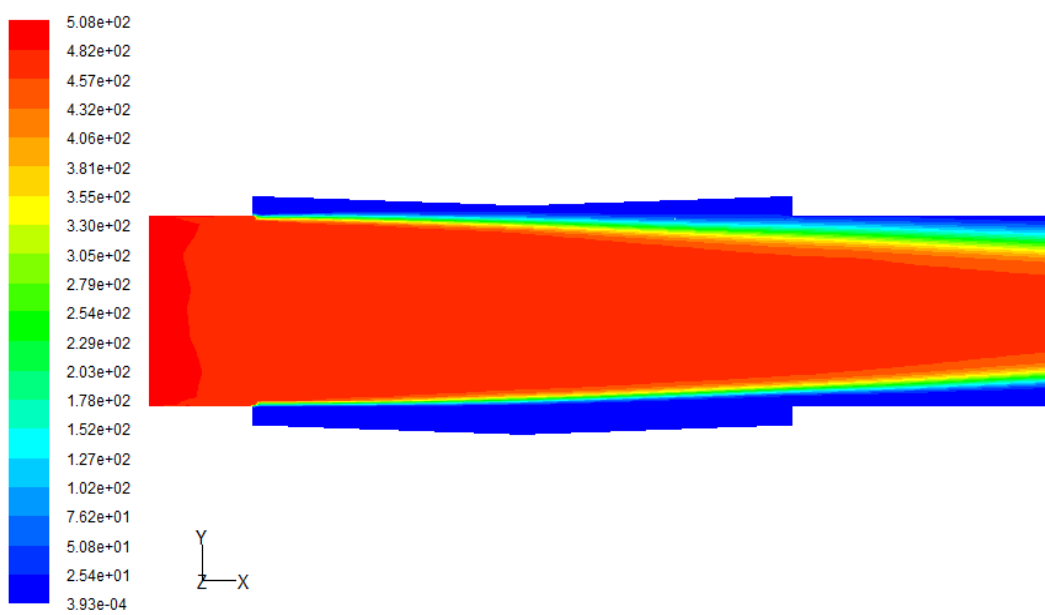


Figure 4.16. Pression dynamique en Pa

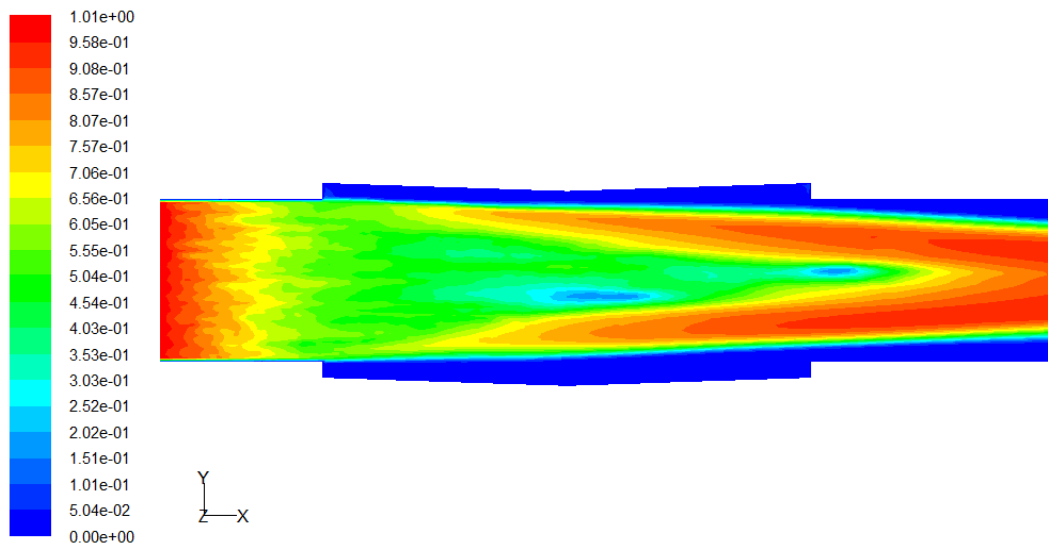


Figure 4.17 profile des vitesses le long du canal

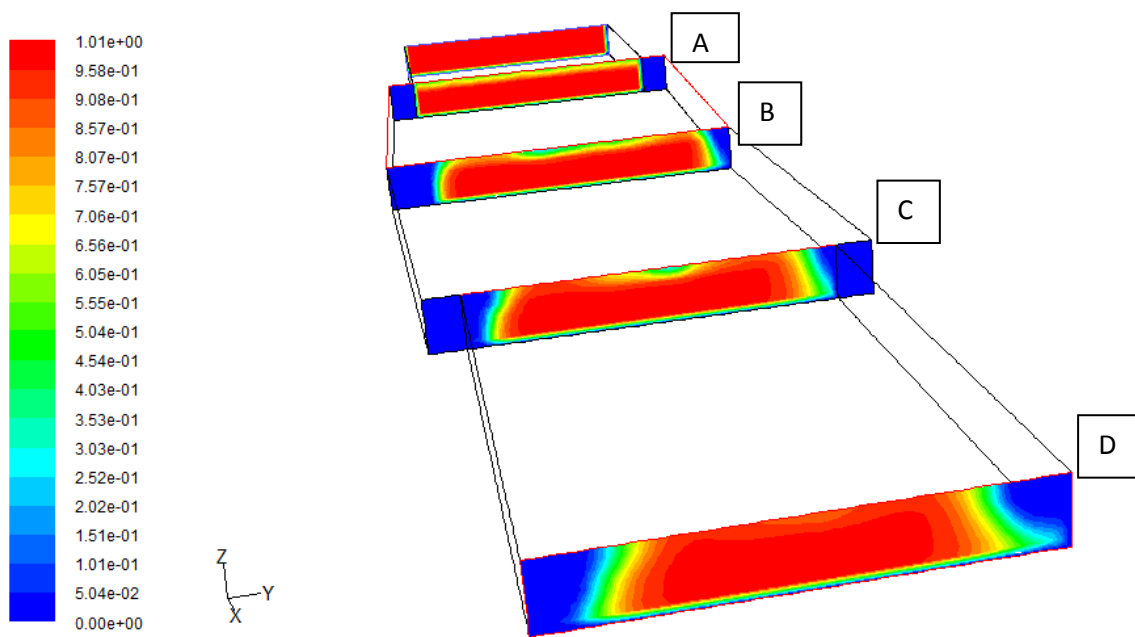


Figure 4.18-a. profile vitesses dans les différentes sections du canal

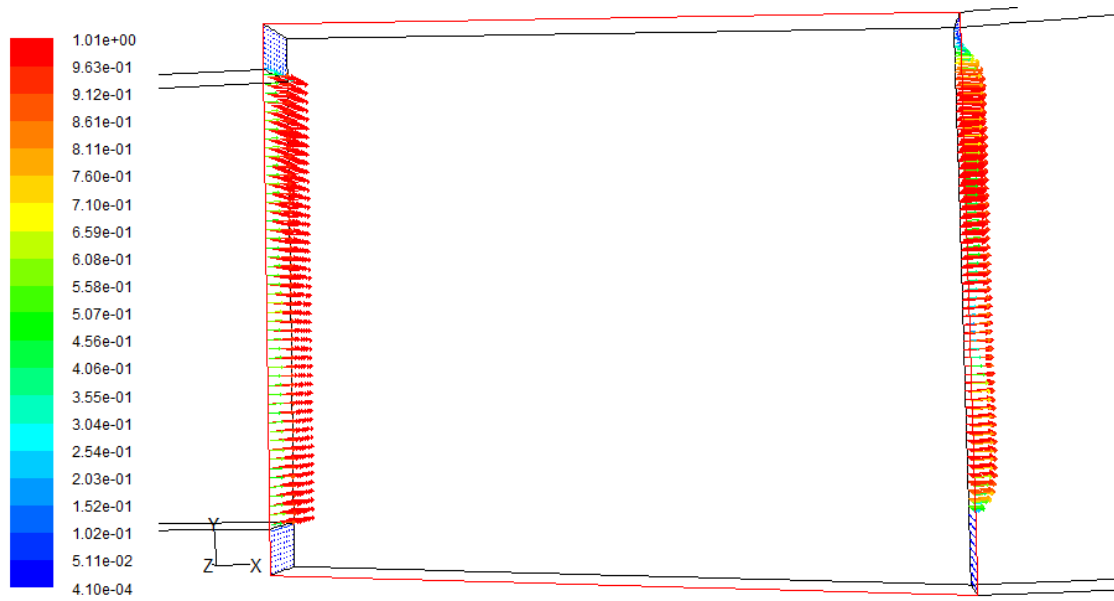


Figure 4.18-b. Profile des vecteurs- vitesses dans les sections A et B du canal

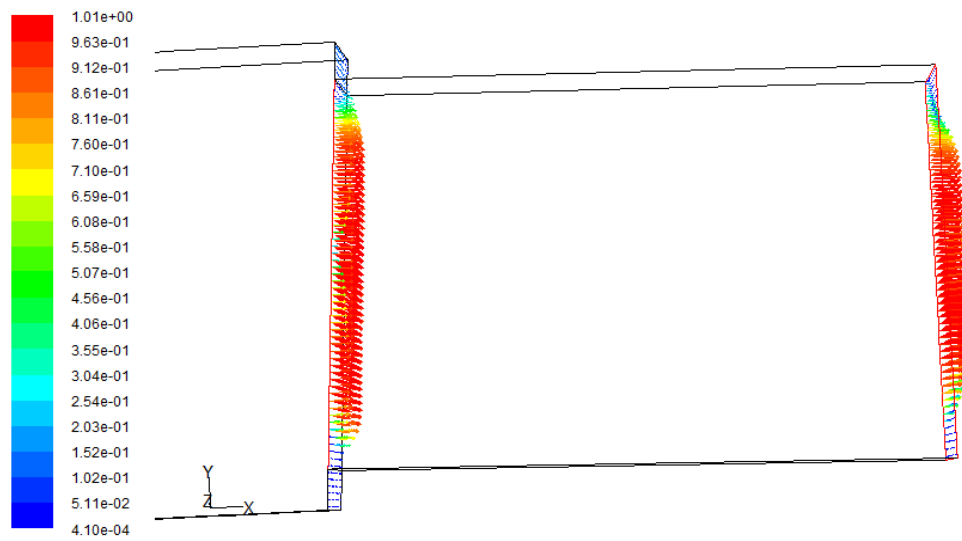


Figure 4.18-C. Profile des vecteurs - vitesses dans les sections C et D du canal

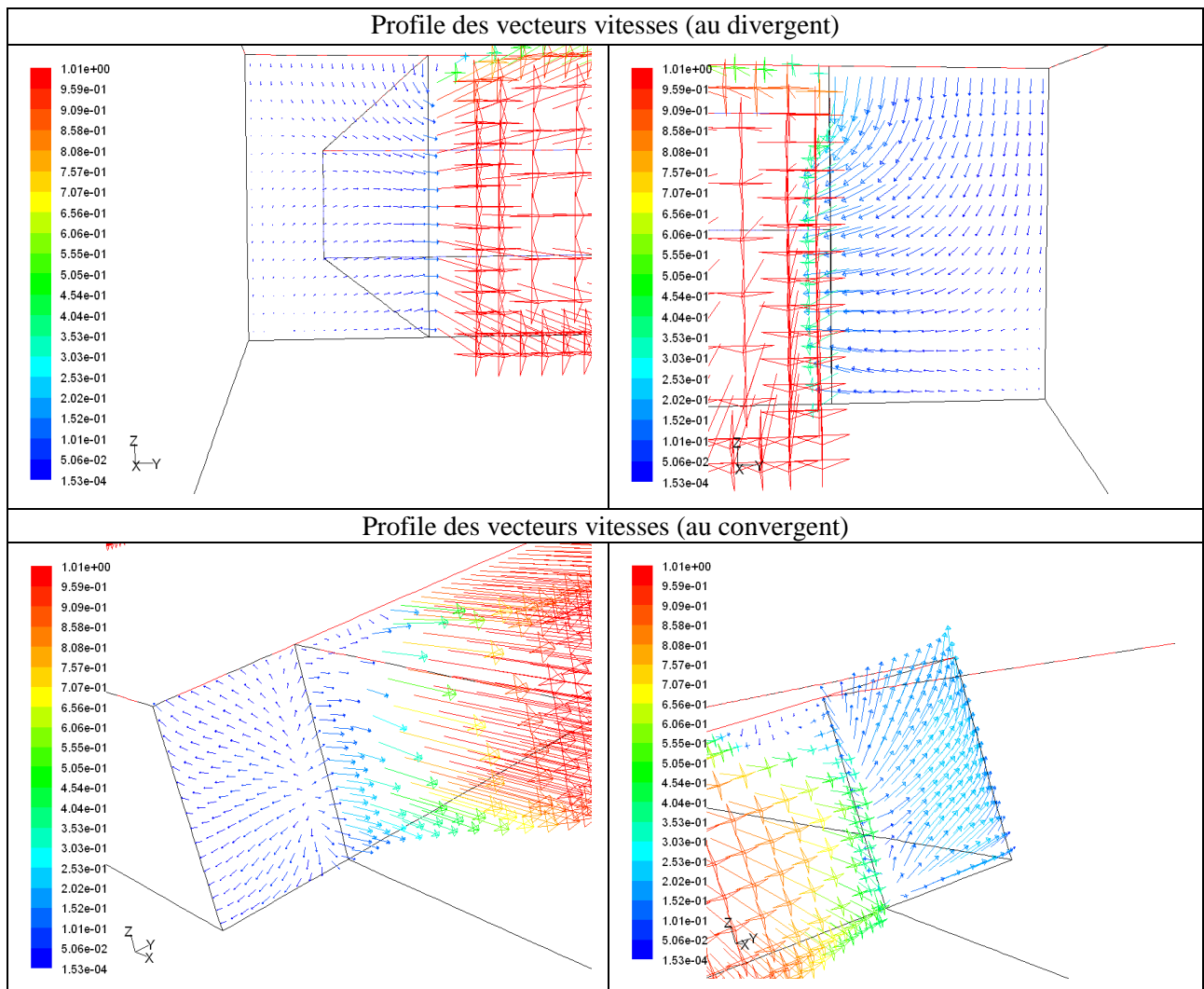


Figure 4.19. Profile des vecteurs- vitesses dans les singularités

Les figures (4.15 & 4.16) présentent les profils des pressions statique et dynamique respectivement, la pression statique se présente stable le long du canal, une légère diminution pour la pression dynamique depuis le milieu du canal jusqu'à la sortie où elle atteint sa valeur moyenne, aux parois depuis l'élargissement du canal jusqu'à la sortie les valeurs observées sont les plus faibles ce qui traduit un faible écoulement dans cette zone.

Les figures 4.17, 4.18(a, b, c,) & 4.19 montrent les profils des vitesses et des vecteurs vitesses le long du canal avec plus de détails pour les zones de changement de section à savoir le rétrécissement et l'élargissement. Les valeurs maximales (en rouge) de la vitesse sont observées le long de l'axe du canal avec une légère diminution depuis l'entrée du divergent jusqu'à l'entrée du convergent ce qui traduit l'effet du changement brusque de la section et la pente du canal ; les valeurs faibles sont signalées au près des parois en commençant depuis

l'entrée du divergent jusqu'à la sortie du canal. Des zones de recirculations sont observées au niveau des singularités et à la surface libre à l'entrée du convergent, où la valeur de la vitesse augmente davantage jusqu'à la sortie, suite au rétrécissement du canal.

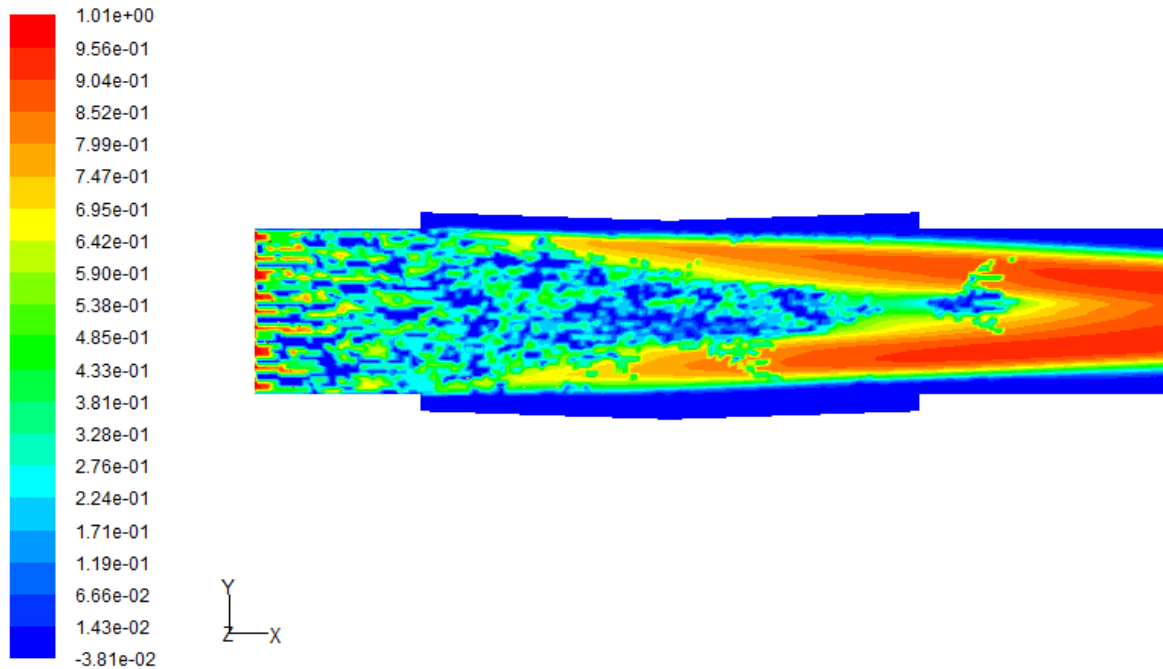


Figure 4.20-a. Profile des vitesses par rapport à l'axe X

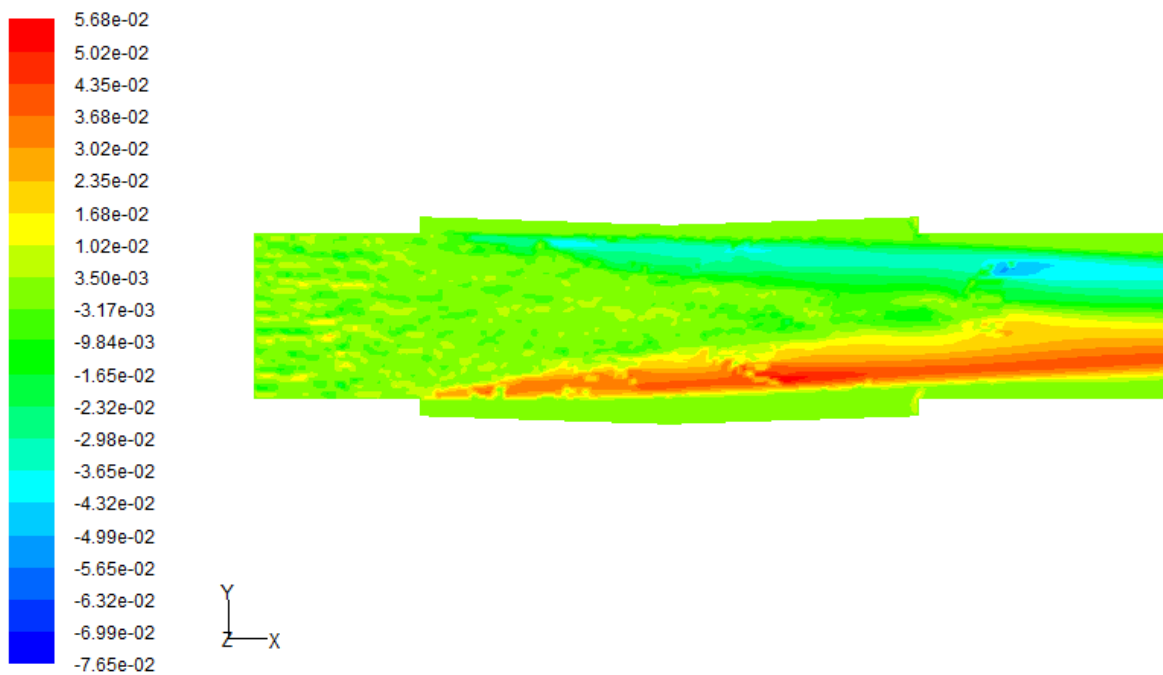


Figure 4.20-b. Profile des vitesses par rapport à l'axe Y

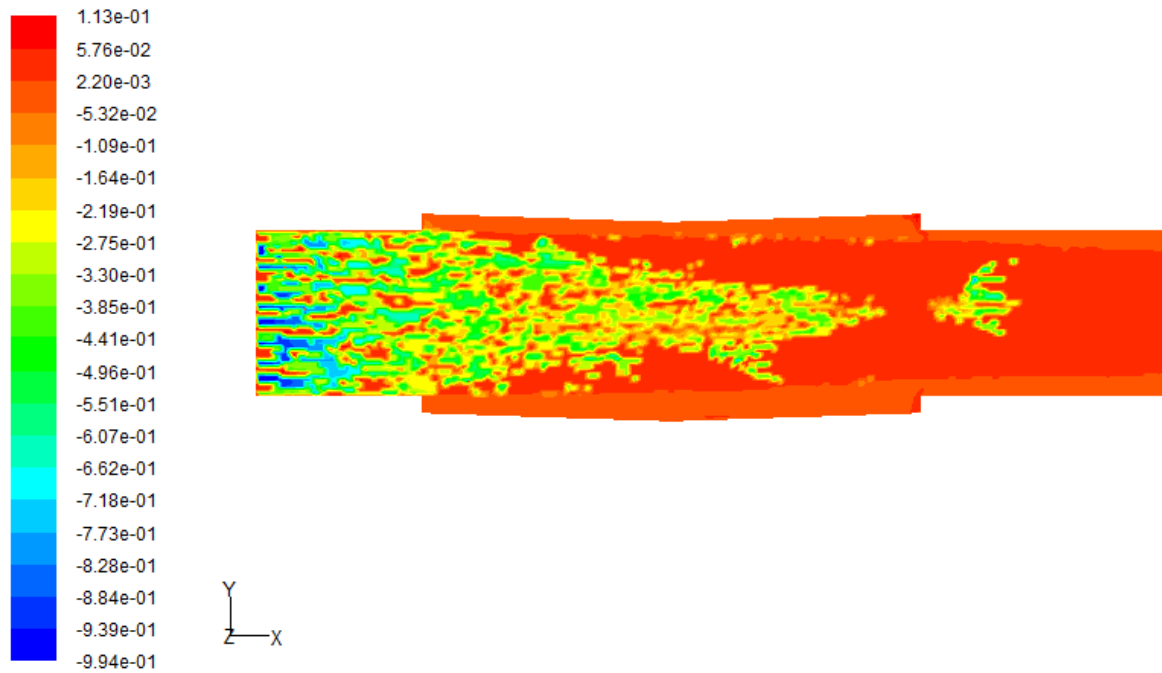


Figure 4.20-c. Profile des vitesses par rapport à l'axe Z

Les figures 4.20 (a,b,c) et figure 4.18 présentent les profils des vitesses suivant les différents axes. Les signes négatifs expliquent une circulation inverse due à la forme géométrique inhomogène du canal, changement de la pente du fond ainsi à l'effet des frottements aux fond et aux parois. Les frottements, illustrés ci après par la figure 4.21, sont plus importants sur le fond et faible en en se rapprochant de la paroi, due à la largeur importante du canal par rapport à sa profondeur.

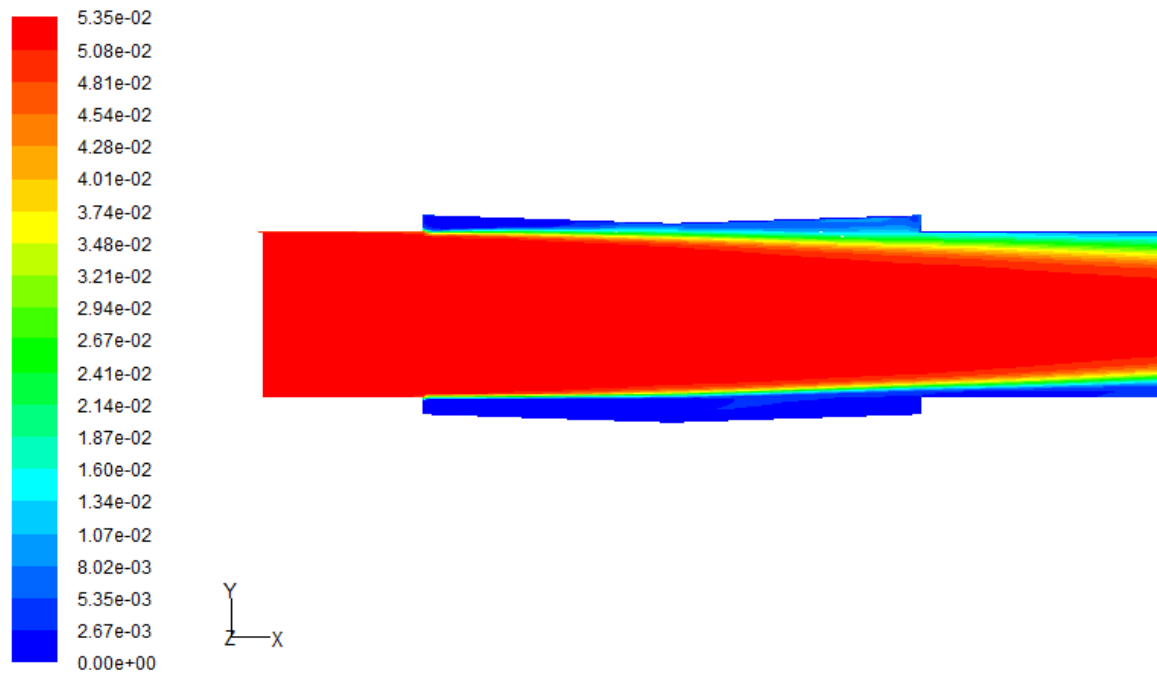


Figure 4.21. Profile de la contrainte de cisaillement sur le fond et sur les parois

Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons réalisé une simulation sur deux modèles pour un écoulement instationnaire, les deux modèles étudiés sont composés d'un canal non rectiligne, à section rectangulaire variable (élargissement et rétrécissement).

Afin d'avoir une idée sur le comportement de l'écoulement et ces différents phénomènes résultants dans ce types de géométries et en particulier les profils des vitesses, les deux modèles sont simulés avec des conditions aux limites établies sur le préprocesseur GAMBIT, les calculs et la visualisation des résultats sont effectués sur le solveur et post processeur FLUENT.

La simulation en 3D nous a permet d'avoir une vision globale du phénomène pour une meilleur compréhension du problème d'écoulement à surface libre dans un canal non rectiligne et non prismatique tout en se focalisant sur les structures des vitesses objet de notre travail.

Les résultats issus de cette simulation sont satisfaisants, ils décrivent l'écoulement dans les deux modèles étudiés avec beaucoup de logique, et s'avèrent assez convaincants [49, 50,51].

Conclusion générale & perspectives

Conclusion générale & Perspectives

Dans ce travail nous avons présenté des définitions générales sur les différents types d'écoulements à surface libre, les différents paramètres hydrauliques qui caractérisent chaque régime d'écoulement ainsi la transition d'un régime d'écoulement à un autre. Nous avons donné une idée générale sur la distribution des vitesses et leur profiles dans un canal découvert pour les différentes dimensions (1D, 2D et 3D), nous avons présenté également quelques phénomènes hydrauliques dans les écoulements dans les canaux découverts.

Nous avons, également, dévoilé les propriétés mathématiques du système de Barré de Saint-Venant, avec ces deux principales équations à savoir l'équation de continuité et de l'équation de la dynamique qui gouvernent l'écoulement non permanent à surface libre.

Le système de Barré de Saint-Venant est un système d'équations différentielles aux dérivées partielles non linéaires et hyperboliques, dont la solution analytique est impossible pour le cas général, pour cela nous avons fait recours aux méthodes de résolutions numériques, en particulier la méthode des volumes finis qui est la plus approprié et la plus utilisée pour la discrétisation des équations de BSV.

Pour concrétiser notre approche, nous avons fait appel au code numérique dédié aux simulations des différents fluides nommé FLUENT qui utilise la méthode des volumes finis comme base de résolution.

La géométrie ainsi que le maillage des modèles à simuler, ont été élaboré sous le préprocesseur GAMBIT avec un certain nombre de conditions aux limites, les modèles choisis présentent un canal non rectiligne à section rectangulaire avec un élargissement et un rétrécissement et une pente variable.

Pour une vitesse imposée à l'entrée, et afin d'avoir une idée sur les comportements des différents phénomènes hydrauliques résultants dans ce types de géométries pour un écoulement instationnaire, les calculs et la visualisation des résultats ont été réalisés avec le solveur et le post processeur FLUENT.

La simulation, effectuée en 3D, nous a permet d'avoir une vision globale du phénomène avec une meilleure compréhension du problème d'écoulement à surface libre dans des canaux à géométrie complexes en se concentrant sur les vitesses d'écoulement et leurs structures durant l'écoulement qui sont l'objet de notre travail. Les résultats issus de cette simulation décrivent l'écoulement dans les modèles étudiés avec beaucoup de logique et s'avèrent satisfaisants et convaincants.

Suite au caractère purement théorique de ce travail, il est d'un grand intérêt de le confronter à des résultats issus d'un travail expérimental, ce qui le rend plus crédible et plus exploitable pour les concepteurs des canaux découverts dans les différents domaines à savoir le domaine de l'irrigation, la protection des sites contre les inondations, et le transport des sédiments et l'aménagement des oueds, ce qui laisse les portes ouvertes pour une perspective immédiate afin de concrétiser cette comparaison en réalisant un prototype dans le laboratoire.

Bibliographie

Bibliographie

- [1] Jonathan WERTEL, " Modélisation 3D des écoulements turbulents à surface libre en canal rectangulaire " ,thèse de doctorat, Université louis pasteur de Strasbourg, 2006.
- [2] Hubert Chanson, "Environmental Hydraulics of Open Channel Flows " , Elsevier Butterworth-Heinemann, 2004.
- [3] M. Chouaib Labiod, " Ecoulement a surface libre sur fond de rugosité inhomogène", thèse de docteur de l'institut national polytechnique de Toulouse, France, 2005.
- [4] Pierre Sochala, " Méthodes numériques pour les écoulements souterrains et couplage avec le ruissellement", thèse de Docteur de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, France, 2008.
- [5] Ali Berreksi, Ahmed Kettab, Boualem Remini, Abdelatif Bouhadj, Omar Belhadj "Numerical Simulation of Two Dimensional Torrential Flows Through Progressive Channel Expansion", European Journal of Scientific Research ISSN 1450-216X Vol.26 No.1 (2009), pp.98-107
- [6] E.G. Ladopoulos, " Singular integral equations in potential flows of open-channel transitions" ,Computers & Fluids 39 (2010) 1451–1455, 2010 Elsevier.
- [7] Mahmoud F. Maghrebi,Majid Rahimpour, "Streamwise velocity distribution in irregular shaped channels having composite bed roughness",Flow Measurement and Instrumentation 17 (2006) 237–245, 2005 Elsevier.
- [8] Benabid Abderrahmane, "Contribution à l'étude des écoulements permanents graduellement variés en canal prismatique " , Mémoire de magistère, université de Batna, 2009.
- [9] Debadi Chakraborty, Mohit Bajaj, Leslie Yeo, James Friend, Matteo Pasquali, J. Ravi Prakasha, "Viscoelastic flow in a two-dimensional collapsible channel", [J. Non-Newtonian Fluid Mech.](#) 165 (2010) 1204–1218, 2010 Elsevier.
- [10] Boudiaf H'ssine, "Contribution à l'étude d'un écoulement turbulent homogène et isotrope dans les canaux à surface libre", Mémoire de magistère, université de Batna,2009.
- [11] Mahmoud F. Maghrebi, Majid Rahimpour, "Prediction of stage–discharge curves in open-channels using a fixed-point velocity measurement", Flow Measurement and Instrumentation 17 (2006) 276–281, 2006 Elsevier.
- [12] W. Z. Lu, W. S. Zhang, C. Z. Cui, A. Y. T. Leung, "A numerical analysis of free-surface flow in curved open channel with velocity–pressure-free-surface correction", Computational Mechanics 33 (2004) 215–224 , Springer-Verlag 2003.
- [13] José Vazquez, "Hydraulique A Surface Libre", Ecole nationale du génie de l'eau et de l'environnement de Strasbourg, France.

- [14] Mathew Flynn and Liz Gooster, "History of fluid Mecanics".
- [15] José VAZQUEZ, "Hydraulique Générale", Ecole nationale du génie de l'eau et de l'environnement de Strasbourg, France, 2006.
- [16] Hubert Chanson, " The Hydraulics of Open Channel Flow" ,2004.
- [17] A. Osman Akan, " Open Channel Hydraulics ", 2006, Elsevier.
- [18] Shu-Qing Yang, " Velocity distribution in a gradually accelerating free surface flow", *Advances in Water Resources* 29 (2006) 1969–1980
- [19] S. Candel, "Mécanique des fluides", Dunod 1995.
- [20] M. Hanif Chaudhry, " Open-Channel Flow", University of South Carolina, 2008 Springer Science.
- [21] Maher Abdallah, "Sur les méthodes de discrétisation numérique de problèmes hyperboliques non linéaires appliquées aux équations de Barré de Saint-Venant pour la modélisation de l'hydraulique en réseau d'assainissement", thèse de Docteur de l'Université Louis Pasteur – Strasbourg I, France, 2005.
- [22] John Fenton, "Open channel hydraulic ", 2007.
- [23] M.Carlier, "hydraulique générale et appliquées", Eyrolles 1980.
- [24] A. Lencastre, "Manuel d'hydraulique générale",1983.
- [25] Walter H.Graf & M.S. Altinakar "Hydraulique fluviale, écoulement non permanent et phénomènes transport", EPF, Lausanne.
- [26] L. Chatellier "Mécanique des fluides instationnaire", master MNM 1ere Année 2006.
- [27] Rabih Ghostine, "contribution à la résolution des équations de barré de saint venant bidimensionnelles par une méthode de type éléments finis discontinus : application à la simulation des écoulements au sein des carrefours dans la ville", thèse doctorat, Université de Strasbourg, mécanique des fluide, 2009.
- [28] G.D. Smith, "Numerical solution of partial differential equations", Oxford 1975.
- [29] Christophe Ancey " Hydraulique à surface libre, Phénomènes de propagation : ondes et ruptures de barrage, Bases mathématiques, outils de simulations, applications" laboratoire hydraulique environnementale (LHE) école polytechnique fédérale de Lausanne, 2009.

- [30] P. A. Sleight , I M Goodwill , "The St Venant Equations", School of Civil Engineering, University of Leeds, March 2000.
- [31] Meraihi Fateh, "Etude d'un écoulement instationnaire à l'aval des ouvrages hydrauliques et son influence sur les lits des canaux", mémoire de magistère, Université de Batna, 2009.
- [32] S.V. Patankar, "Numerical Heat Transfer and Fluid Flow", ed Hemisphere, New York, 1980.
- [33] J.M Hervouet, "hydrodynamics of free surface flow", weilly, 2007.
- [34] Elisa Aldrighetti, "Computational hydraulic techniques for the Saint Venant Equations in arbitrarily shaped geometry "Ph.D. Thesis, University of Trento, may 2007.
- [35] Benkherbache Souad, " Simulation numérique d'un écoulement sur une marche descendante ", mémoire de magistère, Université De M'sila, 2005.
- [36] Lyamna Hassinet, " Etude de l'écoulement laminaire dans un mini canal par la méthode des volumes finis", Mémoire de magistère, Université de Batna, 2008.
- [37] Kamal Gueraoui", Analyse numérique, Méthode des volumes finis", Université Mohammed V, Rabat 2010.
- [38] Alexei Stoukov, " introduction à la mécanique des fluides numérique : méthode volumes finis", 2006.
- [39] Ricardo Camarero, "Génération de maillages, introduction pratique ", école polytechnique Montréal, 2008.
- [40] Djouimaa Sihem, " Simulation de l'écoulement transsonique turbulent autour d'une aube de turbine", thèse de Docteur de l'Université de Batna, 2007.
- [41] Abderrezak Hamami, "simulation de l'écoulement dans un mini canal", mémoire de magistère, Université de Batna, 2005.
- [42] Gislain Lipeme Kouyi, "Expérimentations et modélisations tridimensionnelles de l'hydrodynamique et de la séparation particulaire dans les déversoirs d'orage", thèse de Docteur de l'Université Louis Pasteur – Strasbourg I, France, Sciences pour l'Ingénieur, 2004.
- [43] Balima Olivier, "Etude de la convection naturelle dans une cavité carrée en 2d et 3d sous fluent et gambit", école supérieure d'ingénieurs de Poitiers, France
- [44] D. Fedala, " simulation numérique des écoulements Internes dans les turbomachines, Manuel de maillage sous Gambit et de simulation sous Fluent applications", Laboratoire d'Energétique et de Mécanique des Fluides Interne *ENSAM, CER de Paris*

- [45] Cécile POUTOUS, " Modélisation asymptotique et analyse numérique d'un problème de couplage fluide-structure", thèse docteur de l'université de PAU et des pays de l'adour, france, Mathématiques Appliquées, 2006.
- [46] G.P. Merkley, " Mathematical modeling of open-channel velocity profiles for float method calibration", Agricultural Water Management 70 (2004) 229–244
- [47] Walid JAAFAR, "Étude des champs de vitesse dans les effluents des réseaux d'assainissement : Expérimentation et simulation numérique", thèse de Doctorat, Université Louis Pasteur – Strasbourg I, mécanique des fluide, 2006.
- [48] Gabriel Wecl, " Fluent tutorials",2009.
- [49] Mme SHI Yu-e," Résolution numérique des équations de Saint-Venant par la technique de projection en utilisant une méthode des volumes finis dans un maillage non structuré", thèse doctorat, Université de CAEN Basse Normandie, Mécanique des milieux fluides, 2006.
- [50] Gaci Farid, "Etude de l'écoulement tridimensionnel et le transfert de chaleur d'un fluide traversant un coude ", Mémoire de magistère Université Mentouri , Constantine
- [51] Robert Booij, " Modelling the flow in curved tidal channels and rivers", International Conference on Estuaries and Coasts ,November 9-11, 2003, Hangzhou, China