REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

MINISTRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

Université de Mohammed Seddik Ben Yahia - Jijel

Faculté Des sciences et de la Technologie



Département de Génie Civil et Hydraulique

Projet de fin d'étude

En vue de l'obtention du diplôme : Master en hydraulique

Option : Hydraulique Urbaine

Présenté par :

Boutasseta Abdellah

Chabani Mostapha

Simulation numérique d'un l'écoulement à surface libre en présence d'obstacle

Dirigé par :

- Mr. Labied .C

Soutenu publiquement le 22 / 07/ 2019 devant le jury composé de :

- Président : Ratiat .A

- Examinateur : Amara .L

Promotion 2019

Résumé

Dans ce travail on a mené une étude numérique tridimensionnel d'un écoulement a surface libre turbulent dans un canal de section rectangulaire dont le fond présente une pile de section circulaire s'appuyant sur le fond . La méthode des volumes finis est utilisée pour résoudre les équations de transport non linéaire, régissant les équations de quantité de mouvement, de l'énergie cinétique turbulente, de dissipation et en dépistant la fraction de volume de chacun des fluides dans tout le domaine.

Les résultats numérique sont obtenus par deux modèles, le modèle multiphasique (VOF) (Volume Of Fluid) et le modèle $(k - \xi)$ la turbulence, notons ici que nous avant utilisé le code de calcul Fluent pour faire notre calcul.

Abstract

In this work, a numerical study of three-dimensional of turbulent flow has free surface in a channel of rectangular section whose bottom presents circular pier resting on one of the bottom has been carried out. The finite volume method is used to solve the transport equations, governing the equations of momentum, kinetic energy, dissipation and that of the volume fraction. The numerical results are obtained by two models, the model multiphasic (VOF)(Volume Of Fluid) for the free-surface and the model $(k - \xi)$ for turbulence, we used the code Fluent to make our calculation.

Table des matières

Ta	ble o	des matières	v
Li	ste d	les tableaux	vi
Ta	ble o	des figures	х
No	otati	ons et abréviations	xi
In	trod	uction générale	1
1	Gén	néralité sur les écoulement en présence des piles de pont	3
	1.1	Généralités sur les écoulements	3
	1.2	Types des écoulements à surface libre	4
		1.2.1 Classification selon le temps	4
		1.2.2 Classification selon l'espace	5
	1.3	Les régimes d'écoulement	6
		1.3.1 l'écoulement laminaire	6

 $\mathbf{2}$

	1.3.2	l'écoulement turbulent	6
1.4	Les C	anaux	7
	1.4.1	Définition d'un canal	7
	1.4.2	Les différents types des Canaux	7
	1.4.3	Régimes d'écoulement dans un canal à surface libre	8
	1.4.4	Géométrie des canaux	10
1.5	Dépôt	solide dans les rivières	11
1.6	Génér	alités sur les ponts	11
1.7	Défini	tion et composition des ponts	12
	1.7.1	Principaux éléments constitutifs d'un pont	12
	1.7.2	Dimensionnement hydraulique des ponts	13
1.8	Évalu	ation du remous	13
	1.8.1	Phénomène du Remous	13
	1.8.2	Valeur de l'exhaussement maximal	15
1.9	Ressa	uts Hydrauliques	20
1.10	Proble	ème des Affouillements	22
	1.10.1	Affouillement général ou affouillement normal	23
	1.10.2	Affouillement de contraction (due essentiellement à la présence du rem-	
		blais d'accès)	23
	1.10.3	Affouillement local (due à la présence des piles)	24
1.11	Conc	lusion	27
Modélisation mathématique 28			
2.1	Génér	alités sur la turbulence	28

ii

	2.2	Équat	ion régissant l'écoulement	29
	2.3	Modél	isation de la turbulence	30
	2.4	Caract	éristiques des écoulements turbulents	31
	2.5	Échell	es de la turbulence	31
	2.6	Les di	fférentes approches de simulation	32
		2.6.1	Simulation numérique directe (DNS)	32
		2.6.2	Simulation aux grandes échelles (LES)	33
		2.6.3	Modélisation statistique (RANS)	33
	2.7	Modèl	es de fermeture du système	37
		2.7.1	Concept de la viscosité turbulente	37
	2.8	Modèl	es de turbulence	38
		2.8.1	Modèles à zéro équation	38
		2.8.2	Modèles à une équation de transport	39
		2.8.3	Modèles à deux équations de transport	40
	2.9	Traite	ment de la région proche à la paroi solide	41
		2.9.1	Effet de la présence d'une paroi	41
		2.9.2	La modélisation de l'écoulement en proche paroi	42
	2.10	Conclu	nsion	43
3	Mod	lélisat	ion Numérique	44
	3.1	Princi	pes des codes CFD	44
	32	Préser	ntation du GAMBIT et FLUENT	45
	.	2 2 2 1	CAMBIT	15
		J.2.1		40
		3.2.2	r resentation du code de calcul ANSYS Fluent	45

	3.3	Etapes nécessaires pour réussir une simulation numérique d'un problème par	
		FLUENT	47
		3.3.1 Démarrage de fluent	47
		3.3.2 Chargement du modèle	47
		3.3.3 Initialisation et lancement des itérations	48
		3.3.4 Visualisation des résultats	48
	3.4	Définition de la méthode de résolution	48
		3.4.1 Méthode des volumes finis	49
		3.4.2 Forme générale de l'équation de transport	52
		3.4.3 Modélisation avec la méthode VOF : avec «Fluent »	56
		3.4.4 Couplage pression-vitesse	57
		3.4.5 Convergence	58
	3.5	Procédures de résolution	59
		3.5.1 Création de la géométrie	59
	3.6	Création du maillage	60
		3.6.1 Les conditions aux limites	63
	3.7	Organigramme de calcul	65
	3.8	CONCLUSION	66
4	Rés	ultats des simulations	67
	41	Description des expériences de Szydlowski (2011)	67
	4.2	Analyse des résultats	68
	4.3	Convergence Des Calculs	60
	т.J Л Л	Cas de l'écoulement fluviel	70
	4.4		10

	4.4.1	Profil de la surface	70
	4.4.2	Profil de vitesse le long du canal	72
	4.4.3	la distribution de la ligne d'eau le long de canal	75
	4.4.4	L'évolution de la vitesse le long du canal	76
	4.4.5	Champ de vitesse calculé dans un plan horizontal	76
	4.4.6	Champ de vitesse calculé dans un plan verticale	79
	4.4.7	Zone de recirculation	80
4.5	Cas de	e l'écoulement torrentiel	81
	4.5.1	Profil de la surface	81
	4.5.2	profil de vitesse le long du canal	84
	4.5.3	L'évolution de la vitesse le long du canal	85
	4.5.4	Champ de vitesse calculé dans un plan horizontal	89
	4.5.5	Champ de vitesse calculé dans un plan verticale	91
	4.5.6	Zone de recirculation	95
4.6	Conclu	usion	97
Conclu	sion g	énérale	98
Bibliog	graphie		100

Liste des tableaux

2.1	Coefficients standards du modèle $k - \xi$ standard	41
3.1	Tableau récapitulatif des équations de transport	52
3.2	Interpolation du flux des faces en fonction du sens de l'écoulement	55
3.3	Expression des coefficients ai résultants du schéma UPWIND	56
4.1	caractéristiques de l'écoulement à l'entrée 2^{eme} cas	81

Table des figures

1.1	(Écoulement permanent et Écoulement non-permanent).	5
1.2	Schéma des différents régimes d'écoulement a surface libre	6
1.3	Canal naturel	8
1.4	Éléments géométriques de la section (d'après Graf, 1993)	10
1.5	Effets d'un rétrécissement sur les écoulements uniformes :(a,b) régime fluvial; (c, d) : régime torrentiel (d'après Chow, 1959)	12
1.6	Remous dû à l'obstruction : Profil en long et vue du dessus. $\ldots \ldots \ldots \ldots$	15
1.7	Coefficient de base K_b en fonction du rapport de contraction $M(=b/B)$, pour les culées de types 1,2 et 3	17
1.8	Coefficient de base K_b en fonction du rapport de contraction $M(=b/B)$ pour la culée type 4	17
1.9	définition du coefficient d'obstruction J	18
1.10	coefficient K_0 en fonction du coefficient d'obstruction J suivant le type des piles.	18
1.11	Coefficient σ en fonction du rapport de contraction M	19

1.12	l'exécution des culées	20
1.13	Coefficient correcteur due à l'excentricité en fonction du rapport de contraction .	20
1.14	Schéma d'un ressaut hydraulique (Graf, 1993)	21
1.15	Position d'un ressaut hydraulique (Graf, 1993).	21
1.16	Les Trois Types d'affouillement au Droit d'un Ouvrage (Van Tuu, 1981). $\ . \ . \ .$	23
1.17	Vortex d'eau suite à un affouillement local autour d'une pile (Calgaro et Virlo- geux, 1991)	24
3.1	Volume de contrôle bidimensionnel	50
3.2	Schéma du maillage	51
3.3	Présentation de la géométrie par GAMBIT en 3D	60
3.4	Présentation de fluide (pile solide) par GAMBIT en 3D	60
3.5	Maillage par GAMBIT 3D	61
3.6	Maillage par GAMBIT Amon	62
3.7	Maillage par GAMBIT avale.	62
3.8	Maillage par GAMBIT autour de pile.	62
4.1	Schéma de laboratoire(set-up)	68
4.2	Évolution es résidus au cours des itérations (1^{er} cas)	69
4.3	Évolution des résidus au cours des itérations (2^{eme} cas)	70
4.4	La représentation des deux phases (eau et l'air) dans un plan verticale y= 0.3 m.	71
4.5	La représentation des deux phases (eau et l'air) dans un plan verticale y=0.05m $$	71
4.6	La représentation des deux phases (eau et l'air) dans un plan verticale y=0.12m $$	72
4.7	Profile de vitesse à l'entré, à $1m$, $2m$ et à $3m$	72
4.8	Profile de vitesse d'eau, à $4m$ et à $5m$	73

4.9	ligne d'eau le long de l'axe de symétrie	73
4.10	Ligne d'eau le long de l'axe de pile	74
4.11	Profil de surface mesuré (+++) et calculé (-) pour la première expérience, la ligne de hauteur critique (-) : a)la long de l'axe du canal b) le long de l'axe du pilier (dimensions en mètres) (MICHAL .SZYDLOWSKI. 2011)	74
4.12	les lignes d'eau le long de l'axe de symétrie et profil de la hauteur critique de model étudie et de model de (MICHAL .SZYDLOWSKI .2011)	75
4.13	les lignes d'eau le long de l'axe de pile et profil de la hauteur critique de model étudie et de model de (MICHAL .SZYDLOWSKI .2011)	75
4.14	Développement de la vitesse le long du canal	76
4.15	Champ de vites se calculée dans un plan horizontal Z= 0.1	77
4.16	Champ de vitesse calculée dans un plan horizontal Z=0.2	77
4.17	Champ de vitesse calculée dans un plan horizontalZ=0.3	78
4.18	Champ de vitesse calculée dans un plan horizontalZ=0.4	79
4.19	Champ de vitesse calculée dans un plan vertical Y=0.12	80
4.20	Champ de vitesse calculée dans un plan verticalY=0.25	80
4.21	La zone de recirculation.	81
4.22	La représentation des deux phases (eau et l'air) dans un plan verticale y= 0.05 m.	82
4.23	La représentation des deux phases (eau et l'air) dans un plan verticale y= 0.3 m.	83
4.24	La représentation des deux phases (eau et l'air) dans un plan verticale y= 0.12 m.	84
4.25	Profile de vitesse, à 1m , 2m et à 3m	85
4.26	Profile de vitesse, à $4m$ et à $5m$	85
4.27	Développement de la vitesse le long du canal.	86
4.28	la ligne d'eau le long de l'axe de symétrie	86

4.29	la ligne d'eau le long de l'axe de la pile	87
4.30	Profil de surface mesuré (+++) et calculé (-) pour le seconde expérience, la ligne de la hauteur critique () : a) le long de l'axe du canal) le long de l'axe du pilier (dimensions en mètres) (MICHAL .SZYDLOWSKI .2011)	87
4.31	les lignes d'eau le long de l'axe de symétrie et profil de la hauteur critique de model étudie et de model de SZYDLOWSKI .2011.	88
4.32	les lignes d'eau le long de l'axe de symétrie pile et profil de la hauteur critique de model étudie et de model de SZYDLOWSKI.2011.	88
4.33	Champ de vitesse calculée dans un plan horizontal Z=0.1m	89
4.34	Champ de vitesse calculée dans un plan horizontal Z=0.2m	90
4.35	Champ de vitesse calculée dans un plan horizontal Z=0.25m	91
4.36	Champ de vecteur de vitesse calculé dans un plan verticale y=0 (plane de symétrie).	92
4.37	Champ de vecteur de vitesse calculé dans un plan verticale y=0.1	93
4.38	Champ de vitesse calculée dans un plan vertical Y=1.2m	94
4.39	Champ de vitesse calculée dans un plan vertical Y=0.25m	95
4.40	Zones de recirculation le long du canal.	96

Notations et abréviations

Abréviations

Lettres latines

А	coefficient dans le système d'équations discrétisées.	
b	terme source dans le système d'équations algébriques discrétisées.	
В	La largeur entre Culées	[m].
B_0	largeur au miroir du régime normal en amont de la singularité	[m].
\mathbf{C}	Constante d'intégration de la loi logarithmique.	
C_d	largeurs d'empiétement de la largeur au miroir par les culées de dr	oite [m].
C_g	largeurs d'empiétement de la largeur au miroir par les culées de g	auche [m].
C_u	constante empirique égale à 0.09.	
D	diamètre d'une conduite circulaire	[m].
D_h	bprofondeur hydraulique	[m].
D_i	largeur d'empiétement dans la section en travers de l'écoulement	[m].
d_v	remous d'exhaussement maximal.	
$E[\phi]$	moyenne à partir d'un ensemble N.	
F_r	nombre de Froude.	
$F_{in\phi}$	Le flux total à l'entré de la variable .	
g	accélération de la pesanteur	$[m/s^2].$

- h1 Le tirant d'eau maximum juste en amont du pont.
- h_1^* Le remous maximum dû au rétrécissement.
- h0 Le tirant d'eau dans la section considérée avec rétrécissement (au niveau du pont).

h_n	hauteur de tirant d'eau normal	[m].
h_c	hauteur critique	[m].
$h_{c'}$	hauteur critique entre les piles	[m].
HN	Profondeur normale d'affouillement	[m].
Ha	Profondeur due à la réduction de la section	[m].
HL	Profondeur d'affouillement local	[m]

- I pente de fond d'un canal.
- I_t l'intensité de la turbulence.
- I_c pente critique de fond d'un canal.
- J coefficient d'excentricité.
- k énergie cinétique turbulente.
- k_b Coefficient qui tient compte de la contraction M, de la forme des culé, et de l'ouverture de l'ouvrage B.
- k_p terme obtenue à partir d'une équation de transport simplifié ou les termes de diffusion sont négligés.

 $k_e {\rm Coefficient}$ correcteur dû à l'excentricité en fonction de M.

k^*	coefficient déterminé à l'aide des abaques de Bradley comme	e somme de termes	5.
L	largeur de canal à la surface libre		[m].
L_0	taille caractéristique	[m].	
l_k	échelle de taille des plus petits tourbillons.		
L_m	Longueur de mélange	[m].	
М	coefficient d'obstruction.		
$\overrightarrow{\eta}$	Vecteur normal à la surface considérée de l'élément.		
n	nombre de pile .		
P_m	périmètre mouillé	[m].	
Р	Pression statique	[Pa].	
P'	fluctuation de pression	[Pa]	
Q	débit	$[m^3/s].$	
R_e	nombre de Reynolds.		
R_h	rayon hydraulique	[m].	

xii

R_k	nombre de Reynolds des tourbillons dissipatifs	[m].
R_{ϕ}	somme absolue des résidus correspondant à la variable $\phi.$	
\mathbf{S}	terme source.	
S_m	section mouillé	$[m^2].$
S_{ij}	Tenseur de taux de déformation.	
S_0	La pente du canal ou du fond.	
S_f	La pente de la surface libre ou piézométrique.	
t	variable de temps	[s].
\cup_0	Vitesse caractéristique	[m/s].
u	composantes des vitesses suivant l'axe X	[m/s].
u_i	composante de la vitesse suivant la direction i	[m/s].
u_j	composante de la vitesse suivant la direction j	[m/s].
u_k	vitesse caractéristique des plus petits tourbillons	[m/s].
u_{π}	vitesse de frottement à la paroi	[m/s].
u^+	vitesse adimensionnelle.	
$\overline{u_{i}^{'}u_{j}^{'}}$	tension de Reynolds.	
V	vitesse d'écoulement	[m/s].
v_a	La vitesse moyenne au niveau du pont.	
Х	coordonnée d'espace adimensionnelle.	
х	coordonnée suivant l'axe Z	[m].
Y	coordonnée d'espace adimensionnelle.	
у	coordonnée suivant l'axe Y	[m].
у	distance à partir de la paroi	[m].
y^+	distance adimensionnelle.	
Z	coordonnée suivant l'axe Z	[m].

Lettres grecques

- α facteur de sous-relaxation.
- ϕ variable indépendante (Pression, les deux composantes de la vites se...)
- $\bar{\phi}$ composante moyenne.
- ϕ^{\prime} composante fluctuante.
- $\triangle X$ pas d'espace suivant l'axe X.

$\vartriangle Y$	pas d'espace suivant l'axe Y.	
Γ	coefficient de diffusion.	
μ	coefficient de diffusion.	
v	viscosité cinématique	$[m^2/s].$
V_t	viscosité cinématique turbulente	$[m^2/s].$
ρ	masse volumique	$[kg/m^3].$
σ	taux de réduction global de la section due aux culées et aux piles.	
π_{ij}	tenseur de contrainte.	
π_p	contrainte de cisaillement pariétale.	
δ_{ij}	symbole de Kronecker.	
ξ	taux de dissipation de l'énergie cinétique turbulente	$[m^2/s^3]$
σ_R	coefficient caractéristique de forme des piles.	
σ_k	nombre de Prandtl turbulent associés à k.	

 σ_{ξ} nombre de Prandtl turbulent associés à ξ .

Exposants

()′	fluctuation	ou	correction	de	la	variable.
· `							

- ()* valeur estimée.
- $()^+$ relatif à l'adimensionnement en variables de paroi.

Indices supérieurs

- i , j Indices (i, j=1,2 , 3).
- E noeud considéré du coté Est du noeud principal P.
- e face Est du volume de controle.
- N noeud considéré du coté Nord du noeud principal P.
- n face Nord du volume de contrôle considéré.
- P noeud principal considéré du maillage.
- S noeud considéré du coté Sud du noeud O.
- s face Sud du volume de contrôle considéré.
- W noeud considéré du coté Ouest du noeud P.
- w face Ouest du volume de contrôle considéré.

Abréviation

CFD	Computationnal Fluid Dynamics.
DNS	Direct Numerical Simulation en anglais.
LES	Large Eddy Simulation.
RANS	Reynolds Averaged Navier-Stokes.
URANS	Unsteady RANS.
VOF	volume of fluid.

Story

D'après les historiens, le calcul numérique remonte au moins au troisième millénaire avant notre ère. Il est à l'origine favorisé par le besoin d'effectuer des mesures dans déférents domaines de la vie courante, notamment en agriculture, commerce, architecture, géographie et navigation ainsi qu'en astronomie.

Il semble que les Babyloniens (qui peuplaient l'actuelle Syrie/Iraq) sont parmi les premiers à réaliser des calculs algébriques et géométriques alliant complexité et haute précision. Surtout, ils donnent une importance et un sens au placement relatif des chiffes constituant un nombre, c'est-à - dire à introduire la notion de base de dénombrement, en l'occurrence, la base sexagésimale que nous avons fini par adopter dans certains domaines. Ils se distinguent ainsi d'autres civilisations, même bien plus récentes, qui développent des méthodes plus lourdes, en introduisant une pléthore de symboles.

Il y a environ 3500 ans, les populations de la vallée de l'Indus (régions de l'Inde et du Pakistan) introduisent les notions de zéro et emploient les nombres négatifs. Ils adaptent également le système décomptage Babylonien au système décimal qui est le nôtre aujourd'hui.

Ces premiers outils de calcul sont largement développés par la suite par les Grecs, puis transmis en Europe par l'intermédiaire des civilisations musulmanes peuplant le bassin méditerranéen.

Introduction générale

L a construction de ponts à travers une rivière provoque souvent une modification importante de l'hydrodynamique de l'écoulement et de la morphologie du lit. Cette modification devient problématique en périodes de crue et surtout si l'impact de l'implantation du pont sur l'hydraulique de l'oued n'a pas suffisamment été étudié. En effet, dans de telles situations, l'écoulement est chargé de débris et de particules solides de différentes tailles, et en raison d'interactions complexes écoulement-parois-solides, le fond de l'oued évolue engendrant une diminution de la section de passage.

La variabilité de la géométrie de la section transversale de la rivière pourrait amplifier significativement ce processus. Cela conduit à d'énormes inondations des zones se trouvant aux bords de la rivière à l'amont du pont.

Dans le cadre de ce mémoire de fin d'études, nous testons les capacités du modèle de turbulence $k - \xi$ à un modèle diphasique de type VOF à reproduire les résultats d'une expérience de l'écoulement à surface libre en présence d'une pile réalisée en laboratoire (référence). Cette expérience consiste en un écoulement à surface libre étudié en régimes fluvial et torrentiel dans un canal rectangulaire contenant un obstacle vertical de forme cylindrique pour reproduire l'impact d'une pile de pont sur l'écoulement à l'échelle du laboratoire. Les simulations numériques ont été réalisées à l'aide du logiciel ANSYS Fluent.

Le manuscrit est composé de quatre chapitres :

Dans le premier chapitre, nous avons commencé par des généralités sur les écoulements à surface libre. Ensuite nous avons présenté une synthèse sur les formules et les relations utilisées

lors de l'étude d'un écoulement de rivière en présence de ponts. Le chapitre se termine par une synthèse bibliographique de quelques travaux de recherche en relation avec notre thème.

Le deuxième chapitre est consacré à la modélisation de l'écoulement étudié. Il contient un rappel des équations de Navier-Stokes régissant les écoulements turbulents incompressible. La turbulence est prise en compte suivant l'approche statistique et les contraintes turbulentes sont calculées selon le concept de Boussinesq. Le traitement de l'écoulement au voisinage de la paroi a été aussi abordé.

Dans le chapitre trois, nous présentons la procédure classique utilisée pour la résolution des équations de Navier-Stokes combinées avec le modèle VOF. Nous avons rappelé les différentes étapes : génération du maillage avec le logiciel Gambit (Géométrie, maillage et conditions aux limites); discrétisation des équations; algorithmes de couplage pression-vitesse, résolution des équations; convergence de la solution.

Dans le dernier chapitre, nous présentons et discutons les résultats issus des simulations. Nous nous sommes intéressés à deux régimes d'écoulement : le premier est fluvial à l'amont et à l'aval de la pile; le deuxième est torrentiel à l'amant et à l'aval de la pile. Les résultats obtenus sont relativement en accord avec les résultats expérimentaux même si des simulations supplémentaires sont nécessaires pour aboutir à une étude complète. Nous proposons une étude de sensibilité au maillage ; raffinage du maillage au voisinage de l'interface ; test d'autres modèles de turbulence ; prolongement de la partie aval du canal pour éviter l'influence de la condition limite à la sortie sur la résolution de l'écoulement.

Généralité sur les écoulement en présence des piles de pont

Introduction

Dans le présent chapitre, on divise le travail en deux parties. Dans la première partie, on essaye de donner une vue générale sur les écoulements a surface libre, les caractéristiques et les différents types de canaux. Dans la deuxième partie, on donne une étude de l'écoulement à travers les ponts, et ses phénomènes, ainsi que quelques travaux effectués sur notre problème.

1.1 Généralités sur les écoulements

L'étude des écoulements naturels entre dans le cadre de l'hydraulique à surface libre. Ce qui différencie cette dernière de l'hydraulique en charge est la présence d'une surface libre, c'est-àdire une surface qui est en contact direct avec l'atmosphère. Ainsi le moteur de l'écoulement n'est pas le gradient de pression comme c'est le cas pour les écoulements à charge, mais tout simplement la gravité. On parle dans ce cas des écoulements gravitaires.

Une caractéristique commune à ces écoulements est le fait que la profondeur d'eau est petite par rapport à la longueur d'écoulement (Longueur de la rivière ou de la conduite par exemple). La gamme des écoulements à surface libre et leurs applications comprend les rivières.

les cours d'eau et les fleuves. Toutefois, elle englobe aussi les écoulements dans les conduites non pleines, comme c'est le cas dans les systèmes d'irrigation ou d'assainissement.

La modélisation de ce type d'écoulement nécessite un découpage du domaine de calcul en deux sous domaines non miscible séparés par une interface bien définie qui présente la surface libre.

1.2 Types des écoulements à surface libre

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

1.2.1 Classification selon le temps

1.2.1.1 L'écoulement permanent (stationnaire)

Le mouvement est permanent (ou stationnaire) si les vitesses U et la profondeur h restent invariables dans le temps en grandeur et en direction.

1.2.1.2 L'écoulement non permanent (non stationnaire)

Le mouvement est dit non permanent quand les conditions en un point quelconque du varient avec le temps.



FIGURE 1.1 – (Écoulement permanent et Écoulement non-permanent).

Au sens strict, 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 définir ainsi le régime quasi-permanent.

1.2.2 Classification selon l'espace

1.2.2.1 L'écoulement uniforme

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.

1.2.2.2 L'écoulement non uniforme

Le mouvement 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 nonuniforme peut être accéléré ou décéléré suivant que la vitesse croît ou décroît dans le sens du mouvement.



FIGURE 1.2 – Schéma des différents régimes d'écoulement a surface libre.

1.3 Les régimes d'écoulement

Il y a deux types d'écoulement, permanent pour des fluides réels et on doit envisager chacun d'eux. On les appelle écoulement laminaire et écoulement turbulent.

1.3.1 l'écoulement laminaire

Dans l'écoulement laminaire, les particules du fluide se déplacent en libres droites parallèles disposées en couches, ou lamelles.

Les grandeurs des vitesses de lamelles adjacentes ne sont pas les mêmes. L'écoulement laminaire obéit la loi reliant la contrainte tangentielle visqueuse au taux de déformation angulaire.

1.3.2 l'écoulement turbulent

Dans l'écoulement turbulent, les particules de fluide se déplacent dans toutes les directions au hasard. Il est impossible de décrire le mouvement d'une particule.

1.4 Les Canaux

1.4.1 Définition d'un canal

C'est un système de transport dans lequel l'eau s'écoule et dont la surface libre est soumise à la pression atmosphérique.

1.4.2 Les différents types des Canaux

On distingue deux catégories de canaux :

- \checkmark Les canaux naturels;
- \checkmark Les canaux artificiels.

1.4.2.1 Canaux naturels

Ce sont les cours d'eau qui existent naturellement sur (ou sous) terre; tels que les ruisselets, torrents, rivières, fleuves et estuaires, voir (figure 1.3).

Il existe plusieurs classifications des cours d'eau donnée par Bernard (1975) :

- ✓ Sont qualifié de rivière les cours d'eau de pente inférieure à 1%;
- \checkmark Les rivières sont torrentielles lorsque leur pente est comprise entre 1% et 6%;
- \checkmark Au-delà de 6%, les cours d'eau sont appelés torrents.



FIGURE 1.3 – Canal naturel.

Le lit mineur : c'est l'espace occupée par l'écoulement pour les crues courantes Le lit majeur : c'est la pleine inondable occupé par les crues exceptionnelles . La rive : c'est le milieu géographique qui sépare les milieux aquatique et terrestre. Berge : c'est le talus incliné qui séparant le lit mineur et le reste du lit majeur.

1.4.3 Régimes d'écoulement dans un canal à surface libre

Une première classification est basée sur la comparaison de la valeur relative des forces agissant sur ces écoulements (la gravité, l'inertie et la viscosité). Le résultat de l'équilibre de ces forces est traduit par des nombres a dimensionnels : Reynolds et Froude. Le nombre de Reynolds traduit l'importance des forces d'inertie par rapport à la force de viscosité, il est défini par le rapport suivant :

$$R_e = \frac{Force \ d'inertie}{forcede \ viscosit\acute{e}} = \frac{VR}{v}$$

V : est une vitesse caractéristique.

R : est le rayon hydraulique.

v : est la viscosité cinématique.

Les expériences avec différents canaux à surface libre montrent que l'écoulement est turbulent dès que le nombre de Reynolds atteint des valeurs de 2000.

- ✓ Si Re < 2000 L'écoulement est laminaire;
- ✓ Si Re > 2000 L'écoulement est turbulent (Carlier, 1972).

Le nombre de Froude n'est pas utilisé pour les écoulements en charge car la force de gravité n'influence pas ce type d'écoulement.

$$F_r = \frac{Force \ d'inertie}{Force \ de \ gravit\acute{e}} = \frac{U}{sqrt(\sqrt{gD_h})}$$

g : accélération de la gravité.

 D_h : est la profondeur hydraulique.

Le classement des régimes se fait par le nombre de Froude comme suit :

- ✓ Si Fr = 1 L'écoulement est en régime Critique;
- ✓ Si Fr > 1 L'écoulement est en régime Torrentiel (Super critique). Les forces d'inertie sont prépondérantes, est ceci se traduit par une importante vitesse d'écoulement ;
- ✓ Si Fr < 1 L'écoulement est en régime Fluvial (Sub critique). Dans ce cas, l'effet de la gravité est plus prononcé, ceci se traduit par une faible vitesse d'écoulement.

1.4.4 Géométrie des canaux



FIGURE 1.4 – Éléments géométriques de la section (d'après Graf, 1993).

Les principales caractéristiques géométriques d'un canal sont :

- ✓ La section transversale (A) :c'est la section plane normale à la direction de l'écoulement ;
- ✓ La section mouillée (A_m) : c'est la portion de la section occupée par le fluide dans la section du canal;
- ✓ Le périmètre mouillé (P_m) : est formé par la longueur de la ligne de contact entre la surface mouillée et les parois de la section (la largeur de la surface libre n'entre pas en compte);
- ✓ La largeur du canal à la surface libre (B) : est la largeur du canal au niveau de la surface libre.
- ✓ La profondeur ou la hauteur d'eau (h);
- ✓ Le rayon hydraulique (R_h) : $R_h = \frac{A_m}{P_m}$;
- ✓ La profondeur hydraulique (D_h) : $D_h = \frac{A_m}{B}$;
- ✓ La hauteur normale h_n qui correspond à la hauteur d'écoulement en régime permanent.

A part la géométrie de la section, on prend en considération aussi les pentes longitudinales du canal, donc :

- ✓ α : L'(inclinaison de la paroi du fond;
- ✓ La pente du canal ou du fond (S_0) : $S_0 = \tan \alpha = \sin \alpha$;
- ✓ La pente de la surface libre ou piézométrique (S_f) .
- ✓ La hauteur critique h_c qui est la hauteur d'écoulement pour laquelle le nombre de Froude vaut 1.

1.5 Dépôt solide dans les rivières

L'écoulement dans une rivière naturelle n'est jamais uniforme, soit parce que les paramètres géométriques changent (pente, largeur ...), soit parce qu'il y a des singularités (méandres, seuil, pont). Donc il y a des zones à faible vitesse et des zones à forte vitesse.

Dans les zones à faible vitesse, la capacité de transport diminue et les particules les plus lourdes se déposent par l'effet de gravité. Les sédiments qui se déposent par ce processus sont appelés des alluvions. Une partie de la charge en suspension peut sédimenter dans le chenal, la majeure partie sédimente à l'embouchure de cours d'eau avec le lac, la mer ou l'océan.

1.6 Généralités sur les ponts

Les ouvrages routiers comprennent tous des passages d'eau « inférieurs » aux voies de circulation; à savoir les Buses et Dalots (Ponceaux) et les Ponts.Ces ouvrages constituent des points de singularité le long des cours d'eau naturels, se traduisant en général par des rétrécissements des sections offertes à l'écoulement, et par suite d'un effet de remous (Figure 1.5) Ces effets dépendent principalement de la géométrie des frontières, du débit et de la nature de l'écoulement. Le régime d'écoulement à travers un rétrécissement telle qu'une pile de pont peut être fluvial (subcritique) ou torrentiel (supercritique) :

- ✓ Lorsque l'écoulement est fluvial, le rétrécissement entraîne la formation d'un remous (backwater) prononcé qui s'étend en amont (Figures 1.5)
- ✓ Si l'écoulement est torrentiel et si le niveau d'eau en amont du rétrécissement est moins élevé que la ligne de profondeur critique (DCL), le rétrécissement a pour effet de perturber

uniquement le profil de la surface l'eau en face de la section contractée et ne s'étend pas en amont (Figure I.6). Dans le cas contraire, la surface d'eau forme un profil S1 qui s'étend en amont sur un faible distance et se termine par un ressaut hydraulique (Figure 1.5).



FIGURE 1.5 – Effets d'un rétrécissement sur les écoulements uniformes :(a,b) régime fluvial ; (c, d) : régime torrentiel (d'après Chow, 1959).

1.7 Définition et composition des ponts

Le terme « Pont » désigne en général tout ouvrage permettant le franchissement en élévation d'un obstacle naturel (cours d'eau, vallée, etc.) ou artificiel (routes, chemin de fer, etc.). Lorsque l'obstacle à franchir est une dépression profonde de terrain qui sert ou non à l'écoulement des eaux, on parle de viaduc. Un pont se compose principalement de deux parties : l'infrastructure et la superstructure.

1.7.1 Principaux éléments constitutifs d'un pont

Les ponts comprennent essentiellement des éléments porteurs constitués par les poutres principales, les arcs, les câbles (éléments porteurs principaux).

Le tablier : est la partie quasi horizontale située sous la voie portée : il comprend les éléments porteurs dans le cas des ponts à poutre ou est supportée par eux dans le cas des ponts en arc ou des ponts à câbles.

Les appuis : ce sont les culées (appuis de rive), les piles (appuis intermédiaires) et les pylones des ponts à câbles.

Les fondations : qui peuvent être superficielles ou profondes.

1.7.2 Dimensionnement hydraulique des ponts

Les piles et les Culées des ponts qui sont en contact direct avec l'écoulement doivent avoir des profils de formes hydrodynamiques pour présenter le moins de résistance à l'écoulement de l'eau et par suite une sollicitation minimale des structures. D'autre part, ils doivent présenter une restriction minimale de la section naturelle de l'écoulement pour réduire les effets des remous, la submersion des ouvrages et l'érosion du lit de l'oued à l'aval (menaçant dans les deux cas et la vie de l'ouvrage et de ses usagers).

1.8 Évaluation du remous

Le passage du débit de crue provoque un étranglement de la section d'écoulement, ce qui entraîne une surélévation du niveau d'eau à l'amont du pont. La présence des piles participe aussi à la surélévation du niveau d'eau. C'est cette surélévation du niveau d'eau qu'on appelle le remous.

1.8.1 Phénomène du Remous

On suppose que le phénomène du remous est dans le cas du lit simple. Soit un lit rectangulaire où l'écoulement est uniforme avant l'implantation d'un pont. Suite à l'existence d'une obstruction (pont), l'écoulement devient perturbé et on constate un exhaussement légèrement à l'amont de l'ouvrage .Sur la figure (1.6), vue en dessus, on représente l'écoulement perturbé. Dans la partie centrale de l'écoulement, la direction des lignes de courant est peu altérée, alors qu'à proximité des rives, elles se décollent des bords au point "a" appelé points de séparation, pour converger vers la contraction, laissant des zones "I a " dites de "zones de séparation" qui sont le siège de grandes turbulences. Après la section 2, où elles pénètrent dans la contraction, elles continuent à converger légèrement en se décollant de la culée, jusqu'à la section 3, à partir de la quelle elles divergent pour occuper de nouveau, à la section 4, toute la largeur de la rivière. De nouvelles zones de séparation "*II*" a" sont ainsi crées.

Sur la même figure (1.6), coupe longitudinale, on voit que la perturbation apportée par la contraction commence en amont en une section 0, à partir de laquelle l'eau monte (par rapport à la hauteur normale) jusqu'à un maximum (qui mesure l'importance du remous). Ce maximum est atteint à la section 1, légèrement en amont de la contraction, au niveau du point de séparation "a". La surface libre de l'écoulement commence alors à redescendre pour atteindre son point le plus bas à la section 3.Elle remonte de nouveau jusqu'à retrouver la hauteur normale. C'est dans la section 3 que les vitesses passent par un maximum.

Le projeteur est appelé à connaître une caractéristique très importante dans cette étude : l'exhaussement maximum de la ligne légèrement à l'amont d'un ouvrage, donnée par l'expression suivante :

 $h_1^* = h_1 - h_0$



FIGURE 1.6 – Remous dû à l'obstruction : Profil en long et vue du dessus.

1.8.2 Valeur de l'exhaussement maximal

La méthode la plus facilement utilisable est celle du Bureau of Public Roads des USA , élaboré d'après des essais sur modèles Soient :

h1: Le tirant d'eau maximum juste en amont du pont.

ho : Le tirant d'eau dans la section considérée avec rétrécissement (au niveau du pont) = PHE

$$h_1^* = h_1 - h_0$$

 h_1^\ast : Le remous maximum dû au rétrécissement.

b:La largeur entre Culées.

B: La largeur du cours d'eau. (entre les berges)

$$M = \frac{b}{B}$$

Ou:

M : Le rapport de contraction (dans le cas de section rectangulaire)

$$V_a = \frac{Q_{max}}{bh_0}$$

Ou : V_a : La vitesse moyenne au niveau du pont. Le remous h_1 est donné par :

$$h_1^* = k^* \frac{V_a^2}{2g}$$

Ou:

g : pesanteur (9, $81m/s^2$) K^* : Coefficient qui est calculée à partir des abaques présentés ci-après selon la décomposition suivante.

$$K^* = k_b + k_p + k_e$$

 k_b : est le coefficient de base, terme principal de calcul. Il est donné par les figures 7 et 8 en fonction du coefficient d'obstruction M pour les divers types de culées en vue de dessus. Ce coefficient est le plus important dans l'évaluation du remous.



FIGURE 1.7 – Coefficient de base K_b en fonction du rapport de contraction M(=b/B), pour les culées de types 1,2 et 3.



FIGURE 1.8 – Coefficient de base K_b en fonction du rapport de contraction M(=b/B) pour la culée type 4.

 K_p : terme correcteur rendant compte de l'effet d'obstruction des piles, fonction de J coefficient d'obstruction des piles (définie sur la figure 8), du type de pile et de M. K p peut être considéré comme indépendant du diamètre, de la largeur, de l'espacement des piles et du nombre de piles mises dans l'alignement les unes des autres à condition qu'il soit au plus égal à cinq. K o =f(J) est donné par la figure 9 et =f(M) est donnée par la figure 1.

$$K_p = K_o * \sigma$$



FIGURE 1.9 – définition du coefficient d'obstruction J.



FIGURE 1.10 – coefficient K_0 en fonction du coefficient d'obstruction J suivant le type des piles.


FIGURE 1.11 – Coefficient σ en fonction du rapport de contraction M.

Ce coefficient (K_p) devient important lorsque les piles sont assez massives tel que pour les piles en maçonnerie (E augmente, J augmente et Ko et K_p sont plus grandes).

 K_e Coefficient correcteur dû à l'excentricité défini sur la figure 11 en fonction de M et du coefficient d'excentricité e défini par (voir figure 1.13).

$$e = (1 - \frac{q_c}{q_a})$$
 lorsque $q_c > q_a$
ou
 $e = (1 - \frac{q_c}{q_a})$ lorsque $q_a > q_c$



FIGURE 1.12 – l'exécution des culées.



FIGURE 1.13 – Coefficient correcteur due à l'excentricité en fonction du rapport de contraction

1.9 Ressauts Hydrauliques

Le ressaut hydraulique, plus brièvement appelé ressaut se produit si un écoulement passe (brusquement) du régime torrentiel (amont ou super critique), Fr1 > 1, au régime fluvial (aval ou subcritique), Fr2 < 1. Ce changement de régime conduit à une brusque surélévation du niveau d'eau, (h2 - h1), sur une très courte distance et provoque une dissipation importante de l'énergie mécanique (Figure 1.14), Les profondeurs h2 et h1, sont appelées profondeurs conjuguées; elles encadrent un ressaut qui a une h hauteur donnée par la différence des profondeurs conjuguées, h2 - h1).



FIGURE 1.14 – Schéma d'un ressaut hydraulique (Graf, 1993).



FIGURE 1.15 – Position d'un ressaut hydraulique (Graf, 1993).

1.10 Problème des Affouillements

Par la réduction de la section mouillée du cours d'eau, les ponts conduisent à une augmentation des vitesses et l'apparition de sillage et de vortex qui entraînent l'affouillement du fond du lit. Celui-ci peut atteindre la profondeur des fondations des piles et des culées, pouvant ainsi compromettre la stabilité de l'ouvrage.

L'affouillement est le résultat de l'érosion du lit d'un oued ou de ces berges. Pendant la période d'élévation d'eau durant une inondation, la vitesse de l'eau s'augmente résultant à une augmentation dans les contraintes de cisaillement sur les matériaux au fond du lit. Lorsque les contraintes de cisaillement deviennent suffisamment élevées, les matériaux sont soulevés du fond du lit et transportés plus loin avec le flux. L'entraînement des matériaux peut s'effectuer de trois manières différentes selon leur grosseur (Van Tuu, 1981) :

- ✓ Les éléments les plus fins sont mis en suspension et y sont maintenus par le mouvement tourbillonnaire de l'eau;
- \checkmark Les éléments moyens progressent par saut ;
- \checkmark Les éléments les plus gros roulent sur le fond.

Cette migration des matériaux augmente la surface de la section mouillée et, pour satisfaire la continuité du flux, la vitesse du flux à travers la surface affouillée diminue. Quand la vitesse diminue, la contrainte de cisaillement diminue aussi.Éventuellement, un équilibre est atteint et il n'y a plus de migration des matériaux du lit de l'oued. Pendant la période de la fin de l'inondation, la vitesse du flux diminue, permettant aux sédiments en suspension de se déposer. La nature du processus de l'affouillement est donc critique, les fosses apparue durant les inondations et puis sont suivies d'un rebouchage pendant la période de la fin d'inondation. Tous les types des sols sont affouillables : les sables lâches et les argiles peuvent atteindre leur profondeur maximale d'affouillement dans une affaire d'heures ou de jours, alors que les matériaux plus cohésifs peuvent nécessiter des années. Les roches et les matériaux cimentés atteignent leur profondeur maximale d'affouillement dans des décennies.



FIGURE 1.16 – Les Trois Types d'affouillement au Droit d'un Ouvrage (Van Tuu, 1981).

- Profondeur normale d'affouillement, HN.
- Profondeur due à la réduction de la section, H_a .
- Profondeur d'affouillement local, H_l .

L'affouillement total, qui se produit dans un oued, peut être décomposé en trois types (Hass et al., 1999 et par Van Tuu, 1981) : Affouillement général, affouillement de contraction et affouillement local (Figure 1.16).

1.10.1 Affouillement général ou affouillement normal

C'est un processus de long terme où les matériaux du lit de l'oued sont transportés dans, ou loin de, la débouchée de l'oued. Il se produit dans un lit uniforme et résulte d'une modification du débit.

1.10.2 Affouillement de contraction (due essentiellement à la présence du remblais d'accès)

Il y a eu lieu aux étranglements dans la section d'un oued. La réduction de l'aire de la section dans un étranglement a pour effet une augmentation dans la vitesse de l'écoulement, et donc augmentation des contraintes de cisaillement dans le lit de l'oued. Les moyens d'approches des ponts, les piles et les culées dans le chemin du flux d'eau réduisent l'aire de la section de l'oued et peuvent causer par ailleurs l'affouillement de contraction. Ce phénomène peut avoir pour conséquence de creuser à l'aval d'un pont et mettre en péril l'ouvrage.

1.10.3 Affouillement local (due à la présence des piles)

C'est le résultat des vortex (tourbillons) formés autour des piles et culées, en forme de fer à cheval, sous les conditions d'inondation. L'augmentation dans les vitesses du flux dans les vortex a pour conséquence le développement des fosses d'affouillement, qui peuvent être rebouchés pendant l'étape de chute des inondations alors que la vitesse du flux diminue et les sédiments sont capables de tasser. Les fosses d'affouillement local peuvent poser le danger le plus grave pour un pont à cause de leur proximité des piles.



FIGURE 1.17 – Vortex d'eau suite à un affouillement local autour d'une pile (Calgaro et Virlogeux, 1991).

Synthèse bibliographique

L'écoulement autour des piles de ponts est un sujet qui a suscité l'intérêt des ingénieurs en hydrauliques et concepteurs des ponts. Nombreuses études on été effectuées dés les années 1950 Pour comprendre la structure de l'écoulement autour des piles de pont, dans le but de prédire l'affouillement qui cause l'échec des ponts, les inondations, et fournir un guide des constructions futures (Shrestha, 2015).

Afin de donner un aperçu sur les travaux effectués dans le passé, on présente une brève recherche bibliographique.

Chrisohoides et al, 2003 : Ont fait des calcule numérique et des expressions de laboratoire pour examiner les structures tridimensionnelles des tourbillons de grande échelle provoqués par des piles de pont dans une rivière à fond plat. La méthode numérique à volume fini est développée pour résoudre les équations RANS (Reynolds Averaged Navier-Stokes), avec le modèle k- ξ pour la modélisation de la turbulence.

Liang et Sotiropoulos, 2005 : Ont fait une modélisation numérique des écoulements hydrauliques complexes. Comme cas d'exemple, ils ont utilisés le cas des piles de pont pour tester la performance du code CFD (computationnal fluid dynamics) pour reproduire l'écoulement dans sa complexité. Les équations de fermeture d'URANS (Unsteady RANS), et de turbulence sont discrétisées à l'aide d'une approche des volumes finis du deuxième ordre. Les équations discrétisées sont intégrées dans le temps. Dans cette étude, il était démontré que la simulation peut capter l'apparition d'un déversement de Vortex cohérents à proximité de la Fondation, tout en tenant compte des caractéristiques topographiques à grande échelle de la portée de la rivière environnante.

Galip Seckin et Serter Atabay 2005 : Une série de cinq expériences a été effectuée dans un canal combiné à deux hauteurs comprenant diverses conditions de rugosité et différents modèles de ponts, dont : un modèle de pont en arc à une seule ouverture semi-circulaire (ASOSC), un modèle de pont en arc à plusieurs ouvertures semi-circulaires (AMOSC), un modèle de pont en arc à une seule ouverture elliptique (ASOE), des modèles à tablier droit avec ou sans jetées (DECK) comprenant diver-ses largeurs de travées. Les rendements de six différentes méthodes de calculer le remous autour des piliers de ponts ont été comparés en utilisant des données expérimentales choisies avec soin sur de nombreuses combinaisons de cas.Les résultats de la méthode de l'énergie (energy), la méthode du moment (momentum), la méthode WSPRO, la

mé-thode de Yarnell, la méthode du USBPR et la méthode de pont en arc (arch bridge) ont été comparés aux résultats ex- périmentaux.

Les résultats indiquent que la méthode de l'énergie (energy) simulait plus précisément les valeurs de remous mesurées que les autres méthodes. Les différences dans les remous entre les valeurs expérimentales et les va-leurs calculées par la méthode de l'énergie (energy) étaient généralement entre -3,2 % et 0,8 %pour ce qui est de la profondeur d'écoulement. Une fonction généralisée simple pour l'estimation des remous en amont d'un pont est égale-ment proposée. **Kingston, 2006 :** A fait une étude numérique sur les effets de remous causé par un pont traversant une rivière (Le fleuve Beaver) pour prédire les inondations. La simulation a été réalisée par le logiciel HEC-RAS, qui permet de montrer les effets du remous sur les débits d'inondation. Le changement de la taille des piles dans la simulation a démontré que l'effet du remous augmente avec la taille des piles. Elle a également examiné les travaux expérimentaux des professeurs de l'Université Polytechnique de Catalogne, et a confirmé que les effets de remous dépendent du degré d'obstruction du canal, ainsi que des effets d'érosion locale .

El-Alfy, 2009 : A fait une étude expérimentale sur le remous d'exhaussement causé par la présence des piles de pont en utilisant l'équation de conservation de l'énergie, l'équation de continuité, et les formules empiriques développées par Soliman et al(). Cette recherche était concentrée sur l'étude expérimentale de l'écoulement dans la zone entre les piles, et l'élévation du niveau d'eau à la partie amont, elle a permis de mettre en évidence que l'écoulement à la partie aval des piles de pont, la forme des piles ainsi que le ratio entre leur langueur et largeur ont un effet sur le remous d'exhaussement en amont, et a permis de calculer cet exhaussement. Esmaeil et al, 2009 : Afin de simuler l'écoulement et l'affouillement local autour d'un pont à quatre piles dans une grande rivière naturelle. Ils ont utilisé le programme SSIIM, qui est un code de calcul numérique qui permet de résoudre le flux tridimensionnel, et de simuler la sédimentation en résolvant les équations de Navier-Stokes, et en se basant sur la méthode des volumes finis pour la discrétisation de ces équations. Ils ont utilisé le modèle k-oméga pour la fermeture du système, et l'algorithme SIMPLE (Semi-Implicit Method for Pressure Linked Equations) pour le couplage pression-vitesse. Leur étude a montré que le programme SSIIM peut être utilisé efficacement pour faire cette simulation et que le modèle k-oméga donne des résultats raisonnables.

SZYD-OWSKI, 2011 : ont fait une étude numérique et expérimentale pour voir l'influence de la pile sur l'écoulement .pour cela, on a fait une simulation numérique par une structures bidimensionnel d'écoulement d'eau autour des piles utilisant la méthode des volumes finis pour

résoudre les équations de (Saint-Venaut); pour l'étude expérimental ,elle est faite dans le laboratoire hydraulique de la Faculté de génie civil et environnemental de Gdansk Université de technologie (GUT), Pour les même 02 cas dans la simulation, et on prend les mesures résultants , enfin on compare les résultants obtenue dans la simulation et l'étude expérimentale.

Usman et al, 2013 : Ont fait un travail de simulation numérique tridimensionnelle avec le code de calcul ANSYS-Fluent, pour objectif de connaitre les propriétés de l'écoulement autour des piles de pont qui subissent l'affouillement, tel que la vitesse et la direction de l'écoulement, ainsi que les contraintes auxquelles sont exposées les piles et pour différents débits. Leur étude peut être utilisée pour avoir une meilleure compréhension de l'écoulement autour des piles, ainsi que pour améliorer les formules de prédiction de l'affouillement autour des piles de pont. Le modèle était validé en l'essayant pour des écoulements auxquels la littérature a fourni les résultats exacts. Ils ont observé que l'écoulement est plus turbulent en aval des piles qu'en amont, et que la présence des piles ne change pas considérablement les valeurs de la vitesse moyenne à la partie aval.

Yovanni et al, 2016 : ont effectué une simulation numérique de deux objets partiellement enterrés dans un lit de rivière ondulée en utilisant un modèle hydrodynamique tridimensionnel, non hydrostatique avec des nombres de Reynolds d'écoulement de 86 061 et 76209, Respectivement. Pour valider les mesures expérimentales de la vitesse, les équations de Navier- Stokes en moyenne de Reynolds (RANS) ont été utilisées avec un modèle de fermeture de la turbulence k-epsilon. Ensuite ils ont effectué une simulation à grande échelle LES (Large Edy Simulation) afin de caractériser la structure de l'écoulement autour des deux objets. Le modèle kepsilon a été capable de reproduire les flux moyens caractéristiques et les intensités turbulentes moyennes observées dans Les expériences, la simulation LES a permis d'identifier les Structures de turbulence instantanées responsables du phénomène d'affouillement non révélées par les mesures.

1.11 Conclusion

Dans ce chapitre, on a donné quelques notions de base sur les principales caractéristiques géométriques des canaux ainsi que les caractéristiques et la classification des écoulements à surface libre au niveau du passage par les piles des ponts, et aussi on a ramené quelques méthodes empiriques qui étaient développées pour l'estimation de la hauteur du remous. Enfin, nous avons fait une recherche bibliographique sur le phénomène.



Modélisation mathématique

Introduction

D'Ans le présent chapitre, nous abordons les différentes approches de la simulation des écoulements turbulents, ensuite nous donnons un rappel sur la modélisation de la turbulence par l'approche RANS (Reynolds Average Navier Stokes) en exposant les différents modèles de turbulence.

2.1 Généralités sur la turbulence

Depuis la définition, très simple, d'osborne Reynolds qui décrit le mouvement turbulent comme un "écoulement sinueux", plusieurs descriptions de la turbulence permettent de retracer l'évolution de la compréhension des phénomènes qui a conduit à la connaissance et à la maîtrise que l'on a aujourd'hui des écoulements turbulents.

Taylor et Von Karman en 1937 définissent la turbulence comme "un mouvement irrégulier qui fait son apparence dans les fluides gazeux ou liquides lorsqu'ils s'écoulent sur des surfaces solides ou même lorsqu'ils avoisinent des courants du même fluide s'écoulant le long ou par-dessus l'un l'autre". Cette définition précise que la turbulence peut être générée par les forces de frottement due à l'interaction du fluide avec des parois solides "turbulence de paroi" ou au mélange de

couches de fluides "turbulence libre".

Monin et Yaglom (1971) décrivent les écoulements turbulents comme "des écoulements où la vitesse, la pression, la température et les autres grandeurs mécaniques du fluide fluctuent de manière désordonnée avec des variations spatio-temporelles brusques et irrégulières". Landau et Lifchitz (1971) donnent une définition équivalente : "le mouvement turbulent d'un fluide est, pour des valeurs suffisamment grandes du nombre de Reynolds, caractérisé par l'existence d'une variation extrêmement irrégulière, chaotique de la vitesse au cours du temps en chaque point du fluide. Selon Hinze (1975), le mouvement turbulent du fluide est "une situation irrégulière de l'écoulement dans laquelle les diverses quantités montrent une variation aléatoire dans les coordonnées spatiotemporelles de sorte que des valeurs moyennes statistiquement caractérisées peuvent être discernées". Dans un plus récent ouvrage, Lesieur (1994) caractérise la turbulence, à la fois par les qualificatifs désordonné, aléatoire, chaotique et par deux de ses propriétés essentielles : imprévisibilité et mélange. Dans l'ensemble des définitions, on retrouve la notion d'irrégularité spatio-temporelle et aléatoire de l'écoulement. L'imprévisibilité signifie que le système est sensible aux conditions initiales et la propriété de mélange de la turbulence se manifeste par une forte diffusion des quantités transportées.

2.2 Équation régissant l'écoulement

Les écoulements à surface libre pleinement développées sont régis par les équations de continuité et de quantité de mouvement déduites respectivement des lois de conservation de la masse et de quantité de mouvement. En considérant un fluide incompressible (eau), ces équations, dans un repère cartésien, s'écrivent (Versteeg et Malalasekera,2007).

$$\frac{\partial U_i}{\partial X_i} = 0 \tag{2.1}$$

$$\rho \frac{dU_i}{dt} = \rho \left(\underbrace{\frac{\partial U_i}{\partial t} + U_j \frac{\partial U_i}{\partial X_j}}_{A}\right) = \underbrace{\rho F_i}_{B} - \underbrace{\frac{\partial P}{\partial X_i}}_{C} + \underbrace{\frac{\partial \pi_{ij}}{\partial X_j}}_{D}$$
(2.2)

La signification physique de l'équation (2.2), fait apparaître clairement :

- A : Variation de la quantité de mouvement par unité de volume;
- B : Forces volumiques par unité de volume;
- C : Forces associées à la pression par unité de surface;

D : Contraintes visqueuses par unité de surface.

Avec :(2.2)

 U_i : Composante de la vitesse suivant la direction i;

 F_i : Force de volume par unité de volume due à la gravité;

P: Pression;

 ρ : Masse volumique du fluide;

 π_{ij} : Tenseur de contraintes visqueuses, et i et j des indices (i,j=1,2,3).

Pour les fluides Newtoniens, comme l'eau par exemple, les contraintes de viscosité π_{ij} sont reliées au taux de déformation locale comme suit :

$$\pi_{ij} = 2\mu \ S_{ij} + \lambda \ \delta_{ij} \ div(\vec{V}) \tag{2.3}$$

Avec : V : Vecteur de vitesse d'écoulement ;

 μ : Viscosité dynamique qui relie la contrainte visqueuse à la déformation linéaire;

 λ : Viscosité qui relie la contrainte visqueuse à la déformation volumétrique (div V), elle est prise égale à $-2/3\mu$;

 δ_{ij} : Indice de Kronecker ($\delta_{ij} = 1$ si $i = j, \delta_{ij} = 0$ si $i \neq j$); S_{ij} : Composante de taux de déformation exprimé par :

$$S_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial U_i}{\partial X_j} + \frac{\partial U_j}{\partial X_i} \right)$$
(2.4)

Pour un écoulement incompressible, la déformation volumétrique est nulle, et en tenant compte de la relation (2.3), l'équation de la dynamique devient après quelques arrangements :

$$\rho \frac{dU_i}{dt} = \rho \left(\frac{\partial U_i}{\partial t} + U_j \frac{\partial U_i}{\partial X_j} \right) = \rho F_i - \frac{\partial P}{\partial X_i} + \mu \frac{\partial}{\partial X_j} \left(\frac{\partial U_i}{\partial X_j} \right)$$
(2.5)

Cette équation est appelée « équation de Navier-Stockes » ou « équation de la conservation de la quantité de mouvement » sous forme indicielle.

2.3 Modélisation de la turbulence

La modélisation des écoulements turbulents est un considérable outil pour la compréhension des mécanismes physiques pour la conception et le développement dans la nature. Son utili-

sation courante a été rendue possible par les progrès réalisés dans le domaine de la résolution des équations de la mécanique des fluides et surtout par l'évolution des moyens de calcul. Aujourd'hui la modélisation est un véritable complément aux études expérimentales permettant de limiter le nombre d'essais en soufflerie, entraînant une réduction des coûts et des délais de conception, et constitue ainsi un enjeu économique majeur.

2.4 Caractéristiques des écoulements turbulents

- ✓ la turbulence apparait dans les écoulement dont le nombre de Reynolds est très élevé;
- ✓ les écoulements turbulents sont caractérises parleur irrégularité et varient de manière aléatoire;
- ✓ les écoulements turbulents sont caractérises par une large gamme d ?échelles de longueur, de vitesse et de fréquence;
- \checkmark les écoulements turbulents sont dissipatif;
- \checkmark les écoulements turbulents sont fortement rotationnels;
- ✓ Des structures organisés plus ou mois cohérentes existent dans la plus part des écoulements turbulents .

2.5 Échelles de la turbulence

Les hypothèses de Kolmogorov conduisent à un certain nombre de déductions essentielles sur les caractéristiques statistiques des structures turbulentes. En admettant que le mouvement des petites échelles est uniquement gouverné par la viscosité et par le taux de dissipation, il est possible de définir les échelles :

$$(\eta \approx (v^3/\xi)^{\frac{1}{4}} \qquad \pi \approx (v/\xi)^{\frac{1}{2}} \qquad v \approx (v\xi)^{\frac{1}{4}} \approx (\xi\eta)^{\frac{1}{3}}$$
(2.6)

qui sont appelées micro-échelles de Kolmogorov respectivement de longueur, de temps et de fluctuation de vitesse. La dernière relation, dite loi de Kolmogorov, montre que la variation de vitesse sur la distance η (qui représente la vitesse des mouvements turbulents dont l'échelle est de l'ordre de η) est en raison de la racine cubique de cette distance. On peut remarquer que le nombre de Reynolds bâti sur la base de v et η est de l'ordre de grandeur de l'unité ce qui illustre bien le fait que le mouvement des plus petites échelles est visqueux et que la dissipation s'ajuste au flux d'énergie en ajustant l'échelle de longueur des structures les plus énergétiques. Selon la théorie de Kolmogorov, le taux de dissipation de l'énergie dans les petites structures représente également le taux d'injection d'énergie par les forces extérieures ainsi que le flux d'énergie transféré à travers la cascade.

2.6 Les différentes approches de simulation

L'équation de Navier-Stokes n'a hélas pas de solution analytique connue en régime turbulent. C'est pourquoi les ingénieurs ont besoin de codes de calcul, dans les quels le problème est discrétisé, et résolu numériquement. Classiquement, on distingue trois grandes familles de méthodes pour simuler les écoulements turbulents.

2.6.1 Simulation numérique directe (DNS)

Cette approche consiste tout "simplement" à résoudre directement les équations du mouvement, sans aucun modèle de turbulence. Ainsi, toute la gamme d'échelles est résolue explicitement. Son inconvénient majeur est son coût de calcul. En effet, l'absence de modèle requiert d'avoir des mailles de l'ordre des échelles dissipatives, et de même pour le pas de temps. Or, il découle des travaux de Kolmogorov que, plus le nombre de Reynolds d'un écoulement est élevé, plus les petites échelles sont séparées des grandes, et plus il faut mailler finement le domaine étudié. De plus, un tel niveau de résolution nécessite l'utilisation de schémas numériques d'ordre élevé Par conséquent, la DNS est, à l'heure actuelle, difficilement applicable 'a des situations industrielles Les résultats obtenus constituent de véritables expériences numériques, et servent couramment de "banc d'essai" pour de nouveaux modèles, ainsi qu'à l'analyse de la structure détaillée de la turbulence. Ils ont permis de grandes avancées sur le plan fondamental.

2.6.2 Simulation aux grandes échelles (LES)

La simulation des grandes échelles pourrait se présenter, schématiquement, comme l'intermédiaire entre DNS et RANS. Son principe est le suivant : résoudre explicitement les grandes échelles, et modéliser l'effet des plus petites. Le paramètre de coupure est classiquement la taille de maille ; les tourbillons de tailles plus petites que celle-ci sont modélises, tandis que les plus grands sont calculés explicitement. Cette stratégie se base sur une conséquence des travaux de Kolmogorov : les petites structures ont un comportement plus universel (c'est-'a-dire peu dépendante du type d'écoulement étudie) que les grandes. Par conséquent, la modélisation de leur influence constitue une stratégie plus raisonnable que celle du spectre global d'énergie turbulente.

Cependant, résumer la LES comme l'intermédiaire entre RANS et DNS serait maladroit. En effet, tandis que les méthodes RANS reposent sur une approche moyennée de l'équation de Navier-Stokes, la LES se base sur un filtrage convolutif, ce qui est, conceptuellement, différent d'un opérateur de moyenne. Pourtant, les équations du mouvement RANS et LES sont formellement identiques; seule la modélisation diffère. Le champ de vitesse obtenu en LES n'est pas moyen, mais instationnaire et tridimensionnel, ce qui est très intéressant lorsque l'on souhaite déterminer l'évolution dynamique de l'écoulement.

2.6.3 Modélisation statistique (RANS)

L'héritière des travaux de Reynolds, dont elle porte le nom; Reynolds Averaged Navier-Stokes(RANS), cette approche a toujours été la plus populaire dans l'industrie, en raison de son faible coût de calcul. En effet, elle est l'opposée de la DNS, dans la mesure o'u la turbulence est dépouillée de son caractère déterministe, car considérée comme un processus totalement stochastique, dont seules les statistiques sont supposées prévisibles.

De ce fait, il n'y a pas besoin de recourir 'a des maillages extrêmement fins, ce qui rend abordable le coute du calcul. En contrepartie, il faut résoudre quelques équations supplémentaires ; cela va d'un simple modèle algébrique (longueur de mélange par exemple) 'a toute une famille d'équations de transport pour les contraintes de Reynolds et une variable d'échelle supplémentaire (par exemple $R_{ij} - \xi$). La grande faiblesse de cette famille d'approches, est qu'elle est la plus empirique. En effet, Chaque modèle a son type d'écoulement de prédilection, ou même sa zone à l'intérieur d'un même écoulement, mais aucun ne semble capable de prédire correctement une large gamme de configurations turbulentes. Néanmoins, ces méthodes sont adéquates pour des études ne requérant pas une grande quantité d'informations.

2.6.3.1 Décomposition statique

Pour résoudre ce système une approche statique est utilisée. Les grandeurs caractéristiques instantanées de l'écoulement turbulent seront décomposées selon les règles de Reynolds comme suit : le premier représente le mouvement d'ensemble et le second le mouvement fluctuant, soient :

$$U_i = \bar{U}_i + u'_i, \qquad \bar{u'} = 0$$

(2.7)
 $P = \bar{P} + p', \qquad \bar{p'} = 0$

Avec

 \overline{U}_i : La composante moyenne de la vitesse suivant i;

 u'_i : La composante fluctuante de la vitesse suivant i;

 \bar{P}_i : La composante moyenne de la pression;

 p'_i : La composante fluctuante de la pression.

En général : la quantité f(x, t) est décomposée en deux parties distinctes

$$f = \bar{f} + f'$$

 \bar{f} est la partie moyenne (d'ensemble).

f' est la partie fluctuante.

Remarque : la partie fluctuante est centrée $\bar{f}' = 0$

a.Règles de Reynolds

En utilisant les règles dites « règles de Reynolds Hinze (1975) qui sont les suivants :

 $\bar{\phi}' = 0.$ $\bar{\phi} = \bar{\phi}.$

$$\overline{f\phi} = \overline{f}.\overline{\phi}$$

$$\overline{f+g} = \overline{f} + \overline{g}$$

$$\overline{f\phi'} = \overline{f}.\overline{\phi'} = 0$$

$$\overline{f\phi} = \overline{f}.\overline{\phi} + \overline{f'}.\overline{\phi'}$$

$$\frac{\overline{\partial\phi}}{\partial x} = \frac{\overline{\partial\phi}}{\partial x}$$

$$(2.8)$$

b.Les tensions de Reynolds :

Le formalisme des règles de Reynolds conduit en prenant la moyenne de chaque équation aux équations de Reynolds.

$$\frac{\partial}{\partial t}(U_i + u') + (U_j + u'_j)\frac{\partial}{\partial x_j}(U_i + u'_i) = -\frac{1}{\rho}\frac{\partial}{\partial x_i}(P + p') + \frac{\partial}{\partial x_j}(v\frac{\partial}{\partial x_i}(U_i + u'_i))$$
(2.9)

On moyenne ensuite ces équations et après calcul, on retrouve l'équation de continuité et celle de chaque celle de Navier-Stokes moyenné.

• Équation de continuité :(conservation de la masse)

$$\backslash \frac{\partial \bar{U}_i}{\partial x_i} = 0 \tag{2.10}$$

• Équation de transport de quantité de mouvement :

$$\underbrace{\bar{U}_{j}\frac{\partial}{\partial x_{j}}(\rho\bar{U}_{i})}_{\text{Terme convectif}} = -\frac{1}{\rho}\underbrace{\frac{\partial p}{\partial x_{i}}}_{\text{Effet de la pression}} + \underbrace{v\frac{\partial^{2}\bar{U}_{i}}{\partial x_{j}^{2}}}_{\text{Contrainte visqueuse}} + \frac{\partial}{\partial x_{j}}\underbrace{\left(-vu_{i}'u_{j}'\right)}_{\text{Contrainte de reynolds}}$$
(2.11)

Les équations de Reynolds moyennées obtenues font apparaître un nombre d'inconnues Supplémentaire($u_i^{\rightarrow} u_j^{\rightarrow}$) d'où la nécessité d'un modèle de turbulence afin de fermer le système d'équation à résoudre.

c.L'équation de continuité moyennée

Soit un écoulement incompressible et stationnaire, on aura

$$\left(\frac{\partial \bar{u_i}}{\partial x_i}\right) + \left(\frac{\partial u_i'}{\partial x_i}\right) = 0 \tag{2.12}$$

En prenant la moyenne de cette expression, on trouve :

$$\left(\frac{\partial \bar{u_i}}{\partial x_i}\right) + \left(\frac{\partial \bar{u'_i}}{\partial x_i}\right) = 0 \tag{2.13}$$

Comme les moyennes des fluctuations sont nulle, il reste :

$$\left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_i}\right) = 0 \tag{2.14}$$

C'est l'équation de continuité pour le champ moyen.

En retranchant cette expression de règles de Reynolds on obtient :

$$\left(\frac{\partial \bar{u'}_i}{\partial x_i}\right) = 0 \tag{2.15}$$

Qui constitue l'équation de continuité pour les fluctuations

2.6.3.2 Hypothèses simplificatrices

Les hypothèses simplificatrices adoptées dans notre étude sont :

- ✓ L'écoulement est permanent ;
- \checkmark L'écoulement est newtonien et incompressible;
- ✓ L'écoulement est bidimensionnel;
- ✓ Le fluide est visqueux;
- \checkmark Absence de transfert de chaleur ;
- \checkmark La force gravitationnelle et les forces externes sont négligées.

Après l'introduction des hypothèses données ci-dessus, on peut établir les différentes équations nécessaires à la résolution du problème considéré dans cette étude comme suit :

• L'équation de continuité moyennée

$$\frac{\partial \bar{u}}{\partial x} + \frac{\partial \bar{v}}{\partial y} = 0$$

$$\frac{\partial \bar{u'}}{\partial x} + \frac{\partial \bar{v'}}{\partial y} = 0$$
(2.16)

• L'équation de Navier-Stokes moyennée suivant la direction x et y respectivement

$$\bar{u}\frac{\partial\bar{u}}{\partial x} + \bar{v}\frac{\partial\bar{u}}{\partial y} = -\frac{1}{\rho}\frac{\partial p}{\partial x} + v\left(\frac{\partial^2\bar{u}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2\bar{u}}{\partial y^2}\right) - \left(\frac{\partial\overline{u'u'}}{\partial x} + \frac{\partial\overline{u'v'}}{\partial y}\right)$$
(2.17)

$$\bar{u}\frac{\partial\bar{u}}{\partial x} + \bar{v}\frac{\partial\bar{v}}{\partial y} = -\frac{1}{\rho}\frac{\partial p}{\partial x} + v\left(\frac{\partial^2\bar{v}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2\bar{v}}{\partial y^2}\right) - \left(\frac{\partial\overline{v'u'}}{\partial x} + \frac{\partial\overline{v'v'}}{\partial y}\right)$$

Où : \bar{u} et \bar{v} sont les composantes moyennes de la vitesse suivant x, et y respectivement. Les équations de Reynolds constituent un système dit ouvert, en raison d'apparition d'un nombre d'inconnues supplémentaires, d'où la nécessité d'un modèle de turbulence afin de fermer le système d'équations à résoudre.

2.7 Modèles de fermeture du système

Il existe une grande variété de modèles de turbulence. On distingue en général les différentes méthodes de fermeture en fonction de leur complexité relative. Les modèles les plus simples utilisent des relations purement algébriques pour spécifier les contraintes turbulentes. Ces modèles s'appuient sur le concept de viscosité turbulente.

2.7.1 Concept de la viscosité turbulente

Le modèle de la viscosité turbulente a été énoncé en premier lieu par Boussinesq en (1877), Son idée est basée sur l'observation tendant 'a montrer que le transfert de quantité de mouvement dans un écoulement turbulent est fortement dominé par le mélange des grosses structures. Cette viscosité est notée μ_T et relie linéairement le tenseur de Reynolds'a l'écoulement moyen :

$$\rho \overline{u'_i u'_j} = -\mu_T \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} + \underbrace{\frac{2}{3} \rho \bar{k} \delta_{ij}}_{(a)} \right)$$
(2.18)

k : est l'énergie cinétique moyenne du champ turbulent par unité de masse, appelée de façon plus concise l'énergie cinétique turbulente :

$$\overline{K} = \frac{1}{2} \overline{u'_k u'_k} \tag{2.19}$$

Le terme isotrope(a) est nécessaire, afin de ne pas avoir $\rho \bar{K} = 0$.

2.8 Modèles de turbulence

Les modèles de turbulence consistent à établir des relations ou des équations permettant le calcul des contraintes turbulentes (Reynolds) à partir des caractéristiques de l'écoulement moyen. Ces relations forment avec les équations de Reynolds un système fermé. qui se distingue par un nombre d'équation de transport supplémentaires nécessaires pour fermer le système d'équations du problème à résoudre.

2.8.1 Modèles à zéro équation

Ces modèles ne font appel à aucune équation de transport, et la viscosité turbulente est donnée par une expression algébrique. Cette catégorie de modèles est déduite à partir des formules empiriques en écoulements unidimensionnels à un seul gradient de vitesse, elle est limitée aux écoulements simples comme le jet, le sillage, la couche de mélange, etc.

Prandtl est un des premiers en 1925 é proposer ce type d'approche, considérant que? est directement reliée au gradient de vitesse par l'intermédiaire d'une Longueur lm, appelée Par Prandtl longueur de mélange.

D'après l'analyse dimensionnelle et par analogie avec la viscosité dynamique

$$\mu_t = c.\rho.v.l \tag{2.20}$$

Pour L on utilise l'échelle de longueur des macro-tourbillons (L = C. l) Pour on prend $\left|\frac{\partial \bar{u}}{\partial y}\right|$ en raison de son rôle dans la production de la turbulence. Pour respecter homogénéité des unités, on multiplie $\frac{\partial \bar{u}}{\partial y}$ fois L. La viscosité turbulente s'écrit

$$\mu_t = c.Cl^2 \left| \frac{\partial \bar{U}}{\partial y} \right| = l^2 m \left| \frac{\partial \bar{U}}{\partial y} \right|$$
(2.21)

La contrainte turbulente de cisaillement - $\rho u'_i u'_j$ s'écrit alors :

$$\rho \overrightarrow{u} \overrightarrow{v} = \rho l^2 m \left| \frac{\partial \overline{U}}{\partial y} \right| \frac{\partial \overline{U}}{\partial y}$$
(2.22)

La longueur de mélange doit être déterminée de façon empirique.

2.8.2 Modèles à une équation de transport

Ce type de modèles, comme son nom l'indique, utilise une seule équation de transport pour déduire la viscosité turbulente. En fait, contrairement aux modèles à zéro équation qui, selon leur formulation, ignorent le caractère turbulent de l'écoulement, les modèles à une équation de transport sont basés sur l'introduction d'au moins une grandeur turbulente, comme l'énergie cinétique turbulente k, pour la déduction de la viscosité turbulente.

2.8.2.1 Modèles de fermeture à une équation de transport

Les modèles de fermeture à une équation de transport reposent sur l'hypothèse de Boussinesq, et permettent d'ôter le problème d'une viscosité turbulente nulle au milieu d'une couche de mélange.

2.8.2.2 Modèle de fermeture basé sur l'équation de transport de l'énergie cinétique turbulente

Prandtl et Kolmogorov proposent en 1940 une relation dans laquelle la viscosité turbulente est proportionnelle 'a la racine carrée de l'énergie cinétique turbulente :

$$\mu_t = C_k \rho l \sqrt{\bar{k}} \tag{2.23}$$

Le choix du paramètre k vient naturellement de sa présence dans la loi de comportement (2.18). Cette approche est ainsi basée sur la connaissance en tout point de l'écoulement de l'énergie cinétique turbulente :

$$\underbrace{\rho\left(\frac{\partial \bar{k}}{\partial t} + \bar{u}_j \frac{\partial \bar{k}}{\partial x_j}\right)}_{[1]} - \underbrace{\frac{\partial}{\partial x_j}\left(\mu \frac{\partial \bar{k}}{\partial x_j}\right)}_{[2]} - \underbrace{\frac{\partial}{\partial x_j}\left(\frac{\rho}{2}\overline{u'_j u'_i u'_i}\right)}_{[3]} - \underbrace{\rho\overline{u'_i u'_j}\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j}}_{[4]} - \underbrace{\mu\overline{\frac{\partial u'_i}{\partial x_j}\frac{\partial u'_i}{\partial x_j}}_{[5]}}_{[5]}$$
(2.24)

• La variation totale de l'énergie cinétique turbulente [1] est équilibrée par :

• [3] la diffusion de l'énergie cinétique turbulente par effet des fluctuations de vitesse et de pression.

- [2] Diffusion visqueuse de l'énergie cinétique turbulente par la viscosité.
- [4] l'interaction avec l'écoulement moyen. Cette énergie, cédée par l'écoulement moyen, est

appelée terme de production.

•[5] le taux de dissipation moyen (multiplié ici par la masse volumique), noté par la suite Q, et toujours positif.

Le terme de diffusion [3] doit être modélise, c'est généralement le cas à l'aide d'un terme de diffusion par gradient :

$$-\left(\frac{\rho}{2}\overline{u_j'u_i'u_i'} + \overline{p'u_j'}\right) \approx \frac{\mu T}{\sigma_k}\frac{\partial \bar{K}}{\partial x_j}$$
(2.25)

 μ_t : est la viscosité turbulente vue plus haut.

 σ_k :est le nombre de Prandtl turbulent.

2.8.3 Modèles à deux équations de transport

Cette catégorie de modèles nécessite d'introduire deux équations de transport Supplémentaires pour le calcul de la viscosité turbulente. Il existe plusieurs modèles de ce genre, mais le modèle de base le plus rependu, dans cette catégorie, est celui appelé $k - \xi$, par conséquent il fera l'objet d'une présentation dans la section qui suit.

L'idée de base du modèle $k - \xi$ est de supposer que les structures turbulentes soient convectées par l'écoulement moyen, et leur taille varie sous l'effet de la dissipation visqueuse et du phénomène de type étirement des filets tourbillonnaires (Chassaing 2000). Cette idée peut conduire à concevoir un modèle qui relie l'énergie cinétique turbulente avec son taux de dissipation. Donc si on admet que la dissipation ne dépend explicitement que de k (la source d'énergie) et de (sa capacité de diffusion), on peut conclure que cette dernière soit définie comme suit :

$$v_t = c_\mu \frac{k^2}{\xi} \tag{2.26}$$

Avec : ξ : Dissipation de l'énergie cinétique turbulente ;

 c_{μ} : Constante numérique.

L'expression (2.26) de la viscosité turbulente fait intervenir les deux variables inconnues (k et ξ)alors, ces dernier doivent être déterminées par deux équations de transport.

L'équation de transport exacte de ξ est trop complexe pour permettre une modélisation terme à terme. On retiendra donc une approche phénoménologique qui se base sur l'idée que l'équation de ξ doit avoir la même forme que celle de k : convection, terme source, terme puits, diffusion

visqueuse, et diffusion turbulente.

Alors une simple analyse dimensionnelle permet de relier les termes de productions et de dissipation de ξ à ceux de k (Cande, 2002) :

$$\frac{\partial\xi}{\partial t} + \bar{u}_k \frac{\partial\xi}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(v + \frac{c_\mu k^2}{\sigma_\xi \xi} \right) \frac{\partial\xi}{\partial x_j} \right] + C_{\xi 1} C_\mu K \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} - C_{\xi 2} \frac{\xi^2}{k}$$
(2.27)

Les constantes standards préconisées par Launder et Spalding, sont déterminées à partir des résultats expérimentaux dans les cas très simples de l'écoulement. Elles sont récapitulées dans le tableau (2.1) (Hamani,2014) :

C_{μ}	0.09	Loi logarithmique en paroi
$C_{\xi 1}$	1.44	déformation ou cisaillement uniforme
$C_{\xi 2}$	1.92	décroissance turbulente isotrope
σ_{ξ}	1.3	comparaison avec expérience jet-sillage
σ_k	1	comparaison avec expérience jet-sillage

TABLE 2.1 – Coefficients standards du modèle $k - \xi$ standard

2.9 Traitement de la région proche à la paroi solide

2.9.1 Effet de la présence d'une paroi

Proche des parois, les effets visqueux ne peuvent plus être négligés et la modélisation basée sur un nombre de Reynolds turbulent n'est plus valable. Pour palier à cette difficulté, on utilise des « lois de paroi » (Standard Wall Function), qui sont des modèles d'intégration connectant les conditions à la paroi et près de la paroi. Ces lois sont fondées sur l'approche proposée par Launder et Spalding (1974).

l'effet global de la présence d'une paroi sur l'écoulement sont :

•Des effets de cisaillement :La condition d'adhérence pour un fluide visqueux impose une vitesse nulle à la paroi. L'augmentation significative de la vitesse dans la zone de paroi induit de forts gradients de la vitesse d'où la production d'énergie cinétique.

•Des effets de viscosité : Ils ont un effet dissipatif dominant au voisinage immédiat de la paroi.

•Amortissement visqueux : La condition d'adhérence s'applique aussi aux vitesses fluc-

tuantes. Ainsi, à l'approche d'une paroi, l'énergie cinétique turbulente est dissipée en chaleur.
Echo de paroi : Il s'agit de la redistribution de l'énergie cinétique turbulente sur les différentes composantes du tenseur de Reynolds.

2.9.2 La modélisation de l'écoulement en proche paroi

La modélisation de l'écoulement en proche paroi s'appuie sur celle des écoulements turbulents pariétaux cisaillés simples.

Afin d'ex primer les différentes lois de répartition de la vitesse dans les différentes zones,On définit les paramètres adimensionnels suivants :

$$y^{+} = \frac{\rho y u_{\tau}}{\mu}; u^{+} = \frac{U}{u_{\tau}}$$

$$u_{t} = \left(\frac{\tau_{w}}{\rho}\right)^{1/2}$$
(2.28)

Avec :

Où τ_w est la tension de cisaillement à la paroi.

Y : Distance normale à la paroi.

Une analyse temporelle multi-échelle permet de décomposer en trois couches distinctes la couche limite turbulente proche d'une paroi lisse :

•Une première couche où la viscosité du fluide domine : la viscosité turbulente et est appelée sous couche visqueuse. Dans cette zone le profil de vitesse est linéaire et s'écrit :

$$u^{+} = y^{+} \tag{2.29}$$

La sous couche visqueuse s'étendant jusqu'à une épaisseur de y + = 5.

•Une couche intermédiaire où la viscosité du fluide :et la viscosité turbulente sont équivalentes, appelée zone tampon.

•Une couche externe où la viscosité turbulente : est prépondérante et où le profil de vitesse est logarithmique et :

$$u^{+} = \frac{1}{k} \ln \left(Ey^{+} \right) \tag{2.30}$$

E et K (constante de Von Karman) ont des valeurs fixes qui sont égales à : E = 9 et k =0,40. Cette couche externe est supposée commencer pour $y^+ > 50$.

L'option « Standard Wall Function » est disponible lorsqu'on utilise le modèle $k - \xi$ ou RSM, mais ne peut être utilisée avec le modèle $k - \omega$ (Fluent, 6.3)

Avec le modèle $k - \xi$ standard, les contraintes de Reynolds à la paroi sont calculées en supposant l'existence d'un profil de vitesse entre la paroi et la première cellule proche de la paroi (Fluent, 6.3). Ce profil est modélisé par des lois semblables à celles que nous a vons détaillées précédemment. Elles s'écrivent :

$$u^{*} = y^{*}pour \qquad y^{*} < 11.225$$

$$u^{*} = \frac{1}{k} \ln\left(Ey^{*}\right) \text{ pour } y^{*} > 11.225$$
(2.31)

Les expressions de y^* et u^* sont :

$$y^* = \frac{y_p C_{\mu}^{1/4} k_p^{1/2} \rho}{mu} \quad et \quad u^* = \frac{\bar{U}_{p C_{\mu}^{1/4} k_p^{1/2} \rho} mu}{\tau_w}$$
(2.32)

 \overline{U}_p Représente la vitesse moyenne du fluide au point P, situé à la distance y_p par rapport aux parois. k_p est l'énergie cinétique turbulente au point P. Son taux de dissipation ξ_p est calculé comme suit :

$$\xi_p = \frac{C_{\mu}^{3/4} k_p^{3/2}}{k y_p} \tag{2.33}$$

2.10 Conclusion

Dans le présent chapitre, nous avons fait une présentation de la turbulence et les systèmes d'équations qui régit l'écoulement, comme on a présenté les modèles basés sur le concept de viscosité turbulente, où nous avons présenté à titre indicatif le modèle $k - \xi$, qui est un modèle à deux équations de transport.

A la fin de ce présent chapitre, nous avons achevé par le traitement de la turbulence pariétale.

3

Modélisation Numérique

Introduction

L a résolution des équations d'un écoulement se fait par l'utilisation d'une méthode numérique qui consiste à développer les moyens de la résolution de ces équations. Ce chapitre expose la description du problème et la simulation par le code de calcul FLUENT, essentiellement la procédure qu'il propose pour résoudre les problèmes tels que le nôtre. La construction des géométries avec génération de maillage et l'incorporation des conditions aux limites sont effectuées par le processeur GAMBIT.

3.1 Principes des codes CFD

Les logiciels de mécanique de fluide numérique sont des logiciels de simulation numérique qui basé sur la méthode des volumes finis peuvent maintenant être considérés comme de véritable « expérience numérique », les quelles sont faites avec soin. (ismailzabet ,2011).

Toutes les quantités physiques liées à l'écoulement (champ de vitesse, champ de pression, contraintes, température etc...), sont immédiatement disponibles en tout point de l'écoulement, c'est un avantage principal des méthodes numériques .Dans généralement impossibles ou très difficile en pratique.

3.2 Présentation du GAMBIT et FLUENT

Pour la résolution par le logiciel de simulation numérique des écoulements fluent il faut faire une présentation sur le logiciel Gambit.

3.2.1 GAMBIT

GAMBIT est un logiciel de DAO (Dessin Assisté par Ordinateur) et de génération de maillage (Mailler).Ce logiciel et permis de réaliser des géométries en 2D ou 3D et de construire le maillage. Gambit est largement répandus dans l'industrie (automobile aéronautique, spatiale,...etc.) en raison de sons interface graphique puissante, il permet aussi de réaliser tout type de géométries complexes (fixes ou mobile) associées a des maillages fixes ou adaptatifs. il engendre des fichiers (*.msh) pour Fluent.

3.2.1.1 Maillage sous GAMBIT

Dans l'analyse CFD, la génération du maillage (2D ou 3D) est une phase très importante, vu l'influence de ses paramètres sur la solution calculée. Un maillage de très bonne qualité est essentiel pour l'obtention d'un résultat de calcul précis, robuste et signifiant et a un sérieux impact sur la convergence, la précision de la solution et surtout sur le temps do calcul. Un bon maillage doit également être suffisamment ¡¡ lisse ¿¿ pour la minimisation des éléments présentant des "distorsions " et sur une bonne "résolution" dans les régions présentant un fort gradient (couches limites : ondes de choc,...).

3.2.2 Présentation du code de calcul ANSYS Fluent

3.2.2.1 FLUENT

FLUENT est un code de calcul pour modéliser les écoulements des fluides dans des géométries complexes. Ce logiciel écrit en langage de programmation C et utilise pleinement la flexibilité et la puissance offerte par Ce langage (par exemple allocation de la mémoire dynamique). Et aussi utilisé une architecture qui lui permet d'exécuter plusieurs processus simultanément sur le même poste de travail ou sur des postes séparés pour une exécution plus efficace.

FLUENT résoudre les problèmes d'écoulement avec des mailles non structurées, qui peuvent être produites pour des géométries complexes, avec une relative facilité. Les types de mailles supportées sont :

- ✓ Des mailles en 2D, triangulaires ou quadrilatérales;
- ✓ Des mailles en 3D tétraédriques/hexaédriques/pyramidales;
- \checkmark Des mailles (hybrides) mixtes.

Afin d'automatiser certaines procédures, FLUENT s'utilise à travers une interface graphique l'utilisateur avancé peul adapter ou augmenter aux besoins l'interface en écrivant des macros et des fonctions de menu.

Le logiciel FLUENT permet les capacités de modélisation suivantes : Ecoulements 2D ou 3D; Ecoulement stationnaire ou instationnaire; Ecoulements incompressibles ou compressibles; Ecoulements non visqueux laminaires ou turbulents; Fluide Newtonien ou non Newtonien; Ecoulements avec changements de phases et Ecoulements en milieu poreux.

Le logiciel Fluent basé sur la méthode des volumes finis comme procédé de discrétisation des équations qui gouvernent l'écoulement, telle que l'équation de continuité et quantité de mouvement et de l'énergie. En utilisant cette technique basée sur l'intégration des équations sur un volume de contrôle, ce programme passe par les étapes suivantes :

- La division du domaine en volumes de contrôle discrets en utilisant une grille (maillage) de calcul;
- L'intégration des équations gouvernantes sur les volumes de contrôle individuels, afin de construire les équations algébriques pour les variables discrètes dépendantes, les inconnues telles que : vitesses;
- 3. Linéarisation des équations discrétisées et solution du système d'équations linéaires résultant, pour tenir compte des effets turbulents. Le logiciel de calcul offre la possibilité de choisir un des modèles de turbulence suivants :
 - 1)Le modèle à une équation de SpalartAllmaras;
 - 2)Le modèle à deux équations $k \longrightarrow \xi$;
 - 3)Le modèle à deux équations $k \longrightarrow \omega$;
 - 4)Modèle de contrainte de Reynolds (Reynolds stress model).

Le choix entre ces modèles repose principalement sur les résultats donnés par chacun des modèles suivant les conditions limites prédéfinies .il est vrai qu'un modèle peut donner de meilleurs résultats que l'autre, mais cela est principalement du à la nature des cas étudiés et à la correspondance du modèle de turbulence avec les conditions aux limites.

3.3 Etapes nécessaires pour réussir une simulation numérique d'un problème par FLUENT

3.3.1 Démarrage de fluent

Lancer FLUENT à l'aide d'un raccourci dans le menu démarrer, choisir la version de FLUENT à utiliser (ici version 3D).

3.3.2 Chargement du modèle

1. il faut importer le fichier (*.msh) généré sous GAMBIT pour commencer la simulation.

$\mathbf{File} \rightarrow \mathbf{Read} \rightarrow \mathbf{case}$

2. la vérification du maillage importé pour évite l'erreur ou de volumes négatifs.

 $\mathbf{Grid} \to \mathbf{check}$

$\mathbf{Grid} \rightarrow \mathbf{Smooth}/\mathbf{Swap}...$

Pour s'assurer de la qualité du maillage, il est pratique de lisser le maillage, cliquez sur le bouton Smooth puis sur le bouton Swap. Répétez jusqu'à ce que FLUENT affiche que zéro faces sont swapped.

3.Vérification de l'échelle : avant d'affiches les dimensions qui liés aux dimensions physiques du problème, doit être vérifié.

 $\mathbf{Grid} \to \mathbf{Scale.}$

Définition de modèle de turbulence et des conditions aux limites :

Define \rightarrow **Models** \rightarrow **Viscous**,sélectionner le modèle turbulent simple k-epsilon(2.eqn)

Define \rightarrow **Models** \rightarrow **multiphase**, (choisir méthode vof)

 $Define \rightarrow Materials$, définir le type de fluide utilisé dans la simulation, ici l'eau .

Define \rightarrow **boundary conditions**, spécifier les conditions aux limites Pour chaque zone, donner le type correspondant.

3.3.3 Initialisation et lancement des itérations

 $Solve \rightarrow Initialize \rightarrow Initialize$, choisir à partir de l'entrée.

 $Solve \rightarrow Monitors \rightarrow Residual$, fixer les critères de convergence pour chaque entité physique et afficher le graphe de convergence en cliquant sur Plot.

 $Solve \rightarrow Iterate$, donner le nombre d'itérations et démarrer le calcul des résidus. Lorsqu'on clique sur Iterate, le calcul est lancé. A tout moment, en peut arrêter les calculs avec la combinaison Ctrl-C et reprendre les calculs là où on les a arrêtés si on ne réinitialise pas avec Solve ? Initialize ? Initialize.

3.3.4 Visualisation des résultats

FLUENT permet de visualiser la forme géométrique du maillage et les résultats des calculs de nombreuses façons sous forme graphique.

Display \rightarrow **Grid**, pour afficher la géométrie et le maillage.

Display \rightarrow **contours**, pour afficher les différents profils (vitesse, température, pression...).

Report \rightarrow **Fluxes**, pour afficher la valeur du débit a l'entrée, et la sortie.

Report \rightarrow **Surface Integrals**, pour afficher les valeurs moyennes (vitesses, pressions ...). **Report** \rightarrow **forces** .

 $Plot \rightarrow XY \ Plot.$

3.4 Définition de la méthode de résolution

Le passage d'un problème aux dérivées partielles continu à un problème discret, s'appuie sur les méthodes de dérivées partielles. On distingue trois grandes méthodes pour formuler un problème continu sous forme discrète, basées sur la discrétisation des équations différentielles, telles que la méthode des volumes finis, des différences finies et des éléments finis. La méthode

utilisée par le code ANSYS-Fluent, est celle des volumes finis. ANSYS-Fluent discrétise les systèmes d'équations qui traduisent l'écoulement permanant d'un fluide dans des géométries définies en utilisant une méthode de discrétisation, dont cette opération s'effectue par la transformation des équations différentielles en un système d'équations algébriques suivant des étapes propres au régime permanent. Généralement, on peut distinguer :

- Intégration des équations de transport;
- Discrétisation spatiale;
- Conditions aux limites;
- Couplage pression-vitesse;
- Convergence.

3.4.1 Méthode des volumes finis

3.4.1.1 Rappel sur la méthode des volumes finis

Le domaine de calcul est divisé en un nombre fini de sous domaines élémentaires appelés volumes de contrôles chacun englobe un noeud dit noeud principal. La méthode des volumes finis consiste à intégrer les équations aux dérivées partielles décrites au chapitre précédent sur chaque volume de contrôle, (Gislain.L. K, 2004).



FIGURE 3.1 – Volume de contrôle bidimensionnel.

Pour un noeud principal P les points E et W (E=Est, W= Ouest) sont des voisins dans la direction x, tandis que N et S (N=Nord, S=Sud) sont des voisins dans la direction y. Le volume de contrôle entourant P est montré par les lignes discontinues, les faces du volume de contrôle sont localisées aux points e et w dans la direction x, net s dans la direction y, (Azil F, 2004).

3.4.1.2 Maillage

C'est la subdivision du domaine d'étude en grilles longitudinales et transversales dont l'intersection représente un noeud , ou on trouve les composantes u et v du vecteur vitesse qui se trouve au milieu des segments relient deux noeud adjacents. La discrétisation du domaine est obtenue par un maillage constitué d'un réseau de points. Les grandeurs scalaires pression, température, sont stockées dans le noeud P du maillage, tendis que grandeurs vectorielles u et v sont stockées aux milieux des segments reliant les noeud .

L'équation générale du transport est intégrée sur le volume de contrôle associe aux variables scalaires est les équations de quantités de mouvement sont intégrée sur le volume de contrôle associe aux composants de vitesses. Le volume de contrôle de la composante longitudinale u est décalé suivant la direction x par rapport au volume de contrôle principale, celui de la composante transversale v est décalé suivant la direction de y.

Ce type de maillage est dit maillage décalé permet une bonne approximation des flux convectifs

est une meilleur évaluation des gradients de pression ainsi une stabilisation numérique de la solution. La construction des volumes de contrôle et le maillage décalé sont montrés dans le schéma suivant :



FIGURE 3.2 – Schéma du maillage.



- (1) Noeud de vitesse.
- (2) Noeud des variables scalaires.
- (3) Volume de contrôle pour les variables scalaires.
- (4) Volume de contrôle pour u.
- (5) Volume de contrôle pour v.

3.4.2 Forme générale de l'équation de transport

Sois le problème de transport d'une variable ϕ que lconque, l'équation générale peut être écrite comme suit :

$$\underbrace{\frac{\partial\rho\phi}{\partial t}}_{(1)} + \underbrace{\frac{\partial}{\partial x_i}\left(\rho\phi u_i\right)}_{(2)} = \underbrace{\frac{\partial}{\partial x_i}\left(\Gamma_{\phi}\frac{\partial\phi}{\partial x_i}\right)}_{(3)} + \underbrace{S\phi}_{(4)}$$
(3.1)

 ${\rm O} {\rm \hat{u}}$:

(1) : Terme transitoire;

(2): Transport par convection;

(3) : Transport par diffusion;

(4): Terme source;

 ϕ :Propriété moyenne transportée;

 Γ_{ϕ} : Coefficient de diffusion de la propriété;

 $S\phi$: Terme source de la propriété .

Les expressions des termes de diffusivité et de source varient en fonction des types d'équations résolues. Le terme de gradient de pression, qui ne peut être classé ni comme un terme de convection ni comme un terme de diffusion est en général inclus dans le terme de source pour les trois équations de la dynamique.

Le tableau (3.1) ci-dessous regroupe les différentes équations du transport dans le cas du modèle k-epsilon en fonction de la valeur de la variable, et du terme source $S\phi$.

Équation	Variable ϕ	Terme source $S\phi$
Équation de continuité	1	0
Équation de quantité de	$ar{U},ar{V},ar{W}$	S_U, S_V, S_W
mouvement		
Équation de k	k	S_k
Équation de ξ	ξ	S_{ξ}

TABLE 3.1 – Tableau récapitulatif des équations de transport.

Pour une bonne clarification sur le fonctionnement du solveur de ANSYSFluent, nous proposons, dans ce qui suit, la résolution de l'équation générale de transport d'une propriété ϕ au

sein d'un écoulement 2D en régime stationnaire, et cela à l'aide de la méthode de volumes finis. Alors, l'équation générale de transport (3.1) s'écrit comme suit :

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\rho \phi \bar{u} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\rho \phi \bar{v} \right) = \frac{\partial}{\partial x} \left(\Gamma_{\phi} \frac{\partial \phi}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\Gamma_{\phi} \frac{\partial \phi}{\partial y} \right) + S\phi \tag{3.2}$$

3.4.2.1 Discrétisation de l'équation générale de transport

Cette procédure permet de transformer l'équation générale de transport continue en une équation discrète, et la généralisation sur tous les volumes de contrôle du domaine perm et d'obtenir un système d'équations algébriques à résoudre numériquement. En appliquant le théorème de divergence d'Ostogradski, l'intégrale de volume est substituée en une intégrale de surface comme suit :

$$\int_{V} div(\phi) dV = \int_{S} \phi \overrightarrow{n} dS$$
(3.3)

Avec :

V : Volume de l'élément ;

S : Surface de l'élément ;

 \overrightarrow{n} Vecteur normal à la surface considérée de l'élément.

3.4.2.2 Intégration de l'équation générale de transport sur un volume de contrôle

L'équation de transport d'une quantité scalaire, exprimée sous sa forme intégrale, en régime permanent est donnée par :

$$\int_{V} \left[\frac{\partial}{\partial x} \left(\rho \phi u \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left(\rho \phi u \right) \right] dV = \int_{V} \left[\frac{\partial}{\partial x} \left(\Gamma_{\phi} \frac{\partial \phi}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\Gamma_{\phi} \frac{\partial \phi}{\partial y} \right) \right] dV + \int_{V} S\phi \ dV \quad (3.4)$$

L'application du théorème de divergence d'Ostogradski, exprimée par (3.3) permet de transformer l'équation (3.4) comme suit :

$$\int_{S} \left(\rho \phi u \right) \overrightarrow{n} \, dS + \int_{S} \left(\rho \phi u \right) \overrightarrow{n} \, dS = \int_{S} \left(\Gamma_{\phi} \frac{\partial \phi}{\partial x} \right) \overrightarrow{n} \, dS + \int_{S} \left(\Gamma_{\phi} \frac{\partial \phi}{\partial y} \right) \overrightarrow{n} \, dS + \int_{V} S \phi \, dV \quad (3.5)$$

Pour montrer les flux totaux à travers les sections du volume de contrôle, cette équation s'écrit :

$$J_e - J_w + J_n - J_s = \int_V S_\phi dV \tag{3.6}$$

Où, les indices e, w, n et s indiquent que les quantités correspondantes sont évaluées aux faces est, ouest, nord et sud du volume de contrôle respectivement. Les quantités Je $J_w J_n$, et J_s sont des flux totaux (convection est diffusion) intégrés sur les faces de volume de contrôle, elles sont données par les expressions suivantes :

$$J_{e} = \int_{s}^{n} \left(\rho \bar{u} \phi - \Gamma_{\phi} \frac{\partial}{\partial x} \right) dy \qquad \qquad J_{n} = \int_{w}^{e} \left(\rho \bar{v} \phi - \Gamma_{\phi} \frac{\partial}{\partial y} \right) dx$$
$$J_{s} = \int_{s}^{n} \left(\rho \bar{v} \phi - \Gamma_{\phi} \frac{\partial}{\partial y} \right) dx \qquad \qquad J_{w} = \int_{w}^{e} \left(\rho \bar{u} \phi - \Gamma_{\phi} \frac{\partial}{\partial x} \right) dy \qquad (3.7)$$

La valeur de la variable dans un noeud est influencée par les valeurs des n?uds voisins, ces noeuds sont placés au centre de chaque volume contrôle.

$$J_{e} = \left[(\rho \bar{u})_{e} \phi_{e} - \frac{\Gamma_{\phi e}}{\Delta x_{EP}} (\phi_{E} - \phi_{p}) \right] \Delta y_{ns} \qquad \qquad J_{n} = \left[(\rho \bar{u})_{n} \phi_{n} - \frac{\Gamma_{\phi e}}{\Delta x_{NP}} (\phi_{N} - \phi_{p}) \right] \Delta y_{ew}$$
$$J_{w} = \left[(\rho \bar{u})_{w} \phi_{w} - \frac{\Gamma_{\phi e}}{\Delta x_{Pw}} (\phi_{p} - \phi_{W}) \right] \Delta y_{ns} \qquad \qquad J_{w} = \left[(\rho \bar{u})_{s} \phi_{s} - \frac{\Gamma_{\phi e}}{\Delta x_{Ps}} (\phi_{p} - \phi_{S}) \right] \Delta y_{ew} \quad (3.8)$$

Dans le cas ou le coefficient de diffusivité $\Gamma \phi$ n'est pas constant, ses valeurs sur les facettes 'w', 'e', 's' et 'n' du volume de contrôle sont exprimées en fonction des valeurs aux point no daux P, W ,E ,S , et N .

L'intégration du terme sources est obtenue en supposant que $S\phi$ est uniforme sur le volume de contrôle, elle s'écrit alors :

$$\int_{V} S\phi \quad dV = S_U + S_P \phi_p \tag{3.9}$$

Avec :ws

 S_u : Source liée aux conditions aux limites;

 S_p : Source estimée au noeud P du volume de contrôle considéré.
3.4.2.3 Discrétisation spatiale

Le code de calcul ANSYS-Fluent propose plusieurs schémas de discrétisation (schéma centré, hybride amont, QUICK). Pour la modélisation d'un écoulement fortement convectif, les schémas aux différences avant sont plus adéquats, donc nous avons choisi le schéma UPWIND pour discrétisation des équations. Le schéma UPWIND tient compte du sens d'écoulement, au lieu de faire la moyenne arithmétique pour l'estimation des flux à travers les facettes, l'interpolation prend la valeur de l'un des deux noeuds adjacents suivant le sens du flux.

Sens de flux	valeur de ϕ
$W \leftarrow E$	$\phi_w = \phi_p \phi_\xi = \phi_E$
$W \rightarrow E$	$\phi_w = \phi_w \phi_\xi = \phi_P$
$N \leftarrow S$	$\phi_n = \phi_p \phi_s = \phi_S$
$N \rightarrow S$	$\phi_n = \phi_N \phi_s = \phi_p$

TABLE 3.2 – Interpolation du flux des faces en fonction du sens de l'écoulement.

On pose : $F = \rho \bar{u}$ Et Di flux diffus if défini par :

$$D_{e} = \frac{\Gamma_{e}}{\partial x_{e}} \Delta Y_{ns} \qquad D_{n} = \frac{\Gamma_{n}}{\partial y_{n}} \Delta Y_{ew}$$
$$D_{w} = \frac{\Gamma_{w}}{\partial x_{w}} \Delta Y_{ns} \qquad D_{s} = \frac{\Gamma_{s}}{\partial y_{s}} \Delta Y_{ew} \qquad (3.10)$$

En remplaçant les variables exprimées dans le tableau (3.2) dans l'équation (3.6), et après quelques arrangements on trouve :

$$a_P\phi_P = a_E\phi_E + a_W\phi_W + a_N\phi_N + a_S\phi_S + b \tag{3.11}$$

Cette équation peut être arrangée comme suit :

$$a_P \phi_P = \sum a_i \phi_i + b \tag{3.12}$$

Avec :

 a_i et a_p des coefficients liés aux schémas de discrétisation utilisés pour un volume de contrôle considéré, et les volumes de contrôle qui l'entoure respectivement ; b second membre dépendant du terme source de chaque volume de contrôle considéré. L'expression des coefficients ai dans le cas du schéma UPWIND est donnée dans le tableau ci-dessous :

a_w	$D_w + max(F_w, 0)$
a_E	$D_e + max(-F_w, 0)$
a_S	$D_s + max(F_s, 0)$
a_N	$D_n + max(-F_n, 0)$
a_P	$a_w + a_E + a_S + a_N + (F_e - F_e + F_e - F_e) - S_p$
b	S_u

TABLE 3.3 – Expression des coefficients ai résultants du schéma UPWIND.

3.4.3 Modélisation avec la méthode VOF : avec «Fluent »

Fluent utilise la méthode VOF (Volume of fluid). Avec cette méthode le système n'est plus un ensemble de 'particules' d'eau mais un volume d'eau et un volume d'air superposés. La surface libre est donc l'interface de ces deux volumes, que l'on soumet à la pression atmosphérique. Le principe de cette méthode est de calculé, à chaque itération, la fraction volumique respective d'air et d'eau dans chaque volume de contrôle de la géométrie air/eau qui intervient dans le calcul de la masse volumique intervenant elle même dans les équations qui défini notre problème. Cette méthode donne de très bons résultats pour la modélisation d'écoulement à surface libre notamment pour la visualisation tridimensionnel de l'interaction Écoulement/Obstacle nous utiliserons ce dernier pour simuler notre écoulement.

3.4.3.1 Équation de transport de fraction de volume

La résolution d'un problème multiphasique en utilisant la méthode VOF, est caractérisée par un suiveur d'interface des phases présentes dans un écoulement, il nécessite en plus la résolution de l'équation de transport de la fraction de volume a_q de la phase q (liquide ou gaz) dans une cellule. a_q est définie comme étant le rapport du volume du fluide q par celui de la cellule, dont trois conditions sont possibles :

- $a_q = 1$: la cellule est entièrement occupée par le fluide q;
- $a_q = 0$: la cellule ne contient pas le fluide q;

• $0 < a_q < 1$: la cellule contient plusieurs interfaces.

Dans une cellule, l'équation de transport de fraction de volume, s'écrit comme suite :

$$\frac{1}{\rho_q} \left[\frac{\partial}{\partial t} (a_q \rho_q) + \nabla (a_q \rho_q \overrightarrow{v_q}) = S_{aq} + \sum_{p=1}^n (m_{pq} - m_{qp}) \right]$$
(3.13)

Dans laquelle, m_{pq} est la masse transférée de la phase p vers la phase q, et m_{qp} est la masse transférée de la phase q vers la phase p, et S_{aq} est un terme source de la fraction de volume de la phase q.

Au niveau de chaque cellule de domaine de calcul, les fraction de volume de n fluides doivent vérifier la relation suivante :

$$\sum_{q=1}^{n} a_q = 1 \tag{3.14}$$

Les équations de mouvement sont fermées avec les relations suivantes, donnant la densité et la viscosité de chaque phase :

$$\sum_{q} a_q = 1; \quad \sum_{q} a_q \cdot \rho_q; \quad \mu = \sum_{q} a_q \cdot \mu_q \tag{3.15}$$

Dans le cas où les fluides sont l'eau liquide (noté : l) et sa vapeur (noté : v), ces équations deviennent :

$$\rho = a_v \rho_v + (1 - a_v) \rho_l$$

$$\mu = \mu = a_v \mu_v + (1 - a_v) \mu_l$$
(3.16)

3.4.4 Couplage pression-vitesse

L'utilisation d'un algorithme pour corriger la pression et la vitesse, afin que ces grandeurs vérifient l'équation de continuité est nécessaire. Cet algorithme stipule l'existence d'une relation entre les vitesses corrigées et les pressions corrigées, en vue de vérifier l'équation de conservation de la masse. Trois algorithmes sont disponibles dans le code de calcul ANSYS-Fluent :

- SIMPLE : le plus robuste.
- SIMPLEC : il donne une convergence plus rapide pour les problèmes simples.
- PISO : il est utile pour des problèmes des écoulements instables.

3.4.5 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, ANSYS-Fluent permet de juger l'état de convergence par le biais du calcul des résidus. Après l'étape de discrétisation, l'équation de conservation d'une variable \emptyset donnée sur une cellule de centre P, s'exprime comme suit :

$$ap.\varnothing p = \sum_{nb} a_{nb}.\varnothing_{nb} + b \tag{3.17}$$

où a_p et a_{nb} a représentent les contribution convectives et diffusives, l'indice 'nb' est lié aux centre de cellules adjacentes. b représente la contribution de partie constante du terme source $\emptyset \phi$.

Le résidu $R \varnothing$ correspond au déséquilibre de l'équation 2.9, sommé sur toutes les cellules du domaine. Il s'écrit donc sous la forme :

$$R^{\varnothing} = \frac{\sum_{cellules} p \left| \sum_{nb} a_{nb} \phi_{nb} + b - a_p \phi_p \right|}{\sum_{cellules} p \left| a_p \phi_p \right|}$$
(3.18)

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

A cause de la non linéarité des équations résolues, il est possible, pour atténuer les fluctuations de la solution, de réduire les variations des variables d'une itération à une autre en introduisent une sous-relaxation. Il n'existe pas des règles générales concernant des meilleures valeurs des coefficients de sous-relaxation, mais il existe des recommandations pour chacune des grandeurs, généralement basé sur des connaissances empiriques. De telle sorte que la nouvelle valeur dépend donc de la valeur précédente et de l'écart entre les deux.

$$\emptyset = \emptyset_{old} + \alpha \times \Delta \emptyset \tag{3.19}$$

 α : Facteur de sous-relaxation (0 < α < 1);

La sous-relaxation consiste à diminuer la rapidité de changement des variables, d'une itération

à une autre. Elle est régulièrement employée dans les problèmes non linéaires pour éviter que le processus itératif cité précédemment (Figure 2-6), ne se diverge pas. En cas de problème de divergence du calcul avec le modèle, il est préférable de commencer le calcul avec des facteurs de sous relaxation inférieurs à 0,5 (pour toutes les variables), puis les augmenter au fur et à mesure que le calcul converge pour accélérer la convergence.

$$R^{\varnothing} = \sum_{cellules} p \left| \sum_{nb} a_{nb} \phi_{nb} + b - a_p \phi_p \right|$$
(3.20)

3.5 Procédures de résolution

Pour la création de notre modèle on passe par les étapes suivantes :

3.5.1 Création de la géométrie

Notre géométrie est construite sur Gambit en 3D, vu sa complexité on a choisi de l'établir point par point, relier entre eux dans différentes directions les lignes sont créés, ensuite les faces sont formées, pour obtenir en dernier les volumes.

Notre canal est de 6 m de longueur (4 m amont et 2m a la partie aval), sa hauteur est de 0.6 m et 0.31m de largeur.

Il y avait une pile circulaire d'un diamètre de 0.11 m. il située à 4 m de l'entré de canal, la distance entre la paroi de canal et la pile est 0.134 met entre la pile est le plan de symétrie est 0.066 m.



FIGURE 3.3 – Présentation de la géométrie par GAMBIT en 3D.



FIGURE 3.4 – Présentation de fluide (pile solide) par GAMBIT en 3D.

3.6 Création du maillage

Pour construire un maillage, il est bon de suivre la démarche suivante :

 $\sqrt{}$ définir la géométrie;

 $\sqrt{\text{réaliser le maillage}};$

 $\sqrt{}$ définir les paramètres des zones de calcul.

La géométrie comprend les positions physiques de points caractéristiques définissent la zone que l'on a à mailler : coordonnées spatiales des quatre sommets d'un carré ; du point de départ et du point d'arrivée d'une ligne ; du centre et de l'ouverture angulaire d'un arc de cercle. Il faut pouvoir représenter la zone à étudier par un ensemble de figures géométriques simples raccordées les unes aux autres.

Pour des maillages structurés, on peut faire la liaison entre la géométrie et le maillage, Aussi, avant de réaliser le maillage, il faut spécifier par écrit d'une part la géométrie adoptée pour définir la zone à mailler, d'autre part les numéros des mailles correspondant aux points caractéristiques de la géométrie. Un noeud pourra alors être repéré par ces coordonnées physiques x et y ou indices I et J.

Par ailleurs, il peut être avantageux de définir des points intermédiaires qui ne sont pas indispensables à la définition de la géométrie mais qui permettent de délimiter les zones dans lesquelles les mailles seront adaptées pour raffiner le maillage près des parois par exemple ou bien pour épouser au mieux la forme des obstacles, parois ou autres...

GAMET Solver FLUENT 5.6 ID montapha?		× Dix
File Edit Solver	Help	Operation
<u>***</u>		Ceometry
ê a	Ê.x	
	11. 11	
v k,x	Ϋ́ Σ.x	Global Control
Transcript WARD: There currently is nothing to undo.	Description GRAPHICS WINDOW- LOWER LEPT QOADRANT	5 .
Command:		J≞∎∎≝۹

FIGURE 3.5 – Maillage par GAMBIT 3D.



FIGURE 3.6 – Maillage par GAMBIT Amon .



FIGURE 3.7 – Maillage par GAMBIT avale.



FIGURE 3.8 – Maillage par GAMBIT autour de pile.

Remarque :

On a choisi de raffiner notre maillage dans la zone la plus proche de notre pile ceci à cause des phénomènes important qui déroulent dans cette zone, pour avoir des bonnes résulta.

3.6.1 Les conditions aux limites

Une fois que nous avons représenté la géométrie du système étudié, nous devons fixerdes conditions aux limites du système sur les valeurs de la vitesse U , de l'énergie cinétique turbulente K et du taux de dissipation de l'énergie cinétique ξ Plusieurs types des conditions aux limites sont proposés dans le code de calcul **Fluent**(conditions de symétrie, de pression, de flux nul, de vitesse imposée ...etc.) Nous en utilisons essentiellement trois conditions : le débit d'entrée, pression de sortie et conditions de rugosité : La première condition aux limites «**masse- flow- Inlet** », correspond le débit a l'entrés.

La deuxième condition «**Pressure outlet**», est appliquée au niveau de la sortie (sortie de Fluide), ainsi que au niveau de la surface libre.

La troisième condition nous avons utilisé la condition de « Symétrie » d'ANSYS-Fluent.

La quatrième condition sont représentés par la condition «Wall» dans ANSYS-Fluent.

Géométrie	Type de condition limite	Observation
Entrée	masse- flow- Inlet	le débit à l'entrés
Sortie	Pressure outet	sortie de Fluide
Parois	Wall	Solide
Surface libre	Symétrie	Pression atmosphérique
Pile	Wall	solide
Fond	Wall	solide
Surface	Symétrie	Pression atmosphérique

3.6.1.1 Les conditions aux limites notre cas sont

Les conditions aux limites pour les deux équations de K et ξ devront être adaptées dans le cas de l'emploi d'une loi de paroi. Pour livrer au logiciel les quantités turbulentes à l'entrée du domaine, il est nécessaire de calculer l'intensité turbulente. L'intensité turbulente est obtenue de façon empirique comme suit :

$$I_t = 0.16R_e^{-1/8} \tag{3.21}$$

$$R_e = \frac{U.D_h}{v} \tag{3.22}$$

 D_h : le diamètre hydraulique pour des canaux non circulaires est pris égale à quatre fois le rayon hydraulique.

Les valeurs initiales pour ξ et sont calculées comme suit : (Versteeg, Malasekera).

$$\xi = C_{\mu}^{3/4} \frac{K^{3/2}}{l} \tag{3.23}$$

Ou : C_{μ} : est une constante empirique spécifie au modèle de turbulence, égale à 0,09, et l est une échelle de longueur turbulente donnée par la relation suivante :

$$l = 0.07L \tag{3.24}$$

l : Est une quantité physique liée à la taille des grands tourbillons qui contiennent l'énergie dans des écoulements turbulents.

L : est la longueur caractéristique, dans le cas d'un canal de section transversale non circulaire, on prend le diamètre hydraulique $(L=D_h)$.

l'énergie cinétique turbulente k à l'entrée de canal est calculée en utilisant la formule utilisée par le code ANSYS-Fluent exprimée comme suite :

64

$$K = \frac{3}{2}(v_{en} * I_t)^2 \tag{3.25}$$

 v_{en} : la vitesse a l'entrés.

3.7 Organigramme de calcul



65

3.8 CONCLUSION

Dans le présent chapitre, nous avons présenté le code calcul ANSYS-Fluent, son principe de fonctionnement, et sa méthode de résolution des équations générales de l'écoulement, en utilisant le modèle basé sur le concept de viscosité turbulente $k - \xi$ incorporé dans sa base de données, ainsi un autre modèle multiphasique VOF (Volume Of Fluid) appliqué seulement à la simulation.

Après, nous avons présenté les étapes suivies pour la création de la géométrie, et du maillage, la Configuration de notre problème, dont les résultats seront discutés au chapitre suivant.



Résultats des simulations

Introduction

C e chapitre est consacré à l'analyse et la discussion des résultats des simulations numériques réalisées sur des expériences existants. Notre choix s'est fixé sur les travaux expérimentaux de Szydlowski (2011) réalisés dans un canal expérimental de section rectangulaire ayant une largeur de 0.62 m. L'auteur a étudié l'allure de la surface libre produite par deux pilles circulaires d'un diamètre de 0.11 m installées symétriquement par rapport à l'axe du canal.

4.1 Description des expériences de Szydlowski (2011)

L'expérience de szydlowski 2011 Réalisés dans un canal de la forme rectangulaire avec un lit en béton et des murs en verre, dont la longueur totale de l'installation était environ 28m. Le segment actif de canal de laboratoire (avec parois de verre) est de 15 m de longue et 0.62 de largeur, La section modèle du pont est située à 2 m en aval de l'entrée d'eau. Il y a deux piliers circulaires d'un diamètre de 0,11 m, Les distances entre les parois du canal et les piles et entre les piles sont identiques et mesurent 0,134 m. Les ordonnées de la surface d'eau son déterminé le long de l'axe de canal et le long de l'axe de la pile d'ans un intervalle [1 m; 1.5 m] en avale de model de pont, le débit entrant dans le canal est de 0.114 m3 /s.

On a deux essais dans cette expérience :

Pour le premier essai, la profondeur d'eau est de 0.48 m, et pour le régime il est fluvial le long de canal. Pour le deuxième essai, avec une profondeur d'eau de 0.19 m en aval, en amont du pont l'écoulement est fluvial .Le long de la constriction entre les piles, une diminution soudaine de la surface de l'eau s'est produite, le régime est devenu torrentiel. Le débit près du fluvial.



FIGURE 4.1 – Schéma de laboratoire(set-up)

4.2 Analyse des résultats

Pour la simulation de l'écoulement à surface libre dans un canal de section rectangulaire en présence d'une pile, les résultats de simulation seront comparés aux résultats expérimentaux de **MICHAL SZYDLOWSKI** 2011.

Dans cette simulation nous avons utilisé deux models le model le multiphasique (VOF) (Volume Of Fluid) et le model de turbulence k-? standard avec leur constante standard préconisées par Launder et Spaldingsont récapitulées dans le tableau (4.1). Notons ici que nous avons utilisé le code de calcul Fluent pour faire notre calcul.

Pour les caractéristiques de l'écoulement à l'entrée de canal, nous avons utilisé la condition exprimée par (3.23), (3.24) du chapitre 3.

Ces caractéristiques sont regroupées dans les Tableaux (4.1)(4.2)

4.3 Convergence Des Calculs

Pour s'assurer de la convergence des calculs, nous nous aidons d'un critère visuel. Le premier consiste à observer les courbes des résidus définis par les équations (2.23), (2.24), et (2.27) tracées par Fluent, en fonction des itérations. Lorsque les résidus sont faibles (inférieurs à 10-3 au moins) et que les courbes deviennent plates comme illustrées ci-dessous, nous pouvons considérer que la solution est atteinte.



FIGURE 4.2 – Évolution es résidus au cours des itérations (1^{er} cas).



FIGURE 4.3 – Évolution des résidus au cours des itérations (2^{eme} cas).

4.4 Cas de l'écoulement fluvial

$U_m(m/S)$	H (m)	R_e	I_t	Rh	К	ξ
0.38306452	0.48	179527.559	0.03526579	0.11716535	0.00027374	2.2685E - 05

4.4.1 Profil de la surface

Dans la figure nous présentons les deux types de phases (l'eau et l'air).



FIGURE 4.4 – La représentation des deux phases (eau et l'air) dans un plan verticale y=0.3m.



FIGURE 4.5 – La représentation des deux phases (eau et l'air) dans un plan verticale y=0.05m



FIGURE 4.6 – La représentation des deux phases (eau et l'air) dans un plan verticale y=0.12m

4.4.2 Profil de vitesse le long du canal

Le développement du profile de la vitesse u dans cette section est représenté dans les figures (4.7) et (4.8) ci-dessous.



FIGURE 4.7 – Profile de vitesse à l'entré, à 1m, 2m et à 3m.

D'après la figure, nous remarquons que la vitesse est uniforme à l'entrée, Un peu plus loin,

72

le fluide est freiné au niveau des berges (conséquence directe de la rugosité des parois et du frottement du fluide avec celles-ci).à 3 m de l'entrée l'écoulement et plus rapide.



FIGURE 4.8 – Profile de vitesse d'eau, à 4m et à 5m.

A une distance de 4 m de l'entré, on remarque une accélération considérable de l'écoulement due au rétrécissement du canal (présence pile de ponts), a 5m on remarque que la vitesse est Diminue jusqu'à sa stabilité :



FIGURE 4.9 – ligne d'eau le long de l'axe de symétrie.



FIGURE 4.10 – Ligne d'eau le long de l'axe de pile.



FIGURE 4.11 – Profil de surface mesuré (+++) et calculé (-) pour la première expérience, la ligne de hauteur critique (-) : a)la long de l'axe du canal b) le long de l'axe du pilier (dimensions en mètres) (MICHAL .SZYDLOWSKI. 2011)

74



4.4.3 la distribution de la ligne d'eau le long de canal

FIGURE 4.12 – les lignes d'eau le long de l'axe de symétrie et profil de la hauteur critique de model étudie et de model de (MICHAL .SZYDLOWSKI .2011)



 $\label{eq:Figure 4.13-les lignes d'eau le long de l'axe de pile et profil de la hauteur critique de model étudie et de model de (MICHAL .SZYDLOWSKI .2011)$

Comparaissent :

Les figures (4.12, 4.13) fait apparaitre la comparaison des ligne d'eau le longue de l'axe de symétrie et de pile obtenues dans le cadre de cette étude comparé avec celui de MICHAL .SZYDLOWSKI 2011 . Nous remarquons dans ces courbes une allure presque identique, et Le

régime ne change dans les trois cas (fluvial en amon et en aval).



4.4.4 L'évolution de la vitesse le long du canal

FIGURE 4.14 – Développement de la vitesse le long du canal.

La figure (4.14) représente l'évolution de la vitesse le long du canal. On remarque une distribution uniforme de vitesse avec une maximale valeur située à la pile de pont, cette valeur est augment rapide à 3.9 m à 4.1 puis elle devient constante la longue du canal.

4.4.5 Champ de vitesse calculé dans un plan horizontal

Les champs de vitesse calculée pour des plans horizontaux sont présentés dans les Figure (4.15, 4.16, 4.17,4.18) .La zone aval de la pile est bien visualisée dans cette situation, elle montre des vitesses faible de l'ordre de (Quelques Cm/s), puis la vitesse s'augmente jusqu'à son état de stabilité Dans les positions plus éloignées de la pile, nous pouvons remarquer une accélération de la vitesse; Il est évident que la présence de la pile dans le canal réduit la section du passage, provoquant une forte accélération de l'écoulement, l'accélération est bien visualisée lorsqu'on montre les profils des vitesses axiales dans cette zone.



FIGURE 4.15 – Champ de vitesse calculée dans un plan horizontal Z=0.1.



FIGURE 4.16 – Champ de vitesse calculée dans un plan horizontal Z=0.2.



FIGURE 4.17 – Champ de vites se calculée dans un plan horizontal Z=0.3.



FIGURE 4.18 – Champ de vitesse calculée dans un plan horizontalZ=0.4.

4.4.6 Champ de vitesse calculé dans un plan verticale

Les champs de vitesse calculée pour des plans horizontaux sont présentés dans la Figure (4.19,4.20), cette visualisation tridimensionnelle englobe toute la zone du canal :

 $\sqrt{}$ Il est clair d'avoir des vitesses nulle au niveau des parois latérales, ainsi que dans les faces caractérisant l'obstacle (pile), qui sont due aux conditions aux limites déclarées et imposées par le code de calcul (type Wall).

 \checkmark Dans la zone de la pile (Plan Y=0.12 m), l'effet de la pile sur l'écoulement est bien identifié, la zone aval de l'obstacle interprète bien l'effet de blocage de l'écoulement.



FIGURE 4.19 – Champ de vitesse calculée dans un plan vertical Y=0.12.



FIGURE 4.20 – Champ de vitesse calculée dans un plan verticalY=0.25.

4.4.7 Zone de recirculation

Le long du canal, on remarque la présence d'une zone de recirculation de petites tailles à faibles vitesses (quelques Cm/s), située dans la zone aval de la pile ,c'est a conséquence de la

présence de pile (la zone de recirculation est petit car le régime et fluvial en amont et en aval) .



FIGURE 4.21 – La zone de recirculation.

4.5 Cas de l'écoulement torrentiel

$U_m(m/S)$	H (m)	R_e	I_t	Rh	К	ξ
0.66	0.28	262068.966	0.02793563	0.09977011	0.00073188	0.00011646

TABLE 4.1 – caractéristiques de l'écoulement à l'entrée 2^{eme} cas

4.5.1 Profil de la surface

Dans la figure nous présentons les deux types de phases (l'eau et l'air)

81



FIGURE 4.22 – La représentation des deux phases (eau et l'air) dans un plan verticale y=0.05m.



FIGURE 4.23 – La représentation des deux phases (eau et l'air) dans un plan verticale y=0.3m.



FIGURE 4.24 – La représentation des deux phases (eau et l'air) dans un plan verticale y=0.12m.

4.5.2 profil de vitesse le long du canal

D'après la figure, nous remarquons que la vitesse est uniforme à l'entrée (régime fluvial), avec une augmentation de vitesse au milieu de profile, ce dernier changer avec un pas de 1m.

84



FIGURE 4.25 – Profile de vitesse, à 1m , 2m et à 3m.

à 4m d'entrée on observe une accélération brusque considérable de l'écoulement due au rétrécissement du canal. à 5m la hauteur d'eau diminue avec une grande vitesse (à cause de passage vers le régime torrentielle).



FIGURE 4.26 – Profile de vitesse, à 4m et à 5m.

4.5.3 L'évolution de la vitesse le long du canal

On remarque une distribution uniforme de la vitesse à l'amont avec une maximale valeur située à la pile de pont, cette valeur augmente rapidement de 3.8 m à 4.2 m puis elle se diminue jusqu'à sa stabilité (1m/s).par conséquence, La vitesse à l'avale devient plus grande que l'amont,

puisque le régime a changé (régime fluvial vers torrentiel).



FIGURE 4.27 – Développement de la vitesse le long du canal.

la distribution de la ligne d'eau le long de canal



FIGURE 4.28 – la ligne d'eau le long de l'axe de symétrie .



FIGURE 4.29 – la ligne d'eau le long de l'axe de la pile.



FIGURE 4.30 – Profil de surface mesuré (+++) et calculé (-) pour le seconde expérience, la ligne de la hauteur critique (- -) : a) le long de l'axe du canal) le long de l'axe du pilier (dimensions en mètres) (MICHAL .SZYDLOWSKI .2011).



FIGURE 4.31 – les lignes d'eau le long de l'axe de symétrie et profil de la hauteur critique de model étudie et de model de SZYDLOWSKI .2011.



FIGURE 4.32 – les lignes d'eau le long de l'axe de symétrie pile et profil de la hauteur critique de model étudie et de model de SZYDLOWSKI.2011.

Les figures (4.31,4.32) représentent les lignes d'eau au centre du canal (y=0) et dans le plan passant par le centre de la plie (y=0.11 m) issues de la simulation et celles obtenues par Szydlowski (2011). Les profils numériques et expérimentaux présentent une légère différence dans la zone située proche de la pile. A l'aval de la pile, la différence est accentuée et le niveau d'eau n'a pas franchi la hauteur critique. Cette différence pourrait être causée par la qualité de maillage dans la zones d'interface(eau / air).

4.5.4 Champ de vitesse calculé dans un plan horizontal

Dans les figures suivantes on a observé que la vitesse a diminué à chaque fois qu'on change la hauteur (Z=0.1, Z=0.2 et Z=0.25) .par la suite nous avons remarqué des vitesses négative (zone recirculation) que sont bien apparait derrière la pile (z =0.2, 0.25).



FIGURE 4.33 – Champ de vitesse calculée dans un plan horizontal Z=0.1m.



FIGURE 4.34 – Champ de vitesse calculée dans un plan horizontal Z=0.2m.


FIGURE 4.35 – Champ de vitesse calculée dans un plan horizontal Z=0.25m.

4.5.5 Champ de vitesse calculé dans un plan verticale

Le régime est fluvial à l'amont des piles, et torrentiel à l'aval. De l'amont à l'aval on a observé un remous d'exhaussement figure (4.36, 4.37), de plus il y a un brusque abaissement de la surface libre, à l'aval de la pile un remous d'exhaussement est suivi d'un ressaut permet à la surface.



FIGURE 4.36 – Champ de vecteur de vites se calculé dans un plan verticale y=0 (plane de symétrie).



FIGURE 4.37 – Champ de vecteur de vitesse calculé dans un plan verticale y=0.1.



FIGURE 4.38 – Champ de vitesse calculée dans un plan vertical Y=1.2m.



FIGURE 4.39 – Champ de vitesse calculée dans un plan vertical Y=0.25m.

Dans les figure (4.38, 4.39) on observe des vitesses nul au niveau des parois, à l'aval de la pile (plan y=0.25m, 1.2m) on remarque une augmentation de la vitesse dans la zone proche de la pile (rétrécissement du canal est la cause de cette augmentation), Cette augmentation de vitesse provoque le ressaut, enfin la vitesse se démunie jusqu'à sa stabilité dans la zone qui se trouve loin de la pile.

4.5.6 Zone de recirculation

Dans les figures que suivent on remarque la présence de deux zones de recirculation de tailles différentes dans la partie aval, la première zones située approchée de la pile (vortex de sillage), la deuxième zone située approchée de la paroi latérale. Dans la réalité les vortex

95

de sillage provoquent des vortex de forme de fer à cheval, sous les conditions d'inondation. L'augmentation dans les vitesses du flux dans les vortex a pour conséquence le développement des fosses d'affouillement.



FIGURE 4.40 – Zones de recirculation le long du canal.

4.6 Conclusion

Ce chapitre était consacré aux résultats de la simulation numérique donnés par le code de calcul ANSYS-Fluent.

L'étude de simulation a été établie pour le cas d'un écoulement turbulent de l'eau dans un canal de section rectangulaire en présence d'une pile circulaire, nous avons interprétées résultats obtenus et les structures d'écoulement observées le long du canal et au niveau du pont.

Conclusion générale

Dans ce mémoire, on a présenté une simulation numérique tridimensionnelle d'un Écoulement à surface libre turbulent sans transfert ni diffusion ni interaction entre les deux phases qui sont l'eau et l'air. On a donc considéré un écoulement tridimensionnel d'un fluide newtonien homogène et incompressible. La configuration géométrique du modèle physique est un canal de section rectangulaire, comporte un pile circulaire s'appuyant sur le fond, qui est installé suivant la transversale.

L'outil d'investigation étant le logiciel **Fluent** modèle numérique tridimensionnel en volumes finis utilisant les équations de Navier-Stockes. La formulation mathématique de ce type d'écoulement est déduite de l'écriture des lois de conservation de la masse et de quantité de mouvement. Puisque nous nous intéressons à l'étude d'un écoulement à surface libre comme nous l'avons décrit précédemment (deux phases différentes (eau et air)). Le modèle VOF (Volume Of Fluid) qui est fondé sur le point de vue d'Euler peut modeler deux fluides ou plus non miscibles. En résolvant un ensemble d'équations simple de quantité de mouvement et en repérant la fraction volumique de chacun des fluides dans tout le domaine, ce modèle a été choisi aussi pour sa simplicité et son temps relativement. Notons ici que c'est le modèle le plus adapté dans de pareils cas.

En ce qui concerne le régime turbulent, la décomposition de Reynolds des équations rend le système d'équations ouvert et par conséquent pour effectuer sa fermeture on est amené à adopter un modèle de turbulence capable de traiter des géométries complexes en 3D à grands nombres de Reynolds. Pour cela on a opté pour le modèle de fermeture $(k - \xi)$ qui fait parti de cette catégorie de modèles, élaboré par Jones et Launder en 1974.

Entre autres résultats obtenus dans cette étude, certains peuvent être synthétisés comme suit :

 $\sqrt{}$ La présence de la pile crée des fortes perturbations dans l'écoulement, qui modifié Globalement la structure de l'écoulement.

 $\sqrt{}$ L'apparition d'une zone de recirculation à faibles vitesses (quelques Cm/s), située dans l'alignement de la pile .

 $\sqrt{}$ Plus le niveau de l'écoulement dans le canal augmente, plus les caractéristiques de l'énergie cinétique turbulente et le taux de dissipation augmente.

Bibliographie

- [3] [1]Azil.F, (2004), « Etude des paramètres climatiques, sous serres chauffées en présence de la plante », thèse de magister, université de Batna.
- [2] Abdou, A., (2011), "Étude Numérique d'une couche limite turbulente autour d'un profil bidimentionnel", Mémoire de magistère, Université Mentouri-Constantine.
- [3] Ancey, C., (2016). "Mécanique des fluides, une introduction à l'hydraulique pour les ingénieurs civils", École Polytechnique Fédérale de Lausanne Ecublens.
- [4] Boussinesq, J., (1877). "Théorie de l'écoulement tourbillonnant", Mem. Pres. Acad. Sci. XXIII.
- [5] Bernard , M , (1975), Aménagements hydrauliques, Université Laval .
- [6] Benmoussa F. (2013) "Étude numérique d'un écoulement à surface libre", Thesis,Département de mécanique, Université de Batna.
- [7] Benmebarak M. (2015) « Modélisation et simulation des écoulements à surface libre en présence de singularités du fond » Mémoire de Magistère en hydraulique. Université de Bejaia.
- [8] Bureau of Public Roads, (1960, "Hydraulics of Bridge Waterways", US Dept of Commerce, Washington.
- [9] Bougherra y, Mahlous s, (2017) " Modélisation et Simulation Numérique de l'écoulement dans un Oued franchi par un pont ", Mémoire de fin d'études, Université de Bejaia.

- [10] Carlier, M., (1972), "Hydraulique générale et appliqué", Edition Eyrolles Chow, V.T. Hill (1959), " Open channel hydraulics ", Mc Graw .
- [11] Chassaing P.,(2000), Turbulence en mécanique des fluides : Analyse du phénomène dans une perspective de modélisation à l'usage de l'ingénieur, Edition Cépadues, Coll. Polytech de l'I.N.P de Toulouse.
- [12] Cande, S., (2002) "mécanique des fluides", Degoutte, G., (2001), "Hydraulique et dynamique fluviale", Université de Paris sud.
- [13] Chrisohoides, A., Sotiropoulos, F., Terry, W., et Sturm., (2003). "Coherent Structures in Flat-Bed Abutment Flow : Computational Fluid Dynamics Simulation and Experiments", Journal of Hydraulic Engineering. Vol. 192. No. 3, Atlanta.
- [14] Diaf .A (2012) ,« contribution a l'étude des écoulements de surface par méthodes numériques » Mémoire de Magistère en hydraulique. Université de Tlemcen.
- [15] El-Alfy, K.S., (2009). "Backwater rise due to flow constriction by bridge piers", Mansoura University, El-Mansoura, Egypt.
- [16] Fluent Help, (2013), "ANSYS Fluent Theory Guide".
- [17] Graf, W- Hydraulique fluviale (tome I), Écoulement permanent uniforme et non Uniforme (1993).
- [18] G. Nicollet, (1982), "Hydraulique des Ouvrages de Franchissement des Vallées Fluviales", La Houille. Blanche, N°4.
- [19] Graf, W.H., (2000). "Hydraulique Fluviale, Ecoulement et phénomène de transport dans les canaux à géométrie simple", Laussanne, Presse Polytechniques et Universitaires Romandes.
- [20] Goutx Ladreyt, (2001). "Hydraulique des cours d'eau", Département voies navigables et eau groupe d'hydraulique fluviale, France.
- [21] Gislain .L. K, (2004), « Expérimentations et modélisations tridimensionnelles de l'hydrodynamique et de la séparation particulière dans les déversoirs d'orage », Thèse Doctorat, Université louis Pasteur-Strasbourg.
- [22] HAMANI S. (2014) « Modélisation des écoulements turbulents à surface libre », Mémoire de Magistère en hydraulique, Université de Bejaia.
- [23] Ismail zabat, " Etude numérique de l'efficacité dimensionnelle d'une cheminée solaire", mémoire de master en génie mécanique option énergétique, sous la direction de Mr.N.cherrad,ouargla, université de kasdi merbah ouargla.

- [24] Khlifa MAALEL Zouheir HAFSIA., (Mai 2012), "cours OUVRAGES HYDRAU-LIQUES", école nationale d'ingénieurs de tunis.
- [25] Kingston, S., (2006). "Backwater Effect Caused by Bridges", University of Catalonia.
- [26] L. Hamill, (1998), "Bridge Hydraulics", Routledge, New York.
- [27] Marchesse, Y., (2010). "Modélisation de la turbulence", édition année universitaire 2009-2010,Département : Mécaniques et Energétiques, Ecole Catholique d'Arts et Métiers, Lyon.
- [28] M.SZYDIOWSKI, (2011)," Numerical Simulation Of Open Channel Flow Between Bridge Piers", Faculty of Civil and Environmental Engineering, Gdansk University of Technology.
- [29] Sagaut, P., (2013). "Turbulence : Une introduction, Institut Jean Le rond d'Alembt", Institut Jean Le Rond d'Alembert, Université pierre et Marie curie, paris 6.
- [30] Shrestha, C., N., (2015). "Bridge pier flow interaction and its Effect on the process of Scouring", a thesis submitted in fulfillment of the requirement for the degree of doctor, University of Technology Sydney.
- [31] T. Esmaeili, A.T., Dehghani A., Zahiri A.R., et Suzuki K., (2009). "3D Numérical Simulation of scouring Around Bridge Piers (case study : Bridge 524 crosses the Tanana River", Conference Paper, World Academy of Science, Engineering and Technology.
- [32] Tutorial GAMBIT.
- [33] Tutorial FLUENT.
- [34] Usman G., Shahid A., et Abdul G., (2013). "Modelling the Flow Structure in Local Scour Around Bridge Pier", University Research journal of Engineering et technology, Volume 33. No 2, April, 2014, Mehran.
- [35] Versteeg., H.K., Malalasekera., W., (2007). "An introduction to computational Fluid Dynamics, The finite volume method ", second edition, London.
- [36] Van Tuu N (1981). "Hydraulique routière ", BCEOM, République Française, Ministère de la Coopération et du développement, France.
- [37] Yovanni, A. Cataño-Lopera, Blake J. Landy and Marcelo H. García (2016). "Unstable flow structure around partially buried objects on a simulation river bed", University of Illinois at Urbana-Champaign, USA.